

Ser. 4
S 145

SZW

Ministerie van Sociale Zaken
en Werkgelegenheid

Koudebelasting en handvaardigheid

S 145

Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden



NIA0068772

Koudebelasting en handvaardigheid

**W.A. Lotens
F.J.G. van de Linde
G. Havenith
R. Heus
H.A.M. Daanen**

**Nederlands Instituut voor
Arbetsomstandigheden NIA
bibliotheek-documentatie-informatie
De Boelelaan 30, Amsterdam-Buitenveldert**

ISN-nr. 11695
plaats SER. 41 S. 145
datum 5 AUG. 1992

**Onderzoek uitgevoerd in opdracht van het
Directoraat-Generaal van de Arbeid door het
Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, afdeling
Thermofysiologie**

juli 1992

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Koudebelasting

Koudebelasting en handvaardigheid / W.A. Lotens ...[et al.] - Den Haag:
Arbeidsinspectie, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. - III. - ([Studie /
Arbeidsinspectie, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid],
ISSN 0921-9218; S 145)

Onderzoek uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid
door het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, afdeling Thermofysiologie. -

Met lit. opg.

ISBN 90-5307-270-5

Trefw.: thermofysiologie.

INHOUD

Blz.

BESCHRIJVING VAN DE INHOUD

I	CONTACT MET KOUDE MATERIALEN AANRAKEN VAN KOUDE MATERIALEN	5
II	VOORSPELLING VAN DE AFKOELING VAN HANDEN DOOR HET AANRAKEN VAN KOUDE MATERIALEN	43
III	HET FUNCTIONEREN VAN DE HANDEN IN DE KOU	60

BESCHRIJVING VAN DE INHOUD

Bij het hanteren van koude materialen of het verrichten van fysiek werk in een koude omgeving koelen de handen af. Dat zal in het algemeen tot een vermindering van de prestatie leiden. Heel gewone verrichtingen, zoals montagewerk, kunnen in de kou een groot probleem worden door verlies van tastzin en handvaardigheid. Ook kan een verhoogd risico optreden. Enerzijds gaat het daarbij om schade aan de handen en anderzijds om ongevallen. Kou is mogelijk een belangrijke cofactor bij het optreden van ongevallen op de werkplek. De directe oorzaak is niet bekend, maar het ligt voor de hand dat verlies van tastzin, coördinatie en kracht, het dragen van dikke kleding en gladheid een rol spelen. Er bestaat een goede relatie tussen het verlies van handvaardigheid en tastzin enerzijds en huidtemperatuur anderzijds. Het is dus zinvol om na te gaan waardoor koude handen eigenlijk optreden.

In tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt kunnen handen niet altijd warm gehouden worden door handschoenen te dragen. De warmte die de handen aan de omgeving afstaan moet door het bloed aan de hand toegevoerd worden uit de kern van het lichaam. Gebeurt dat niet in voldoende mate dan koelen de handen onontkoombaar af, langzaam met goede handschoenen en sneller zonder. De handschoenen bepalen in zulke omstandigheden dus niet de eindtemperatuur, dat doet de omgeving, maar het tempo waarmee die temperatuur bereikt wordt. Wordt er wel voldoende bloed aan de handen toegevoerd dan hebben handschoenen een sterk effect omdat de handen dan snel in temperatuur stijgen, totdat de lichaamstemperatuur is benaderd. Warmer kunnen ze niet worden. De doorbloeding is dus de sleutel tot handtemperatuur.

In 1989 werd door Lotens een model opgesteld van de doorbloeding van de voet. Thermoregulator zijn handen en voeten enigszins vergelijkbaar, zodat dat model ook aanknopingspunten geeft voor de hand. Waardoor wordt nu de doorbloeding bepaald? Ten eerste door de lichaamstemperatuur. Met een warm lichaam worden handen en voeten sterk doorbloed. Dat hangt samen met de warmteregulatie van het lichaam. De handen en voeten worden door het lichaam gebruikt om overtollige warmte af te geven. De doorbloeding neemt toe, waar te nemen aan de gezwollen venen op de rug van de hand, de handen gaan zweten en geven dientengevolge veel warmte af. In de kou worden de handen en voeten als het ware fysiologisch geamputeerd, ten gunste van het behoud van lichaamstemperatuur. De doorbloeding ligt nagenoeg stil en de handen koelen sterk af. Verder speelt de gemiddelde huidtemperatuur mee, waardoor op een verandering van de omgevingstemperatuur, die als eerste aan de huid te voelen is, snel kan worden ingespeeld door het lichaam, zonder dat de kern al warmte verloren heeft. Ten slotte doet ook de temperatuur van de handen zelf mee, omdat vrije zenuwuiteinden en tastorgaantjes de doorbloeding reflexmatig beïnvloeden. Zo treedt geen onnodig warmteverlies optreedt als de handen in koud water gestoken worden.

In het genoemde model werden deze drie temperaturen opgenomen als bepalers van de doorbloeding. Deze hebben als kader gediend voor een experiment naar de afkoeling van handen als ze in contact komen met koude materialen. Dat wil zeggen dat de gemiddelde huidtemperatuur constant werd gehouden door naar behoefte de kleding aan te passen en dat de lichaamstemperatuur op twee niveaus werd gehouden, een rustniveau (37.1 °C) en een arbeidsniveau (37.5 °C). De lokale temperatuur van de hand kon uiteraard niet vastgelegd worden omdat de afkoeling juist daar

gemeten werd. Bij drie verschillende omgevingstemperaturen (-10, 0 en 10 °C) werden de handen van proefpersonen blootgesteld aan 6 verschillende materialen (polystyreenschuim, mahoniehout, nylon, roestvrij staal, aluminium en een gethermosteerde buis). Deze materialen hebben een sterk verschillende warmtegeleiding en warmtecapaciteit zodat ze ook sterk verschillen in afkoelend effect. Twaalf proefpersonen hielden staven van deze materialen in hun handen, terwijl de handtemperaturen werden gemeten. Dat deden ze met blote handen, maar ook met werkhandschoenen aan. De snelheid van afkoeling werd bepaald en de tijdsconstante daarvan vastgelegd. Alle tijdsconstanten bleken met behulp van een regressievergelijking aan lichaamstemperatuur, handschoen, materiaal en omgevingstemperatuur toe te schrijven. Dat maakt het dus mogelijk om de afkoeling te voorspellen voor andere omstandigheden. Dit experimentele deel van het onderzoek wordt in deel I beschreven ('Contact met koude materialen'). De auteurs geven tolerantietijden aan voor afkoeling, maar ook de sensatie van kou en pijn wordt gekwantificeerd.

In deel II wordt een poging gedaan om een analytisch model op te stellen dat de afkoeling kan beschrijven ('Voorspelling van de afkoeling van handen door het aanraken van koude materialen'). Daarvoor is uitgegaan van het eerder genoemde model voor de voet, maar de geometrie van de voet is vervangen door die van de hand. Ook is er rekening gehouden met het feit dat als handen (en sommige andere lichaamsdelen) erg koud worden er een beschermingsmechanisme in werking treedt dat bevroering voorkomt. Dat heet Cold Induced VasoDilation (CIVD) en laat pulsgewijs warm bloed toe in de vingers. Naarmate het lichaam warmer is en de hand kouder zijn de pulsen heviger en frequenter. Het gevolg is dat een warm lichaam niet gauw bevroeringen van de vingers zal vertonen, maar een koud lichaam wel. Er is een schatting van de grootte van dit effect gemaakt en in de doorbloeding opgenomen. De hand wordt in het model eenvoudig voorgesteld als een plak weefsel met aan beide zijden huid. De bloedstroom loopt eerst door de palm en vervolgens door de rug van de hand, om dan naar de lichaamskern terug te keren. Dit model blijkt net zo goed als het regressiemodel uit deel I in staat om de meetgegevens te verklaren en biedt een houvast om te schatten wat er in andere omstandigheden zal gebeuren (bij voorbeeld bij hele lage temperaturen, met extra dikke handschoenen, met elektrisch verwarmde handschoenen, wanneer huidbevroering optreedt, etc).

De afkoelingsgegevens zijn op zich niet zo bruikbaar als er geen criteria zijn voor toelaatbare handtemperaturen. In deel III van het onderzoek is een literatuurstudie beschreven naar de effecten van kou op de hand ('Het functioneren van de handen in de kou'). Daarin wordt beschreven wat het effect van kou is op de fysiologische systemen die aan handvaardigheid meewerken: zenuwstelsel, gewrichten, spieren en sensoriek. Bij een huidtemperatuur van 12-16 °C neemt de tastzin en de zenuwgeleiding sterk af, maar deze grens verschilt van persoon tot persoon. In tegenstelling tot in de warmte treedt er in de kou betrekkelijk weinig fysiologische aanpassing op. Harding is belangrijk aspect en ook training. In weerwil van het volksgeloof is er weinig verschil tussen mannen en vrouwen in de afkoeling van handen. Wel is het zo dat ouderen minder vasoconstrictie vertonen en dus warmere handen hebben (ten koste van de lichaamstemperatuur). In hoeverre de handtemperatuur ook in de taakprestatie doorwerkt hangt van de taak af. Fijnmotorische taken lijden eerder onder kou dan grofmotorische. Bij het aangeven van risico's op de werkvloer dient naast de handtemperatuur dan ook rekening gehouden te worden met de taak en de leeftijd van het individu.

**F.J.G. van de Linde
G. Havenith
R. Heus**

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	7
SUMMARY	8
1 INLEIDING	9
2 MATERIAAL EN METHODEN	10
2.1 Experimenteel ontwerp	10
2.2 Hypothese	16
2.3 Analyse en statistische bewerking	18
3 RESULTATEN	19
3.1 Materialen	23
3.2 Handbescherming	24
3.3 Arbeid	25
3.4 Luchttemperatuur	25
3.5 Tijd	25
3.6 Proefpersonen	25
3.7 Handtemperaturen	27
3.8 Subjectieve sensatie	28
3.9 Afkoelingscurven	32
4 DISCUSSIE	35
5 CONCLUSIES	41
REFERENTIES	42

SAMENVATTING

In het kader van een opdracht voor het Directoraat Generaal voor de Arbeid, met als einddoel het opstellen van richtlijnen voor de blootstellingsduur bij het aanraken en vasthouden van koude oppervlakken met de handen, is een experiment uitgevoerd met 12 proefpersonen, waarbij de afkoelsnelheid van hun handen werd gemeten bij het vastpakken van staven uit 6 verschillende materialen. De materialen waren: polyurethaan, hout, nylon, roestvast staal, aluminium, en een gethermosteerde buis. Verdere parameters in het experiment waren: arbeid (voorafgaand aan het vastpakken hadden de proefpersonen gerust of arbeid verricht), omgevingstemperatuur (-10, 0, 10°C), en handbescherming (wel of geen handschoen). De gemeten afkoelcurves werden geanalyseerd als zijnde exponentiele curves. Dit leverde waarden op voor de daarbij horende tijdsconstanten (Tau). Deze tijdsconstanten bleken significant af te hangen van de contactcoëfficiënt van de materialen, van de aanwezigheid van handbescherming, van de voorafgaande arbeid, van de omgevingstemperatuur en tenslotte bleek er een interactie op te treden wat betreft het effect van de contactcoëfficiënt en de handbescherming. Verder bleek op basis van deze parameters een tijdsconstante te berekenen die een goede voorspelling van de gemiddelde contacttemperatuur van de hand mogelijk maakte. Ook de subjectieve comfort- en pijnsensatie van de proefpersonen voor hun handen bleek goed te voorspellen. De relevante parameters waren: de contacttemperatuur, de omgevingstemperatuur en de handbescherming. De pijnscore "een beetje pijn" levert voor de handbuitenzijde een limietwaarde op van 16°C en voor de handbinnenzijde van 19°C. De comfortscore "koud" hoort bij een contacttemperatuur van 10 en 16°C voor buiten- en binnenzijde.

Een probleem bij de voorspelling van afkoelcurves en comfort/pijn is de grote variatie tussen individuen. Teneinde de veiligheidsmarges te vergroten dient te worden overwogen, in plaats van voorspellingsformules gebaseerd op de mediaan waarden van de data, gebruik te maken van het vijfenzeventigste percentiel van de populatie.

SUMMARY

As a part of a project, for the Directorate General for Labour, an experiment was performed for the purpose of creating guidelines for exposure limits of skin in contact with cold surfaces. Using 12 test subjects, the cooling speed of their hands was measured, while holding bars made out of 6 different materials. The materials were: polyurethane foam, wood, nylon, stainless steel, aluminum and a liquid perfused, temperature controlled aluminum tube. Other parameters in the experiment were: work (before the materials were touched, the subjects performed work or rested), ambient temperature (-10, 0, 10°C), hand protection (nude or glove). The measured cooling curves were analyzed as (first order) e-power curves. This produced values of the associated time constants (τ). The τ values appeared to be significantly related to the materials contact coefficient, the presence of hand protection, the preceding work, the ambient temperature, and finally the interaction between contact coefficient and hand protection. Further it was shown that these parameters allowed a good prediction of the τ values, and of the related cooling curves. Also the comfort and pain sensation of the subjects was shown to be predictable with a model involving the parameters contact temperature, ambient temperature and hand protection. The pain level "a little pain" was associated with a temperature of the back of the hand of 16°C and of 19°C for the inner side. The comfort rating "cold" was associated with contact temperatures of 10 and 16°C for the outer and inner side of the hand respectively.

A problem in the prediction of cooling curves and/or comfort sensation is the large inter-individual difference between subjects. In order to increase the safety margin, predictions based on the third quartile of the data should be considered, as opposed to predictions based on the median of the data.

1 INLEIDING

Mede als gevolg van het in werking treden van de ARBO-wet worden in toenemende mate vragen gesteld over de veiligheids- en gezondheidsrisico's die arbeid met zich mee kan brengen. Het is dan gewenst dat men zich bij het beantwoorden van die vragen kan baseren op goed gefundeerde richtlijnen. Lang niet altijd zijn zulke richtlijnen voorhanden. Zo heeft het Directoraat Generaal voor de Arbeid van het Ministerie van Sociale Zaken (DGA) onderkend dat er nog weinig richtlijnen bestaan op het gebied van koudarbeid. Op dit moment is er op nationaal niveau niet veel meer dan de zogenaamde L-index van het Veiligheidsbesluit Fabrieken en Werkplaatsen (1938) en het P-blad no 142 van de Arbeidsinspectie (1977). De L-index geeft aan dat onder een bepaalde temperatuur maatregelen moeten worden genomen, maar geeft niet aan welke. Het P-blad geeft goede algemene adviezen, maar spreekt zich niet uit over blootstellingstijden in relatie tot de temperatuur. Recent is er een DGA-publikatie tot stand gekomen "Richtlijnen voor de ergonomie van werkplekken". Het Hoofdstuk "Richtlijn ergonomie klimaat" hierin geeft fysiologische grenzen, met name over de ondergrens van huidtemperatuur die voorlopig kan worden aangehouden bij het evalueren van een werkplek. Vooral op het Noord-Amerikaanse continent wordt de Wind Chill Index (WCI) van Siple en Passel (1945) toegepast. Hiermee kan het risico van snelle bevriezing van de onbedekte huid in lucht worden voorspeld. Ook zijn er indices voor de hoeveelheid benodigde kleding, bijvoorbeeld van Steadman (1971) en Holmér (1989). Deze laatste publikatie is in bewerking voor een ISO-norm.

Behalve de WCI, die maar een beperkte toepasbaarheid heeft, zijn er geen richtlijnen voor blootstellingsduur of werk/rust schema's. Er moet op dit moment dus gekozen worden voor het voorschrijven van kleding (isolatie) en/of het meten van huidtemperatuur. Een probleem is dat een goede kledingisolatie weinig garantie biedt voor het waarborgen van de gewenste huidtemperatuur van de extremiteiten. Bij blootstelling aan koude reageert het lichaam namelijk met een sterke vermindering van de doorbloeding van de extremiteiten. Dit is een positief teruggekoppeld regelmechanisme. Vooral de handen en voeten, waarin zich relatief weinig spierweefsel bevindt en waarin dientengevolge de plaatselijk opgewekte warmte laag is, zijn voor de warmtehuishouding aangewezen op de warmtetoevoer via het bloed. Een eenmaal ingezette afkoeling van de extremiteiten gaat daarom in principe door totdat vrijwel de omgevingstemperatuur is bereikt. De gemeten temperatuur van de extremiteiten is bij voortdurende afkoeling slechts een momentopname. Omdat bovendien de handen en voeten sterk kunnen afkoelen door een relatief groot huidoppervlak ten opzichte van de inhoud en de handen vaak niet goed beschermd kunnen worden in verband met de taakuitvoering vormen de handen een apart probleem, waarvoor extra richtlijnen nodig zijn. Te denken valt hierbij aan blootstellingsnormen voor koude, natte omstandigheden, zoals bijvoorbeeld in de visverwerkende industrie.

Een specifiek probleem doet zich voor indien met de handen koude materialen worden aangeraakt. Wat gebeurt er indien - in plaats van lucht of water - gereedschapsstaal wordt vastgepakt, of bouwmaterialen zoals steen of hout? Algemeener gesteld: wat is het verband tussen handtemperatuur en de fysische eigenschappen van het vastgepakte materiaal? Hierover zijn in de literatuur weinig gegevens te vinden. De vraag wordt nog ingewikkelder als we bedenken dat de handtemperatuur niet alleen beïnvloed wordt door het vastgepakte materiaal, maar eveneens door de thermische toestand van het lichaam. Zolang het lichaam namelijk een warmteoverschot heeft, bijvoorbeeld als gevolg van de warmteproductie die arbeid met zich meebrengt, zal niet snel perifere vasoconstrictie optreden. Als bovendien nog rekening gehouden wordt met de isolerende werking van handschoenen, wordt het duidelijk dat het hier om een complexe vraag gaat.

Het DGA heeft het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO (IZF) opdracht gegeven richtlijnen op te stellen voor de blootstellingsduur bij het aanraken of vasthouden van koude materialen. Het werk is hierbij in een drietal fasen opgedeeld. De eerste fase is het verrichten van een literatuuronderzoek. De tweede fase bestaat uit experimenteel onderzoek. De derde fase is een modelonderzoek, waarbij de gegevens uit de tweede fase gebruikt worden om een analytisch model van de warmtehuishouding van de hand te verifiëren. Dit rapport doet verslag van de tweede fase.

2 MATERIAAL EN METHODEN

2.1 Experimenteel ontwerp

Een proefpersoonexperiment werd ontworpen met als belangrijkste onafhankelijke variabelen de omgevingstemperatuur, het contactmateriaal, arbeidsniveau voorafgaand aan de proef, handschoenen, en geslacht (Tabel I).

Tabel I Onafhankelijke variabelen en hun niveaus.

variabele	niveaus
1. temperatuur	10°C, 0°C, -10°C
2. contactmateriaal	polyurethaan, hout, aquilon, rvs, aluminium, thermosbuis
3. arbeid	rust, arbeid
4. handschoenen	met of zonder werkhandschoenen
5. proefpersonen	6 mannen, 6 vrouwen
6. tijd	30 minuten blootstelling

Twaalf proefpersonen werden per drietal tegelijk blootgesteld aan één van de drie temperaturen in een klimaatkamer bij een lichtsnelheid van minder dan 0.2 m/s. Per dag waren er zes sessies, drie 's ochtends en drie 's middags. Tijdens elke sessie hielden de proefpersonen gedurende een half uur links en rechts verschillend contactmateriaal vast. Dit materiaal had de vorm van een staf met een lengte van 30 cm en een diameter van 4 cm. Tijdens het vasthouden werden al of niet handschoenen gedragen. Het type handschoenen was het zogenaamde "amerikaantje", vrij dunne katoenen werkhandschoenen met een lederen binnenzijde. Mede door de lage kostprijs zijn deze handschoenen veelvuldig op de werkplek te vinden. Onmiddellijk voorafgaand aan het vasthouden werd al of niet arbeid verricht door herhaald op- en afstappen van lage trapjes. Tijdens de experimenten droegen de proefpersonen door het laboratorium verstrekte kleding en isolerend schoeisel, met dien verstande dat de hoeveelheid isolatie naar vrije keuze kon worden samengesteld door de proefpersonen, opdat zij - gegeven de omstandigheden - zo comfortabel mogelijk zouden zijn. Een sessie duurde nooit langer dan 50 minuten. Tussen de sessies konden de proefpersonen kort de klimaatkamer verlaten. In die pauze werd steeds wat warmes gedronken en soms wat gegeten. Indien van toepassing werden de door zweet nat geworden handschoenen voor droge omgewisseld. De handen zelf werden weer opgewarmd door ze tegen de drinkbekers of het lichaam te houden.

De contactmaterialen waren zo gekozen dat een behoorlijke spreiding in de fysische eigenschappen werd verkregen. De uitersten werden hierbij gevormd door polyuret- haanschuim ("Roofmate") dat uitgedrukt per volumeenheid een verwaarloosbare warmtecapaciteit en geleiding heeft, en een met behulp van glycoldoorstroming gethermosteerde dunwandige aluminium buis als "heatsink" met een hoge geleiding en oneindig grote warmtecapaciteit. De fysische eigenschappen van de materialen (dichtheid, specifieke warmte en geleiding) worden vaak samengevat in twee grootheden: de "thermal diffusivity" en de contact coëfficiënt. De laatste, de contact coëfficiënt of thermische penetratie coëfficiënt (Yoshida, Matsui and Taya, 1989) is in relatie tot de hier behandelde problematiek de meest relevante grootheid. De contact coëfficiënt (b) wordt berekend volgens de formule:

$$b = \sqrt{C \cdot \rho \cdot \lambda} \quad (\text{J/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s} \cdot \text{°C}}) \quad (1)$$

met: C = specifieke warmte (J/g°C)
 ρ = dichtheid (g/m³)
 λ = geleidingscoëfficiënt (W/m°C)

De contact coëfficiënt van de door ons gebruikte materialen is weergegeven in Tabel II.

Tabel II Contact coëfficiënt van de gebruikte materialen berekend op grond van gegevens uit Carslaw and Jaeger (1959).

materiaal	Contact coëfficiënt ($J/m^2 \cdot \sqrt{s} \cdot ^\circ C$)
polyurethaan-schuim	100
hout (mahonie)	256
aquilon (nylon-6)	1545
roestvast staal	13335
aluminium	21739
thermosbuis	40000

De staven waren opgehangen ter hoogte van de armleuningen van leunstoelen. Tijdens het beetpakken van de staven zaten de proefpersonen in deze stoelen. Hun ellebogen rustten hierbij op de armleuningen, de rest van de arm niet. De proefpersonen werden geïnstrueerd zo hard in de staven te knijpen als nodig was om het gewicht van hun onderarm te compenseren. Zij moesten hiertoe de biceps ontspannen. Zo werd voorkomen dat zware staven een grotere knijpkracht zouden vergen met alle gevolgen van dien voor de doorbloeding van de handen.

Zowel tijdens voorafgaande rust of arbeid als tijdens het vasthouden van het contactmateriaal werden verschillende lichaamstemperaturen gemeten:

1. kern (rectum: T_{rect})
2. buik (ter hoogte van de navel: T_{buik})
3. grote teen (T_{gt}) en linker en rechter onderarm (T_{ol} , T_{or})
4. twee contacttemperaturen (muis v.d. duim en laatste vingerkootje (distale phalanx) van de middelvinger: T_{kcd} en T_{kcv})
5. vier handtemperaturen (tussen wijsvinger en middelvinger, tussen pink en ringvinger, buitenkant van het laatste vingerkootje (dorsale zijde distale phalanx) van de duim en midden op de rug van de hand: T_{wm} , T_{pr} , T_d en T_m)

De contacttemperaturen werden gemeten met koper-constantaan thermokoppels en een Fluke dataacquisitiesysteem (Fluke 2400B). Deze temperaturen werden elke 10 seconden bemonsterd. De overige temperaturen werden met thermistors bepaald (Yellow Springs Instruments 700 serie). Deze temperaturen werden elke seconde bemeten. Alle meetgegevens werden gemiddeld per minuut via een Digital PDP11 computer vastgelegd op magneetschijf voor verdere bewerking. De sensoren werden vooraf en achteraf gecalibreerd en de kalibratiewaarden verwerkt in de meetgegevens.

Van één van de drie proefpersonen in een sessie werd steeds met behulp van een rekstrookplethysmograaf (Medisonics Vasculab PPG 13) aan beide onderarmen de doorbloeding bepaald. Deze meetgegevens werden op een analoge papierrecorder weggeschreven voor latere handmatige analyse. In de helft van de exposities was het contactmateriaal voorzien van een dubbele wikkeling van geïsoleerd weerstandsdraad met daartussen een dunne laag krimpkoos. Deze voorziening werkte als een integrale warmtestroommeting en werd eveneens door de Fluke bemonsterd. Omdat deze warmtestroommeter een verstoring van het contactoppervlak tot gevolg heeft werd slechts in de helft van het aantal gevallen met warmtestroommeter gemeten, zodat later voor de invloed kon worden gecorrigeerd.

De koude- en pijnsensatie van de proefpersonen werd voor linker en rechterhand en contactzijde en buitenzijde van de hand afzonderlijk genoteerd op twee momenten: Direct na het beetpakken en juist voor het moment van loslaten. De pijnsensatie werd alleen juist voor loslaten genoteerd. Hierbij werd gebruik gemaakt van twee scoringslijsten volgens Tabel III.

