

Ser. 4
S 44-4

1^o esc.

Bijstelling en aanvulling van een inventarisatiemethode voor het vastleggen van klimaatomstandigheden in industriële bedrijven

Onderzoek

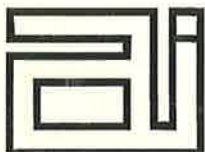
Uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid
door de Maatschappelijke Hoofdgroep Technologie,
Afdeling Binnenmilieu

Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden



NIA0008877

Directoraat-Generaal van de Arbeid



S 44-4

Jc

Bijstelling en aanvulling van een inventarisatiemethode voor het vastleggen van klimaatomstandigheden in industriële bedrijven

Onderzoek

Uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid
door de Maatschappelijke Hoofdgroep Technologie,
Afdeling Binnenmilieu

Nederlands Instituut voor
Arbeidsomstandigheden NIA
bibliotheek-documentatie-informatie
De Boelelaan 32, Amsterdam-Buitenveldert

stamb.nr. 1005
plaats Ser. 4, S44.4 1^{ste}.
datum 27 MAART 1990

auteurs: ir. R. D. Crommelin
J. M. Koppers

december 1989

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Cox, C.

Bijstelling en aanvulling van een inventarisatiemethode voor het vastleggen van klimaatomstandigheden in industriële bedrijven / auteur: C. Cox; met medew. van: R. D. Crommelin, J. M. Koppers.
- Voorburg: Directoraat-Genraal van de Arbeid van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. - Ill. - ([Studie] / Directoraat-Generaal van de Arbeid, [Arbeidsinspectie], ISSN 0921-9218; S 44-4).

Uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid door de Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO. - Met lit. opg.

ISBN 90-5307-044-3

SISO 614.3 UDC 697: 334.71

Trefw.: klimaatomstandigheden; industrieën.

INHOUD

Blz.

	SAMENVATTING	5
1.	INLEIDING	7
2.	DE BEOORDELING VAN - DE MATE VAN - DE THERMISCHE BELASTING	9
	2.1 Inleiding	9
	2.2 Warme omgevingen	10
	2.3 Koude omgevingen	13
	2.3.1 Koudebelasting van het gehele lichaam	13
	2.3.2 Lokale koudebelasting	15
	2.4 Tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling	18
	2.4.1 Algemeen	18
	2.4.2 Tocht	18
	2.4.3 Temperatuurwisselingen	22
	2.4.4 Asymmetrische warmtestraling	24
	2.4.4.1 Lichte activiteiten	24
	2.4.4.2 Matig zware en zware activiteiten	26
	2.5 Conclusies	29
	2.6 Literatuur	30
3.	DE METING VAN DE GEMIDDELDE STRALINGSTEMPERATUUR	36
	3.1 Inleiding	36
	3.2 Beschrijving van de apparatuur	37
	3.3 Bepaling van de responsietijd	39
	3.4 Vergelijking van de meting met de warmtestralingsmeter en de globe-temperatuur-meting	39
	3.5 Vergelijking van de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de uit de plane radiant temperature berekende gemiddelde stralingstemperatuur	44
	3.6 Conclusies	45
	3.7 Literatuur	47

INHOUD (vervolg)**Blz.**

4.	PERSONAL MONITORING VAN KLIMAAT	48
4.1	Inleiding	48
4.2	Beschrijving van de meetset	50
4.3	Responsietijden	53
4.3.1	Luchttemperatuur	53
4.3.2	Relatieve vochtigheid	56
4.3.3	Plane radiant temperature	57
4.3.4	Samenvatting van de resultaten	57
4.4	Draagproeven	58
4.5	Bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur	58
4.6	Ontwikkelingen in het buitenland	60
4.7	Conclusies	60
4.8	Literatuur	61
5.	KENTALLEN	63
5.1	Inleiding	63
5.2	Kentallen	63
5.2.1	Vorm en afmetingen	63
5.2.2	Warmtetransport door transmissie	64
5.2.3	Warmtetransport door ventilatie	65
5.2.4	Accumulerend vermogen van de gebouwconstructie	68
5.2.5	Interne warmtebronnen	69
5.2.6	Zoninstraling	70
5.3	Voorbeeld van toepassing: zuivelfabriek	72
5.3.1	Omschrijving	72
5.3.2	Vorm en afmetingen	74
5.3.3	Warmteverlies door transmissie	74
5.3.4	Warmtetransport door ventilatie	77
5.3.5	Accumulerend vermogen	78
5.3.6	Interne warmtebronnen	79
5.3.7	Zoninstraling	79

INHOUD (vervolg)**Blz.**

5.4	Voorbeeld van toepassing: staalfabriek	80
5.4.1	Omschrijving	80
5.4.2	Vorm en afmetingen.	80
5.4.3	Warmteverlies door transmissie	82
5.4.4	Warmtetransport door ventilatie	84
5.4.5	Accumulerend vermogen	84
5.4.6	Interne warmtebronnen	85
5.4.7	Zoninstraling	86
5.5	Overzicht van de resultaten	86
5.6	Literatuur	88
6.	DE RELATIE TUSSEN KLIMAAT EN PRESTATIE	90
6.1	Inleiding	90
6.2	De invloed van de thermische belasting op de prestatie: theorie	91
6.2.1	De arousal-theorie	91
6.2.2	De distraction-theorie	93
6.2.3	De attentie-theorie	93
6.3	De invloed van warmte op de prestatie	93
6.3.1	De invloed van warmte op de prestatie bij fysieke arbeid	94
6.3.2	De invloed van warmte op de prestatie bij mentale taken	99
6.3.2.1	Thermisch comfortabele condities	99
6.3.2.2	Gematigd warme condities	100
6.3.2.3	Extreme condities	102
6.3.2.4	Combinatie van warmte en geluid	105
6.3.2.5	Discussie en conclusies	106
6.4	De invloed van koude op de prestatie	107
6.4.1	De invloed van koude op de prestatie bij fysieke arbeid	107
6.4.2	De invloed van koude op de prestatie bij mentale taken	110
6.5	Thermisch klimaat en bedrijfsongevallen	111
6.6	Conclusies	113
6.7	Literatuur	116

SAMENVATTING

In het kader van de ontwikkeling van een instrumentarium voor de vastlegging van klimaatomstandigheden in bedrijven is door de Afdeling Binnenmilieu van MT-TNO een methode voor een inventarisatie van klimaatomstandigheden in bedrijven opgesteld. Naar aanleiding van een beproeving van de inventarisatiemethode is deze in het onderhavige onderzoek bijgesteld en aangevuld. De volgende onderwerpen zijn nader uitgewerkt:

- de beoordeling van - de mate van - de thermische belasting;
- de meting van de gemiddelde stralingstemperatuur;
- de vastlegging van het persoonlijk klimaat van een werknemer;
- kentallen voor de thermische karakterisering van industriële gebouwen;
- de relatie tussen klimaat en prestatie/productiviteit.