Tabel III Scoringslijsten die werden gebruikt voor het noteren van de subjectieve koude- en pijnsensatie.

warmteoordeel		pijnoordeel	
nummer	omschrijving	nummer	omschrijving
2	comfortabel warm	6	geen enkele pijn
1		7	
0	neutraal	8	een beetje pijn
-1		9	
-2	comfortabel koel	10	nogal wat pijn
-3		11	
-4	oncomfortabel koel	12	veel pijn
-5		13	
-6	koud	14	erg veel pijn
-7		15	
-8	zeer koud	16	ondraaglijke pijn
-9			
-10	zeer, zeer koud		

Het experimenteel ontwerp was zodanig dat de onafhankelijke variabelen 1 tot en met 5 (Tabel I) volledig werden gepermuteerd. Linker- en rechterhand werden hierbij als identiek beschouwd. Één conditie (materiaal * arbeid * temperatuur * handschoen) werd door iedere proefpersoon maar met één hard ondergaan. Onderlinge laterale beïnvloeding van de handen was in het experiment geminimaliseerd

doordat de extreem verschillende materialen (polyurethaan en hout versus aluminium en thermostaatbuis) nooit paarsgewijs aan de proefpersonen werden aangeboden. Hiermee werd vermeden dat één hand warm was en de andere koud. Op één dag werden er bovendien óf handschoenen gedragen óf niet. Alle condities werden volgens een verwisselingsschema aan de proefpersonen aangeboden zodat volgorde-effecten werden uitgemiddeld. Het verschil tussen ochtend- en middagsessies en het verschil tussen staven met- en zonder warmtestroommeter was niet volledig in het design opgenomen.

Proefpersonen

De proefpersonen werden volgens de gebruikelijke methoden van het IZF geworven onder de studentenpopulatie van de Rijksuniversiteit Utrecht. Zij werden van tevoren, zowel mondeling als schriftelijk, uitgebreid op de hoogte gebracht van het doel en de werkwijze van het experiment. De proefpersonen ondertekenden allen voorafgaand aan de deelname een verklaring waarmee vaststond dat zij vrijwillig deelnamen en volledig op de hoogte waren van het doel en de werkwijze van het experiment en de rechten en plichten van proefpersonen en onderzoekers, inclusief het recht om het experiment te allen tijde zonder opgaaf van redenen af te breken. Het experimentele protocol werd door de proefpersooncommissie van het IZF goedgekeurd. Voor het afbreken van de experimenten werd een temperatuurcriterium van 5°C vastgesteld. Indien één van de gemeten contacttemperaturen (of een andere huidtemperatuur) een waarde van 5°C zou bereiken zou het experiment onmiddellijk worden afgebroken.

De proefpersonen waren gezonde jonge mensen zonder klachten over perifeer vaatlijden of met een voorafgaande koudeschade. Van de proefpersonen werd het volume van de handen bepaald door de bepaling van het gewicht van de hoeveelheid verplaatst water bij onderdompeling tot de processus styloideus (dit is het knobbeltje juist boven de pols aan de armbuitenzijde). Het contactoppervlak werd bepaald door een staf van 4 cm diameter in een donkere kamer te omwikkelen met fotografisch papier en deze te laten beethouden door de proefpersonen. Daarbij werd de instructie gegeven dezelfde kracht uit te oefenen als tijdens het experiment (Deze meting vond na het experiment plaats). Door rondom belichting werd vervolgens de projectie verkregen. Het oppervlak werd d.m.v. millimeterpapier bepaald. Fig. 1 laat de drie meest extreme handen zien.

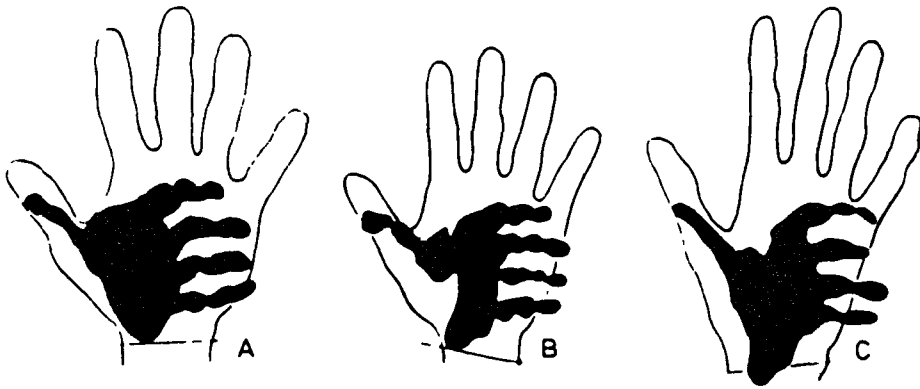


Fig. 1 De drie meest extreme voorbeelden van handen van de proefpersonen. A: grootste (mannen)hand met een volume van 405 cm^3 ; B: kleinste (vrouwen)hand met een volume van 260 cm^3 ; C: (vrouwen)hand (340 cm^3) met de slankste vingers. Het zwarte oppervlak geeft het contactoppervlak aan.

De anatomische kenmerken van hun handen worden in Tabel IV weergegeven:

Tabel IV Anatomische kenmerken van de handen van de proefpersonen. De waarden zijn gemiddeld over beide handen.

nr	man/vrouw	contactoppervlak (cm^2)	handvolume (cm^3)
1	m	47.3	360
2	m	54.3	343
3	v	40.1	260
4	v	46.4	285
5	v	53.2	372
6	m	41.2	356
7	v	30.6	312
8	v	30.1	297
9	m	43.8	350
10	v	51.4	340
11	m	55.8	405
12	m	57.2	375
gemiddelde:		45.9	338

2.2 Hypothese

De hypothese voor dit experiment zal aan de hand van Fig. 2 worden toegelicht.

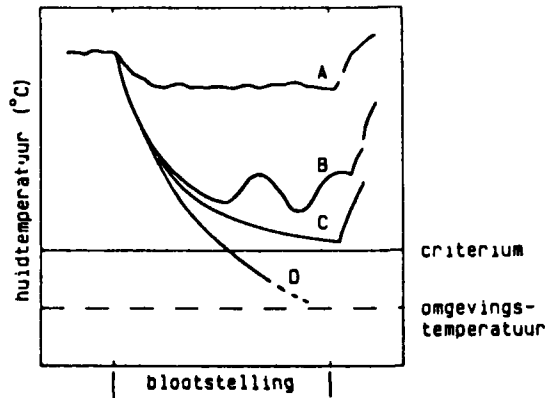


Fig. 2 Typische afkoelingscurven van de hand bij blootstelling aan de kou.

A: Evenwichtstemperatuur door continue aanvoer van warm bloed

B: Cold Induced Vasodilation

C: Continue afkoeling zonder dat het criterium wordt bereikt

D: Sterke afkoeling en overschrijding van het criterium.

Indien een persoon door een combinatie van arbeid, kleding en omgevingstemperatuur warmer is dan neutraal dan zal niet al te extreme perifere koudeblootstelling niet direct volledige vasoconstrictie tot gevolg hebben. Pas als via het contactmateriaal zoveel warmte is afgegeven dat de overtollige lichaamswarmte is weggevoerd wordt de doorbloeding tot een minimum van ongeveer 0.5% gereduceerd (Clark en Edholm, 1985). Tot die tijd kan bij continue aanvoer van warmte een evenwicht in stand worden gehouden, resulterend in een constante handtemperatuur. Dit is curve A in Fig. 2. Bij een combinatie van sterke perifere afkoeling en een warme proefpersoon treedt weliswaar forse temperatuurdaling op, maar zal de eindtemperatuur fluctueren en gemiddeld enkele graden hoger liggen dan de omgevingstemperatuur als gevolg van het fenomeen van Cold Induced Vasodilation, waarbij ondanks de kou de bloedvaten in de hand zich tijdelijk weer openen en daardoor de hand verwarmen (curve B). Koude proefpersonen koelen perifeer altijd af. Is de perifere koudeblootstelling niet al te extreem (bijvoorbeeld bij polyurethaanschuim) dan zal de criteriumtemperatuur niet binnen het tijdsbestek van 30 minuten vasthouden worden bereikt (curve C). Indien dit wel het geval is (aluminium) dan wordt de blootstellingsduur conform beperkt (curve D). De laatste twee curves verschillen in wezen onderling weinig en beschrijven de afkoeling van een "dood" lichaam. De afkoelingscurve van een willekeurig fysisch object is te beschrijven met een e-macht (eerste orde systeem) volgens de formule:

$$T(t) = T_{\text{eind}} + \Delta T \cdot e^{(-t/\text{Tau})} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

met: $T(t)$ = temperatuur van het object op tijdstip t
 T_{eind} = eindtemperatuur van het object
 ΔT = beginwaarde-eindwaarde
 t = tijd
 Tau = tijdconstante van de afkoeling

Voor een werkelijk dood object zal de eindtemperatuur gelijk zijn aan de omgevings-temperatuur. Bij de hand daarentegen blijft altijd enige bloedflow, en dus warmteinstroom, aanwezig. De eindtemperatuur zal dus boven de omgevingstemperatuur liggen. Deze eindtemperatuur is geschat door deze te berekenen voor een hand in lucht. Lucht ligt wat betreft zijn effectieve geleiding ongeveer halverwege de schaal schuimthermos. De warmte input in de hand is gegeven door de bloedflow (.5 ml/100ml min), het handvolume (340 ml), het temperatuurverschil van het in- en uitstromende bloed, en de effectiviteit van de counter-current heat exchange in de hand (.6, Raman en Vanhuysse, 1975). In formule:

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} &= \text{flowin} \cdot \text{handvolume} \cdot \text{Ramanfactor} \cdot \text{soortelijke warmte} \cdot \Delta T \\ &= \frac{.5}{60 \cdot 100} \cdot 340 \cdot .6 \cdot 4.2 \cdot (37 - T_{\text{hand}}) \\ &= 2.6 - .07 T_{\text{hand}} \end{aligned} \quad (\text{W}) \quad (3)$$

Het warmteverlies van hand naar omgeving wordt gegeven door de warmteoverdrachtscoëfficiënt van lucht, het handoppervlak (in dit geval is gerekend met een gemiddelde waarde van .05 m²), en de temperatuurgradient:

$$\begin{aligned} Q_{\text{uit}} &= h \cdot \text{Oppervlak} \cdot (T_{\text{hand}} - T_{\text{omg}}) \\ &= 9 \cdot .05 \cdot (T_{\text{hand}} - T_{\text{omg}}) \end{aligned} \quad (\text{W}) \quad (4)$$

Door Q_{in} en Q_{uit} aan elkaar gelijk te stellen is de relatie tussen de eindtemperatuur van de hand en de omgevingstemperatuur af te leiden:

$$T_{\text{eind}} = 5. + .86 \cdot T_{\text{omg}} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

De hypothese nu is dat bij volledige vasoconstrictie de meetgegevens van handtemperatuur goed zijn te beschrijven met de gegeven formule, waarbij de tijdconstante Tau afhankelijk is van anatomische eigenschappen van de hand en de fysische eigen-

schappen van het materiaal. Arbeid zal de afkoelingsnelheid van de hand doen verminderen, evenals isolatie (handschoen) en een lagere contactcoëfficiënt van het contactmateriaal. Hoe trager de afkoelingsnelheid hoe langer de Tau. In het geval van evenwicht van de warmtebalans of CIVD is de formule 2 geen goede beschrijving van de meetgegevens. De curve volgt dan uit de perifere warmtebalans. De evenwichtstemperatuur zal dan lager zijn bij een grotere warmtecapaciteit en sterkere geleiding van de contactmaterialen.

2.3 Analyse en statistische bewerking

De meetgegevens werden omgezet in ASCII-files en ingelezen in een "spreadsheet" van het statistisch software-pakket SYSTAT. Data werden gecorrigeerd aan de hand van voor en na het experiment uitgevoerde kalibraties van de sensors. Door grafische weergave van de individuele afkoelcurves zijn de data gecontroleerd op uitbijters en zijn de CIVD delen van de afkoelcurves verwijderd om een foutieve berekening van de tijdconstante te voorkomen. De gegevens werden vervolgens aan een variantieanalyse onderworpen, waarbij een significant effect werd geaccepteerd bij $p < 0.05$. Vervolgens werden de gegevens gemiddeld voor grafische weergave. Tenslotte werd de best passende curve van de in de hypothese omschreven vorm bepaald volgens de methode van de kleinste kwadraten voor alle individuele afkoelcurves.

Er werden geen best passende CIVD of warmtebalans modellen berekend. Met behulp van regressieanalyse werden de onafhankelijk variabelen vervolgens zo goed mogelijk verrekend in voorspellende formules van handtemperatuur bij verschillende combinaties van omgevingstemperatuur, arbeid, handbescherming en contactmateriaal.

De lichaamstemperaturen werden als volgt gemiddeld: T_{bu} is de gemiddelde temperatuur van de buitenkant van de hand, en is het ongewogen gemiddelde van T_{rw} , T_{pm} , T_{rh} en T_d . T_{co} is het gemiddelde van de twee contacttemperaturen van de hand, T_{kcd} en T_{kcv} . T_{hand} , de gemiddelde handtemperatuur, is het ongewogen gemiddelde van T_{bu} en T_{co} . De gemiddelde huidtemperatuur T_{huld} is het gewogen gemiddelde van T_{bulk} , T_{gb} , T_{ol} en T_{or} . Tenslotte werd de warmteopslag in het lichaam berekend volgens:

$$\text{Storage} = 3.5 \cdot [0.7 \cdot (37 - T_{rect}) + 0.3 \cdot (33 - T_{huld})] \quad (\text{J/g}) \quad (6)$$

met: Storage = warmteopslag in het lichaam (J/g)

3.5 = warmtecapaciteit van het lichaam (J/g°C)

3 RESULTATEN

De experimentele opzet om met behulp van voorafgaande rust versus voorafgaande arbeid een verschil in thermische toestand te induceren is goed geslaagd. Het trapjes lopen heeft gemiddeld Storage met 1.5 J/g verhoogd. Dit moge blijken uit Fig. 3, waarin Storage is uitgezet tegen de tijd voor 12 combinaties van omgevingstemperatuur, handbescherming en arbeid. Alleen bij de situatie 10°C, bloot is de Storage in het begin (dus na het einde van de arbeid resp. rust) gelijk. Hiervoor is geen directe verklaring te geven. Dat de Storage vervolgens toch voor arbeid hoger wordt dan voor rust zou op een zeker na-ijl effect duiden. De in Fig. 3 weergegeven Storage is hierbij gemiddeld over de proefpersonen.

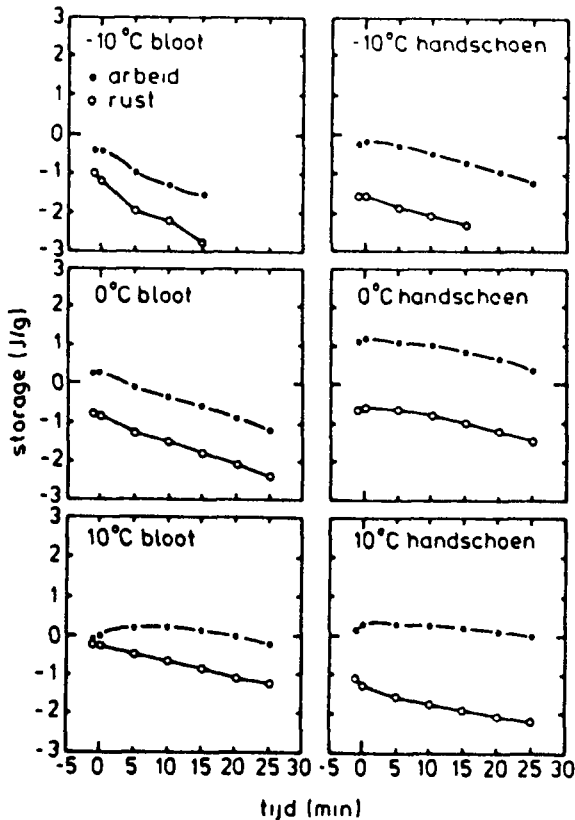


Fig. 3 Het gemiddelde verband tussen Storage en tijd voor 12 combinaties van omgevingstemperatuur, handbescherming en arbeid.

Zowel met de warmtestroommeters als met de niet-invasieve doorbloedingsmeting werden slechte resultaten behaald door technische problemen. Hierdoor moeten veel metingen worden verworpen. De overblijvende waarnemingen waren helaas zeer

tegenstrijdig en leveren geen eenduidig beeld op. Daarom wordt van rapportage van deze resultaten afgezien.

De gethermosteerde buis bleek bij -10°C , rust en blote handen een erg zware koudebelasting te vormen. Drie proefpersonen liepen hierbij een eerstegraads bevrozing op ondanks het hanteren van het veiligheids criterium. Bij één proefpersoon (nr 10) had de bevrozing het grootste oppervlak, vrijwel de gehele handpalm, terwijl bij haar de blootstelling reeds werd beëindigd na 5 minuten. Op dat moment gaven de contacttemperaturen een laagste waarde aan van 8°C . Het criterium was in haar geval namelijk verhoogd omdat deze proefpersoon opvallend slanke handen had (C in Fig. 2). In alle drie gevallen van bevrozing was snelle verwarming met warm water voldoende om na een periode van enkele dagen van napijn en vervelling weer zonder restverschijnselen aan het experiment deel te nemen; er zijn geen proefpersonen uitgevallen. Een proefpersoon, nr 6, werd misselijk en draaierig van de koudepijn. Om deze reden heeft hij één sessie gemist. Door de eerder genoemde problemen met bevrozing werd na enkele sessies niet meer geëxperimenteerd met de combinatie rust, -10°C , blote handen, thermosbuis. Aan de andere koude combinaties, r.v.staal en aluminium en blote handen bij -10°C werden de proefpersonen wel blootgesteld. De blootstellingsduur was hierbij echter soms wel kort. En een enkele maal trad nog een bevrozing op bij aluminium. Dat betrof eenmaal de duim en tweemaal de ringvinger. Na bevrozing werden deze delen met de hand opgewarmd, waarna het contactmateriaal weer werd beetgepakt, echter zodanig dat geen contact met de aangedane plek meer werd gemaakt.

De isolerende werking van de dunne warmtestroommeters die om de staven waren gewikkeld hadden een significante invloed op de afkoeling van de handen. Tabel V geeft een indruk van de grootte van deze invloed.

Tabel V De invloed van de warmtestroommeters op de gemeten handtemperaturen na 5 en na 25 minuten blootstelling. Er is gemiddeld over de blootstellingsduur, proefpersonen, arbeid en contactmateriaal. ΔT_{bu} en ΔT_{co} geven de verschiltemperaturen tussen de situatie met en die zonder warmtestroommeter aan voor de buitenzijde resp. de contactzijde van de hand. De temperatuur met fluxmeter was steeds het hoogst.

Handbescherming	Temperatuur (°C)	ΔT_{bu} (°C)		ΔT_{co} (°C)	
		tijd (min)			
		5	25	5	25
bloot	-10	0.6	1.2	2.6	1.1
bloot	0	0.7	1.3	1.5	0.3
bloot	10	0.6	1.1	1.1	0.3
handschoen	-10	0.2	0.5	0.8	0.8
handschoen	0	0.5	0.7	0.9	0.1
handschoen	10	0.4	0.3	0.6	0.3

De invloed van de fluxmeter was afhankelijk van het contactmateriaal en de blootstellingsduur. Daarom werden de meetwaarden met warmtestroommeter per minuut en per contactmateriaal verminderd met een factor die verder afhankelijk was van de omgevingstemperatuur en de handbescherming. Deze correctie was gemiddeld in de orde van 1°C.

De eerste orde effecten van de onafhankelijke variabelen waren veelal significant. Tabel VI geeft de uitkomsten van de variantieanalyse.

Tabel VI Uitkomsten van de variantieanalyse van de temperaturen voor de hoofdeffecten van de onafhankelijke variabelen. De aangegeven getallen zijn p-waarden. ns betekent niet significant.

onafhankelijke variabele	Td	Twm	Tpr	Trh	Tkcd	Tkcv	Trect	Tgt	Tol	Tor
handschoen	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
temperatuur	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
arbeid	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	ns	ns
materiaal	.002	.001	.0	ns	.0	.0	ns	.009	.005	ns
proefpersonen	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
warmtestrooms.	ns	.003	.006	ns	.016	.011	ns	ns	ns	ns
tijd	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
sex	.0	.0	.0	.0	ns	ns	.0	.0	ns	ns

Voor de verdere verwerking van de resultaten werden de meetgegevens gereduceerd tot individuele waarnemingen op de tijdstippen $t=0, 1, 5, 10, 15, 20$ en 25 (min). Hierbij is $t=0$ het minuutgemiddelde van de minuut voorafgaand aan het beetpakken van het contactmateriaal. De overige tijdstippen geven de tijd aan na het moment van beetpakken. Het tijdstip $t=30$ werd verworpen omdat veel proefpersonen dan juist bleken te hebben losgelaten, waardoor geen continue afkoeling werd gemeten. Een voorbeeld van de zo verkregen afkoelcurves is gegeven in Fig. 4.

De gepresenteerde curves zijn steeds gemiddeld over tenminste 10 van de 12 proefpersonen. Vielen er meer proefpersonen uit, dan zijn de curves overeenkomstig verkort. Vanzelfsprekend speelt dit louter bij de zeer koude sessies. Door de middeling en het afbreken van de curve bij het uitvallen van meer dan 2 proefpersonen zijn echter niet de meest extreme temperaturen weergegeven. Aan de hand van de grafische bladen bespreken we nu de hoofdeffecten.

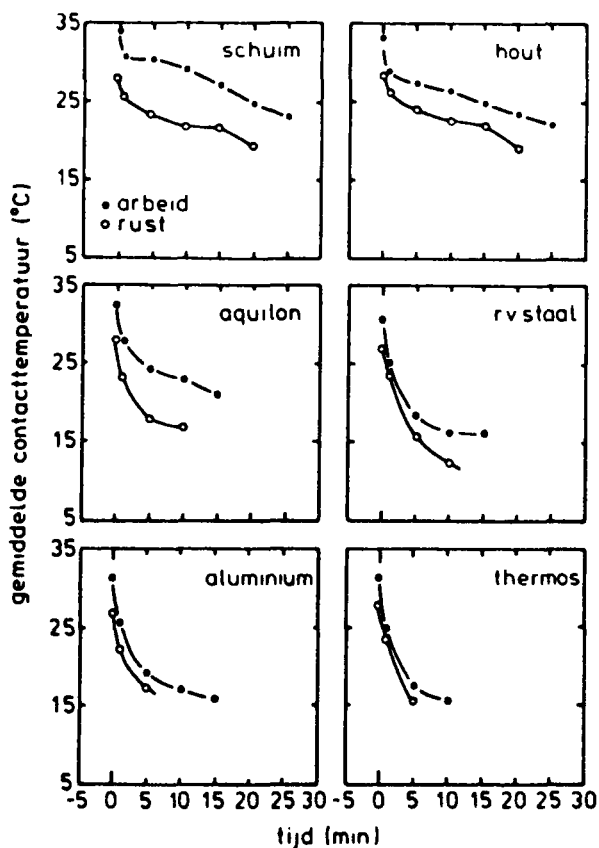


Fig. 4 Gemiddelde contacttemperatuur T_{∞} met blote handen bij -10°C . De bovenste curves zijn steeds met voorafgaande arbeid.

3.1 Materialen

Het effect van de materialen is, zoals eerder vermeld, statistisch significant. Uit een post-hoc test blijkt echter dat r.v.staal en aluminium onderling meestal niet verschillen met uitzondering van de koudste sessies. In de minder extreme situaties (handschoenen, 0 en 10°C) en zeker bij arbeid is er geen verschil tussen pu-schuim en hout onderling en hout en aquilon onderling. Indien een proefpersoon direct na het beetpakken een niet al te grote afkoelingsnelheid te zien gaf, dan werd in de blootstellingsperiode van een half uur ook het temperatuurcriterium niet bereikt. Zo waren er proefpersonen, met name nrs 5 en 11 (nr 11 is A in Fig. 2) die ook met blote handen de metalen staven bij -10°C konden beethouden, vermoedelijk doordat zij in het begin voldoende energie in het contactmateriaal deponeerden om de staaf-temperatuur te verhogen. Het grootste verschil tussen de materialen vinden we vanzelfsprekend aan het einde van de blootstelling. Tabel VII geeft hiervan een gemiddeld overzicht.

Voor de gemiddelde handtemperatuur is de eindwaarde met thermosbuis en zonder handschoenen ruwweg 7°C lager dan met pu-schuim. Met handschoenen is het effect van contactmateriaal kleiner, het verschil tussen de gemiddelde eindtemperaturen van thermosbuis en pu-schuim bedraagt dan 2 à 3°C. Onder warme omstandigheden, met arbeid en handschoenen, is er geen verschil meer. We concluderen daarom voorlopig dat het verschil tussen de contactmaterialen vooral tot uiting komt bij de koude combinaties, waarbij het verschil in de eindwaarde van de gemiddelde handtemperatuur kan oplopen tot 7°C.

Tabel VII Eindwaarden van gemiddelde handtemperatuur aan het einde van de blootstelling als functie van het contactmateriaal bij drie omgevingstemperaturen, twee arbeidsniveaus en blote versus gehandschoende handen. Superscript getallen geven de eindtijd aan; indien geen getal is weergegeven is het tijdstip $t = 25$ min.

conditie		contactmateriaal						
hand- bescher- ming	tem- pera- tuur	ar- beid	pu- schuim	hout	aquilon	r.v.- staal	alu- minium	thermos- buis
bloot	-10	rust	15.9 ²⁰	15.5 ²⁰	15.3 ¹⁰	11.7 ¹⁰	16.4 ⁵	16.0 ⁵
bloot	-10	arbeid	19.3	17.9	17.4 ¹⁵	15.0 ¹⁵	14.8 ¹⁵	15.2 ¹⁰
bloot	0	rust	21.0	19.4	18.3	14.6	15.1	14.0
bloot	0	arbeid	24.1	23.1	22.3	17.1	17.5	14.6
bloot	10	rust	24.9	24.3	21.5	19.6	19.9	18.1
bloot	10	arbeid	29.9	29.6	28.2	23.8	25.5	22.4
hands.	-10	rust	18.7 ²⁰	17.7 ²⁰	17.2 ²⁰	17.8 ¹⁵	19.1 ¹⁵	17.8 ¹⁵
hands.	-10	arbeid	24.7	24.4	20.9	21.0	21.2	20.4
hands.	0	rust	23.6	22.4	22.0	21.1	20.3	20.4
hands.	0	arbeid	27.5	26.6	26.9	24.5	25.9	23.5
hands.	10	rust	25.0	24.7	24.0	23.2	23.5	23.6
hands.	10	arbeid	32.0	32.4	31.1	30.6	29.3	31.3

3.2 Handbescherming

Tabel VII leent zich ook goed voor een eerste orde beschouwing van het effect van handbescherming. Te zien is dat dit significante effect, uitgedrukt in de gemiddelde handtemperatuur aan het einde van de blootstelling, groter is naarmate de koudebelasting groter is. Bij de gethermosteerde buis is het verschil in de orde van 7°C , en daarmee vergelijkbaar met het verschil tussen de twee extreme materialen. Het is opmerkelijk dat een dunne werkhandschoen kennelijk toch al een behoorlijk effect heeft. Niettemin konden de meeste proefpersonen de combinatie van handschoen, -10°C en rust niet volhouden, op basis van pijn of van het temperatuurcriterium van 5°C , ongeacht het contactmateriaal.

3.3 Arbeid

Het significante hoofdeffect arbeid geeft een gemiddelde verschuiving van 4°C in de gemiddelde eindtemperatuur van de hand.

3.4 Luchttemperatuur

Het effect van luchttemperatuur, en daarmee van de starttemperatuur van de staaf, is eveneens significant. Het effect is sterker dan dat van materiaal, handbescherming en arbeid, gegeven het bereik van deze variabelen in het experiment. Het verschil in eindwaarden na blootstelling van een half uur bedraagt ruwweg 10°C als we de omgevingstemperaturen van -10 en 10°C met elkaar vergelijken.

3.5 Tijd

Vanzelfsprekend is het tijdseffect significant. Bij de meeste combinaties van onafhankelijke variabelen koelen de handen af, en wel sneller naarmate de koudebelasting groter is. De handtemperatuur stijgt of blijft stabiel bij een aantal van de warmere combinaties, met name bij 10°C en arbeid met handschoenen. Bij wat koudere combinaties treedt een stabiele temperatuur op met pu-schuim en hout.

3.6 Proefpersonen

Fig. 5 geeft, gemiddeld over alle condities en de blootstellingsduur T_{hand} voor de proefpersonen. Het is duidelijk dat voor de gemiddelde handtemperatuur de verschillen vrij groot zijn, gemiddeld zo'n 5°C verschil tussen de koudste en de warmste proefpersoon (beide mannen).

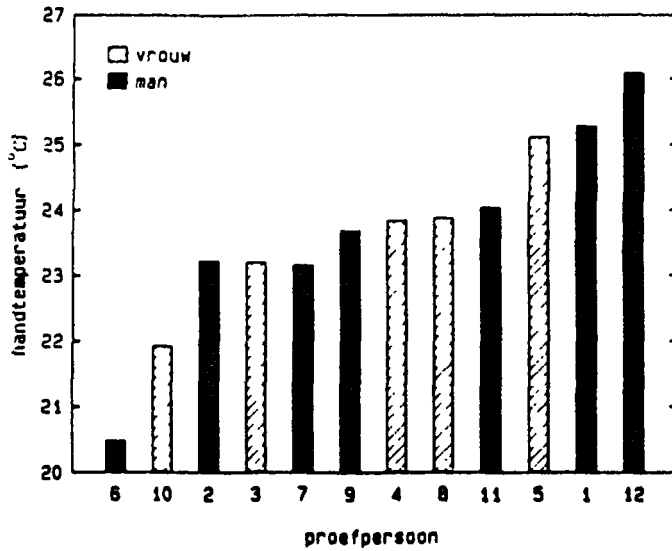


Fig. 5 T_{hand} gemiddeld over alle condities en de blootstellingsduur voor de 12 proefpersonen.

De vrouwen zitten daar tussen in. De man met de kleinste oppervlakte/inhoud verhouding van de handen is proefpersoon 11. De warmste handen vinden we bij proefpersoon 1 en 12, beide mannen. Daarvan had 12 normale handen en 1 slanke handen. Bovendien was 11 een roker. De vrouw met de warmste handen was proefpersoon nr 5, rookster. Reeds voor het experiment begon kondigde zij aan nooit koude handen te hebben. De koudste vrouw is pp 10, dat is C uit Fig. 2, dus met de slankste handen. Zij was degene met het grootste bevroeringsletsel. De koudste man, proefpersoon 6, was degene die van de koudepijn draaierig en misselijk was. Dit was in alle opzichten de meest tengere proefpersoon met een tamelijk bleke gelaatskleur. Aan deze beschouwing kan de indruk worden ontleend dat proefpersoonkenmerken wel correleren met het voorkomen van koude handen, maar niet met het voorkomen van warme handen.

Niettemin gaf de variantieanalyse aan dat er een significant verschil tussen mannen en vrouwen bestaat voor de onbewerkte meetgegevens. Hoe is dit met het bovenstaande te rijmen? Fig. 6 brengt hierin duidelijkheid.

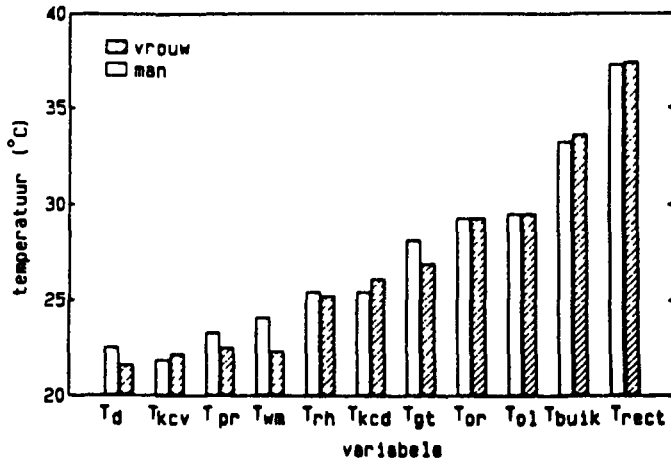


Fig. 6 Temperatuurgegevens, gemiddeld over alle condities en de blootstellingsduur voor beide sexen.

De post-hoc test wijst uit dat de perifere temperaturen van de vrouwen gemiddeld iets lager waren dan van de mannen, behalve de contacttemperaturen. Hun buik- en rectaal temperatuur was juist significant iets hoger. De verschillen zijn echter klein en in dit rapport maken we verder geen onderscheid tussen mannen en vrouwen.

3.7 Handtemperaturen

Fig. 6 laat zien dat van alle perifere temperaturen T_d gemiddeld het laagste was, op de voet gevolgd door T_{kcv} . Omdat de tweede contacttemperatuur, T_{kcd} , duidelijk hoger is dan de overige temperaturen van de buitenzijde van de hand, ontstaat het vermoeden dat de buitenzijde van de hand gemiddeld kouder is dan de contactzijde. Het is belangrijk om te weten voor welke condities dit geldt. Uit de analyse blijkt dat dit verschil sterk van het contactmateriaal afhangt. Bij sterk geleidende materialen is de binnen- en buitenzijde van de hand vrijwel gelijk van temperatuur. Bij isolerende materialen is de binnenzijde warmer. Zonder contactmateriaal (bij het begin van de sessie) is de binnenzijde ook warmer. In Fig. 7 zijn de temperaturen aan het einde van de sessies van binnen- en buitenzijde tegen elkaar uitgezet voor de twee extreemste materialen. Doordat T_{bu} en T_{co} toenemen met afnemende koudebelasting ontstaat een puntenwolk over een vrij breed temperatuursgebied.

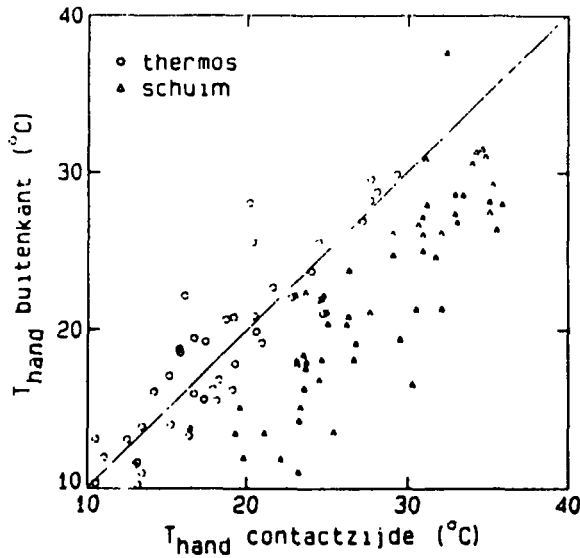


Fig. 7 Het verband tussen de temperatuur van de handbuitenkant (T_{bu}) en die van de handbinnenzijde (T_{co}), gemiddeld over de blootstellingsperiode per conditie voor de 2 meest uiteenliggende contactmaterialen (schuim en thermos).

3.8 Subjectieve sensatie

Het temperatuuroordeel direct na het vastpakken van de materialen correleerde sterk met alle onafhankelijke variabelen. De correlatie was nog sterker bij het eindoordeel van de handtemperaturen. De uitkomsten van de variantieanalyse voor de hoofdeffecten geven aan dat alle hoofdeffecten steeds significant zijn ($p < 0.000$). De eindoordeelen worden gemiddeld weergegeven in Fig. 8.

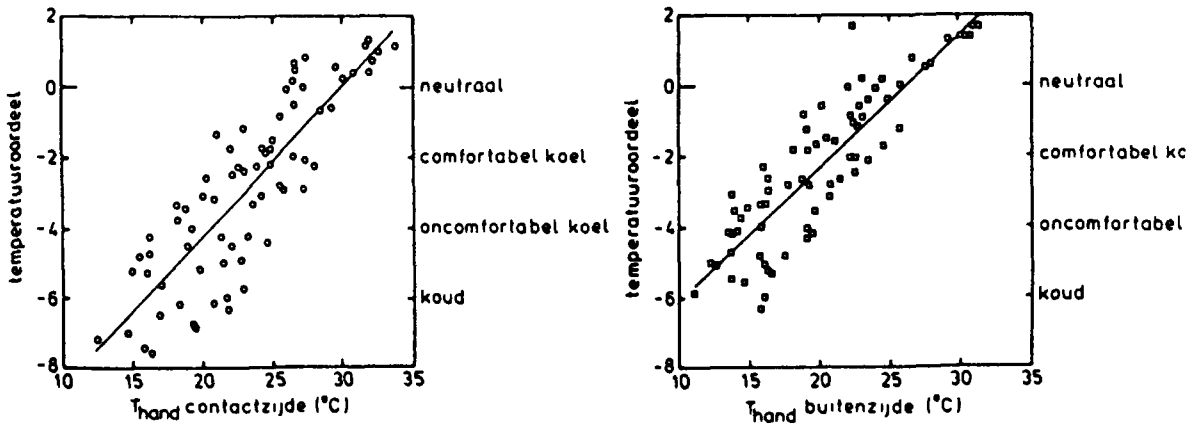


Fig. 8 Over de proefpersonen gemiddelde temperatuuroordelen juist voor het loslaten van het contactmateriaal, uitgezet tegen T_{co} en T_{bu} . De lijnen zijn lineaire regressies.

Tabel VIII Stapsgewijze regressieanalyse op de oordelen. * geeft aan of de betreffende variabele aan de verklaarde variantie bijdroeg. De variabele proefpersonen werd uit de analyse weggelaten. R^2 is het percentage verklaarde variantie. De beginoordelen zijn niet weergegeven.

variabele	oordeel		
	SENS _{co}	SENS _{bu}	pijn
constante	*	*	*
handbescherming			*
temperatuur	*	*	*
arbeid	*	*	*
contact coëfficiënt	*	*	*
T_{rect}			
Storage	*		
T_{huid}			
T_{co}	*		*
T_{bu}		*	*
handbescherming*temperatuur	*	*	*
R^2	.95	.93	.83

Stapsgewijze regressie-analyse geeft als uitkomst dat de variantie in de subjectieve oordelen goeddeels met de plaatselijke huidtemperatuur, de onafhankelijke variabelen en de interacties is te verklaren (Tabel VIII).

Naarmate meer variabelen gebruikt worden in de voorspelling van een parameter zal het percentage verklaarde variantie groter zijn. De gebruikswaarde neemt er echter door af. Daarom hebben we nagegaan met welk minimum aantal variabelen toch een behoorlijke voorspelling van de temperatuur- en pijnsensatie kon worden verkregen. De volgende formules zijn hiervan het resultaat:

Oordeel:

$$\text{Pijnsensatie} = 11.6 - .258 \cdot T_{co} - .047 \text{Temp} + .842 \text{handschoen} \quad (R^2 = .75) \quad (7)$$

$$\text{Temp. sensatie contactzijde} = -10.1 + .417 T_{co} + .082 \text{Temp} - 1.603 \text{handschoen} \quad (R^2 = .90) \quad (8)$$

$$\text{Temp. sensatie buitenkant} = -7.3 + .296 T_{bu} + .097 \text{Temp} - .631 \text{handschoen} \quad (R^2 = .89) \quad (9)$$

(geen handschoen = 1, wel handschoen = 2)

Met weinig variabelen is kennelijk voor pijn een redelijke- en voor de thermische sensatie zelfs een goede voorspelling te verkrijgen. De thermische sensatie is voor de contactzijde wel duidelijk afhankelijker van de handschoen dan de buitenkant. De aanwezigheid van de factor handschoen kan als een maat voor de warmtestroom gezien worden: Zonder handschoen koelt de hand sneller af en zal er een grotere temperatuurgradient tussen contactoppervlak en de dieper liggende pijnsensoren zijn dan wanneer de hand wel door een handschoen beschermd is. Zodoende kan bij gelijke contacttemperatuur de temperatuur op de plaats van de pijnreceptoren bij aanwezigheid van een handschoen lager zijn en in een sterkere pijnsensatie resulteren.

Pijn-eendoordeel en temperatuur-eendoordeel zijn vrij sterk met elkaar gecorreleerd, zoals blijkt uit Fig. 9. De correlatie van het pijnoordeel met de contacttemperatuur is groter dan met de temperatuur van de handbuitenkant, ondanks dat deze laatste vaak lager is (Fig. 10). Dit wordt tevens weerspiegeld door de gevoeligheid van de beide sensaties met de erbij horende handtemperatuur. Ook hier is de contactzijde gevoeliger.

sensaties met de erbij horende handtemperatuur. Ook hier is de contactzijde gevoeliger.

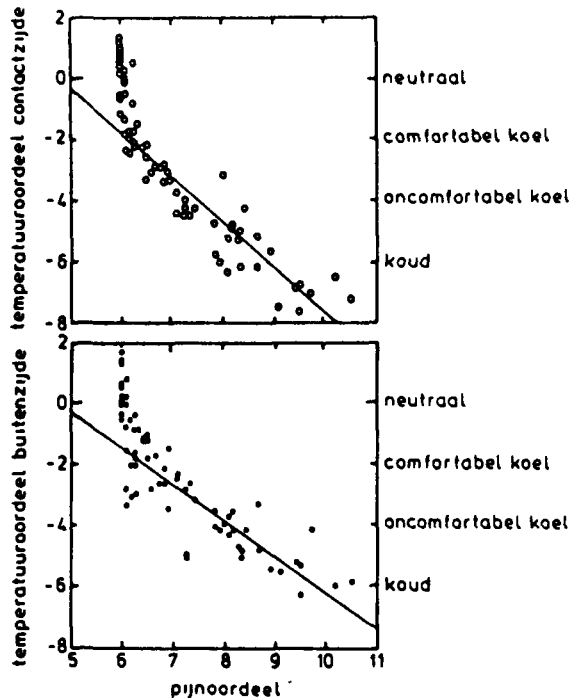


Fig. 9 Het verband tussen de eindoordelen van temperatuur en het pijnoordeel voor buitenkant en contactzijde. De curven zijn berekende regressielijnen die de relaties voor handbuitenzijde en contactzijde apart weergeven.

Het pijnoordeel is naar een zijde gelimiteerd op 6 (geen enkele pijn). Dit "plafond" wordt bereikt bij de wat hogere temperaturen. Derhalve zijn bij de regressieberekeningen hierboven alleen pijnwaarden groter dan 6.2 meegenomen om invloed van het genoemde "plafondeffect" te voorkomen.

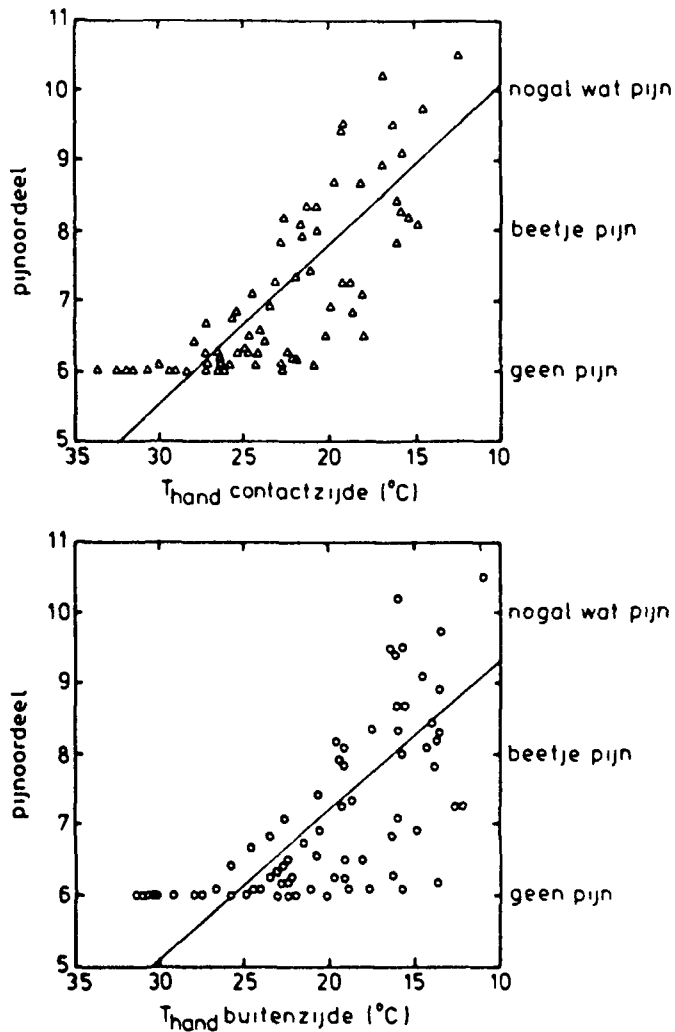


Fig. 10 Het verband tussen de eindwaarde van de pijnscore en de feitelijke handtemperatuur voor buitenkant en contactzijde. De curven zijn berekende regressielijnen die de relaties voor handbuitenzijde en contactzijde apart weergeven voor de oordelen hoger dan 6.2.

3.9 Afkoelingscurven

Volgens de in de methoden beschreven procedure werd voor alle individuele afkoelcurven de tijdconstante Tau in de exponent van e bepaald volgens de methode van de kleinste kwadraten. Daarbij werd steeds de individuele begintemperatuur ingevoerd. In een aantal gevallen werd de hand warmer in plaats van kouder (schuim, hoge omgevingstemperatuur, arbeid). In deze gevallen is het model eigenlijk foutief.

De analyse levert dan oneindig grote tijdconstanten, hetgeen voor de vraagstelling echter weer wel realistisch is. Immers, oneindig grote tijdconstanten betekenen afwezigheid van afkoeling, en dus afwezigheid van risico's voor de handen.

De individuele waarden werden samengevoegd tot één Tau voor elke specifieke experimentele conditie. Gekozen werd hierbij niet voor het middelen van de Tau waarden, aangezien er ook Tau waarden van oneindig (geen afkoeling) voorkwamen, maar voor het nemen van de mediaan. Aangezien een belangrijk aspect van de afkoeling het voorkomen van bevrozing is, is naast de mediaan ook de "lower hinge", ofwel het vijfenzeventigste percentiel bepaald. Bij de mediaan hebben 50% van de proefpersonen een kortere tijdconstante, bij de lower hinge is dat nog maar 25%. Op basis van deze waarden is een latere voorspelling dus aan de veiligere kant.

Fig. 11 a,b geeft de resultaten weer. Hierin is niet Tau, maar de inverse ervan ($k = 1/\text{Tau}$) uitgezet, tegen de natuurlijke logaritme van de contactcoëfficiënt b .

Deze figuren leiden tot de volgende beschouwingen. Variantieanalyse laat zien dat de hoofdeffecten materiaal, handschoen, temperatuur, arbeid en de interacties materiaal * handschoen, temperatuur * handschoen en arbeid * handschoen significante invloed hebben op de k -waarden. De interactie temperatuur * materiaal heeft dit alleen voor de situatie zonder handschoen.

Met handschoenen is de gevoeligheid van de k -waarde voor de omgevingstemperatuur lager dan zonder handschoenen.

In de hypothese is beschreven dat de k -waarde zou moeten afhangen van de handbescherming, het contactmateriaal en anatomische kenmerken van de hand. Deze laatste factor verdwijnt zodra de proefpersonen worden samengenomen, zoals in Fig. 11 het geval is. Uit Fig. 11 blijkt duidelijk een afhankelijkheid van k van de arbeid en de omgevingstemperatuur, die niet in de hypothese voorzien was. We komen daar in de discussie op terug.

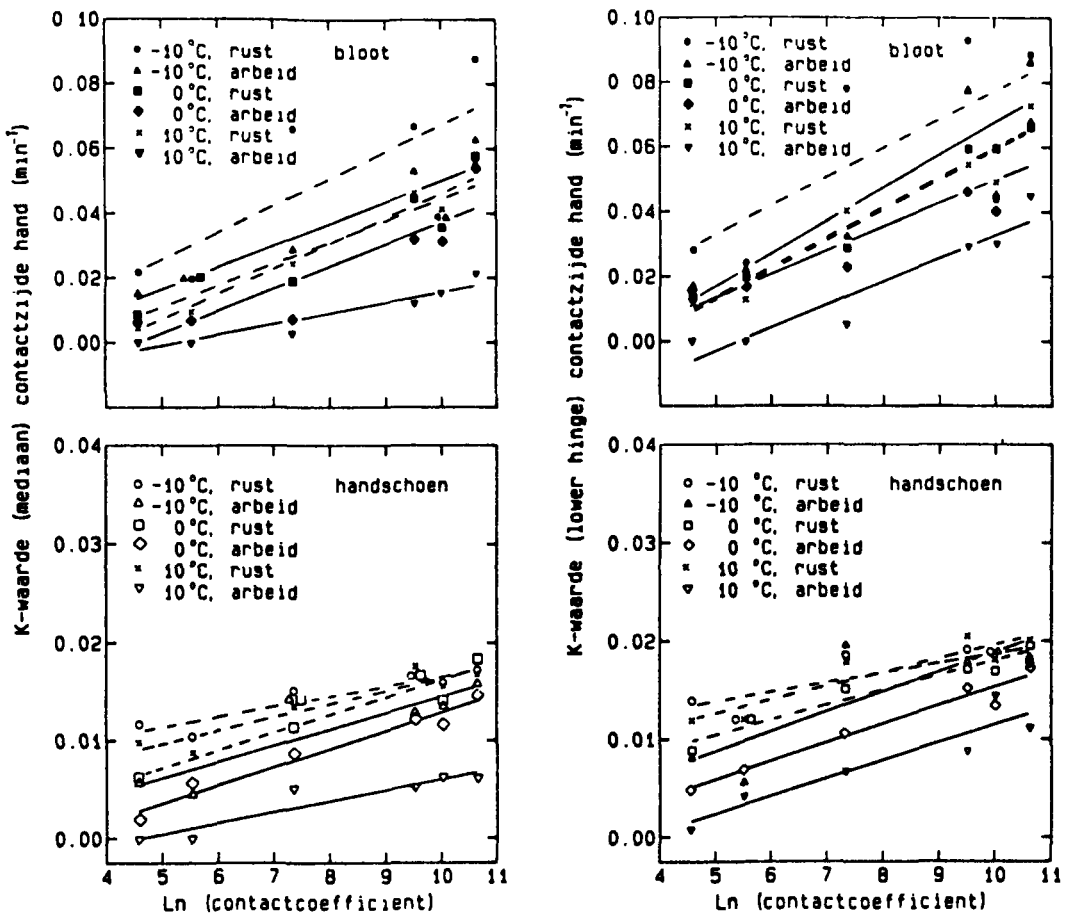


Fig. 11a (*links*) "Mediaan" k-Waarden voor de contactzijde van de hand, uitgezet tegen de natuurlijke logaritme van de contactcoëfficiënt van het contactmateriaal, voor 6 verschillende combinaties van temperatuur en arbeid. Fig. 11b (*rechts*) "Lower hinge" k-Waarden voor de contactzijde van de hand, uitgezet tegen de natuurlijke logaritme van de contactcoëfficiënt van het contactmateriaal, voor 6 verschillende combinaties van temperatuur en arbeid.