Op basis van een literatuurstudie zijn voorstellen voor criteria en grenswaarden voor de beoordeling van de mate van de thermische belasting gedaan. Voor warme omgevingen kan het percentage nat huidoppervlak als beoordelingsmaatstaf worden gebruikt. Voor de koudebelasting van het gehele lichaam kan de benodigde kledingisolatie als beoordelingsmaatstaf worden toegepast. Voor het opstellen van beoordelingscriteria voor de plaatselijke koudebelasting (van handen, voeten en hoofd) is nader onderzoek wenselijk.

Een literatuurstudie naar criteria voor de beoordeling van de belasting door tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling in industriële ruimten heeft slechts beperkte informatie opgeleverd voor het opstellen van criteria. Er worden voorstellen voor criteria gedaan voor de beoordeling van tocht bij lichte arbeid, temperatuurwisselingen, stralingsasymmetrie bij lichte arbeid en de warmtestraling van stralingsbronnen bij matig zware en zware arbeid.

Uit een inventarisatie van commercieel verkrijgbare apparatuur voor een directe en snelle meting van de gemiddelde stralingstemperatuur is gebleken dat er momenteel één dergelijk apparaat commercieel verkrijgbaar is. De nauwkeurigheid voldoet aan de door de International Organization for Standardization (ISO) vereiste nauwkeurigheid.

In het kader van de vastlegging van het "persoonlijk" klimaat van een werknemer is een meetset voor de personal monitoring van de luchttemperatuur, de relatieve vochtigheid en de plane radiant temperature samengesteld en beproefd in het laboratorium. De meetset kan aan een riem of een draagtuigje worden bevestigd en zo door de werknemer zelf worden

gedragen. De responsietijden van de meetset voor de bovengenoemde grootheden zijn korter dan 20 seconden. Snel wisselende klimaatomstandigheden ten gevolge van het productieproces of beweging van de werknemer kunnen met de set worden vastgelegd.

Er zijn kentallen opgesteld c.q. geselecteerd waarmee het thermisch gedrag van bedrijfsruimten kan worden gekarakteriseerd. De kentallen hebben betrekking op de vorm en afmetingen van de ruimte, het warmtetransport door transmissie en ventilatie, het accumulerend vermogen van de gebouwconstructie en de zonbelasting. Het gebruik van de kentallen wordt gedemonstreerd aan de hand van twee voorbeelden.

Op basis van een literatuurstudie is een inventarisatie gemaakt van gegevens over de invloed van de thermische belasting c.q. klimaat op de arbeidsproductiviteit c.q. arbeidsprestatie. Uit de door de verschillende onderzoekers gepresenteerde effecten van de thermische belasting op de prestatie komt geen eenduidig beeld naar voren. De vergelijking van de gegevens wordt bemoeilijkt door het grote aantal van invloed zijnde factoren. Het meest duidelijk is afname van de prestatie bij werk met de handen onder invloed van koude. Op basis van het literatuuronderzoek zijn, voor zover mogelijk, kwantitatieve relaties tussen klimaat en prestatie afgeleid.

1. INLEIDING

In het kader van de ontwikkeling van een instrumentarium voor de vastlegging van klimaatomstandigheden in bedrijven zijn door de Afdeling Binnenmilieu van MT-TNO, in samenwerking met de afdeling Thermofysiologie van IZF-TNO, de afgelopen jaren twee projecten uitgevoerd.

In het eerste onderzoek vond een selectie plaats van een meetmethode voor het thermisch klimaat, waarmee de thermische belasting van werkende mensen kan worden afgeleid. Op basis van het onderzoek wordt gepleit voor de vastlegging van de basisgrootheden van het klimaat (luchttemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur, luchtsnelheid en luchtvochtigheid) en de invloedsfactoren activiteit en kleding. De thermische belasting van de mens wordt bepaald met de door de ISO (International Organization for Standardization) voorgestelde thermofysiologische modellen.

In vervolg op dit onderzoek werd een onderzoek uitgevoerd waarin een methode voor een inventarisatie van klimaatomstandigheden in een bedrijf werd opgesteld en beproefd in twee bedrijven. De op te stellen inventarisatiemethode diende te worden gebaseerd op de huidige stand van de techniek. Eventuele tekortkomingen van de methode die zouden blijken bij de beproeving zouden in een latere fase worden bijgesteld.

Bij het beproeven van de inventarisatiemethode in een zuivelbedrijf en een staalbedrijf kwamen een aantal tekortkomingen van de methode naar voren. De voornaamste knelpunten waren:

- De uitvoering van de methode in een bedrijf vergt veel tijd, zowel voor de metingen als voor de uitwerking;
- Er is geen apparatuur voor een directe, snelle en (binnen 5 K) nauwkeurige meting van de gemiddelde stralingstemperatuur;
- Het vastleggen van het persoonlijk klimaat van werknemers met wisselende werkplekken in bedrijven met grote ruimtelijke variaties van het klimaat en variaties van het klimaat in de tijd vergt veel tijd en is onnauwkeurig;
- De beoordeling van de mate van de thermische belasting is, uitgaande van de berekende waarden voor de verschillende indices met de door de ISO voorgestelde modellen, niet mogelijk door het ontbreken van grenswaarden voor de indices voor de industriële situatie;
- Er zijn geen methoden voor de beoordeling van de thermische belasting ten gevolge van tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling in industriële ruimten.

Uit overleg met beleidsambtenaren van het Directoraat-Generaal van de Arbeid bleek dat het wenselijk is de knelpunten op te lossen, zodat de inventariatiemethode kan worden gebruikt voor het op gestandaardiseerde wijze vastleggen van de klimaatomstandigheden in industriële bedrijven.

Bij het inventariseren van de ernst en de omvang van de klimaatproblemen in de industrie wil het Directoraat-Generaal inzicht verkrijgen in de globale kostenconsequenties van het oplossen van probleemsituaties. In dat kader is het wenselijk om de invloed van het klimaat op de arbeidsproductiviteit c.q. de arbeidsprestatie te kunnen kwantificeren.

Voor de keuze van maatregelen of technische oplossingen voor het verbeteren van klimaatomstandigheden in een bedrijfsruimte is inzicht nodig in het thermisch gedrag van die ruimte. Het thermisch gedrag kan worden gekarakteriseerd met behulp van kentallen.

In het onderhavige onderzoek zijn de volgende onderwerpen nader uitgewerkt:

- de beoordeling van - de mate van - de thermische belasting;
- de meting van de gemiddelde stralingstemperatuur;
- de vastlegging van het persoonlijk klimaat van een werknemer;
- kentallen voor de thermische karakterisering van industriële gebouwen;
- de relatie tussen klimaat en prestatie/productiviteit.