Met behulp van stapsgewijze regressieanalyse werd nagegaan welke onafhankelijke variabelen een significant deel van de variantie in de k-waarden verklaren. Daartoe werden in de analyse ingevoerd:

- constante
- $\ln(b)$ (Tabel II)
- omgevingstemperatuur (Tabel I)
- handbescherming (Tabel I)
- arbeid (Tabel I)
- interacties van bovenstaande parameters

Uit deze analyse kwamen de volgende regressieformules voor Tau (= 1/k) naar voren:

voor de mediaan:

$$\text{Tau} = 1000. / (-32.1 + 12.0 \ln(b) + 23.1 \text{ handschoen} - 9.9 \text{ arbeid} - .69 T_{\text{omg}} - 5.3 \ln(b) \cdot \text{handschoen}) \quad (R^2 = .79) \quad (10)$$

voor de lower hinge:

$$\text{Tau} = 1000. / (-44.9 + 15.7 \ln(b) + 29.8 \text{ handschoen} - 9.2 \text{ arbeid} - .68 T_{\text{omg}} - 7.1 \ln(b) \cdot \text{handschoen}) \quad (R^2 = .82) \quad (11)$$

4 DISCUSSIE

Sensatie

Het onderhavige experiment levert een uitgebreide basis van meetgegevens voor de verificatie van analytische modellen van de perifere temperatuur en de daarbij behorende sensaties van pijn en temperatuur. De voorspellende formules voor pijn- en temperatuursensatie zijn direct te gebruiken voor het verkrijgen van een idee omtrent comfort. Tot nu toe is altijd gesteld (Lotens en Van de Linde, 1989) dat voor comfort de handtemperatuur meer zou moeten bedragen dan 25°C. Voor de temperatuursensatie van de contactzijde van de hand lijkt dit inderdaad het geval (Fig. 8). Voor de handbuitenzijde (waar veelal de handtemperatuur gemeten wordt), ligt de sensatie "comfortabel koel" daarentegen lager, bij ca 21°C. De in Fig. 7 getoonde handbuitenzijde, altijd kouder ten opzichte van de handbinnenzijde, blijkt dus gepaard te gaan met een lagere comfortlimiet voor de buitenzijde dan voor de binnenzijde. Met andere woorden, een comfortabele hand heeft een koudere buiten- dan binnenkant. Het is in dit verband opmerkelijk dat het pijnoordeel van de proefpersonen juist onder deze "comfort" temperatuur begint af te wijken van het getal 6 (geen enkele pijn). Ook voor pijn verdraagt de handbuitenzijde lagere temperaturen dan de handbinnenzijde (Fig. 10). Zouden we "een beetje pijn" als limietwaarde toestaan, dan komt het er bij behorende temperatuurcriterium op 19°C te liggen voor de handbinnenzijde en op 16°C voor de handbuitenzijde (Fig. 10). Voor het temperatuuroordeel komen deze waarden overeen met een score iets lager dan oncomfortabel koel. Houden we het temperatuuroordeel "koud" aan, dan komt dit overeen met een contacttemperatuur van 16°C voor de binnenzijde en 10°C voor de buitenzijde (Fig. 8).

De regressievergelijkingen voor de voorspelling van temperatuursensatie en pijn bevatten alle de lokale huidtemperatuur, de omgevingstemperatuur en de factor handschoenen. De invloed van de lokale huidtemperatuur ligt voor de hand en is in Fig. 10 duidelijk af te lezen. De spreiding die in Fig. 10 echter nog aanwezig is blijkt

deels toe te schrijven aan de omgevingstemperatuur, hetgeen mogelijk wijst op een effect van de algemene thermische toestand van de persoon op de lokale sensatie, en deels aan het effect van het al dan niet dragen van handschoenen, dat mogelijk representatief is voor de warmtestroom van hand naar contactmateriaal en omgeving. De drie causale parameters zouden dan dus zijn: lokale huidtemperatuur, algemene thermische toestand en lokale warmtestroom.

Afkoeling

Wat betreft de relatie van de Tau (of k) waarden met de onafhankelijke parameters vallen naast de voor de hand liggende hoofdeffecten materiaal en handschoen de grote effecten van arbeid en omgevingstemperaturen en de sterke interacties tussen de hoofdeffecten op. De voorafgaande arbeid verlaagt de k (verhoogt de Tau) doordat er vanuit de warmere lichaamskern meer, dan wel gedurende langere tijd, bloed naar de hand zal stromen voor de doorbloeding door vasoconstrictie ten gevolge van afkoeling tot het minimum terug zal lopen. Het effect van de omgevings-temperatuur zou ook deels via de lichaamskern kunnen werken net als arbeid, maar het feit dat dit effect kleiner is bij gebruik van de handschoen spreekt dit tegen. Dit laatste pleit meer voor een lokale invloed, via het aan de omgeving blootgestelde deel van de hand. Vergelijken we de warmteoverdrachtscoëfficiënt van lucht (convectie + straling) met die van de materialen, dan blijkt de warmteoverdracht naar de lucht aanzienlijk bij te dragen aan de totale warmteoverdracht vanaf de hand (via lucht + contactmateriaal).

Het dragen van handschoenen vermindert het effect van arbeid, het materiaal en van de omgevingstemperatuur fors, ondanks dat de handschoenen relatief dun zijn. De factor handschoenen is derhalve zeer belangrijk.

Voorspelling handtemperatuur

Met betrekking tot de berekende afkoelcurven en de daarbij behorende voorspellingsformule voor de tijdconstante Tau, is de vraag hoe goed deze de afkoeling van het contactoppervlak voorspellen. Een indicatie hiervoor is de voorspelling met deze formules van de in dit experiment verzamelde dataset. Dit is slechts een indicatie, omdat de formules immers op deze dataset zijn gebaseerd.

Deze voorspelling kan op een aantal manieren worden uitgevoerd. Naast de voorspelling van de Tau, kan immers ook de starttemperatuur voorspeld worden. Verder kan dit voor de individuele curves en voor de gemiddelde curves per conditie worden gepresenteerd.

Fig. 12 geeft de relatie tussen gemeten en voorspelde contacttemperaturen uitgaande van de werkelijke starttemperatuur, de geschatte eindtemperatuur en de voorspelde Tau. Duidelijk is te zien dat de spreiding voor de situatie met handschoenen kleiner is dan voor de blote situatie. De correlatie tussen gemeten en voorspelde waarde bedraagt .91, met een standaard afwijking in de voorspelling (SEE) van 2.5°C. Het

resultaat van deze zelfde voorspelling gemiddeld over proefpersonen per conditie (handschoen, arbeid, temperatuur, materiaal) is weergegeven in Fig. 13. De correlatie is hierin uiteraard groter ($R = .94$) en de spreiding is hierin vanzelfsprekend kleiner ($SEE = 1.8^\circ\text{C}$).

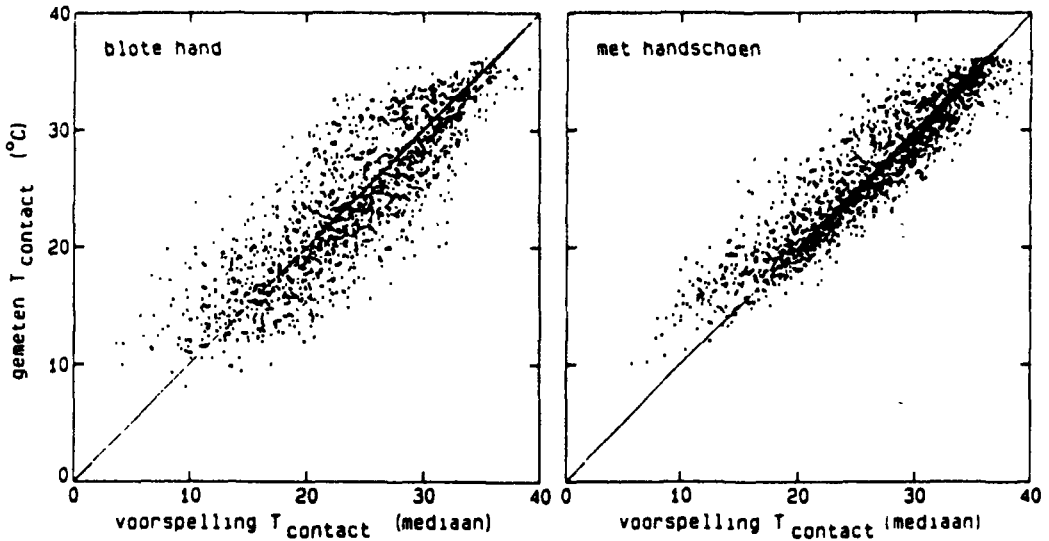


Fig. 12 Relatie tussen gemeten en voorspelde contacttemperatuur per vijf minutenperiode uitgaande van werkelijke starttemperatuur, geschatte eindtemperatuur en voorspelde Tau (mediaan) voor alle 5 minuten periodes in de individuele afkoelcurven, zowel voor blote handen (links) als handschoenen (rechts).

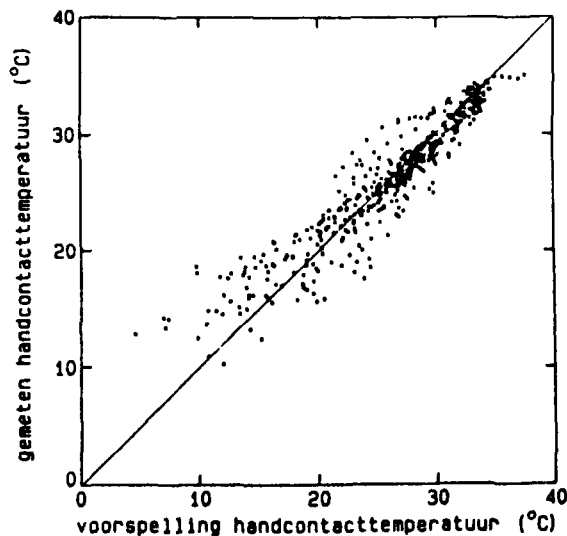


Fig. 13 Als Fig. 12, maar nu gemiddeld over proefpersonen.

Een probleem bij het onderhavige experiment is dat de starttemperaturen niet gelijk zijn, doordat de personen al een tijdlang rustten of werkten in het klimaat voordat ze de materialen vastpakten. Hier is bewust voor gekozen om een realistische situatie te creëren. Het nadeel is dat de startwaarden nu ook van het individu, het klimaat, de arbeid en de tijd afhankelijk zijn. Het is echter ook mogelijk om deze op een vergelijkbare manier als de Tau met multi-pele regressie te voorspellen. De erbij horende regressievergelijking is:

$$T_{\text{start}} = 23.4 + .05 T_{\text{omg}} + 4.2 \text{ arbeid} + .34 \text{ handschoen} \quad (^\circ\text{C}) \quad (12)$$

Opnieuw is een voorspelling van de contacttemperatuur gemaakt, nu op basis van een geschatte eindtemperatuur (zie methode), en voorspelde starttemperatuur en Tau. Het resultaat is, gemiddeld over proefpersonen, te zien in Fig. 14.

Opvallend is dat voor de gemiddelden over proefpersonen de voorspelling vrijwel niet slechter is geworden ($R=.93$ en $SEE=1.8$) dan bij het gebruik van de werkelijke starttemperatuur. Zoals te verwachten is voor de individuele voorspelling de spreiding fors hoger ($SEE=4.0$) en de correlatie coëfficiënt lager ($R=.93$). Voor de praktijk betekent een voorspelde starttemperatuur dus een redelijke voorspelling van de groepswaarden, maar een matige voorspelling voor het individu.

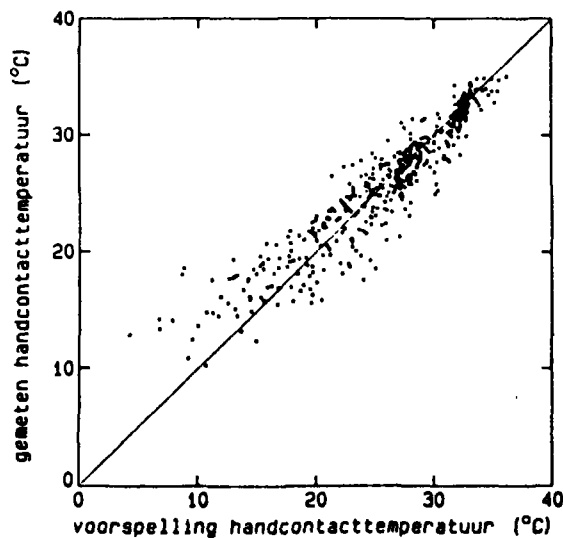


Fig. 14 Als Fig. 13, maar nu uitgaande van voorspelde starttemperaturen.

Interindividuele verschillen

Het verschil tussen proefpersonen is minstens van dezelfde orde van grootte als het verschil tussen de niveaus van de andere onafhankelijke variabelen. Om die reden is te verwachten dat zelfs de beste voorspelling van de handtemperatuur niet voor een individu kan gelden zolang geen inzicht is verkregen in de parameters die deze individuele verschillen verklaren. Uit dit onderzoek blijkt dat de anatomie van de hand en het man/vrouw verschil geen doorslaggevende rol spelen. Ook zijn er indicaties dat hetzelfde geconcludeerd kan worden ten aanzien van rookgewoonten. Dit geeft voeding aan het vermoeden dat het essentiële verschil tussen proefpersonen veeleer gezocht moet worden in de reactiviteit van de perifere perfusie. In vervolgonderzoek is het daarom nuttig de proefpersonen in die zin te karakteriseren. Een standaard koude-provocatietest met bijbehorende meting van perfusie en warmtedissipatie lijkt hiervoor de aangewezen methode.

Effect van arbeid

Bij koudebelasting koelen handen altijd af, behalve als, als gevolg van lichaamsarbeid, zoveel warmte wordt geproduceerd dat de koudebelasting kan worden gecompenseerd. In dit experiment, waar om praktische redenen de arbeid werd beëindigd juist voor het vastpakken van de contactmaterialen, zal na verloop van tijd altijd een warmtetekort ontstaan. Voor de gehele duur van de blootstelling kon daarom alleen een evenwichtstemperatuur worden behouden (na voorafgaande arbeid) bij 10°C bij de contactmaterialen hout en pu-schuim.

Representatieve handtemperatuur

Het is opmerkelijk dat in vrijwel alle gevallen de duimtemperatuur, die werd gemeten op het nagelbed, het laagste is. De oorzaak hiervan moet worden gezocht in de geometrie van dit lichaamsdeel, dat gekarakteriseerd wordt door een grote oppervlakte/inhoud verhouding en daardoor snel kan afkoelen. Weliswaar geldt dit voor de vingers ook, maar die liggen doorgaans tegen elkaar aan waardoor het effectief oppervlak fors afneemt. Dit suggereert dat voor het meten van de koudebelasting op de werkplek kan worden volstaan met de meting van de duimtemperatuur. Bij de sterk geleidende materialen (Fig. 7), in sterke kou of in natte omstandigheden hoeft dit echter niet altijd juist te zijn.

Veiligheid

Een vraag die tot dusverre niet beantwoord is, is of de voorspelling dient te geschieden op basis van de medianen voor de tijdconstanten of op basis van de "lower hinge" (vijfenzeventigste percentiel). Als het gaat om veiligheid zou men zeker willen dat de hele populatie geen risico loopt. Naar dit experiment vertaald zou dit betekenen, dat de waarden van de proefpersoon met de meest extreme afkoeling als richtlijn moeten gelden. In verband met mogelijke meetafwijkingen lijkt dit niet realistisch. Hetzelfde geldt als men in plaats van de meest extreme waarde (het honderdste percentiel)

bijvoorbeeld zou kiezen voor het negentigste percentiel. Door het aantal van 12 proefpersonen is ook dit getal twijfelachtig. Het in deze studie berekende vijfenzeventigste percentiel, met andere woorden één vierde van de proefpersonen is kouder, lijkt een realistischere bepaling. Bij het gebruik van de voorspellingsformule voor de lower hinge van de Tau waarde blijkt slechts 10% van de gemeten contacttemperaturen een meer dan 1°C lagere waarde voor de contacttemperatuur te geven dan voorspeld. Dit is, zoals te verwachten duidelijk minder dan bij gebruik van de mediaan voorspelling van de Tau, hetgeen duidelijk de grotere veiligheidsmarge van de lower hinge ten opzichte van de mediaan voorspelling weergeeft. De uiteindelijke keuze voor een van beide benaderingen is op dit moment moeilijk te maken en kan mogelijk beter worden gemaakt in het derde deel van dit onderzoek, de modelstudie.

5 CONCLUSIES

De initiële afkoelingsfase van de handen bij blootstelling aan koude materialen is redelijk te beschrijven met een e-macht (eerste orde systeem), waarvan de tijdconstante berekend wordt als functie van het contactmateriaal, de omgevingstemperatuur, de handbescherming en de arbeid.

Bij het opstellen van afkoelcriteria dient uit veiligheidsoogpunt het gebruik van "vijfzeventigste percentiel" waarden boven de mediaanwaarden te worden overwogen.

Het warmteverlies via de lucht van blote handen draagt bij de meeste contactmaterialen significant bij aan het totale warmteverlies via de hand.

Het dragen van handschoenen (zelfs dunne) heeft een uitermate groot effect op het warmteverlies bij het aanraken van koude materialen.

De temperatuursensatie en - in iets mindere mate - de pijsensatie zijn beide goed te voorspellen op grond van de lokale huidtemperatuur, omgevingstemperatuur en het gebruik van handschoenen. Mogelijk vormen deze parameters als representanten van een lokale en een centrale temperatuurinput, samen met een lokale warmtestroominput de basis voor temperatuursensatie en pijn.

Om de temperatuursensatie niet lager te laten zakken dan "comfortabel koel", dient de temperatuur van de handbuitenzijde niet onder de 21°C en die van de handbinnenzijde niet onder de 25°C te zakken.

Om de pijsensatie niet sterker te laten worden dan "een beetje pijn", dient de temperatuur van de handbuitenzijde niet onder de 16°C en die van de handbinnenzijde niet onder de 19°C te zakken.

REFERENTIES

- Arbeidsinspectie (1938). Veiligheidsbesluit voor fabrieken en werkplaatsen.
- Arbeidsinspectie (1977). Arbeid in koel en vriesruimten P no 142.
- Clarck, R.P. and Edholm, O.G., (1985), Man and his thermal environment, Edward Arnold, London.
- Holmér, I. (1989). Required Clothing Insulation. Technical document International Standardization Organisation.
- Lotens W.A. en Linde, F.J.G. van de (1989). Richtlijn Ergonomie: Klimaat, in: Schuffel, H., Ellens, E. and Pot, F. (1989) Richtlijnen voor de ergonomie van werkplekken, Publikatie DGA-S59.
- Raman, E.R. and Vanhuyse, V.J. (1975). Temperature dependence of the circulation pattern in the upper extremities. J. Appl. Physiol. 249, 197-210.
- Siple, P.A. and Passel, C.F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. Proc. Am. Philos. Soc. 89, 177-199.
- Steadman, R.G. (1971). Indices of wind chill of clothed persons. J. Appl. Meteorol. 10, 674-683.
- Yoshida, Matsui and Taya, (1989). Thermal environment-Contact with surfaces in the comfort range. Document International Standardization Organisation N187.

Deel II

**VOORSPELLING VAN DE AFKOELING
VAN HANDEN DOOR HET AANRAKEN
VAN KOUDE MATERIALEN**

W.A. Lotens

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	45
SUMMARY	46
1 INTRODUCTIE	47
2 MODELBESCHRIJVING	47
2.1 Geometrie	47
2.2 Doorbloeding	48
2.3 Warmtestroom	50
2.4 Oplossingsmethode	50
2.5 Protocol	51
3 RESULTATEN	51
3.1 Luchttemperatuur	52
3.2 Materialen	52
3.3 Lichaamswarmte en handschoenen	53
3.4 Temperatuur van de handpalm en de rug van de hand	54
3.5 Correlatie tussen model en experiment	56
4 DISCUSSIE	56
4.1 Doorbloeding	56
4.2 Geometrie	57
4.3 Karakteristieke afwijkingen	57
4.4 Extrapolaties	58
5 CONCLUSIES	58
REFERENTIES	59

SAMENVATTING

Er is een eenvoudig analytisch model ontwikkeld om het afkoelen van handen door aanraking met koude materialen te voorspellen. Het model beschouwd de hand als een plaat lichaamsweefsel, die aan beide zijden bedekt is met huid. Het enige regelmechanisme is de doorbloeding van de huid, die eerst langs de palm gaat en dan langs de rug van de hand terugkeert. De regelfunctie is overgenomen van een eerdere studie over voeten, maar werd uitgebreid met een term die de vaatverwijding in de kou beschrijft. De palm is in contact met materialen die worden gekarakteriseerd met hun warmtegeleiding en warmtecapaciteit. De handen zijn aanvankelijk op evenwichtstemperatuur in een neutrale omgeving en raken dan plotseling het koude materiaal aan. De optredende afkoeling is vergeleken met experimentele gegevens voor zes materialen (schuim, hout, nylon, staal, aluminium en gethermosteerd metaal), drie temperaturen (-10, 0 en 10°C), twee thermische toestanden van het lichaam (neutraal en 4°C verhoogd), alles met en zonder handschoenen. Over het algemeen is er een behoorlijke overeenstemming tussen model en experiment, maar het model mist drie karakteristieken van het experiment: het ongelijke effect van gelijke stappen van 10°C in materiaal temperatuur op de temperatuur van de palm van de hand, de koeling van nylon en de snelle daling van de handrug temperatuur. Niettemin vertoont het model een correlatie van .88 met het experiment en bedraagt de standaardafwijking ca 2.5°C, wat minder is dan de individuele variaties.

SUMMARY

A simple analytical model has been developed to simulate the cooling of hands due to touching various types of cold material. The model consists of a slab of tissue, covered at both sides with skin. The only active mechanism is the skin blood flow. The blood flow is controlled by body core temperature, mean skin temperature, and local hand temperature. The blood flows along the palm before returning via the back of the hand. The control function was adapted from an earlier study, dealing with feet, but enhanced with a cold induced vasodilation term. The palm of the hand is touching materials that are specified with conductivity and heat capacity. The hand is initially at steady state in a neutral environment and then suddenly grabs the material. The resulting cooling curves are compared to data from an experiment including six materials (foam, wood, nylon, steel, aluminum, and thermostated metal), three temperatures (-10, 0, and 10°C), two thermal states of the body (neutral and .4°C raised), and with and without gloves. There is a fair general agreement between the model and the experiment, but the model fails to predict three specific effects: the unequal effect of equal 10°C steps in cold surface temperature on hand palm temperature, the cooling effect of nylon, and the rapid drop in hand back temperature. Nevertheless the overall regression is .88 with a standard deviation between model and experiment of about 2.5°C, which is less than the individual variation.

1 INTRODUCTIE

Voor het Directoraat Generaal voor de Arbeid werd door Van de Linde e.a. (1990) een experimenteel onderzoek gedaan naar de afkoeling van handen bij het aanraken van koude materialen. In de analyse werd een regressieformule gegeven die de afkoeling beschrijft als een e-macht met variabele tijdconstante. Deze beschrijving geeft met enige nauwkeurigheid aan hoelang het zal duren voor de handen tot een zekere temperatuur zijn afgekoeld. In het derde rapport over dit onderzoek (Daanen, 1991) wordt aan de hand van een literatuurstudie aangegeven welke temperaturen kritisch zijn voor prestatieverlies en ongevalsrisico. Zo is een databestand opgebouwd dat een behoorlijk gebied van omstandigheden omvat. Niet helemaal bevredigend is echter dat interpolatie en extrapolatie van het geldigheidsgebied onzekerheden bevat. Dat ligt niet aan de data maar is een eigenschap van regressiemodellen. Daarom wordt in dit tweede rapport getracht een analytisch model op te stellen van de warmtewisseling van de hand. De modelberekeningen worden vergeleken met de data. Als daartussen overeenstemming is neemt het vertrouwen in extrapolaties enorm toe, omdat begrepen kan worden hoe en waarom veranderingen optreden.

De basis voor het model is een thermoregulatiemodel voor de voet dat door Lotens e.a. (1989) is opgesteld ten behoeve van de ontwikkeling van gevechtslaarzen. Er bestaat een sterke gelijkenis tussen de thermoregulatie van handen en van voeten. De enige relevante regelkarakteristiek in de kou is de doorbloeding, omdat het bloed de warmte naar de hand moet aanvoeren. De hand zelf produceert nauwelijks warmte omdat het volume aan lichaamsweefsel daarvoor te gering is. Raman en Vanhuysse schatten de warmteproductie van de hand op ca .25 W.

Het eenvoudigste model waarmee de data kunnen worden beschreven is een plaat weefsel dat de kern van de hand voorstelt, die aan beide zijden met huid is bedekt. De rug van de hand is in contact met lucht, terwijl de palm materiaal aanraakt, dat aan de andere zijde de luchttemperatuur heeft. De kern van de hand wordt slechts doorbloed om de voeding te verzorgen, maar de doorbloeding van de huid wordt geregeld.

2 MODELBESCHRIJVING

2.1 Geometrie

De geometrie van het model en de indeling in compartimenten is weergegeven in Fig. 1. De hand is slechts voor een gedeelte in contact met het materiaal. In feite is de huid van de palm geplooid en wordt voor een gedeelte van de palm helemaal geen warmte afgegeven omdat daar huid in contact is met huid. Slechts ca 15% van de hand is echt in contact met het materiaal. Voor het contact is het materiaal op

luchttemperatuur; na vastgrijpen verandert die temperatuur aan de contactzijde, maar de achterkant blijft op luchttemperatuur.

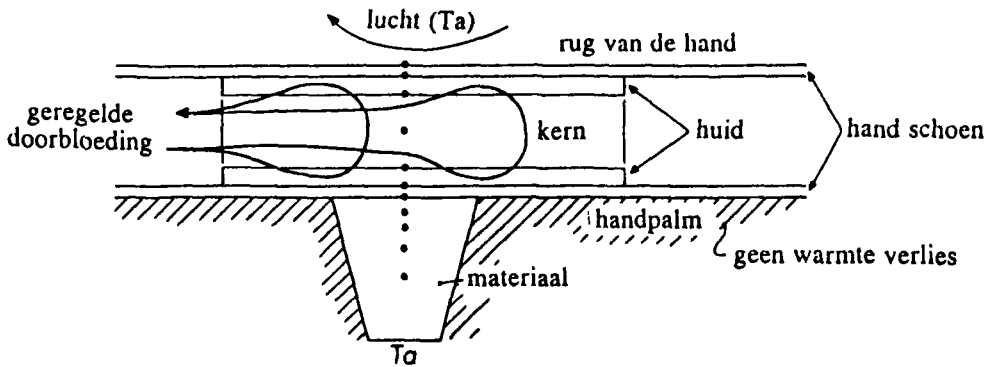


Fig. 1 De in het model aangenomen geometrie van de hand en de omgeving. De stippen geven de compartimentering aan.

Om de nauwkeurigheid op te voeren zijn de lagen in compartimenten verdeeld. De compartimenten zijn aangebracht omdat bij berekeningen binnen een compartiment gelijke temperatuur heerst. Hoe fijner verdeeld, hoe preciezer de temperatuur wordt berekend. De verdeling is niet gelijk, maar nabij de huid zijn de compartimenten dunner dan verder weg.

Er is een geometriefactor ingevoerd om de vorm van het materiaal in rekening te kunnen brengen. Voor een vlakke plaat materiaal is de achterzijde net zo groot als de contactzijde (factor 1), maar voor een voorwerp dat in de handpalm past veel kleiner (bijna 0). Voor de staven in het experiment is de factor ca .1.

2.2 Doorbloeding

De hele hand wordt doorstroomd met een vaste lage doorbloeding van .3 ml bloed-/100 ml weefsel/ min (.3 %/min), maar de huid heeft een aanvullende geregelde doorbloeding. De vorm van de regelfunctie is overgenomen van Lotens e.a. (1989):

$$blf = 2^{(1.5 \cdot ((T_c - 36.8) + .15 \cdot (T_{sk} - 33.)) + 2 \cdot (T_l - 29.))} \quad (\%/min)$$

waarin blf de doorbloeding is, T_c de kerntemperatuur van het lichaam, T_{sk} de gemiddelde huidtemperatuur en T_l de lokale huidtemperatuur. De blf moet met 12 vermenigvuldigd worden om om te rekenen naar l/h per m² hand (enkelzijdig gemeten).

De genoemde regelfunctie heeft geen fysiologische basis maar was slechts bedoeld om doorbloedingsdata uit verschillende bronnen (Burton & Edholm, 1955; Wyss e.a.,

1974, 1975) in een formule te vatten. Geen van deze bronnen specificeerde alle drie de inputs maar Lotens e.a. (1989) kwamen tot de conclusie dat ze alledrie nodig waren om zowel de data in de kou als die in de warmte te beschrijven. De gebruikte gevoeligheden en drempelwaarden voor kern- en huidtemperaturen zijn bekende waarden in de thermoregulatie (Cabanac e.a., 1971; Nadel e.a., 1971).

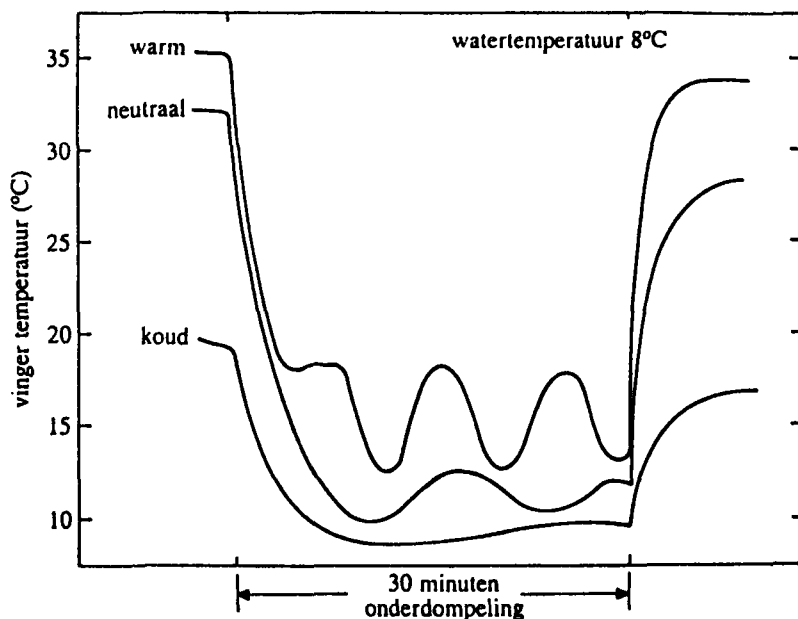


Fig. 2 Verloop van de handtemperatuur bij immersie in water voor 3 lichaamstemperaturen. De globale laagste handtemperatuur en de typische oscillaties hangen van de lichaamstemperatuur af (overgenomen van Van de Linde & Romet, 1991).

In deze studie werd de regelfunctie uitgebreid met een Cold Induced VasoDilation (CIVD) term. Die beschrijft het toenemen van de doorbloeding als de handtemperatuur onder een bepaalde waarde komt. Dit is een beschermingsmechanisme tegen koudschade. Aangenomen wordt dat de CIVD afhangt van de lichaamstemperatuur. Van de Linde en Romet (1991) vonden dat de typische oscillaties in de temperatuur ten gevolge van CIVD sterker zijn bij een warm dan bij een koud lichaam (Fig. 2). Ook blijft de temperatuur hoger. Kennelijk verschuift de drempel voor CIVD met de lichaamstemperatuur en dit wordt in rekening gebracht met de volgende correctie:

$$\text{blf}' = 2 \cdot (15 + 10 \cdot (T_c - 36.8) - T_i) \quad (\%/min)$$

$$\text{blf}' \geq 0$$

Om realistisch te blijven is ook aangenomen dat de doorbloeding terugvalt naar nul als de handtemperatuur het vriespunt nadert.

2.3 Warmtestroom

Het veneuze bloedvatenstelsel van de handen en onderarmen is gesplitst in een oppervlakkig en een diep stelsel. Het oppervlakkige stelsel voert het bloed van de gecontroleerde doorbloeding, dat de arterio-veneuze anatomoses passeert. Het oppervlakkige stelsel ligt aan de rugzijde van de hand. Als vereenvoudiging is aangenomen dat het bloed na het passeren van de palm (plm) via de handrug (drs) afgevoerd wordt. De warmte die dan naar de handpalm gevoerd wordt is:

$$hf_{bl} = .6 \cdot 12 \cdot blf \cdot \text{RhoCp}_b \cdot (T_c - T_{plm})/3600 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

en naar de handrug:

$$hf_{bl} = .6 \cdot 12 \cdot blf \cdot \text{RhoCp}_b \cdot (T_{plm} - T_{drs})/3600 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

waarin .6 de efficiency is van het warmtetransport volgens Raman en Vanhuyse (1975) en RhoCp_b de warmtecapaciteit van bloed in $\text{J/l}^\circ\text{C}$.

2.4 Oplossingsmethode

Het model kent lagen (hand kern, huid, handschoen, materiaal) en binnen lagen weer compartimenten. Voor elk compartiment geldt de wet van behoud van energie:

$$-k \cdot T_n^{m-1} + (M + 2 \cdot k)T_n^m - k \cdot T_n^{m+1} - Q_m \cdot dx - M \cdot T_o^m = 0$$

met	M	=	$\text{RhoCp} \cdot dx^2/dt$	$\text{(W/m}^2\text{C)}$
	dx	=	dikte compartiment	(m)
	dt	=	stap in tijd	(s)
	Q	=	warmtebron	$\text{(W/m}^2\text{)}$
	m	=	teller van het compartiment	
	k	=	warmtegeleiding	$\text{(W/m}^2\text{C)}$

n betekent nieuwe tijd en o oude tijd. Alle vergelijkingen worden tegelijk opgelost met deze impliciete methode door middel van matrixinversie. Tabel I geeft de waarde van de parameters voor de diverse lagen.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor lucht is (Kerslake, 1972):

$$h_a = 5 + 8.3 \cdot \sqrt{V_a} \text{ (W/m}^2\text{C)}$$

waarin V_a de windsnelheid is in m/s .

Tabel I Specificatie van de diverse lagen.

laag	dikte m	aantal com- partimenten	k W/m°C	Rho·Cp J/°C
kern	.018	2	.6	3500
huid	.001	1	.3	3500
handschoen	.0025	1	.04	300
bloed	-	-	-	4000
<i>materialen:</i>				
schuim	.05	4	.03	45
mahonie	.05	4	.23	500
nylon	.05	4	.25	1700
staal	.05	4	34	4000
aluminium	.05	4	220	2500
thermos	.005	4	220	2500

2.5 Protocol

In het model wordt aangenomen dat de hand begint in een evenwichtsconditie bij 22°C zonder handschoenen. Dan worden eventuele handschoenen aangetrokken en pakt de hand het materiaal vast dat op de nieuwe luchttemperatuur is.

3 RESULTATEN

Het model werd toegepast voor een aantal condities ten aanzien van luchttemperatuur, materiaal, warmte van het lichaam en gebruik van handschoenen en vergeleken met de data van Van de Linde e.a. (1990). De condities waren:

Luchttemperatuur:	10, 0 en -10°C
Materialen:	schuim, mahonie, nylon, staal, aluminium en gethermosteerde buis (aluminium buis die doorspoeld werd met een vloeistof van constante temperatuur)
Warmte lichaam:	rust ($T_c = 37.1$, $T_{sk} = 31$), arbeid ($T_c = 37.5$, $T_{sk} = 31.5$)
Handschoenen:	blote handen, 2,5 mm dikke werkhandschoenen (Amerikaantjes).

Terwille van de overzichtelijkheid zullen hier niet alle resultaten worden getoond maar zal een selectie worden gemaakt uit de vergelijkingen tussen model en experiment. De laatste vergelijking

is een regressie waarin wel alle combinaties van condities zijn opgenomen en waaraan de prestatie van het model kan worden afgemeten.

3.1 Luchttemperatuur

Fig. 3 toont de vergelijking tussen het model (linker grafiek) en het experiment voor de drie luchttemperaturen. Als referentie is gekozen voor blote handen, rust en het materiaal aluminium. Het model voorspelt een snelle daling van de temperatuur van de handpalm door het contact met het koude aluminium. Op de echte contactplaatsen daalt de huidtemperatuur aanvankelijk tot vrijwel de luchttemperatuur, maar voor de handpalm als geheel is het effect matiger door het uitmiddelen van contact- en niet-contactplaatsen. De aanvankelijke doorbloeding van $6 \text{ l/m}^2\text{h}$ loopt in de eerste paar seconden terug tot ca $1 \text{ l/m}^2\text{h}$, tot CIVD inzet rond de 30° minuut. Ondertussen koelt de hand af als dood materiaal. De afkoeling bij 10°C komt dicht bij de gemeten waarden. Bij 0°C is de koeling sneller. Na ongeveer 6 min start de CIVD en vertraagt de afkoeling. Het model voorspelt dat de handtemperatuur niet beneden de 13°C zal uitkomen. De metingen laten zien dat in werkelijkheid de hand iets langzamer koelt. Bij -10°C gebeurt het tegenovergestelde, waarbij de echte handtemperatuur duidelijk beneden het voorspelde minimum van 10°C uitkomt.

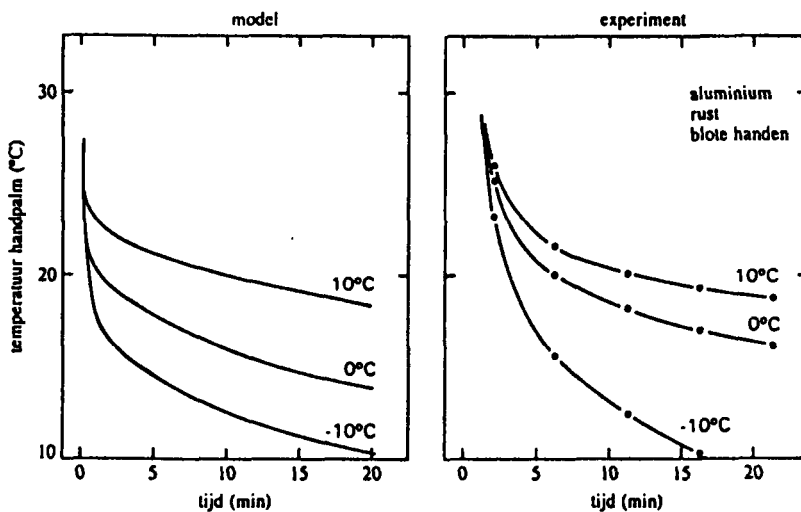


Fig. 3 Berekende (linker grafiek) en gemeten (rechter grafiek) afkoeling van de handpalm bij 3 luchttemperaturen.

3.2 Materialen

De fysieke eigenschappen van de materialen hebben een sterk effect op de afkoeling van de hand. Het is noch alleen de warmtegeleiding, noch alleen de warmtecapaciteit maar de combinatie van die twee die de hand doen afkoelen. Het resultaat is dat de hand warmer blijft bij het aanraken

van schuim, hout of nylon dan wanneer die aan lucht wordt blootgesteld. De metalen laten de hand echter sneller afkoelen. De vergelijking tussen model en experiment (Fig. 4) laat zien dat er over het geheel een goede overeenstemming is maar dat met nylon de hand sneller afkoelt dan voorspeld en dat metalen de hand minder doen afkoelen dan voorspeld.

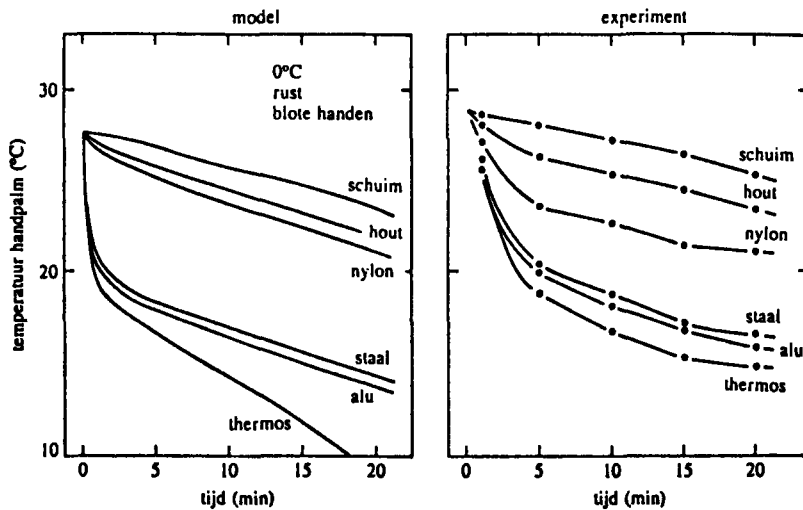


Fig. 4 Berekende (linker grafiek) en gemeten (rechter grafiek) temperaturen van de handpalm tijdens het aanraken van 6 verschillende materialen.

3.3 Lichaamswarmte en handschoenen

Zowel de toegenomen lichaamswarmte als het dragen van handschoenen hebben een sterk effect op de handtemperatuur. De handschoenen in de berekening van Fig. 5 zijn 2.5 mm dik, maar zelfs erg dunne handschoenen zijn effectief om te beschermen tegen de hele sterke afkoeling op de contactplaatsen met koud materiaal. De warmtestromen kunnen oplopen tot de orde van grootte van 10000 W/m^2 voor blote handen tijdens de eerste seconden in contact met aluminium, maar worden gereduceerd tot de orde van grootte van 2000 W/m^2 voor handschoenen van .5 mm dik en tot 500 W/m^2 voor handschoenen van 2.5 mm dik. Na de eerste minuten is de snelheid van afkoeling ongeveer hetzelfde met en zonder handschoenen, maar blote handen zijn dan al zo'n 8°C kouder.

De toename in lichaamswarmte van $.4^\circ\text{C}$ in gemiddelde lichaamstemperatuur veroorzaakt een aanvankelijk verhoogde handtemperatuur die blijft bestaan gedurende de hele afkoelperiode. Het model voorspelt dat het verschil tussen rust en arbeid kleiner is met handschoenen aan, maar dit wordt niet bevestigd door de experimentele gegevens. De voorspelde temperaturen zijn in het geheel wat lager, waarschijnlijk door een verschil in starttemperatuur van de hand.

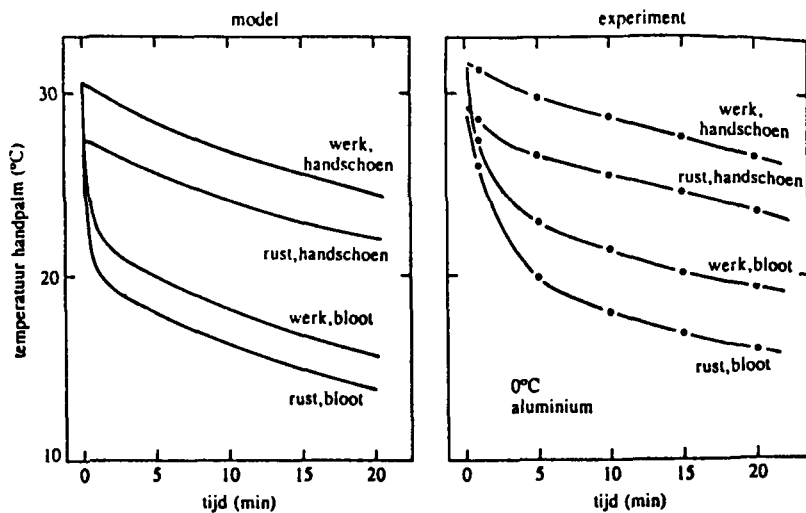


Fig. 5 Berekende (linker grafiek) en gemeten (rechter grafiek) temperaturen van de handpalm met en zonder handschoenen en met en zonder verhoogde lichaamstemperatuur.

3.4 Temperatuur van de handpalm en de rug van de hand

De handpalm is veelal warmer dan de rug van de hand. Een uitzondering vormt de palmtemperatuur op het moment dat de palm een goed geleidend materiaal aanraakt. In dit geval is het bloed dat via de rug van de hand terugkeert kouder dan de rug van de hand zelf. Deze toestand moet van voorbijgaande aard zijn omdat de warmtetoevoer van de rug van de hand geheel afhankelijk is van het bloed. Dit wordt weergegeven in Fig. 6. Als schuim wordt vastgegrepen wordt er in feite isolatie aan de handpalm toegevoegd, waardoor het verschil tussen palm en rug toeneemt. Wanneer daarentegen aluminium wordt aangeraakt wordt de handpalm kouder dan de handrug tot het temperatuurverschil na ongeveer 20 minuten omkeert.

De gemeten afkoeling laat dit effect inderdaad zien, maar er is een beduidend verschil in handrugtemperatuur. Zowel voor schuim als aluminium vertoont de handrug een snelle aanvankelijke daling in temperatuur die het verschil tussen palm en rug vergroot voor schuim, maar verkleint voor aluminium. Tengevolge daarvan kruisen de lijnen reeds na 8 minuten in plaats van na 20 minuten.

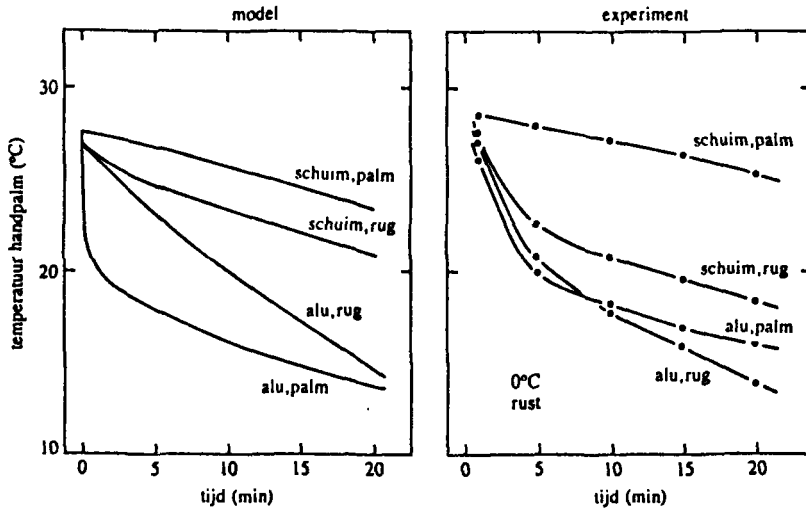


Fig. 6 Berekende (linker grafiek) en gemeten (rechter grafiek) temperaturen van de handpalm en de rug van de hand tijdens het aanraken van schuim en aluminium van 0°C.

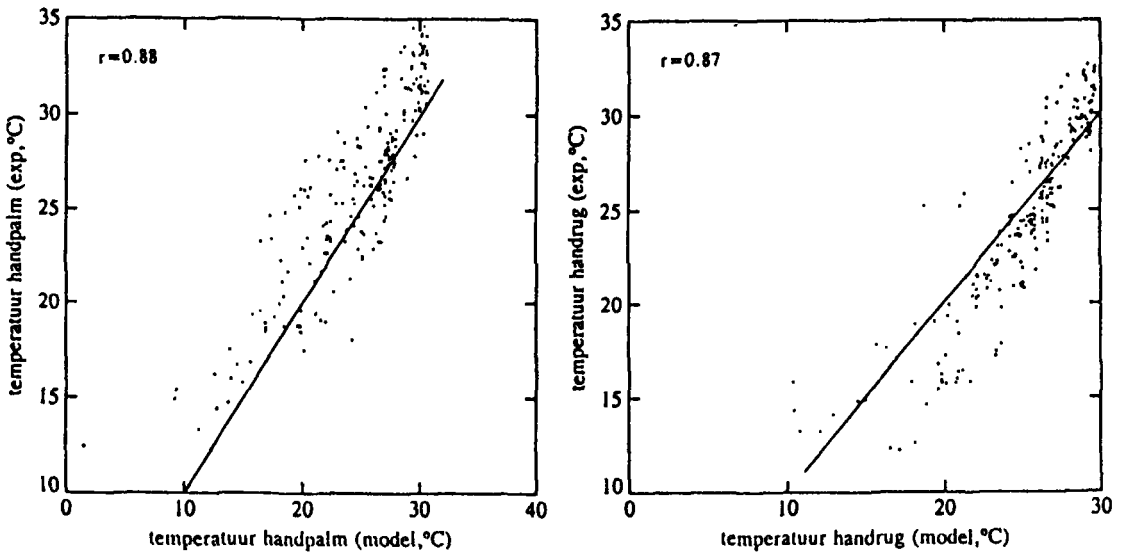


Fig. 7 Correlatie tussen voorspelde en gemeten temperatuur van de handpalm (linker grafiek) en de rug van de hand (rechter grafiek).

3.5 Correlatie tussen model en experiment

Voor alle 72 combinaties van condities werden de handpalm- en handrugtemperaturen verzameld voor de minuten 1, 5 en 20. Dit werd zowel voor het model als voor het experiment gedaan. Regressie-analyse laat zien dat de correlatie .88 is voor de palm en .89 voor de handrug (Fig. 7). De restvariantie vertoont toch nog een significante correlatie met de hoofdeffecten luchttemperatuur, materiaal, handschoen (niet voor de palm) en lichaamstemperatuur. Als deze correlatie mee wordt genomen stijgt de totale correlatiecoëfficiënt tot .95. Het model verklaart de experimentele variantie dus grotendeels maar niet volledig, zodat er nog ruimte voor verbetering is.

Analyse van het absolute verschil tussen berekende en gemeten temperaturen laat zien dat dit gemiddeld 1,6°C bedraagt voor de handpalm van een standaard afwijking van 2.5°C. Voor de handrug is dit respectievelijk -.2 en 2.4°C.

4 DISCUSSIE

4.1 Doorbloeding

Het model is niet ontwikkeld voor deze studie maar was overgenomen. Zijn belangrijkste eigenschap is de regelfunctie van de doorbloeding, die gebaseerd is op gemengde gegevens voor handen en voeten, zowel in de warmte als in de kou en die was toegespitst op de voet. Deze regelfunctie schijnt aan zijn doel te beantwoorden zowel voor voeten (Lotens e.a., 1989) als voor handen (deze studie). In werkelijkheid geeft de hand meer warmte af dan de voet als die in koel water wordt gedompeld (Daanen e.a., 1991), ondanks zijn kleinere oppervlakte. Dit zou een hogere doorbloeding van de hand suggereren. Deze studie laat inderdaad zien dat de aanvankelijke handtemperatuur wat aan de lage kant was voor het model, maar het verschil was niet groot genoeg om een verandering van de regelfunctie te rechtvaardigen in het licht van de verschillen tussen individuen.

De toevoeging van CIVD doorbloeding is kunstmatig. Hoewel CIVD uitvoerig in de literatuur is beschreven zijn goede kwantitatieve gegevens over de doorbloeding in deze conditie schaars. CIVD hangt van de temperatuur van de lichaamskern af. Lewis (1930), Greenfield e.a. (1951) en Keatinge (1957) vonden duidelijke effecten van lichaamstemperatuur op CIVD, maar tot op de dag van vandaag is er onzekerheid over hoe dit plaatsvindt. Het effect is te groot om alleen het gevolg te zijn van veranderingen in bloeddruk en bloedtemperatuur, maar directe sympatische invloed is ook onwaarschijnlijk omdat het lichaamstemperatuureffect niet verdwijnt bij een nerveuze blokkade. De studie van Van de Linde en Romet (1991) is waarschijnlijk de enige die het lichaamstemperatuureffect kwantitatief laat zien. Het feit dat de vingertemperatuur op een hogere waarde stabiliseert als het lichaam warm is was de reden om een verschuivende drempel te introduceren.

Het effect van CIVD op de handtemperatuur was niet erg doorslaggevend in de geteste omstandigheden. Als de CIVD met 50% wordt verhoogd zijn de resultaten nauwelijks anders. De reden is

dat de handen alleen genoeg afkoelen om CIVD op te wekken als koud metaal wordt vastgepakt en dan zijn de warmtestromen zo groot dat de warmte die door het bloed vervoerd wordt niet met de afkoeling kan wedijveren. Als de hand verder koelt verdwijnt de CIVD weer omdat bevroren handen niet doorbloed worden.

4.2 Geometrie

Behalve de doorbloeding bevat het model slechts geometrische factoren die objectief kunnen worden vastgesteld en fysische constanten die overgenomen zijn uit handboeken. De geometrie is allesbehalve realistisch omdat er geen vingers zijn en de anatomie en functie van de vingers in werkelijkheid verschillen van die van de palm. Het is daarom bevredigend dat zo'n vereenvoudiging toch redelijke resultaten geeft, maar het is ook duidelijk dat in werkelijkheid de temperatuur van de hand verre van homogeen is over het oppervlak. De eenvoud sluit uit dat het model passend gemaakt wordt op de data. Er zijn ook geen pogingen gedaan parameterwaarden te veranderen om een betere overeenstemming te bereiken.