2. DE BEOORDELING VAN -DE MATE VAN- DE THERMISCHE BELASTING

2.1 Inleiding

In [2.1] is voor de beoordeling van de thermische belasting op de arbeidsplaats de voorkeur uitgesproken voor toepassing van de van toepassing zijnde ISO-normen. Op dit moment zijn door ISO de volgende normen c.q. ontwerpnormen uitgebracht:

(concept-) Norm

Gebied

ISO 7730 [2.2]

Moderate thermal environments.
Determination of the PMV and PPD indices
and specification of the conditions for
thermal comfort.

Beoordeling van de
thermische belasting
in gematigde condities.
Bepaling van de PMV
en PPD volgens Fanger.

ISO 7243 [2.3]

Hot environments -Estimation of the heat
stress on a working man, based on the
WBGT-index (wet bulb globe temperature).

Beoordeling van de
thermische belasting
in een warme omgeving.
Bepaling van de WBGT en
eventueel de toelaatbare
blootstellingstijd.

ISO/DIS 7933 [2.4]

Hot environments - Analytical
determination and interpretation of
thermal stress using calculation of
required sweat rate.

Beoordeling van de
thermische belasting in
een warme omgeving.
Bepaling van de benodigde
zweetverdamping, percentage nat
huidoppervlak en eventueel de
toelaatbare blootstellingstijd.

ISO/TC159/SC5/GT1/N146 [2.5]

Evaluation of cold environments.

Beoordeling van de thermische belasting in een koude omgeving.
Bepaling van de vereiste kledingisolatie en eventueel de toelaatbare blootstellingstijd.

Daarnaast zijn er nog concept-normen voor de bepaling van het metabolisme [2.6] (ISO/DIS 8996 Determination of metabolic rate) en de kledingisolatie [2.7] (ISO/DP 9920 Estimation of the thermal characteristics of a clothing ensemble).

Bij het opstellen en beproeven van een inventarisatiemethode voor het vastleggen van klimaatomstandigheden in bedrijven [2.8] is gebleken dat in ISO-modellen voor de beoordeling van het thermisch klimaat in warme en koude omgevingen [2.4, 2.5] niet voorzien in de beoordeling van de mate van de klimaatbelasting. In de ISO-documenten [2.4, 2.5] worden alleen criteria gegeven ter voorkoming van gezondheidsrisico's. Hinder ten gevolge van een klimaatbelasting, in het kader van de ARBO-wet ook als belasting gezien, zal al optreden bij lagere niveau's van klimaatbelasting. Hiervoor worden geen criteria gegeven.

Door middel van een literatuurstudie is nagegaan welke grenswaarden zouden kunnen worden toegepast voor de beoordeling van de mate van de thermische belasting. Hierbij is zoveel mogelijk uitgegaan van grootheden die met de ISO-modellen kunnen worden berekend.

In de ISO-documenten voor warme en koude omgevingen [2.4, 2.5] worden geen criteria voor de beoordeling van de belasting door tocht, temperatuurwisselingen en stralingsasymmetrie gegeven. Op basis van een literatuuronderzoek, onder andere een on-line literatuurrecherche, zijn voorlopige criteria opgesteld voor de beoordeling van de belasting door tocht, stralingsasymmetrie en temperatuurwisselingen in industriële ruimten.

2.2 Warme omgevingen

Voor de beoordeling van de thermische belasting in warme omgevingen wordt door veel onderzoekers de benodigde zweetverdamping om de warmtebalans in evenwicht te houden voorgesteld [2.9]: Heat Stress Index (Belding en Hatch), P4SR (McArdle), ITS (Givoni),

SW_{req} (ISO/DIS 7933). Deze benodigde zweetverdamping kan worden vertaald in het zogenaamde percentage nat huidoppervlak. Dit is gedefinieerd als de verhouding van de benodigde warmte-afgifte door verdamping en de maximaal mogelijke warmte-afgifte door verdamping in de actuele situatie. Het percentage nat huidoppervlak kan met behulp van de berekeningsmethodiek in ISO/DIS 7933 worden berekend.

Het percentage nat huidoppervlak kan worden gebruikt voor de beoordeling van de mate van de thermische belasting in warme omgevingen. Tussen de natheid van de huid en onbehaaglijkheid of onaangenaamheid blijkt een duidelijke relatie te bestaan. De onbehaaglijkheid neemt lineair toe met de natheid van de huid tot een percentage nat huidoppervlak van circa 80%. Daarboven neemt de onbehaaglijkheid snel toe [2.10]. Uit een vergelijking van diverse studies concludeert Berglund [2.10] dat de grens tussen behaaglijk en onbehaaglijk ligt bij een percentage nat huidoppervlak van circa 25%.

Gagge [2.11] geeft het volgende overzicht van het verband tussen het percentage nat huidoppervlak en onbehaaglijkheid:

percentage nat huidoppervlak	uitspraak
0 -20%	behaaglijk
20%	licht onbehaaglijk
60%	onbehaaglijk
80%	zeer onbehaaglijk
100%	ondraaglijk

Deze indeling komt redelijk overeen met de indeling van de Heat Stress Index (HSI). De HSI komt in principe overeen met het percentage nat huidoppervlak. De beoordeling op basis van de HSI is als volgt:

HSI	beoordeling
0	geen thermische belasting
10-30	lichte tot matige belasting
40-60	zware hittebelasting
70-90	zeer zware hittebelasting
100	maximale belasting

Bolijn [2.12] stelt de volgende beoordeling van de thermische belasting op basis van het percentage nat huidoppervlak voor:

percentage nat huidoppervlak	beoordeling
< 20%	behaaglijk
20 - 50%	onbehaaglijk, matige belasting
50 - 80%	zeer onbehaaglijk, zware belasting
> 80%	zeer zware belasting

In [2.13] wordt het verband tussen het percentage nat huidoppervlak en de acceptatie. Deze grafiek is gebaseerd op gegevens van Berglund [2.13]. Uitgaande van de aanbeveling van ASHRAE te streven naar een thermisch klimaat dat door 80% van de personen als acceptabel wordt beschouwd, wordt in [2.13] een grenswaarde voor het percentage nat huidoppervlak afgeleid van 32%. Daarnaast wordt de veronderstelling gemaakt dat bij kortdurende blootstelling of cyclische blootstelling aan een warme omgeving en een neutrale omgeving acceptatie van de warme toestand toeneemt. Er wordt tevens opgemerkt dat de acceptatie wordt beïnvloed door de verwachtingen ten aanzien van het klimaat onder de gegeven omstandigheden. Wanneer van de bovenstaande situatie sprake is wordt een streefwaarde van 50% acceptatie gekozen. Dit leidt tot een maximale waarde van het percentage nat huidoppervlak van 48%.

ISO/DIS 7933 [2.4] stelt dat bij niet-geacclimatiseerde personen een maximaal percentage nat huidoppervlak van 85% kan optreden. Bij geacclimatiseerde personen bedraagt het maximale percentage 100%.

Samenvattend kan worden gesteld dat het percentage nat huidoppervlak een geschikte parameter is voor de beoordeling van de mate van de thermische belasting in warme omgevingen. Op basis van het bovenstaande overzicht van grenswaarden van verschillende auteurs wordt de beoordelingsschaal voorgesteld:

percentage nat huidoppervlak	beoordeling
<20%	lichte belasting
20% - 50%	matige belasting
50% - 80%	zware belasting
>80%	zeer zware belasting

2.3 Koude omgevingen

2.3.1 Koudebelasting van het gehele lichaam

De gemiddelde huidtemperatuur is een goede indicator van de thermische belasting en behaaglijkheid in koude omgevingen [2.10, 2.16]. Op basis van de gemiddelde huidtemperatuur is een uitspraak mogelijk over de thermische behaaglijkheid van het gehele lichaam. Criteria worden gegeven door Gagge [2.11]. Met behulp van diverse thermofysiologische modellen [2.17, 2.18, 2.19, 2.20] van verschillende complexiteit kan de gemiddelde huidtemperatuur worden berekend.

In het ISO-document met betrekking tot de beoordeling van de thermische belasting in koude omgevingen [2.5] van Holmer wordt een methode voorgesteld waarmee de benodigde kledingisolatie voor het in evenwicht houden van de warmtebalans van het menselijk lichaam wordt bepaald. Voor de beoordeling van de lokale thermische belasting (handen, voeten, gezicht) door koude wordt de zogenaamde Wind Chill Index voorgesteld. Holmer ziet het document vooral als een discussiestuk [2.5].

Bij de bepaling van de benodigde kledingisolatie wordt onderscheid gemaakt tussen $I_{req,min}$ en $I_{req,neutral}$. $I_{req,min}$ is de benodigde kledingisolatie om de warmtebalans van het lichaam in evenwicht te houden bij een lichaamstemperatuur die lager is dan normaal. Hierbij is sprake van een hoge fysiologische belasting. Wanneer de aanwezige kledingisolatie gelijk is aan $I_{req,min}$ zal de thermische omgeving als enigzins koud worden ervaren [2.5]. Berekening van de PMV volgens ISO 7730 [2.2] voor een aantal waarden van $I_{req,min}$ bij verschillende omgevingscondities en metabolismen (ontleend aan de figuren uit [2.5]) levert waarden op tussen -1,1 en -1,3. Dit komt overeen met een waardering van (enigzins) koel en sluit dus goed aan bij de door Holmer gegeven waardering. Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij een aantal berekeningen de waarden van een aantal variabelen buiten de bijbehorende toepassingsgrenzen van het model van Fanger vielen. Wanneer de aanwezige kledingisolatie lager is dan $I_{req,min}$, rekening houdend met effecten van houding, beweging en wind [2.15], is beperking van de blootstellingstijd gewenst in verband met afkoeling van het lichaam. Holmer stelt als limiet aan het warmteverlies van het lichaam 40 Wh/m².

$I_{req,neutral}$ is de benodigde kledingisolatie bij een normale lichaamstemperatuur, waarbij sprake is van geen bijzondere fysiologische belasting. De thermische omgeving zal als neutraal worden ervaren. Berekening van de PMV volgens ISO 7730 [2.2] voor een aantal waarden van $I_{req,neutral}$ bij verschillende omgevingscondities en metabolismen (ontleend aan de figuren uit [2.5]) levert waarden op tussen -0,3 en -0,8. Dit komt overeen met een waardering van neutraal tot enigzins koel en sluit dus eveneens goed aan bij de door Holmer gegeven waardering. Ook hier geldt de opmerking dat bij een aantal berekeningen de waarden van een aantal variabelen buiten de bijbehorende toepassingsgrenzen vielen. Wanneer de aanwezige kledingisolatie gelijk is aan $I_{req,neutral}$ verschaft de kleding voldoende isolatie om de warmtebalans van het lichaam in evenwicht te houden bij normale of verhoogde gemiddelde huid- en lichaamstemperatuur. Waarden van de kledingisolatie hoger dan $I_{req,neutral}$ kunnen aanzienlijke transpiratie en vochtabsorptie in de kleding veroorzaken. De effectieve kledingisolatie kan dan daardoor afnemen. In deze situatie bestaat ook gevaar op "post-exercise cooling". $I_{req,neutral}$ dient te worden beschouwd als de maximale kledingisolatie.

Holmer stelt dat I_{req} enerzijds gebruikt kan worden als een maat voor de thermische belasting en anderzijds als een richtlijn voor de keuze van adequate kleding.

Met betrekking tot het gebruik als maat van de thermische belasting kan de benodigde kledingisolatie worden beschouwd als een veiligheidsfactor in verband met bescherming tegen het klimaat. Holmer beveelt aan voor arbeidssituaties de criteria behorende bij de geringe fysiologische belasting ($I_{req,neutral}$) toe te passen. $I_{req,min}$ kan dienen als waarschuwingniveau. In uitzonderingssituaties (noodsituaties) en wanneer men met ervaren personen te maken heeft zouden de criteria behorende bij de hoge fysiologische belasting ($I_{req,min}$) kunnen worden toegepast.

Door Aptel [2.20] is een onderzoek verricht waarin de benodigde kledingisolatie en de aanwezige kledingisolatie van werknemers in koel- en vriesruimten zijn vergeleken. Bij waarden van I_{req} tot 1,5 clo bleek de aanwezige kledingisolatie, overigens niet gecorrigeerd voor houding, beweging en luchtsnelheid, nagenoeg gelijk te zijn aan $I_{req,neutral}$. Bij waarden van $I_{req,min}$ boven 1,5 à 2 clo bleek de gemiddelde aanwezige kledingisolatie lager dan $I_{req,min}$. Het verschil is echter niet significant. Een onzekerheid bij de resultaten van Aptel vormt het metabolisme dat met behulp van een arbeidsanalyse en tabellen is bepaald. De onnauwkeurigheid van deze methode is relatief groot.

Het achterblijven van de aanwezige kledingisolatie bij hoge benodigde kledingisolatie is het gevolg van het moeilijk kunnen realiseren van een hogere kledingisolatie met extra kleding.