4.3 Karakteristieke afwijkingen

Hoewel de resultaten in het geheel een behoorlijke overeenkomst laten zien tussen experiment en berekeningen werden een aantal karakteristieke afwijkingen waargenomen. Deze waren:

- Het gemeten effect van 10°C lagere luchttemperatuur is bij overgang van 10 naar 0°C kleiner dan bij overgang van 0 naar -10°C . De gemeten afkoeling bij 0°C is verbazingwekkend gering omdat er een enorme doorbloeding nodig is om de handtemperatuur zo hoog te houden. De doorbloeding is in het model begrensd tot 240 l/min om niet in onrealistische waarden te vervallen. Met deze doorbloeding kan volgens het model de gemeten handtemperatuur niet volgehouden worden. De gemeten en voorspelde afkoeling bij -10°C komen vrij goed overeen. Zonder meer gegevens heeft het geen zin om een hogere CIVD doorbloeding te veronderstellen.
- Nylon schijnt koudere handen te veroorzaken dan berekend. Omdat de andere materialen zo goed lijken te passen is het of de warmtegeleiding fout is ingevoerd. De verschillende soorten nylon hebben echter een warmtegeleiding tussen .21 en .35 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ en dat ligt allemaal dicht bij de gebruikte waarde van .25.
- De rug van de hand koelt sneller af dan voorspeld. De snelle afkoeling van de handrug kan alleen verklaard worden door een afgenomen doorbloeding. In het huidige model is de temperatuur van de handpalm de enige lokale parameter die de doorbloeding regelt. Daarom moet aangenomen worden dat de doorbloeding van de handrug onafhankelijk is van die van de palm of dat de temperatuur van de handrug mede van invloed is op één gezamenlijke doorbloeding. Dit wordt in het bijzonder duidelijk als schuim wordt aangeraakt, omdat de palm dan warm is en geen afname in de doorbloeding zou worden verwacht.

4.4 Extrapolaties

Het model laat een algemene overeenkomst zien met de experimentele data voor een wijd gebied van condities, hoewel de karakteristieke afwijkingen hierboven de nauwkeurigheid beperken tot zo'n 2.5°C. Dit wekt vertrouwen dat het model gebruikt zou kunnen worden om de afkoeling voor andere omstandigheden te berekenen zoals andere materialen, groter of kleiner contactoppervlak, andere luchttemperaturen, korter of langer vasthouden, andere handschoenen, etc. Zulke voorspellingen kunnen van grote waarde zijn bij het opstellen van normen. Een controle van het model met een onafhankelijke dataset is echter aan te bevelen voor zoiets wordt ondernomen.

5 CONCLUSIES

Een eenvoudig analytisch model van de hand staat toe de temperatuur van de palm en de rug van de hand te voorspellen met een nauwkeurigheid van 2.5°C in vergelijking met experimentele gegevens. De hand wordt voorgesteld als een vlakke plaat menselijk weefsel die aan beide zijden met huid is bedekt. De huid wordt doorbloed met warm bloed dat eerst langs de palm en daarna langs de rug stroomt. De regelfunctie voor de doorbloeding kent een term voor de doorbloeding in warmte en voor koude geïnduceerde doorbloeding.

De effecten van luchttemperatuur, warmte van het lichaam, handschoenen en blootstellingsduur bij het aanraken van verschillende materialen worden over het algemeen goed voorspeld maar 4 kwantitatieve afwijkingen komen boven: de aanvangstemperatuur van de hand is 1 tot 2°C te laag, bij 0°C luchttemperatuur is de voorspelde handtemperatuur te laag, bij nylon is de voorspelde handtemperatuur te hoog en de rug van de hand koelt niet snel genoeg af in vergelijking met de handpalm. De algemene overeenkomst tussen voorspelling en meting wekt vertrouwen dat het model gebruikt kan worden om de afkoeling bij aanraken van andere materialen en in andere omstandigheden te berekenen.

REFERENTIES

- Burton, A.C. & Edholm, O.G. (1955). *Man in a cold environment*. Edward Arnold Publ., London.
- Cabanac, M., Cunningham, D.J. & Stolwijk, J.A.J. (1971). Thermoregulatory set point during exercise: A behavioral approach. *J. Comp. Physiol. Psychol.* 76, 551-558.
- Daanen, H.A.M. & Ducharme, M.B. (1991). Physiological responses of the human extremities to cold water immersion. Manuscript submitted to *Arctic Med. Res.*
- Greenfield, A.D.M., Sheperd, J.T. & Whelan, R.F. (1951). The loss of heat from the hands and from the fingers immersed in cold water. *J. Physiol.* 112, 459-475.
- Keatinge, W.R. (1957). The effect of general chilling on the vasodilator response to cold. *J. Physiol.* 139, 497-507.
- Kerslake, D.McK. (1972). *The stress of hot environments*. Cambridge Univ Press, Cambridge.
- Lewis, T. (1930). Observations upon the reactions of the vessels of the human skin to cold. *Heart* 15, 177-208.
- Van de Linde, F.J.G., Havenith, G. & Heus, R. (1990). Contact met koude materialen. Rapport IZF 1990 C-15, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, Soesterberg.
- Van de Linde, F.J.G. & Romet, T.T. (1991) Body temperatures determine the characteristics of cold induced vasodilation. Manuscript submitted for *Eur. J. Appl. Physiol.*
- Lotens, W.A., Heus, R. & Van de Linde, F.J.G. (1989). A 2-node thermoregulatory model for the foot. In: *Thermal Physiology 1989*, Mercer Ed., 769-775, *Excerpta Medica*, Amsterdam.
- Nadel, E.R., Mitchell, J.W., Saltin, B. & Stolwijk, J.A.J. (1971). Peripheral modifications to the central drive for sweating. *J. Appl. Physiol.* 31, 828-833.
- Raman, E.R. & Vanhuysse, V.J. (1975). Temperature dependence of the circulation pattern in the upper extremities. *J. Physiol.* 249, 197-210.
- Wyss, C.R., Brengelmen, G.L., Johnson, J.M., Rowell, L.B. & Niederberger, M. (1974). Control of skin blood flow, sweating, and heart rate: role of skin vs core temperature. *J. Appl. Physiol.* 36, 726-733.
- Wyss, C.R., Brengelman, G.L., Johnson, J.M., Rowell, L.B. & Silverstein, D. (1975). Altered control of skin blood flow at high temperatures. *J. Appl. Physiol.* 38, 839-845.

Deel III

**HET FUNCTIONEREN VAN DE HANDEN
IN DE KOU**

H.A.M. Daanen

INHOUD

	Blz.
SAMENVATTING	63
SUMMARY	64
1 INLEIDING	65
2 FUNCTIONEREN VAN DE HAND IN EEN KOUDE OMGEVING	66
2.1 Handvaardigheid	66
2.2 Prestatie op cognitieve en psychomotorische taken	68
2.3 Reactietijd	69
2.4 Knijpkracht	69
2.5 Volhoudtijd	69
3 WARMTEVERLIES EN -PRODUKTIE VAN DE HAND	70
3.1 Warmtebalans	70
3.2 Warmtetoevoer	70
3.3 Opslag	71
3.4 Warmte-afvoer	71
4 EFFECT VAN KOUDE OP DE HAND	72
4.1 Circulatie	72
4.2 Zenuwstelsel	72
4.3 Gewrichten	73
4.4 Spieren	74
4.5 Sensoriek	74
4.6 Taakprestatie	76
5 PARAMETERS DIE HANDVAARDIGHEID IN KOUDE BEÏNVLOEDEN	77
5.1 Koude-acclimatisatie	77
5.2 Koude-adaptatie	78
5.3 Geslachtsverschillen	79
5.4 Leeftijd	79
5.5 Snelheid van circuloire respons op koude	80
6 RISICO'S	80
6.1 Afkoelsnelheid	80
6.2 Uitdroging	81
6.3 Afname van de kerntemperatuur	81
6.4 Ongevallen	83

7	BEPERKING VAN PRESTATIEVERLIES	84
7.1	Handschoenen	84
7.2	Stralingswarmte	84
7.3	Handvaardigheidstraining in een koude omgeving	85
7.4	Andere maatregelen	86
8	CONCLUSIE	86
	REFERENTIES	88

SAMENVATTING

In een koude omgeving probeert de mens zijn warmte zo goed mogelijk vast te houden. Hij bewerkstelligt dit onder meer door de circulatie door de handen te verminderen. Hierdoor zal de temperatuur van de handen sterk afnemen. Bij een huidtemperatuur van de hand lager dan ongeveer 12 tot 16°C wordt een daling gevonden van de handvaardigheid. Deze drempel is zeker niet absoluut, maar verschilt per individu en taak. De duur van de blootstelling bepaalt mede de hoogte van de drempel.

Naast een afname van de handvaardigheid in een koude omgeving, vinden we een sterke afname van de kracht die kan worden geleverd en van de volhoudtijd van een submaximale contractie. De reactietijd wordt nauwelijks door koude beïnvloed. De prestatie op cognitieve taken neemt in de kou soms toe, en gaat vaak gepaard met een toename van het aantal fouten.

Er zijn nauwelijks verschillen tussen mannen en vrouwen betreffende de huidtemperatuur in een identieke koude omgeving. Ook in taakprestatie lopen de beide geslachten niet uiteen.

Er zijn aanwijzingen dat bij mensen die zijn geacclimatiseerd en/of geadapteerd aan lokale koude de doorbloeding van de handen verhoogd is, en de vermindering in handvaardigheid daardoor geringer is.

Om het verlies van handvaardigheid in een koude omgeving te beperken zijn de belangrijkste aanbevelingen: het dragen van handschoenen (indien de taak dat toelaat), het gebruik van een stralingsbron boven de handen en verhogen van de lichaamstemperatuur door inspanning. Oefenen van de taak in een koude omgeving leidt tot verbetering van de handvaardigheid tijdens die taak.

Het belang van de maatregelen wordt niet alleen gevonden in het verbeteren van de taakprestatie, maar ook in het reduceren van het ongevalsrisico.

SUMMARY

In cold environments humans try to reduce heat loss. One of the mechanisms to do so is to decrease the circulation through the hands. This reduces hand temperature. Skin temperatures of the hand less than 12 to 16°C lead to a decreased dexterity. This threshold is not absolute, but depends on individual and task. Furthermore, the rate of cooling influences the threshold.

In a cold environment not only dexterity decreases, but also maximal grip strength and time to exhaustion at submaximal contraction force. Reaction time is hardly altered by cold. Performance on mental tasks is sometimes improved in cold, but is often accompanied by an increase in the number of errors.

There is almost no difference in gender concerning hand skin temperature and task performance in cold environments. People adapted or acclimatized to local cold show enhanced blood flow through the hands and may have better dexterity.

To reduce loss of dexterity in cold environments it is advised to wear gloves (if the task permits so), to use an additional radiant heat source above the hands and to increase body temperature by exercise. Specific training in cold improves task performance.

The purpose of these advises is not only to improve dexterity but also to reduce the risk of accidents.

1 INLEIDING

Blootstelling aan koude leidt tot een vermindering van motorische vaardigheden. Met name de handen, waarmee de mens de meeste verrichtingen uitvoert, worden minder vaardig in een koude omgeving. De relatief grote oppervlakte in verhouding tot het volume van de hand maakt dit lichaamsdeel bijzonder gevoelig voor koude.

Het verband tussen een koude omgeving en de afname in gevoel en vaardigheid van hand en vinger is uitgebreid onderzocht. Deze grote interesse valt te verklaren door de grote relevantie voor de produktiviteit in verschillende industriële en militaire omgevingen.

In dit rapport wordt de literatuur betreffende de relatie tussen koude en handvaardigheid geordend en kritisch beschouwd. Waar mogelijk wordt gepoogd praktische consequenties aan de resultaten van onderzoek te verbinden, zoals adviezen en normgeving.

Het rapport maakt deel uit van een onderzoekslijn naar koude en handvaardigheid. In deze onderzoekslijn is reeds een onderzoek gepubliceerd betreffende de afkoel-snelheid van handen bij het contact met diverse materialen (Van de Linde e.a., 1990). In voorbereiding is de constructie van een computermodel, waarmee warmteverliezen van de hand kunnen worden voorspeld. Dit model wordt opgebouwd naar analogie van het reeds ontwikkelde model van de voet (Lotens, 1989).

In maart 1990 verscheen een doctoraalscriptie "Handvaardigheid in de kou" (Pieters, 1990). Deze scriptie diende als uitgangspunt voor het onderhavige rapport.

Het rapport is ingedeeld in 8 hoofdstukken. In hoofdstuk 2 worden de parameters in relatie tot het functioneren van de hand genoemd: handvaardigheid, (knijp)kracht en reactietijd. In hoofdstuk 3 wordt de warmtebalans voor de hand gepresenteerd. Met de warmtebalans kan worden nagegaan bij welke omstandigheden de hand warmte gaat verliezen. Herkenning van deze omstandigheden betekent dat men hieruit richtlijnen voor preventie van prestatievermindering kan ontleen. In hoofdstuk 4 wordt het effect van koude op de hand besproken betreffende de circulatie, innervatie, bewegingsapparaat en taakprestatie. Allerlei factoren die verschillen tussen individuen kunnen verklaren in reactie op een koude omgeving, worden besproken in hoofdstuk 5. Deze factoren zijn acclimatisatie, adaptatie, geslachtsverschillen, en snelheid van circulatoire respons op koude. In hoofdstuk 6 worden factoren genoemd die de prestatie in koude doen verminderen en aldus een risico inhouden. In hoofdstuk 7 worden onderzoeken geëvalueerd die mogelijke oplossingen voor vermindering van prestatieverlies in koude hebben getoetst. In hoofdstuk 8 tenslotte worden conclusies aan het voorgaande verbonden.

2 FUNCTIONEREN VAN DE HAND IN EEN KOUDE OMGEVING

Bij het onderzoek naar de afname van de functie van de hand in een koude omgeving zijn als belangrijkste afhankelijke variabelen handvaardigheid (manual dexterity), reactietijd, knijpkracht en volhoudtijd genoemd.

Handvaardigheid wordt gekwantificeerd met diverse testen. Sommige testen zijn dermate complex dat de mentale taak de overhand heeft, zoals het ordenen van getallen. De mentale prestatie wordt door koude soms beïnvloed. In paragraaf 2.2 wordt de invloed van de kou op de mentale prestatie besproken. De meest eenvoudige testen vormen die waarbij een proefpersoon moet reageren met het drukken op of het loslaten van een knop wanneer een lichtje aan of uitgaat. Het moment tussen het aan- of uitgaan van het lichtje en de aanvang van de beweging wordt de reactietijd genoemd. Reactietijd is dus onafhankelijk van het motorische systeem, maar wordt bepaald door de snelheid van impulstransport in het zenuwstelsel. In paragraaf 2.3 wordt de invloed van koude op de reactietijd besproken.

De knijpkracht van de hand wordt voornamelijk bepaald door de spieren van de onderarm. Afkoeling van deze spieren zal leiden tot een afname van kracht, die de handvaardigheid negatief zal beïnvloeden. In paragraaf 2.4 wordt de invloed van temperatuur op de knijpkracht besproken.

De volhoudtijd bij submaximale belasting is interessant bij langdurige statische arbeid. Ze is sterk gereduceerd in koude. In paragraaf 2.5 wordt een onderzoek betreffende volhoudtijd besproken.

2.1 Handvaardigheid

Onder handvaardigheid wordt verstaan de mate waarin de arm, handen en vingers gemanipuleerd kunnen worden.

In de literatuur betreffende de relatie tussen handvaardigheid en koude is de handvaardigheid gemeten met verschillende testen. Het is van belang iets dieper in te gaan op de aard van de testen omdat niet elke test het zelfde aspect van handvaardigheid meet: de ene test zal meer de vingerbewegingen betreffen, terwijl de ander meer de polsbeweging aangaat. Deze verschillen werden mooi geïllustreerd door een experiment van Bourassa en Guion (1959). Zij hebben 15 verschillende vaardigheidstesten onderzocht, bedoeld voor het meten van handvaardigheid, vingervaardigheid, vaardigheid met pincet, visuele vaardigheid en dieptegevoel. Met factoranalyse werd de lading van elke test op 5 factoren bepaald. Er zijn grote verschillen tussen de testen in factorlading. Het construeren van pinnen met ringetjes die daarna in een bord met voorgeboorde gaten worden gezet (het Purdue pegboard) met de niet-dominante hand heeft bijvoorbeeld een factorlading van .54 op een factor genoemd "handvaardigheid", maar een factorlading van -.28 op de factor "grasping ability: grijpvaardigheid". Fleishman en Ellison (1962) hebben op identieke wijze 22 testen op

7 factoren gescoord. Zij hebben 5 factoren daarvan geïdentificeerd als: handvaardigheid, vingervaardigheid, armbewegingssnelheid, pols-vinger snelheid en richten. Zij concluderen dat sommige testen iets anders meten dan hun naam suggereert en geven aan dat testen specifiek dienen te meten.

Bij testen die vingervaardigheid testen in een koude omgeving wordt in het algemeen een grotere prestatiedaling gevonden dan bij testen die de grove motoriek betreffen. Dit komt omdat in een koude omgeving de temperatuur van de lichaamsdelen lager is naarmate men meer in de periferie komt. Vingers zijn in de kou lager van temperatuur dan handen, en handen zijn weer kouder dan bovenarmen.

Al in 1957 had Dusek de overtuiging dat de vingervaardigheid bij lage omgevings-temperaturen sterker afnam dan de handvaardigheid.

Vaughan e.a. (1968) onderwierpen 36 mannen aan vinger- en handvaardigheidstesten in omgevingen van 10, 26,7 en 46°C. De prestatie op testen waarbij de armen en handen alleen grove bewegingen moesten maken was onafhankelijk van de omgevings-temperatuur, terwijl de prestatie op de fijnere motorische taken slechter was in de koude conditie.

Lockhart e.a. (1975) vergeleken 6 taken met elkaar die met verschillende vingertemperaturen werden uitgevoerd. Bij een vingertemperatuur die werd verlaagd van 24°C naar ongeveer 18°C nam de prestatie af op relatief fijne taken als het Purdue Pegboard en schroeven aandraaien met een schroevendraaier. De prestatie betreffende knopen leggen, naald en draad door een houten blokje steken en met de vingers schroefjes aandraaien nam af indien de vingertemperatuur van 18°C naar 13°C daalde. Het leggen van kubussen met een ribbe van ongeveer 2,5 cm in een doos gaf pas een prestatiedaling te zien bij een temperatuuurdaling van 13°C naar 7°C. Het manipuleren van de blokjes is een taak waarbij de grove musculatuur meer betrokken is dan de fijne musculatuur. De vingers hoeven slechts het blokje vast te houden. Hier zien we de geringste prestatiedaling. Het manipuleren van de ringetjes en pinnen vergt vingervaardigheid, die al vrij snel bij afkoeling vermindert. Ook het schroeven draaien met een schroevendraaier wordt al snel lastig. Het plaatsen van het blad in de schroefgroef is een handeling, die vermoedelijk veel vingervaardigheid vereist.

In Tabel I staat voor de 6 onderzochte testen de prestatiedaling weergegeven.

Tabel I Procentuele prestatiedaling op 6 verschillende testen indien de huidtemperatuur van de vinger wordt verlaagd van 24°C naar 7°C (Lockhart e.a., 1975).

Kubussen met ribbe van 2,5 cm in doos doen	11
Naald en draad door kubus doen	22
Schroefjes met hand aandraaien	26
Knopen leggen in touw	28
Schroeven draaien met schroevendraaier	36
Ringetjes om pinnen doen	38

Naast dit onderzoek geven ook de resultaten van het onderzoek van Leblanc (1956), beschreven in paragraaf 4.3 een sterke aanwijzing dat koude voornamelijk de prestatie op taken die fijne motoriek betreffen vermindert.

In het vervolg van dit rapport wordt daarom zoveel mogelijk aangegeven welke taak in een besproken onderzoek is gebruikt, en eventueel welk motorisch equivalent hiervoor in de dagelijkse praktijk kan worden gevonden.

2.2 Prestatie op cognitieve en psychomotorische taken

Ellis (1982) vond dat de tijd die nodig was om getallen te benoemen als even of oneven afnam in de kou. Het aantal fouten nam echter toe. Bij een verbale redeneertaak werd de prestatie beter in de kou. Twee hypothesen worden genoemd als mogelijke verklaring voor de gevonden resultaten. De eerste hypothese is dat kou het attentieniveau verhoogt, en daardoor kan leiden tot verbetering van de prestatie. De tweede hypothese luidt dat koude er voor zorgt dat mensen eerder zijn afgeleid. Het toegenomen aantal fouten zou deze hypothese ondersteunen. Veranderingen in attentieniveau (arousal) en mate van afleiding (distraction) door kou, zullen waarschijnlijk ook de handvaardigheid beïnvloeden. Het zal dan vooral taken betreffen waarbij relatief veel denkwerk en weinig handwerk wordt verricht.

Op een waakzaamheidstaak vond Enander (1987) in een koude omgeving dat de reactie op een stimulus net zo adequaat was als in een thermisch neutrale omgeving. In de kou werd echter vaker vals alarm gegeven. Deze resultaten sluiten goed aan bij de distraction-hypothese. In de koude omgeving vond ze een prestatiedaling op een schroeftaak en bij duimbewegingen. Hierbij is het erg lastig fysiologische effecten van koude te scheiden van de mogelijke verandering in "arousal" en "distraction". Concluderend is het nog wat vroeg het gezegde "houdt het hoofd koel" te onderschrijven. Het effect van koude op het mentale functioneren dient verder te worden onderzocht.

2.3 Reactietijd

Indien een mens zo snel mogelijk moet reageren op een stimulus is er nauwelijks ruimte voor corticale betrokkenheid. Zowel Ellis (1982) als Enander (1975) vonden geen verschil in reactietijd tussen een koude en thermisch neutrale omgeving. Reactietijd is de tijdsduur tussen het moment van stimuluspresentatie en het moment van aanvang van de (motorische) respons.

Pease e.a. (1980) vonden dat de reactietijd wel afhankelijk was van koude. Zij wikkelden pakjes met smeltend ijs om de arm van 9 personen, die daarna zo snel mogelijk nadat een lichtje verscheen de vinger van een knop moesten halen. Deze groep reageerde trager dan een controle groep en een placebo groep. De placebo groep kreeg ook een omwikkelde arm, die met ingewikkelde apparatuur werd verbonden. De proefpersonen kregen te horen dat het hier om stimulatie ging, terwijl in werkelijkheid niets werd aangeboden. De auteurs concluderen dat de afname in reactietijd niet zozeer psychologisch dan wel fysiologisch van aard is, wellicht in samenhang met de afname in zenuwgeleidingssnelheid.

De door Pease e.a. gevonden verschillen waren echter klein, en bovendien was de reactietijd van de 3 experimentele groepen voorafgaand aan het experiment sterk verschillend, zodat gesteld kan worden dat de effecten van koude op de reactietijd uitermate gering zijn, indien aanwezig.

2.4 Knijpkracht

De handknijpkracht neemt sterk af in koude. Vincent en Tipton (1988) vonden een afname van 16% als de hand werd ondergedompeld in water van 5°C. Onderdompeling van de onderarm gaf een daling van 13% te zien.

Barnes en Larson (1985) koelden de onderarm van 24 studenten in water van 10°C. Ze vonden een prestatietijging van gemiddeld 8% onmiddellijk na de koude applicatie. Zij veronderstellen dat koude sensoren zorgen voor excitatie van α -motoneuronen, en aldus zorgen voor krachttoename. Na enige tijd echter gaat de kracht dalen doordat het spierweefsel wordt gekoeld. Deze daling bedraagt 14%, uitgaande van het initiële krachtniveau.

Naast de daling van de maximale kracht vond Holewijn (1991) een daling van de maximale frequentie waarmee kon worden geknepen bij 10% van de maximale kracht indien een huidtemperatuur van 15°C werd vergeleken met 32 of 40°C.

2.5 Volhoudtijd

Clarke e.a. (1958) onderzochten de volhoudtijd van submaximale contracties van de hand in verscheidene temperaturen van een waterbad. De langste volhoudtijd werd

gevonden bij 18°C: 1/3 van de maximale kracht werd ruim 300 seconde volgehouden. Bij 10 graden was dit nog maar ruim 100 seconden. Gekoelde ledematen kennen dus een verminderde volhoudtijd. Het opgelegde krachtniveau was onafhankelijk van de omgevingstemperatuur.

Holewijn (1991) vond dat de volhoudtijd niet verschilde tussen een warme en koude omgeving indien ze werden belast op een bepaald percentage van de maximale kracht, bepaald in die omgeving.

De volhoudtijd wordt dus sterk beïnvloed door het maximale krachtniveau.

3 WARMTEVERLIES EN -PRODUKTIE VAN DE HAND

3.1 Warmtebalans

Van de hand in een koude omgeving kan een warmtebalans worden opgesteld. In formulevorm kan de balans als volgt worden weergegeven:

$$\text{Metabolisme} + \text{Geleiding}_{\text{onderarm} \rightarrow \text{hand}} + \text{Stroming}_{\text{bloed}} + \text{Opslag} = (\text{Geleiding} + \text{Stroming} + \text{Straling})_{\text{hand} \rightarrow \text{omgeving}}$$

3.2 Warmtetoevoer

De warmtetoevoer van de hand wordt bepaald door het metabolisme in de hand, geleiding van warmte van de onderarm naar de hand en warmte die door het circulerende bloed wordt aan- en afgevoerd.

Metabolisme

Naarmate de omgeving kouder is zal de temperatuur van de hand afnemen. Centraal in de hand zal de temperatuur hoger zijn dan in de huid.

De warmte die door het metabolisme van de hand wordt geproduceerd is gering. Raman en Vanhuyse (1975) schatten de warmteproductie in rust op zo'n 0,25 W. Wanneer de spieren in de hand arbeid leveren zal het metabolisme toenemen, maar nooit zoveel dat deze een belangrijke bijdrage aan de warmteontwikkeling in de hand levert.

Geleiding

Geleiding van warmte van onderarm naar hand hangt af van het temperatuurverschil tussen onderarm en hand. Naarmate dit hoger is zal de geleiding toenemen. In een situatie waarin de hand zich in water van 25°C bevindt, schatten Raman en Vanhuyse

(1975) de bijdrage op minder dan 1 W (ongeveer evenveel vermogen als het circulerende bloed overdraagt indien de perifere bloedvaten maximaal zijn gecontraheerd).

Stroming

De bloedstroom is dus de belangrijkste warmtebron van de hand. Ruim 85% van de warmte is afkomstig van het warme bloed dat door de hand circuleert onder thermoneutrale omstandigheden. In een koude omgeving neemt het procentuele aandeel sterk af door vasoconstrictie.