Op grond van het bovenstaande wordt voorgesteld voor de beoordeling van de mate van thermische belasting van het gehele lichaam in koude omgevingen de door Holmer voorgestelde methodiek toe te passen. Hierbij wordt de volgende beoordelingsschaal voorgesteld:

situatie	beoordeling
$I_{cl,res} > I_{req,neutral}$	geen koudebelasting, gevaar voor "after exercise-chill" en mogelijk optreden van warmtebelasting
$I_{cl,res} = I_{req,neutral}$	neutraal
$I_{req,min} < I_{cl,res} < I_{req,neutraal}$	matige belasting
$I_{cl,res} < I_{req,min}$	zware belasting (berekening toelaatbare blootstellingstijd noodzakelijk)

$I_{cl,res}$ wordt gedefinieerd als de aanwezige kledingisolatie, rekening houdend met de effecten van houding, beweging en luchtsnelheid (zie ook [2.15]).

Ten aanzien van de berekening van de toelaatbare blootstellingstijd wordt opgemerkt dat hierbij een aantal individuele factoren een rol spelen [2.24]:

- acclimatisatie;
- fysieke conditie;
- antropometrie (lichaamsoppervlak, dikte van de vetlaag).

Deze factoren zijn niet in het model van Holmer opgenomen.

2.3.2 Lokale koudebelasting.

Naast de koudebelasting van het gehele lichaam kan de lokale koudebelasting van de extremiteiten (handen, voeten en hoofd) worden onderscheiden. In de Nederlandse praktijk

zal deze lokale koudebelasting vaak maatgevend zijn voor de beoordeling van de mate van de thermische belasting door kou.

Holmer stelt in [2.5] voor de beoordeling van de thermische belasting door afkoeling van onbedekte lichaamsdelen de Wind Chill Index voor. De experimentele basis voor deze index was de meting van de afkoelsnelheid van cilindres met water die stonden opgesteld in extreme koude op de Zuidpool [2.25]. De resultaten van deze experimenten werden geëxtrapoleerd naar de afkoelsnelheid van een oppervlak met een temperatuur gelijk aan die van de huid (33°C). Deze index is geschikt voor het beoordelen van het risico van letsel van de blote huid (bijvoorbeeld bevriezing) ten gevolge van excessieve afkoeling in het buitenklimaat [2.5, 2.9, 2.22]. De grenswaarden hebben betrekking op situaties met een hoge fysiologische belasting.

Ten aanzien van het gebruik van de WCI voor het beoordelen van de lokale koudebelasting wordt opgemerkt dat een oppervlakte-temperatuur van 33°C een goed uitgangspunt is voor voorhoofd en nek. Voor handen en voeten zal de huidtemperatuur bij een koudebelasting echter lager zijn. De Wind Chill Index kan derhalve niet worden toegepast. Ook kan de invloed van kleding (handschoenen, schoenen) niet worden verdisconteerd [2.23]. Een belangrijke factor met betrekking tot de afkoeling van handen en voeten is het contact met voorwerpen of materialen. Een belangrijke plaats neemt hierbij het contact met water in. Op dit moment zijn er geen modellen waarmee de temperatuur van handen en voeten in contact met lucht, water, en materialen of voorwerpen kan worden voorspeld [2.26]. Nader onderzoek is gewenst. Een basis van een dergelijk model is aanwezig bij IZF- TNO.

In het kader van werkzaamheden voor de normcommissie Extreme Klimaatomstandigheden van het NNI zijn grenswaarden voor de huidtemperatuur van handen, onderarmen en voeten voorgesteld [2.23]. Deze luiden als volgt:

huidtemperatuur	beoordeling
25°C	grenswaarde in verband met behaaglijkheid
15°C	grenswaarde in verband met verminderde gevoeligheid
5°C	absolute ondergrens

Aptel [2.22] stelt voor om voor de beoordeling van de afkoeling van de handen de huidtemperatuur van de rug van de hand toe te passen. Deze is eenvoudig te meten. Als grenswaarde stelt hij voor een temperatuur van 24°C. Bij lagere waarden neemt de

handvaardigheid af. Dit kan leiden tot een afname van de hoeveelheid verrichte arbeid en de kwaliteit van de verrichte arbeid en tot ongevallen.

Op basis van de beschikbare informatie wordt de volgende beoordelingsmethode van de lokale koudebelasting van handen (en voeten) voorgesteld:

huidtemperatuur	beoordeling
> 25°C	lichte belasting
> 15°C en < 25°C	matige belasting
> 5°C en < 15°C	zware belasting
5°C	absolute ondergrens

Zolang er nog geen modellen beschikbaar zijn voor het berekenen van huidtemperaturen dient de huidtemperatuur door meting worden vastgelegd.

Voor de beoordeling van de afkoeling van het hoofd wordt het gebruik van de Wind Chill Index voorgesteld. De WCI wordt berekend met de formule:

$$WCI = (10,45 + 10 \cdot \sqrt{v_{ar} - v_{ar}}) \cdot (33 - t_a)$$

waarin: v_{ar} = relatieve lichtsnelheid (m/s)

t_a = luchttemperatuur (°C)

Als beoordelingsschaal wordt voorgesteld [2.9]:

WCI	beoordeling
200	aangenaam, geen belasting
400	koel, lichte belasting
800	koud, matige belasting
1000	zeer koud, zware belasting
1200	extreem koud, zeer zware belasting

2.4 Tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling

2.4.1 Algemeen

Naast de thermische belasting van het lichaam als geheel (warmtebalans van het lichaam) kan, zoals reeds aangegeven in 2.3.2 de lokale belasting worden onderscheiden. In industriële ruimten zijn tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling veel voorkomende vormen van lokale belasting. In de ISO-documenten voor warme en koude omgevingen [2.4,2.5] worden geen criteria voor de beoordeling van de belasting door tocht, temperatuurwisselingen en stralingsasymmetrie in industriële ruimten gegeven. Voor gematigde binnenklimaatomstandigheden worden in de annex van ISO 7730 [2.2], die geen deel uitmaakt van de norm, aanbevelingen gegeven voor grenswaarden voor luchtsnelheid en asymmetrische straling.

Er is een literatuurstudie verricht, onder andere door middel van een on-line literatuur-recherche door CID-TNO in de bestanden IBSEDEX en NTIS, naar grenswaarden met betrekking tot genoemde aspecten. Op basis van de literatuurgegevens zijn -voorlopige-criteria voor de beoordeling van de thermische belasting door tocht, temperatuurwisselingen en asymmetrische straling opgesteld.

2.4.2 Tocht

De literatuurstudie heeft slechts zeer summiere informatie opgeleverd over de grenswaarden in verband met tocht voor personen in industriële ruimten. Er is veel onderzoek verricht naar criteria voor tocht met betrekking tot personen met een lichte activiteit. Gegevens voor personen met een hogere activiteit ontbreken [2.27]. Algemeen wordt gesteld dat personen met een hogere activiteit minder gevoelig zijn voor plaatselijke onbehaaglijkheid [2.27]. Daarnaast heeft men te maken met de acceptatie van de optredende luchtsnelheid. Een hoge(re) luchtsnelheid ten gevolge van lopen wordt geaccepteerd. Ook in de buitenlucht wordt een hoge(re) luchtsnelheid eerder geaccepteerd.

In [2.28] worden richtwaarden gegeven voor de maximale luchtsnelheid bij arbeid van verschillende zwaarte (zie tabel 2.1). Er wordt geen literatuurverwijzing bij de waarden gegeven.

Tabel 2.1 Richtwaarden voor luchtsnelheden [2.28].

Zwaarte van de arbeid	Dagbelasting (MJ)	Maximale luchtsnelheid (m/s)
zeer zwaar	> 16	1,0
zwaar	14-16	0,6
middelzwaar	12-14	0,4
licht	10-12	0,2 - 0,3
zeer licht	< 10	0,1 - 0,2

In de tabel komt tot uitdrukking dat de mens minder gevoelig is voor tocht naarmate het werk zwaarder wordt. De toelaatbare luchtsnelheid wordt niet afhankelijk gesteld van de luchttemperatuur.

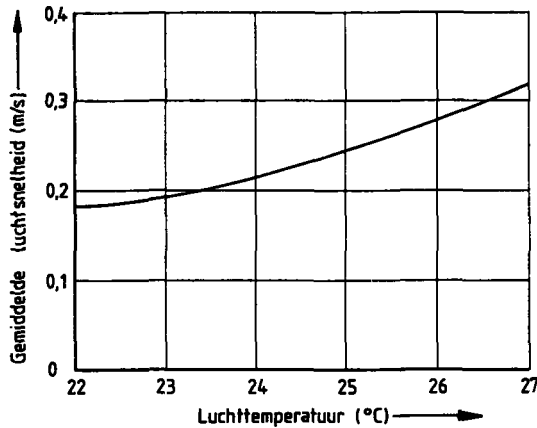
Een dagbelasting van 16 MJ komt overeen met een gemiddeld metabolisme van 165 W/m² gedurende 8 uur van de dag en van 72 W/m² gedurende de resterende 16 uur van de dag. Volgens [2.6] zou een metabolisme van 165 W/m² een matige activiteitsniveau betekenen. In [2.6] wordt echter niet de duur van de activiteit aangegeven. Een gemiddeld metabolisme van 165 W/m² gedurende acht uur zal slechts door een werknemer in een zeer goede fysieke conditie kunnen worden volgehouden. Het is derhalve juist een dagbelasting van 16 MJ als zeer zware arbeid te kwalificeren.

De maximale luchtsnelheden bij zeer lichte arbeid komen overeen met de algemeen gehanteerde criteria voor kantoor- en woonruimten [2.2, 2.27]. Uit recent onderzoek [2.30] is gebleken dat voor zittende en staande mensen, in rust of zeer licht werk verrichtend, naast de luchttemperatuur en de gemiddelde luchtsnelheid ook de fluctuaties van de luchtsnelheid van invloed zijn op de gewaarwording van tocht. De fluctuaties van de luchtsnelheid wordt uitgedrukt in de turbulentie-intensiteit en de frequentie van de snelheidswisselingen. Het rekening houden met de fluctuaties van de luchtsnelheid leidt tot lage maximaal toelaatbare luchtsnelheden van 0,14 tot 0,28 m/s bij luchttemperaturen van 18 tot 28°C, uitgaande van een percentage ontevreden van 20 % en een turbulentie-intensiteit tussen 40 en 60%. Dergelijke waarden van de turbulentie-intensiteit worden in ruimten normaliter aangetroffen.

De grenswaarden volgens Fanger kunnen worden aangehouden voor personen in industriële ruimten die lichte arbeid verrichten (metabolisme tot 70 W/m², zittend werk). Er dient evenwel opgemerkt te worden dat bij het onderzoek van Fanger sprake was van

extreem kritische condities: de personen zaten stil en de luchtstroom was op de nek gericht (het deel van het lichaam dat het gevoeligst is voor tocht).

In de Duitse norm DIN 1946 [2.43] worden eisen gesteld aan de luchtsnelheid in kantoor-ruimten. De eisen volgens DIN 1946 worden weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1 Maximaal toelaatbare gemiddelde luchtsnelheid bij een activiteitsniveau van 58 tot 80 W/m² een warmteverstand van de kleding van 0,5 tot 1 clo en een gemiddelde stralingstemperatuur die ongeveer gelijk is aan de luchttemperatuur.

Bij afwijkende omstandigheden zijn de volgende correcties mogelijk:

- bij verhoging van het activiteitsniveau met circa 28 W/m² verschuift de curve 0,04 m/s omhoog;
- bij verhoging of verlaging van de kledingsisolatie met 0,12 clo verschuift de curve 0,04 m/s omhoog respectievelijk omlaag;
- bij verhoging of verlaging van gemiddelde stralingstemperatuur met 4°C verschuift de curve 0,04 m/s omhoog respectievelijk omlaag.

De toelaatbare gemiddelde luchtsnelheden volgens DIN 1946 [2.43] zijn iets hoger dan die volgens Fanger [2.30], uitgaande van een turbulentie-intensiteit tussen 40 en 60%.

Men zou kunnen overwegen voor de "rustperiodes" van personen die matig zwaar en zwaar werk verrichten de grenswaarden voor de luchtsnelheid bij lichte arbeid toe te passen. Tijdens de rustperiodes is er sprake van een laag metabolisme en dus een hoge gevoeligheid voor tocht.

In [2.31] wordt een overzicht gegeven van het effect van wind op het thermisch comfort voor personen werkend in de buitenlucht (zie tabel 2.2). De gegevens gelden voor middelzware arbeid met standaardkleding. Aan de oorspronkelijke tabel is de waarde van de WCI (zie 2.3.2) toegevoegd.

Tabel 2.2 De invloed van de windsnelheid op het thermisch comfort bij middelzware arbeid en standaardkleding [2.31]. Tussen haakjes is voor elke combinatie van luchttemperatuur en de lichtsnelheid de waarde van de WCI aangegeven.

Windsnelheid (m/s)	Comfortabel	Luchttemperatuur (°C) waarbij waardering		
		Te fris	Te koud	Niet toelaatbaar
0	10 (240)	0 (345)	-14 (490)	-50 (865)
5	26 (195)	19 (390)	11 (610)	-11 (1225)
10	27 (190)	21 (385)	14 (610)	-4 (1185)
20	28 (210)	21,5 (405)	16 (600)	0 (1160)

De beoordeling volgens de WCI komt redelijk goed overeen met de beoordeling volgens [2.31], ondanks het feit dat de waarden uit [2.31] waarschijnlijk zijn gebaseerd op de warmtebalans van het gehele lichaam.