3.3 Opslag

De term opslag staat voor de toe- of afname van de hoeveelheid warmte in de hand. In een koude omgeving zal de hoeveelheid warmte in de hand in de tijd afnemen. Daardoor wordt de opslag term negatief.

3.4 Warmte-afvoer

De door de hand geproduceerde warmte wordt aan de omgeving afgegeven middels straling, stroming en geleiding.

Straling

Een gedeelte van de warmte wordt door electro-magnetische golven aan de omgeving afgestaan. De straling is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen hand en omgeving en valt in het verre infrarood. Huid is vrijwel zwart voor deze golflengten en heeft dus een hoge emissie. In een windstille omgeving voert de straling net zo veel warmte af als de lucht.

Stroming

Indien zich lucht of water langs de hand beweegt, wordt de warmte weggenomen. Bij hoge windsnelheden zal de hand dus harder afkoelen dan bij lage windsnelheden. Omdat de hand een grote oppervlakte heeft ten opzichte van haar inhoud is het uitwisselingsoppervlak relatief groot en kan met stroming een snelle afkoeling plaatsvinden.

Geleiding

Bij het vasthouden van koude materialen wordt de warmte van de hand door geleiding naar het materiaal gevoerd. Indien het materiaal koud is, wordt veel warmte van de hand weggeleid. Het is belangrijk bij de materiaalkeuze van gereedschappen, die in koude worden gebruikt, rekening te houden met de geleiding (Van de Linde e.a., 1990).

4 EFFECT VAN KOUDE OP DE HAND

Wanneer een hand in een koude omgeving komt, vinden we veranderingen in de circulatie, het zenuwstelsel en de gewrichten en spieren. Gezamenlijk zorgen zij voor een verminderde sensoriek en een afname van de prestatie op handvaardigheidstaken.

4.1 Circulatie

In een koude omgeving zal het bloed in de hand koeler worden. Dit verhoogt de viscositeit van het bloed, dat daardoor langzamer zal gaan stromen. Burton en Edholm (1955) rekenen voor dat bloed van 18,5°C 1,5 keer visceuzer is dan bloed van 37°C. De bloedstroom zal dus ook afnemen met een factor 1,5.

De bloedstroom in de huid wordt in werkelijkheid nog veel minder dan alleen op grond van viscositeit verwacht mag worden. Dit komt omdat bloedvaten in de huid gaan samentrekken. Het mechanisme waarmee deze lokale vasoconstrictie tot stand wordt gebracht is altijd nog een discussiepunt onder fysiologen. Waarschijnlijk worden koude-sensoren in de huid geprikkeld, die via een schakelnetwerk uiteindelijk het sympatische zenuwstelsel activeren. In de bloedvaten van de huid (vooral in de vingers) zitten receptoren, die er voor zorgen dat het glad spierweefsel in de wand gaat contraheren bij een toename van de sympatische activiteit.

De vasoconstrictie brengt een grote afkoeling van de huid van de hand met zich mee. De kans op koudelletsel neemt hiermee sterk toe. Er is echter een mechanisme waarmee dit kan worden voorkomen: Cold Induced Vasodilation (CIVD). Lewis (1930) beschreef CIVD voor het eerst. Hij dompelde vingers in ijskoud water, en observeerde na 10 minuten een plotselinge toename van de temperatuur van de vingerhuid. De doorbloeding van de vinger nam sterk toe. Gedurende de verdere periode van onderdompeling zag hij dat perioden van vasoconstrictie en vasodilatatie elkaar afwisselden.

Vasodilatatie in de kou is van groot belang voor de handvaardigheid. Mensen waarbij CIVD sterk optreedt hebben warmere vingers en kunnen meer presteren.

4.2 Zenuwstelsel

De voortgeleidingssnelheid van zenuwen neemt af naarmate de temperatuur van een zenuw lager is (Clark en Edholm, 1985). Vanggaard (1975) vond een vrijwel lineaire afname van de voortgeleidingssnelheid bij een afnemende lokale huidtemperatuur van 1,34 m/s per graad Celsius. Bij blootstelling van tenminste 5 minuten aan temperatu-

ren lager dan 10°C treedt zelfs in bepaalde typen zenuwvezel een nerveuze blokkade op (Basbaum, 1973).

De afname van de zenuwgeleidingssnelheid uit zich in een verminderde gevoeligheid van het sensorisch systeem (zoals afname van de tastgevoeligheid, minder informatie uit spierspoelen e.d.). Afname van de geleidingssnelheid van zenuwen is in het motorisch systeem merkbaar door onder andere een afname in de coördinatie en spierkracht.

4.3 Gewrichten

De temperatuur in een gewricht daalt meer dan spier-, kern- en gemiddelde huidtemperatuur bij blootstelling aan koude (Hunter e.a., 1952). Een daling van de temperatuur van de synoviale vloeistof doet de viscositeit toenemen. Alleen deze stijging in viscositeit is al afdoende om de toename in spierkracht te verklaren die nodig is om een gewricht in de kou te kunnen bewegen.

De verminderde beweeglijkheid van de gewrichten heeft ernstige gevolgen voor de handvaardigheid. Dit wordt goed geïllustreerd door een onderzoek van LeBlanc (1956). Acht proefpersonen deden twee testen: test A bestond uit het buigen van de vingers om een smalle plaat, hetgeen maximale flexie van het proximale interphalangeale gewricht nodig maakte, terwijl test B bestond uit een tiktaak, waarbij het gewricht ongeveer 15° flecteerde. Indien alleen de onderarm (zonder hand) werd gekoeld daalde de prestatie sterk op beide testen (Fig. 1). Indien de hand werd gekoeld daalde de prestatie het sterkst in de test waarbij een zwaar beroep werd gedaan op de gewrichten (test A). Bij koeling van alleen de vingers werd het verschil nog duidelijker. We kunnen uit dit onderzoek concluderen dat de gewrichten een belangrijke rol spelen bij de afname van de handvaardigheid. Het onderzoek van LeBlanc maakt echter ook duidelijk dat koeling van de spieren in de onderarm ook leidt tot een afname van de prestatie, en dat in zijn experimentele set-up de toegenomen viscositeit van de gewrichten niet het volledig nadelig effect van koude op de prestatie kan verklaren.

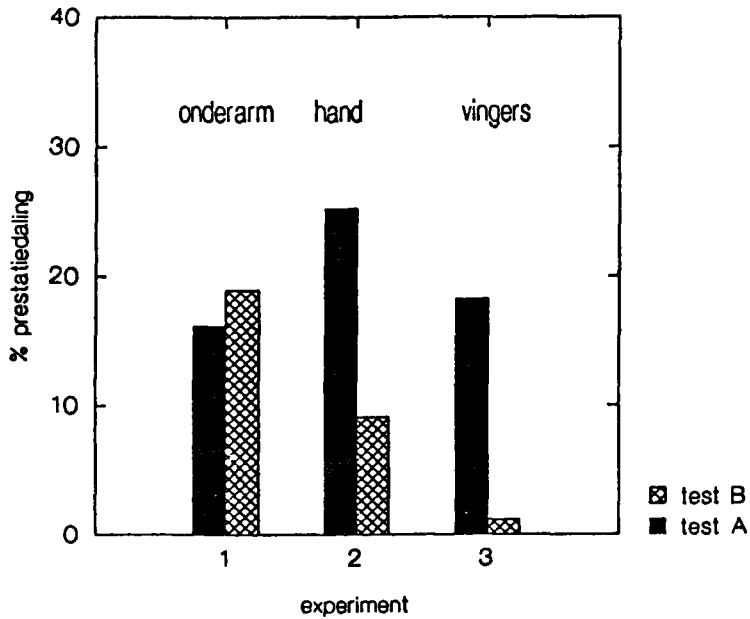


Fig. 1 Percentage prestatiedaling op 2 verschillende testen indien alleen de onderarm wordt gekoeld (experiment 1), indien de hand wordt gekoeld (experiment 2) en indien de vingers (experiment 3) worden gekoeld in ijswater. Test A bestond uit het buigen van de vingers rondom een smalle plaat en test B bestond uit een tiktaak (Leblanc, 1956).

4.4 Spieren

Koelen van de spieren geeft een sterke afname van het maximale vermogen dat de spieren kunnen leveren (Faulkner e.a., 1990). Deze daling is vooral toe te schrijven aan een vermindering van de contractiesnelheid, en nauwelijks aan vermindering van de kracht. Bij excentrische contracties neemt het vermogen dat spieren kunnen absorberen toe. Dit wordt door Faulkner e.a. vooral toegeschreven aan een toegenomen hoeveelheid gebonden cross-bridges in de spier.

4.5 Sensoriek

Een lage omgevingstemperatuur verlaagt de voortgeleidingssnelheid van de zenuwen en zal bovendien de drempelwaarde van sensoren in sommige gevallen veranderen. Hierdoor kan het sensorisch systeem minder gaan functioneren.

Onder het sensorisch systeem wordt verstaan de sensor en het zenuwstelsel vanaf de sensor tot en met het sensorisch gebied in de hersenschors. De sensoren omvatten de

5 zintuigen (oog, oor, smaak, reuk en tast), de sensoren in het bewegingsapparaat (spierspoel, peessensor, gewrichtsensor) en diverse sensoren in de huid zoals pijn-, tast- en thermosensoren. De relatie tussen tastgevoel en koude heeft wellicht een relatie met handvaardigheid en deze relatie is dan ook uitgebreid onderzocht.

Mackworth (1953) ontwikkelde een apparaat om de tastgevoeligheid te bepalen. Een liniaal met een ingefreesde V-vorm, waarbij de afstand tussen de zijkanten toenam, werd langzaam onder de vinger doorbewogen. De plek op de liniaal waarop de proefpersoon twee zijkanten kon detecteren werd bepaald, en als maat genomen voor tastgevoeligheid.

Mills (1956) bepaalde met deze liniaal de relatie tussen huidtemperatuur van de vinger en het discriminatievermogen. Gemiddeld over 25 personen verzamelde hij 175 getallenparen waardoor een kromme gefit kon worden die een sterke afname van het discriminatievermogen bij kou te zien gaf, met name onder 10°C.

Morton en Provins (1960) onderzochten met de liniaal van Mackworth (de zogenaamde V-test) de drempel waaronder de gevoeligheid afnam. De hand werd gestopt in een bak waarin lucht van -22°C werd geblazen en werd aldus afgekoeld tot een huidtemperatuur van -5°C. Daarna werd zij uit de bak gehaald en regelmatig werden de huidtemperatuur en de prestatie op de V-test bepaald. Aanvankelijk is het discriminatievermogen erg laag, maar bij een bepaalde huidtemperatuur verbetert het discriminatievermogen sterk. Indien één persoon de test meerdere malen uitvoerde bleek die drempel nauwelijks te veranderen. Van 3 personen worden de gegevens vermeld: bij ongeveer 3, 7 en 8 °C ligt de drempel. Gemiddeld over alle 20 proefpersonen vonden zij dat bij huidtemperaturen lager dan 20-25°C het discriminatievermogen was gereduceerd. Deze grens is echter volkomen arbitrair. De optelsom van alle afzonderlijke curves geeft een continue daling te zien van het discriminatievermogen bij een oplopende huidtemperatuur omdat er enorme verschillen bestonden in de drempel tussen de verschillende proefpersonen. In een andere test moesten de proefpersonen een vaste druk op een knop uitoefenen bij verschillende huidtemperaturen. De fout die men daarbij maakte was het grootst bij een lage huidtemperatuur, en nam af naarmate de huidtemperatuur steeg. Ook hier was bij veel proefpersonen een vaste drempel waarneembaar.

Voor druk worden met name de lichaampjes van Vater Pacini als sensor genoemd. Volgens Inman en Peruzzi (1961) is de drempelwaarde voor de generatie van een zenuwimpuls in het lichaampje verhoogd bij koude.

Irving (1963) liet druppeltjes en kogeltjes op de vingers van enkele proefpersonen vallen van verschillende hoogte en gewicht. De proefpersonen moesten aangeven of de druppeltjes en kogeltjes werden gevoeld. De gevoeligheid nam sterk af naarmate de vingertemperatuur lager was. Bij één proefpersoon werd gekeken naar de gevoeligheid van verschillende vingers. De ringvinger en middelvinger bleken het

meest gevoelig. Suzuki e.a. (1981) vonden overigens dat vingers van de dominante hand een hogere temperatuur hadden dan van de contralaterale hand, ook in koude. Dientengevolge is bij lage temperaturen de gevoeligheid van de vingers van de dominante hand wellicht groter. Suzuki e.a. hebben dit echter niet onderzocht.

Samenvattend kunnen we stellen dat de (tast-)gevoeligheid plotseling sterk afneemt wanneer de huidtemperatuur bij een individu onder een bepaalde waarde komt. De drempelwaarde verschilt van persoon tot persoon.

4.6 Taakprestatie

In een koude omgeving leiden afname van de voortgeleidingssnelheid van de motorische zenuwen, tezamen met de verminderde beweeglijkheid van de gewrichten en de afname in het te leveren vermogen door de spieren tot een verslechtering van de prestatie.

Teichner (1957) liet ruim 500 mannen een manipulatietest uitvoeren met de handen bij variabele lage temperaturen (-1 tot -37°C) en variabele windsnelheden (2,2 tot 13,4 m/s). Ze waren daarbij dik gekleed, maar de handen waren bij de vaardigheidstest onbedekt. De afname in taakprestatie bleek goed te correleren met de windchill-index, een maat voor afkoeling waarin omgevingstemperatuur en windsnelheid zijn verenigd.

In meeste onderzoeken na 1950 is niet zozeer gekeken naar de relatie tussen klimatologische variabelen en taakprestatie, maar is het accent komen te liggen op de relatie tussen huidtemperatuur van de hand en de prestatie op vaardigheidstaken. De huidtemperatuur wordt namelijk niet alleen bepaald door de omgevingscondities, maar ook door de fysiologische respons op de omgeving. De fysiologische respons is anders voor elk individu, en afhankelijk van lichaamssamenstelling, geslacht, ras en dergelijke.

Schiefer e.a. (1984) hebben een onderzoek gedaan waarbij zowel omgevingstemperatuur als huidtemperatuur als maat voor de kou zijn genomen. De prestatie op 4 verschillende taken werd gemeten bij omgevingstemperaturen van 6, 12, 18 en 24°C. Alleen knopen leggen ging slechter bij 18°C dan bij 24°C. De verschillen tussen 12 en 18°C en tussen 6 en 12°C waren voor vrijwel alle testen en proefpersonen significant. Afname van de prestatie wordt echter al gevonden bij vingertemperaturen van 20 tot 22°C. Bij een huidtemperatuur van 15 tot 16°C is de prestatiedaling 13%. Hij betrok in zijn onderzoek zowel het blanke als het zwarte ras, en mannen en vrouwen. De relatie tussen huidtemperatuur en prestatie bleek beter overeen te komen tussen verschillende groepen dan de relatie tussen omgevingstemperatuur en prestatie.

Riley en Cochran (1984b) hebben bij 35 mannen en 35 vrouwen gekeken naar de prestatie op 4 taken bij omgevingstemperaturen van 23,9°C, 12,8°C en 1,7°C. Na 15 minuten blootstelling mochten ze pas met de taken beginnen. De auteurs vonden geen verschil in prestatie indien de omgevingstemperaturen van 23,9 en 12,8°C met elkaar werden vergeleken. Wel vonden ze een sterke afname bij de lage temperatuur. De prestatie bij 1,7°C was 0,3 tot 15,7% minder dan bij 23,9°C. De temperatuur van de huid van de vinger was afhankelijk van de omgevingstemperatuur, taak, geslacht en individu.

Clark (1961) vindt geen prestatiedaling in knopen leggen indien de huidtemperatuur van de hand van 32,2 naar 15,6°C werd verlaagd. Bij 12,8°C was wel sprake van een aanzienlijke prestatiedaling. Na 40 minuten blootstelling was de prestatiedaling maximaal. De resultaten lijken niet overeen te komen met die van Schiefer e.a. (1984) die bij knopen leggen wel een prestatiedaling vonden indien de omgevingstemperatuur van 24 tot 18°C werd verlaagd. De overeenkomstige huidtemperaturen van de vinger waren 31,5 en 23,6°C. Clark deed zijn metingen echter gedurende het eerste uur van koude blootstelling, terwijl Schiefer e.a. pas begonnen na één uur gewenning en daarna 7 uur lang meetgegevens verzamelden. De verklaring in de gevonden verschillen kan daarom wellicht gevonden worden in de tijdsduur van blootstelling aan koude.

Regelmatig is in de literatuur gepoogd een drempelwaarde voor de huidtemperatuur vast te stellen waaronder een sterke afname van de prestatie plaatsvindt. Fox (1967) komt in zijn review tot de conclusie dat de drempel ongeveer 12 - 16°C bedraagt. Deze drempel is echter afhankelijk van taak en vooral van individu. Ook afkoelsnelheid, vochtgehalte en kerntemperatuur modificeren de drempel waaronder prestatieafname plaats vindt. In hoofdstuk 6 worden deze parameters besproken.

5 PARAMETERS DIE HANDVAARDIGHEID IN KOUDE BEÏNVLOEDEN

De afname van de handvaardigheid in koude is niet voor elk individu even sterk. In dit hoofdstuk worden enkele parameters die de verschillen in reactie op koude kunnen verklaren besproken.

5.1 Koude-acclimatisatie

Van acclimatisatie wordt gesproken indien fysiologische aanpassingen optreden in een veranderde omgeving. Mensen die gewend zijn aan een koude omgeving, kunnen lokale koude beter weerstaan dan zij die niet gewend zijn. Hierbij is niet alleen

harding (een psychologisch fenomeen) in het spel, maar zijn ook fysiologische veranderingen gevonden.

Bij Noorse vissers is aangetoond dat bloedvaten in hun handen in een koude omgeving eerder dilateren dan bij Noorse controle personen (Krog e.a., 1960). De warmte-afgifte tijdens de gedilateerde fase was echter niet verschillend tussen de "kou-gewende" mensen en de controles. Nelms en Soper (1962) verkregen identieke resultaten in de handen van Britse visfileerders. Zij wijzen op een belangrijke psychische factor. Bij eenzelfde watertemperatuur hadden de controles veel problemen (pijn en zelfs flauwvallen) terwijl de kou-gewenden geen problemen hadden.

De verschillen tussen fileerders en controlepersonen zijn niet alleen toe te schrijven aan acclimatisatie, maar kunnen ook te maken hebben met selectie. Wellicht hebben alleen mensen met een goede koude-resistentie dit beroep gekozen. Het is echter aannemelijk dat dit argument onvoldoende is om het gehele verschil te verklaren.

5.2 Koude-adaptatie

Van koude-adaptatie wordt gesproken indien een verandering optreedt van genetische aard door natuurlijke selectie op basis van chronische koude-expositie. Hierbij wordt met name gekeken naar verschillen in thermoregulatie tussen bevolkingsgroepen uit koude streken en warme streken.

Mensen afkomstig uit koude streken hebben een betere doorbloeding van de hand dan mensen die uit warme streken komen. Deze stelling wordt gestaafd door het merendeel van de onderzoeksresultaten.

Brown en Page (1952) toonden aan dat Eskimo's een grotere bloedstroom door de handen hebben dan Canadese studenten. Krog e.a. (1960) vonden geen verschil in bloedstroom tussen Lappen en controles, maar vonden wel dat de handen van Lappen in ijskoud water sneller een toename van de bloedstroom hadden (CIVD - zie paragraaf 4.1).

Bij een bepaalde omgevingstemperatuur hebben zwarte mannen koudere vingers dan blanke mannen (Wyndham e.a., 1964b). Schiefer e.a. (1984) hebben gekeken naar verschillen in prestatie van blanke en zwarte mannen en vrouwen bij omgevingstemperaturen van 6, 12, 18 en 24°C. Indien de gemiddelde prestatie op 4 handvaardigheidstesten tijdens luchttemperaturen van 24 en 6°C met elkaar wordt vergeleken, zien we bij zwarte mannen een daling van 19%, en bij zwarte vrouwen een daling van 10%. Voor de blanken is dit respectievelijk 1% en 4%. Ze concluderen uit hun onderzoek dat blanken dezelfde prestatie leveren als zwarten bij een omgeving die 6°C kouder is. Bij 24°C is er nauwelijks verschil in prestatie tussen blank en zwart, hoewel schroeven draaien door blanken beter gebeurt. Wellicht liggen culturele verschillen hieraan ten grondslag.

Iampietro e.a. (1959) vinden niet alleen een lagere huidtemperatuur bij zwarte mannen in koude condities, maar ook een sterk vertraagde CIVD-respons.

Concluderend kunnen we stellen dat mensen gewend aan kou (door beroep of streek van herkomst) een meer adequate reactie op koude vertonen dan niet-gewenden. Onderzoekresultaten wijzen er bovendien op dat de taakprestatie in de kou beter is bij gewenden.

5.3 Geslachtsverschillen

Wyndham e.a. (1964a) vonden dat bij 27°C luchttemperatuur vrouwen koudere vingers hadden dan mannen. Bij 5°C luchttemperatuur was er geen verschil. Riley en Allison (1979) vonden dat bij een omgevingstemperatuur van 1,7°C vrouwen iets warmere handen hadden (10,7 versus 10,1°C). Bij een omgevingstemperatuur van 12,8°C en 23,9°C waren de handen van mannen respectievelijk 0,3 en 0,6 graden warmer dan die van vrouwen. Zij vonden geen geslachtsverschil in de prestatie op een Purdue pegboard taak.

Vrouwen hebben een iets betere isolatie door een dikkere vetlaag onder de huid (Wyndham e.a., 1964a). Hierdoor zal de huid relatief snel afkoelen in een koude omgeving. Tevens kennen vrouwen een grotere mate van vasoconstrictie in reactie op koude (Green & Bell, 1987). Op grond van de dikkere vetlaag en de relatief grote mate van vasoconstrictie in reactie op koude, kan men een lagere huidtemperatuur verwachten bij vrouwen dan mannen in een koude omgeving. Uit de genoemde onderzoeken blijkt dit echter niet het geval te zijn. De verschillen in huidtemperatuur van de hand tussen man en vrouw bij een bepaalde omgevingstemperatuur zijn uitermate gering.

5.4 Leeftijd

Suzuki e.a. (1981) vergeleken de huidtemperatuur en knijpkracht van 10 ouderen (gemiddeld 43,2 jaar oud) met 11 jongeren (gemiddeld 25,5 jaar oud) bij een omgevingstemperatuur van 10 en 30°C. In de warme omgeving was de huidtemperatuur niet verschillend tussen ouderen en jongeren. In de koude omgeving hadden de ouderen warmere vingers dan jongeren. Wellicht neemt de mate waarin bloedvaten met vasoconstrictie kunnen reageren op koude af met de leeftijd. Ouderen kunnen in een koude omgeving dan ook minder gemakkelijk hun lichaamswarmte behouden, en lopen een grotere kans op onderkoeling.

Aangenomen dat de handvaardigheid beter is bij een hoge huidtemperatuur van de handen, zijn ouderen relatief minder perifeer geïnvaleerd in een koude omgeving

dan jongeren. Er is echter nog geen onderzoek bekend waarin dit nader is onderzocht.

5.5 Snelheid van circulatoire respons op koude

Indien een hand aan sterke koude is blootgesteld vinden we het verschijnsel CIVD. Er bestaan erg grote verschillen tussen individuen met betrekking tot het moment van optreden van CIVD. Zoals in de vorige paragraaf is weergegeven zijn deze verschillen gedeeltelijk te verklaren door gewenning aan de kou.

Bensel en Lockhart (1974) hebben onderzocht of er verschillen zijn in prestatie op een testbatterij bij mensen waar CIVD snel optreedt (binnen 450 seconden na immersie in koud water) en langzaam (tussen 450 en 900 sec. en meer dan 900 s). Mensen waarbij CIVD vroeg optreedt hebben aanvankelijk een betere prestatie dan de anderen, maar na enkele minuten is er geen significant verschil meer tussen beide groepen.

6 RISICO'S

De afname van de handvaardigheid in koude wordt versterkt door enkele factoren, die in dit hoofdstuk worden besproken. Tevens wordt ingegaan op het effect dat een verminderde handvaardigheid heeft op de kans op een ongeval.

6.1 Afkoelsnelheid

Langdurige matige kou heeft niet hetzelfde effect als korte hevige kou, ook als beiden een zelfde huidtemperatuur veroorzaken. Bij langdurige matige kou zijn de dieper gelegen weefsels lager van temperatuur geworden dan bij korte hevige kou. De lagere weefseltemperatuur heeft een nadelig effect op de gewrichten, spieren, circulatie en het zenuwstelsel.

Vandaar dat de combinatie van kou en duur van blootstelling is die het functioneren van de motoriek in koude bepaalt (Enander, 1984). Lockhart e.a. (1975) onderzochten de invloed van afkoelsnelheid op de prestatie op 4 verschillende taken. Zij verlaagden de huidtemperatuur van de vingers tot 18,3, 12,8 en 8,9°C in 5 of 50 minuten. De prestatie bleek afhankelijk van de afkoelsnelheid, huidtemperatuur en taak. Deze factoren waren echter niet onafhankelijk van elkaar. De afkoelsnelheid is met name erg invloedrijk bij lage huidtemperaturen. Bovendien lag bij de ene taak de drempel voor prestatieverlies bij een hogere huidtemperatuur dan bij een andere taak. Concluderend kan men stellen dat bij een gelijke huidtemperatuur een langduri-

ge blootstelling aan een lage omgevingstemperatuur meer risico inhoudt dan een kortdurende blootstelling.

In dit verband is het belangrijk op te merken dat de warmtegeleiding van water 25 maal groter is dan van lucht. Dit betekent dat de afkoelsnelheid in koud water vele malen groter is dan in lucht van dezelfde temperatuur.

6.2 Uitdroging

Roberts en Berberich (1988) vergeleken de verschillen in handtemperatuur tussen mensen met en zonder uitdroging in een koude omgeving. De uitdroging werd bewerkstelligd door ze inspanning te laten verrichten en vochtinname te reduceren. De vingers van de groep met gereduceerde vochtinname werden kouder dan die van de controlegroep.