In een onderzoek naar het effect van de lichtsnelheid op de thermische behaaglijkheid bij matig zware arbeid [2.32] vonden Jones et al. dat bij een metabolisme van 130 W/m² bij een luchttemperatuur tussen 19 en 22°C een lichtsnelheid van 1,2 m/s als thermisch neutraal werd ervaren. De kledingisolatie had slechts een geringe invloed op de resultaten.

De uitgevoerde literatuurstudie heeft alleen beoordelingscriteria voor tocht opgeleverd voor personen die lichte arbeid (tot 70 W/m²) verrichten. De criteria gelden in principe voor kantoorarbeid, maar kunnen ook voor licht industrieel werk (tot 70 W/m²) worden toegepast. Op basis van [2.30] en [2.43] wordt de volgende beoordeling voorgesteld (metabolisme tot 70 W/m²):

Luchttemperatuur (°C)	Gemiddelde lichtsnelheid (m/s)	Beoordeling
18	> 0,14	belastend
20	> 0,16	belastend
22	> 0,18	belastend
24	> 0,22	belastend
26	> 0,28	belastend

Voor matig zware arbeid (metabolisme circa 110 W/m^2) zou, zoals in DIN 1946 [2.43], de toelaatbare gemiddelde luchtsnelheid met $0,04 \text{ m/s}$ kunnen worden verhoogd bij een toename van het metabolisme van 28 W/m^2 ten opzichte van 70 W/m^2 . De daaruit volgende grenswaarden zijn waarschijnlijk aan de conservatieve kant, omdat bij hoge luchttemperaturen en hoge activiteitsniveaus de extra afkoeling ten gevolge van een hoge luchtsnelheid als aangenaam zal worden ervaren. Dit blijkt ook uit het experiment van Jones et al. [2.23]. Er bestaat in deze situatie echter wel het gevaar voor "after-exercise cooling". Nader onderzoek naar criteria voor tocht bij matig zwaar en zwaar werk in industriële ruimten is gewenst.

De beoordeling van tocht c.q. windsnelheid in de buitenlucht kan geschieden op basis van de Wind Chill Index, zoals beschreven in 2.3.2.

2.4.3 Temperatuurwisselingen.

In [2.33] worden enkele fysiologische aspecten van temperatuurwisselingen belicht. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een plotselinge temperatuurdaling en -stijging enerzijds en snelle en langzame wisselingen anderzijds.

Bij een plotselinge temperatuurdaling worden de volgende criteria aangehouden:

- lichte arbeid: enkele graden;
- zware arbeid : meer dan 5 K.

Het effect van een temperatuurdaling wordt sterk beïnvloed door de kleding, luchtsnelheid (tocht) en luchtvochtigheid.

Voor plotselinge temperatuurstijgingen worden in [2.33] geen criteria gegeven omdat hierover onvoldoende bekend is. Wel is bekend dat een plotselinge temperatuurstijging een fysiologische belasting betekent, waarbij men buiten het behaaglijkheidsgebied komt.

Bij langzame temperatuurveranderingen worden de volgende criteria gegeven:

- lichte kleding (0,6 clo): maximaal 1 à 1,5 K per uur, per dag maximaal 5 K;
- standaard winterkleding (1,5 clo): 2 K per uur.

Bij kleine temperatuurveranderingen wordt het verlies aan thermische behaaglijkheid, in tegenstelling tot grote temperatuurwisselingen, pas na enige tijd bemerkt.

Voor lichte arbeid, zoals kantoorwerk, wordt in ASHRAE-Standard 55-1981 [2.29] voor periodieke temperatuurveranderingen een maximaal toelaatbare waarde van 1,1 K/uur (2°F/uur) en voor het temperatuurverloop een maximum van 0,6 K/uur (1°F/uur) aangegeven.

Sprague en McNall [2.34] stellen op basis van experimenten met stil zittende personen met lichte kleding (0,6 clo) in een proefkamer het volgende criterium voor de maximale temperatuurverandering voor:

$$\delta T = \sqrt{4,6 \cdot P}$$

waarin: δT = de temperatuurverandering in K

P = de periode in uren.

Voor een periode van 1 uur is een temperatuurverandering van 2,1 K toelaatbaar. Dit is een veel ruimer criterium dan dat van de ASHRAE [2.29]. De in [2.31] genoemde criteria zijn met het criterium van Sprague en McNall in overeenstemming als men uitgaat van perioden van kwartier tot circa een uur. Ook een temperatuurverandering van 5 K komt overeen als men uitgaat van een periode van ongeveer 5,5 uur. Dit is bijna een werkdag.

Op grond van het bovenstaande lijken de in [2.33] genoemde criteria en het criterium van Sprague en McNall [2.34] bruikbaar voor de beoordeling van temperatuurwisselingen in industriële ruimten. Indien men kleding met een hogere warmteweerstand draagt kunnen deze criteria wellicht nog wat ruimer worden gesteld.

De volgende beoordelingscriteria worden voorgesteld:

- plotseling temperatuurdaling:
 - lichte arbeid:

temperatuurverandering	beoordeling
< 2 K	niet belastend
> 2 K	belastend
 - zware arbeid:

temperatuurverandering	beoordeling
< 5 K	niet belastend
> 5 K	belastend

- temperatuurfluctuaties:

- lichte arbeid, lichte kleding:

temperatuurverandering	beoordeling
$\delta T < \sqrt{4,6 \cdot P}$	niet belastend
$\delta T < \sqrt{4,6 \cdot P}$	belastend

(δT : temperatuurverandering in K; P: periode in uren)

- zware arbeid:

langzame temperatuurfluctuaties niet belastend zolang aan criteria met betrekking van warmtebalans van het gehele lichaam is voldaan.

2.4.4 Asymmetrische warmtestraling

Door Ham [2.35] is een literatuurstudie gedaan naar de toepassing van stralingsverwarming. Uit het onderzoek kwam naar voren dat er onvoldoende inzicht bestaat in het verschil in acceptatie van stralingsintensiteiten bij laagtemperatuur (temperatuur tussen 20 en 250°C), middelhoge- (temperatuur tussen 120 en 450°C) en hoge-temperatuurstraling (temperatuur hoger dan 450°C). Door de grotere indringdiepte in de huid van hoge-temperatuurstraling is een grotere acceptatie van hoge stralingsintensiteiten te verwachten ten opzichte van middelhoge- en lage-temperatuurstraling.

2.4.4.1 Lichte activiteiten

Ten aanzien van de toelaatbare stralingsasymmetrie worden in dit rapport de resultaten van onderzoek door Fanger [2.36,2.37] en Langkilde [2.38] vermeld.