Het menselijk lichaam bestaat voor een groot gedeelte uit water. Water heeft een grote warmtecapaciteit. Een verandering in omgevingstemperatuur zal daarom niet zo snel leiden tot een verandering van de lichaamstemperatuur. Indien de vochtvoorraad wordt verminderd, zoals in het experiment van Roberts en Berberich, zal een koude omgeving snel de lichaamstemperatuur beïnvloeden. De belangrijkste verklaring voor de gereduceerde vingertemperatuur is er in gelegen dat door de hypovolemie er minder bloed gaat stromen door de perifere lichaamsdelen. Hierdoor wordt ook de warmtetoevoer aan de extremiteiten sterk verminderd.

6.3 Afname van de kerntemperatuur

Bij een lichte daling van de kerntemperatuur probeert de mens zijn lichaamswarmte te behouden door perifere vasoconstrictie. Dit leidt tot afkoeling van de handen.

Experimentele verlaging van de temperatuur van het centrale zenuwstelsel (CZS) van dieren doet de arterio-veneuze anastomosen, die waarschijnlijk een belangrijke rol spelen in de thermoregulatie, sluiten (Hales & Iriki, 1977 en Grant, 1930, geciteerd in Clark, 1938). Het sympatische zenuwstelsel is waarschijnlijk hiervoor verantwoordelijk. Op deze wijze heeft de kerntemperatuur een directe invloed op de handtemperatuur.

Gaydos en medewerkers hebben zich de vraag gesteld of afkoeling van de kern de prestatie op een vaardigheidstest doet dalen, of dat het zo is dat alleen de huidtemperatuur van de handen bepalend is voor de prestatie.

Gaydos en Dusek (1958) lieten hun proefpersonen een complexe handvaardigheidstaak uitvoeren in 2 condities: één waarbij de handen werden gekoeld en de rest

van het lichaam warm werd gehouden en één waarbij de taak werd uitgevoerd in een koude omgeving. Zo gauw als de huidtemperatuur van de vinger een bepaalde waarde bereikte moest de test worden uitgevoerd. Er bleek geen verschil in prestatie te bestaan tussen beide condities. Op grond hiervan concluderen Gaydos en Dusek dat de huidtemperatuur bepalend is voor de prestatie. Wat men echter niet weet is hoe warm de mensen het gehad hebben onder de laag kleding: men heeft de kerntemperatuur niet gemeten, en die kan in beide condities best gelijk zijn geweest. In een ander experiment heeft Gaydos (1958) opnieuw 2 condities met elkaar vergeleken: één waarbij de handen warm waren en één waarbij de handen werden gekoeld. De temperatuur in de klimaatkamer was ongeveer 7°C. De prestatie daalde sterk indien de handen werden gekoeld. Er was echter geen sprake van prestatiedaling wanneer de handen warm waren, ondanks de daling van de gemiddelde huidtemperatuur tot waarden van 25,5°C. Hier merkt Gaydos op dat het lichaam gekoeld kan worden tot bijzonder lage waarden zonder dat dit effect heeft op de handvaardigheid.

De meest correcte wijze om het effect van kerntemperatuur op de handvaardigheid te onderzoeken zou zijn door de handtemperatuur gelijk te houden en de kerntemperatuur te variëren. Dergelijk onderzoek is nog niet uitgevoerd. Wel benadert het onderzoek van Tanaka e.a. (1983) bovenstaande opzet. Zij registreerden huid- en kerntemperatuur tijdens het zo snel mogelijk indrukken van knopjes in een koude omgeving. Zij vinden dat de prestatie niet alleen afneemt indien de huidtemperatuur van de hand verlaagt, maar ook indien de algemene thermische staat van het hele lichaam vermindert. De thermische staat van het gehele lichaam werd ingeschat door de gemiddelde huidtemperatuur en de kerntemperatuur te bepalen en onderling te wegen.

Clark en Flaherty (1963) gebruikten koeling of verwarming van beide handen afzonderlijk om te onderzoeken of de lokale huidtemperatuur bepalend is voor de prestatie. Indien één hand wordt gekoeld tot ongeveer 4,5°C daalt de prestatie van die hand en doet de temperatuur van de andere hand er niet meer toe. Wanneer echter de hand die de taak verricht warm gehouden wordt en de andere hand gekoeld wordt ziet men een verbetering van de prestatie. Dit lijkt in tegenspraak met de daling in de huidtemperatuur van de warme hand van ongeveer 2°C, die wordt gevonden. Deze lichte afname van de huidtemperatuur wordt toegeschreven aan een perifere vasoconstrictie. Koeling van één hand is onvoldoende om de kerntemperatuur te verminderen, dus deze variabele zal nauwelijks een rol spelen. Daar de auteurs geen fysiologische verklaring voor de prestatietoename kunnen bedenken, vermoeden zij dat dit een psychologisch effect is. Er was echter slecht gestandaardiseerd in dit experiment en het zou goed zijn indien de metingen eens werden overgedaan.

Ondanks de conclusies van Gaydos en Clark en medewerkers dat de lokale huidtemperatuur de voornaamste bepalende variabele is voor de handvaardigheid, lijkt de algemene thermische staat van het lichaam toch een belangrijke rol te spelen. Verder onderzoek naar de bijdrage van kern- en huidtemperatuur lijkt gewenst. De resultaten hiervan kunnen namelijk voor de praktijk een indicator vormen waar aan te grijpen om vermindering van de handvaardigheid in kou te voorkomen.

Indien de kerntemperatuur zover is gedaald dat de mens gaat rillen en klappertanden is het aannemelijk dat de handvaardigheid zeer ernstig wordt verminderd.

6.4 Ongevallen

Enander (1987) registreerde in een koude omgeving van ongeveer 5°C meer fouten dan bij 21°C tijdens het scoren op verschillende testen, zoals het benoemen van cijfers als even of oneven.

Er bestaan 2 theorieën om de toename van fouten in koude te verklaren: de eerste werd voorgesteld door Teichner in 1958 en hield in dat koude de aandacht van de taak afleidde. De tweede theorie veronderstelt dat in koude het arousal niveau toeneemt, hetgeen leidt tot een vermindering van de prestatie.

Naast deze toename in fouten door "psychische" factoren in een koude omgeving, neemt de handvaardigheid af door fysiologische factoren. De combinatie van beiden kan leiden tot een verhoogde kans op ongevallen in arbeidssituaties in een koude omgeving. Voor zover bekend zijn er weinig epidemiologische onderzoeken verricht waar de relatie tussen omgevingstemperatuur en ongevallen is onderzocht. In Tsjechoslowakije vermelden Bena e.a. (1960) en in het toenmalige Oost-Duitsland Strache (1972) (gecteerd in Müller, 1982) een verhoogd voorkomen van ongevallen bij werkers en werksters in koelcellen.

In het eigen onderzoek van Müller (1982) worden 462 ongevallen geanalyseerd van visfileerders. De ongevalskans neemt toe naarmate de werkdag vordert. Dit kan komen door vermoeidheid, maar ook door geleidelijke inwerking van koude en daardoor verminderde handvaardigheid. De kans op een ongeval bij visfileerders is 12 tot 13 keer hoger dan het gemiddelde van de totale beroepsgroep waartoe de fileerders behoren.

Naast het verhoogde risico op ongevallen door verminderde handvaardigheid, zijn er in koelcellen nog andere verhoogde risico's zoals een verhoogde kans op uitglijden op een bevroren ondergrond. Vaak wordt ook gewerkt met gevaarlijk gereedschap, zoals fileermessen bij visfileerders.

Het lijkt belangrijk onderzoek te initiëren dat de relatie tussen de verminderde handvaardigheid en de ongevalskans vastlegt omdat dan duidelijk kan worden

gemaakt in welke mate de beschreven fysiologische en psychologische verschijnselen in koude hun uitwerking hebben in arbeidssituaties.

7 BEPERKING VAN PRESTATIEVERLIES

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de oplossingen die zijn bedacht om het verlies van handvaardigheid in een koude omgeving tot een minimum te beperken.

7.1 Handschoenen

Het dragen van handschoenen of wanten levert bij veel soorten arbeid ernstige beperkingen op. Bij veel taken is het wel mogelijk handschoenen te dragen waarvan de vingerdelen zijn afgeknipt. Riley en Cochran (1984a) onderzochten het effect van deze halve handschoenen op de testresultaten van verschillende taken (reactie, Purdue pegboard, zo snel mogelijk met een potlood op tafel tikken, knijpkracht etc.). De omgevingstemperatuur werd op 4,4, 10,0 en 15,6°C ingesteld. De huidtemperatuur van vinger en hand was hoger met handschoen dan zonder. Toch bleek er geen verschil in prestatie te bestaan met en zonder handschoen. Het kan zijn dat het dragen van de handschoen het uitvoeren van de taak bemoeilijkte en de hogere huidtemperatuur bijdroeg aan verbetering van het resultaat, zodat de netto uitkomst nihil is.

Vincent en Tipton (1988) lieten zien dat het aantrekken van handschoenen nadat de hand al gekoeld is, een nadelig effect heeft op de maximale knijpkracht. Zij adviseren dan ook om handschoenen uit te doen alvorens te beginnen aan een taak waarbij flinke knijpkracht vereist is.

7.2 Stralingswarmte

Met behulp van stralingswarmte kan warmte worden toegevoerd aan een hand in een koude omgeving. Bij ongeveer -18°C lieten Lockhart en Kiess (1971) 20 proefpersonen schroeven aandraaien, knopen leggen en andere taken uitvoeren met en zonder stralingswarmte op de handen. De prestatie nam flink toe met stralingswarmte. Er wordt verondersteld dat spieren, zenuwen en gewrichten een toename in temperatuur krijgen, en dat aldus de handvaardigheid wordt verbeterd.

7.3 Handvaardigheidstraining in een koude omgeving

In een bijzonder elegant onderzoek hebben Clark en Jones (1962) gekeken wat het effect van training op prestatie in de koude was. In Fig. 2 staan de resultaten van hun onderzoek weergegeven.

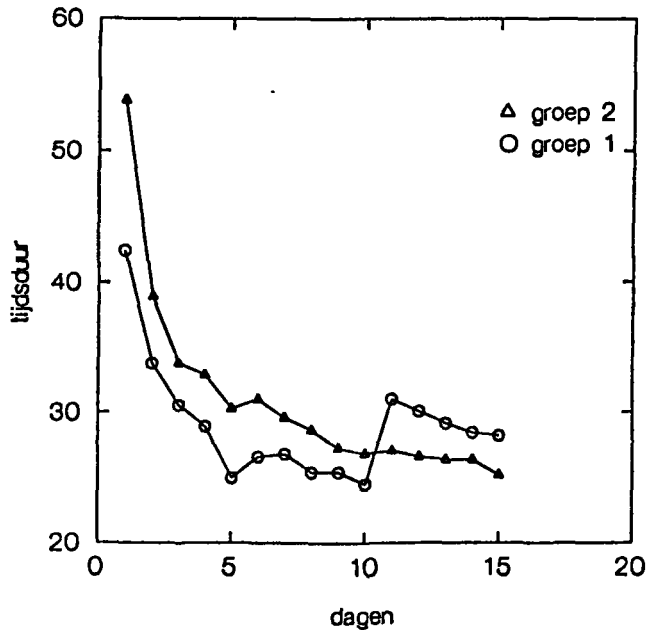


Fig. 2 Gemiddelde tijdsduur benodigd om 15 knopen te leggen. Groep 2 verkeerde 15 werkdagen in een omgevingstemperatuur van 7°C. Groep 1 had de eerste 10 dagen een omgevingstemperatuur van 32°C en de laatste 5 dagen een omgevingstemperatuur van 7°C (Clark & Jones, 1962).

Twee groepen van 10 personen legden 3 weken lang elke werkdag een aantal knopen in touwen. Groep 2 werkte continu in de kou (7°C). Groep 1 werkte de eerste 10 dagen in de warmte (32°C) en de laatste 5 dagen in de kou van 7°C. Duidelijk is te zien dat de eerste 2 weken het in de kou langer duurt voordat de knopen zijn gelegd. Verder is goed zichtbaar dat zich enige trainingseffecten voordoen: de prestatie wordt steeds beter in de loop van de tijd. In de laatste week is de prestatie van de groep die altijd in de kou heeft gewerkt beter dan de groep die voor het eerst in de kou komt. Dit betekent dat het trainingsresultaat afhankelijk is geweest van de temperatuur waarin de training heeft plaatsgevonden!

Jan Roelof Kruithof, die trainde voor de elfstedentocht in een koelcel, is misschien een lichtend voorbeeld: mensen die in de kou handelingen moeten verrichten kunnen de training hiervoor ook het best uitvoeren in een koude omgeving.

7.4 Andere maatregelen

Een mogelijkheid om het verlies van handvaardigheid in de kou te beperken kan zijn het insmeren van de handen met vet. Met name wanneer de handen in koud water de taak moeten uitvoeren, kan vet door zijn isolerende werking warmteverlies tegengaan. Er is echter geen literatuur waarin de werkzaamheid is getest.

8 CONCLUSIES

In een koude omgeving probeert de mens zijn warmte zo goed mogelijk vast te houden. Hij bewerkstelligt dit onder meer door de circulatie door de handen te verminderen. Hierdoor zal de temperatuur van de handen sterk afnemen.

Bij een huidtemperatuur van de hand lager dan ongeveer 12 tot 16°C wordt een daling gevonden van de handvaardigheid. Deze drempel is zeker niet absoluut, maar hangt af van diverse factoren.

Op de eerste plaats zijn er grote verschillen tussen mensen onderling, die te maken hebben met huidsamenstelling en reactiviteit van het vaatstelsel.

Op de tweede plaats hangt de drempel af van de taak die wordt uitgevoerd. Op een fijne manipulatieve taak zal eerder vermindering van handvaardigheid worden gevonden dan bijvoorbeeld een tik-taak.

Op de derde plaats is de afkoelsnelheid van belang. Bij korte, snelle koeling zijn de diepe weefsels in de hand nog redelijk op temperatuur en is de prestatiedaling gering. Indien iemand lange tijd aan koude is blootgesteld en de kerntemperatuur dientengevolge is gedaald, wordt het effect van lokale koude versterkt. Een vochttekort resulteert in koudere handen bij lage omgevingstemperaturen en wellicht tot een vermindering van de handvaardigheid.

Naast een afname van de handvaardigheid in een koude omgeving, vinden we een sterke afname van de kracht die kan worden geleverd en van de volhoudtijd van een submaximale contractie. De reactietijd wordt nauwelijks door koude beïnvloed. Prestatie op cognitieve taken kan verbeteren in de koude, maar gaat vaak gepaard met een toename in het aantal fouten.

Bij weefseltemperaturen lager dan ongeveer 10°C is de zenuwgeleiding ernstig belemmerd, en soms zelfs geblokkeerd. De hand wordt dan gevoelloos. Zo ver moet men het nooit laten komen.

Hoewel vrouwen en mannen duidelijk verschillen in huidsamenstelling en reactiviteit van het vaatstelsel, worden slechts geringe verschillen gevonden in de handtemperatu-

ren in een koude omgeving. Ook in taakprestatie lopen de beide geslachten niet uiteen.

Bij mensen die regelmatig met hun handen in een koude omgeving zitten, treedt acclimatisatie op. Hun handen zijn beter doorbloed dan niet geacclimatiseerden, en behouden mogelijk daardoor een goede handvaardigheid.

Bevolkingsgroepen uit koude streken kennen ook betere aanpassingen dan mensen uit warme streken. Zo hebben blanken warmere vingers dan zwarten bij een lage omgevingstemperatuur.

Om het verlies van handvaardigheid in een koude omgeving te beperken komt men op grond van het besproken onderzoek tot de volgende aanbevelingen:

- Indien de taak het toelaat kunnen handschoenen worden gedragen die het warmteverlies beperken.
- Een stralingsbron boven de handen kan extra warmte toevoeren.
- Oefenen van de taak in een koude omgeving leidt tot verbetering van de handvaardigheid van die taak.
- De kerntemperatuur mag niet dalen. Met lichamelijke inspanning is de kerntemperatuur te verhogen.
- Er dient voldoende te worden gedronken.
- Blanken lijken meer geschikt voor arbeid in kou dan zwarten.

Tenslotte dient er nog op gewezen te worden dat er aanwijzingen zijn dat de verminderde handvaardigheid in een koude omgeving gepaard gaat met een verhoogd ongevalsrisico.

REFERENTIES

- Barnes, W.S. & Larson, M.R. (1985). Effects of localized hyper- and hypothermia on maximal isometric grip strength. *Am. J. Phys. Med.* 64 (6), 305-314.
- Basbaum, C.B. (1973). Induced hypothermia in peripheral nerve: Electron microscopic and electrophysiological observations. *J. Neurocytol* 2, 171-187.
- Bensel, C.K. & Lockhart, J.M. (1974). Cold-induced vasodilatation onset and manual performance in the cold. *Ergonomics* 17 (16), 717-730.
- Bourassa, G.L. & Guion, R.M. (1959). A factorial study of dexterity test. *J. Appl. Psychol.* 43 (3), 199-204.
- Brown, G.M. & Page, J. (1952). The effect of chronic exposure to cold on temperature and blood flow of the hand. *J. Appl. Physiol.* 5, 221-227.
- Burton, A.C. & Edholm, O.G. (1955). *Man in a cold environment.* Edward Arnold Ltd. London.
- Clark, E.R. (1938). Arterio-venous anastomoses. *Physiol. Rev.* 18, 229-247.
- Clark, R.E. (1961). The limiting hand skin temperature for unaffected manual performance in the cold. *J. Appl. Physiol.* 45, 193-194.
- Clark, R.E. & Flaherty, C.F. (1963). Contralateral effects of thermal stimuli on manual performance capability. *J. Appl. Physiol.* 18 (4), 769-771.
- Clark, R.E. & Jones, C.E. (1962). Manual performance during cold exposure as a function of practice level and the thermal conditions of training. *J. Appl. Psychol.* 46, 276-280.
- Clark, R.P. & Edholm, O.G. (1985). *Man and his thermal environment.* Edward Arnold Ltd. London.
- Clarke, R.S.J., Hellon, R.F. & Lind, A.R. (1958). The duration of sustained contractions of the human forearm at different muscle temperatures. *J. Physiol.* 143, 454-473.
- Dusek, E.R. (1957). Manual performance and finger temperatures as a function of ambient temperature. Headquarters Quartermaster Research and Engineering Center Environmental Protection Research Division Technical Report No. EP-68.
- Ellis, H.D. (1982). The effect of cold on the performance of serial choice reaction time and various discrete tasks. *Human factors* 24(5), 589-598.
- Enander, A. (1984). Performance and sensory aspects of work in cold environments: a review. *Ergonomics* 27 (4), 365-378.
- Enander, A. (1987). Effects of moderate cold on performance of psychomotor and cognitive tasks. *Ergonomics* 30 (10), 1431-1445.
- Faulkner, J.A., Zerba, E. & Brooks, V. (1990). Muscle temperature of mammals: cooling impairs most functional properties. *Am. J. Physiol.* 259 (Regulatory Integrative Comp. Physiol. 28), R259-R256.
- Fleishman, E.A. & Ellison, G.D. (1962). A factor analysis of fine manipulative tests. *J. Appl. Psychol.* 46(2), 96-105.
- Fox, W.F. (1967). Human performance in the cold. *Human Factors* 9, 203-220.
- Gaydos, H.F. (1958). Effect on complex manual performance of cooling the body while maintaining the hands at normal temperatures. *J. Appl. Physiol.* 12, 373-376.
- Gaydos, H.F. & Dusek, E.R. (1958). Effects of localized hand cooling versus total body cooling on manual performance. *J. Appl. Physiol.* 12, 377-380.

- Greene, T.C. & Bell, P.A. (1987). Environmental stress. In: Sex differences in human performance. M.A. Baker (Ed.). John Wiley & Sons, Chichester.
- Hales, J.R.S. & Iriki, M. (1977). Differential thermal influences on skin blood flow through capillaries and arteriovenous anastomoses and on sympathetic activity. *Bibl. Anat.* 16, 189-191.
- Holewijn, M. (1991). Temperature effects on EMG and muscle function. Proceedings of the 8th ISEK congress, Baltimore 1990. In Press.
- Hunter, J., Kerr, E.H. & Whillans, M.G. (1952). The relation between joint stiffness upon exposure to cold and the characteristics of synovial fluid. *Canadian J. Medical Science* 30, 367-377.
- Iampietro, P.F., Goldman, R.F., Buskirk, E.R. & Bass, D.E. (1959). Response of negro and white males to cold. *J. Appl. Physiol.* 14, 798-800.
- Inman, D.P. & Peruzzi, P. (1961). The effects of temperature on the responses of Pacinian corpuscles. *J. Physiol.* 155, 280-301.
- Irving, L. (1963). Effect of temperature on sensitivity of the finger. *J. Appl. Physiol.* 18(6), 1201-1205.
- Krog, F., Folkow, B., Fox, R.H. & Lange Andersen, K. (1960). Hand circulation in the cold of Lapps and North Norwegian fishermen. *J. Appl. Physiol.* 15(4), 654-658.
- LeBlanc, J.S. (1956). Impairment of manual dexterity in the cold. *J. Appl. Physiol.* 9, 62-64.
- Lewis, T. (1930). Observations upon the reactions of the vessels of the human skin to cold. *Heart* 15, 177-208.
- Lockhart, J.M. & Kiess, H.O. (1971). Auxiliary heating of the hands during cold exposure and manual performance. *Human Factors* 13, 457-465.
- Lockhart, J.M., Kiess, H.O. & Clegg, T.J. (1975). Effect of rate and level of lowered finger surface temperature on manual performance. *J. Appl. Psychol.* 60, 106-113.
- Lotens, W.A. (1989). A simple model for foot temperature simulation. Report IZF 1989-8, TNO Institute for Perception, Soesterberg. Abstract in Proceedings 3rd Int. Conf. Envir. Erg., Helsinki, August 8-12, (1988), p. 68.
- Mackworth, N.H. (1953). Finger numbness in very cold winds. *J. Appl. Physiol.* 5, 533-543.
- Mills, A.W. (1956). Finger numbness and skin temperature. *J. Appl. Physiol.* 9, 447-450.
- Morton, R. & Provins, K.A. (1960). Finger numbness after acute local exposure to cold. *J. Appl. Physiol.* 15, 149-154.
- Müller, R. (1982). Arbeit in Kälte. Insbesondere beim Löschen von Forst- und Frischfisch. Forschungsbericht Nr. 298. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund.
- Nelms, J.D. & Soper, D.J.G. (1962). Cold vasodilatation and cold acclimatization in the hands of British fish filleters. *J. Appl. Physiol.* 17(3), 444-448.
- Pease, D.G., Ludwig, D.A., Green, E.B. & Millslagle, D.G. (1980). Immediate and follow-up effects of cold on performance time and its components, reaction time and movement time. *Perceptual and Motor Skills* 50, 667-675.
- Pieters, A.M.J. (1990). Handvaardigheid in de kou. Doctoraalscriptie Gezondheidswetenschappen Leiden.

- Raman, E.R. & Vanhuysse, V.J. (1975). Temperature dependence of the circulation pattern in the upper extremities. *J. Physiol.* 249, 197-210.
- Riley, M.W. & Allison, D.M. (1979). Hand-skin temperature and dexterity. Proceedings of the Human Factors society - 23rd annual meeting.
- Riley, M.W. & Cochran, D.J. (1984a). Partial gloves and dexterity. Proceedings of the Human Factors society - 28th annual meeting.
- Riley, M.W. & Cochran, D.J. (1984b). Dexterity performance and reduced ambient temperature. *Human Factors* 26 (2), 207-214.
- Roberts, D.E. & Berberich, J.J. (1988). The role of hydration on peripheral response to cold. *Military Medicine* 153 (12), 605-608.
- Schiefer, R.E., Kok, R., Lewis, M.I. & Meese, G.B. (1984). Finger skin temperature and manual dexterity - Some intergroup differences. *Appl. Ergonomics* 15, 135-141.
- Suzuki, K., Ijichi, M., Matsuki, T., Seki, A., Tanaka, H., Ogata, H. & Noro, K. (1981). The hand and environment. *J.U.O.E.H.* 3 (2), 109-115.
- Tanaka, M., Tochiwara, Y., Yamazaki, S., Ohnaka, T. & Yoshida, K. (1983). Thermal reaction and manual performance during cold exposure while wearing cold-protective clothing. *Ergonomics* 26 (2), 141-149.
- Teichner, W.H. (1957). Manual dexterity in the cold. *J. Appl. Physiol.* 11, 333-338.
- Teichner, W.H. (1958). Reaction time in the cold. *J. Appl. Psychol.* 42, 54-59.
- Van de Linde, F.J.G., Havenith, G. & Heus, R. (1990). Contact met koude materialen. Report IZF 1990 C-15, TNO Institute for Perception, Soesterberg.
- Vanggaard, L. (1975). Physiological reactions to wet-cold. *Aviat. Space Environ. Med.* 46 (1), 33-36.
- Vaughan, J.A., Higgins, E.A. & Funkhouser, G.E. (1968). Effect of body thermal state on manual performance. *Aerospace Med.* 1310-1315.
- Vincent, M.J. & Tipton, M.J. (1988). The effects of cold immersion and hand protection on grip strength. *Aviat. Space Environ. Med.* 59, 738-741.
- Wyndham, C.H., Morrison, J.F., Williams, C.G., Bredell, G.A.G., Peter, J., Von Rahden, M.J.E., Holdsworth, L.D., Van Graan, C.H., Van Rensburg, A.J. & Munro, A. (1964a). Physiological reactions to cold of Caucasian females. *J. Appl. Physiol.* 19, 877-880.
- Wyndham, C.H., Ward, J.S., Strydom, N.B., Morrison, J.F., Williams, C.G., Bredell, G.A.G., Peter, J., Von Rahden, M.J.E., Holdsworth, L.D., Van Graan, C.H., Van Rensburg, A.J. & Munro, A. (1964b). Physiological reactions of Caucasian and Bantu males in acute exposure to cold. *J. Appl. Physiol.* 19, 583-592.