Fanger [2.36,2.37] heeft zittende personen in een proefkamer blootgesteld aan asymmetrische straling ten gevolge van een warme of koude wand en een warm of koud plafond. Het betreft hier lage-temperatuurstraling. Wanneer 5% ontevreden ten gevolge van de stralingsasymmetrie worden geaccepteerd gelden de volgende toelaatbare waarden voor stralingsasymmetrie:

warm plafond:	4 K
koud plafond:	14 K
warme wand:	23 K
koude wand:	10 K

De resultaten van het onderzoek gelden voor zittende personen in een thermische neutrale omgeving. Voor personen met een hogere activiteit zijn er geen gegevens beschikbaar.

Over het algemeen zijn zittende personen het gevoeligst voor een plaatselijke thermische belasting [2.37]. Voor personen buiten het thermisch neutrale gebied voor het lichaam als geheel dienen wellicht andere criteria te worden toegepast.

Fanger stelt tevens dat bij toepassing van middelhoge- en hoge- temperatuurstralers andere grenzen voor toelaatbare asymmetrische straling moeten worden gesteld in verband met de andere absorptie-eigenschappen van de huid voor kortgolvlige straling [2.37].

Langkilde [2.38] creëerde een stralingsasymmetrie met behulp van hoge-temperatuurstralers in de hoeken van wand met plafond van een hoge testruimte met afmetingen $l \times b \times h = 12 \times 10 \times 9$ m. Deze situatie is vergelijkbaar met een hal met stralingsverwarming in de praktijk. De proefpersonen zaten (58 W/m^2) of verrichtten staande licht werk (90 W/m^2). Twee waarden van de kledingisolatie werden onderzocht: 0,6 clo en 1,0 clo.

Langkilde vond een toelaatbare stralingsasymmetrie in verticale richting van 10 tot 14 K. Hierbij bedroeg het percentage ontevreden 5%. De personen verkeerden in een thermisch neutrale situatie met betrekking tot het gehele lichaam.

De verschillen met de resultaten van Fanger bij toepassing van een warm plafond [2.36] worden door Langkilde toegeschreven aan de grotere afstand tussen straler en persoon bij zijn experimenten. Ook het feit dat hoge-temperatuurstralers werden gebruikt kan een verklaring zijn voor de grotere acceptatie. Dit wordt door Langkilde niet genoemd. Ham [2.35] stelt dat de stralers een schuin naar beneden gerichte straling geven die het lichaam op een andere wijze belast dan een stralingsplafond. De uitkomsten zijn volgens hem dan ook gedeeltelijk in overeenstemming te brengen met de door Fanger bepaalde toelaatbare waarden voor asymmetrische straling bij verwarmde wanden. De waarden van Langkilde liggen tussen de waarden voor verwarmde plafonds (4 K) en verwarmde wanden (23 K).

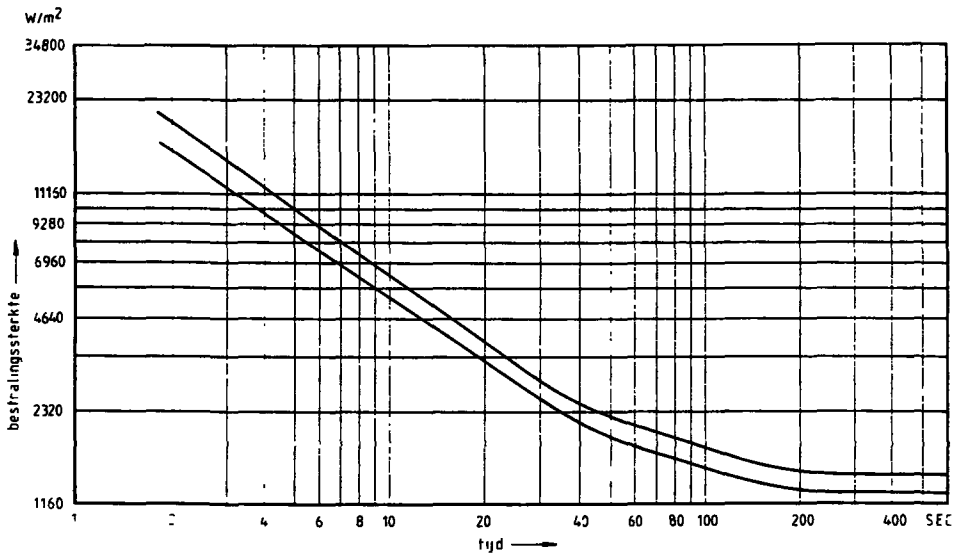
Op grond van het bovenstaande wordt voorgesteld de resultaten van het onderzoek door Langkilde toe te passen voor de beoordeling van asymmetrische straling voor personen die een lichte activiteit uitvoeren in een industriële ruimte. De volgende beoordeling van de stralingsasymmetrie wordt voorgesteld:

stralingsasymmetrie (K)	beoordeling	percentage ontevreden (%)
< 20	niet belastend	< 10
>20 en <30	licht belastend	≤±20
>30 en <40	matig belastend	≤±50
> 40	zwaar belastend	>±50

2.4.4.2 Matig zware en zware activiteiten

Personen met een hogere activiteit zullen minder gevoelig zijn voor een plaatselijke thermische belasting [2.37]. De thermische belasting van deze personen door asymmetrische straling kan waarschijnlijk het best beoordeeld worden op basis van de bestralingssterkte of de plane radiant temperature uit de richting van de stralingsbron.

Buettner geeft waarden voor de blootstellingstijd waarbij een ondraaglijke pijn optreedt bij warmtestraling op de onderarm [2.39] (zie figuur 2.2). Wanneer de bestralingssterkte onder 1400 W/m^2 blijft kan de warmte door het bloed in voldoende mate worden afgevoerd om het bereiken van een kritische temperatuur (42 à 45°C) te voorkomen.



Tijd tot ondraaglijke pijn optreedt wanneer de onderarm wordt bestraald door een elektrische straler met de aangegeven bestralingssterkte. Ongeveer 50% van alle 67 observaties bij 7 personen vielen tussen de twee lijnen.

Figuur 2.2 Blootstellingstijd tot ondraaglijke pijn optreedt wanneer de bovenzijde van de onderarm wordt bestraald met een elektrische radiator [2.39].

In ISO/DIS 7933, versie 1986 [2.40] is een beoordelingsmethode voor de belasting door warmtestraling uit één richting opgenomen. De bestralingssterkte uit de richting van de stralingsbron dient lager te zijn dan 2000 W/m^2 om pijn of verbranding te voorkomen. De

grenswaarde wordt genoemd in een annex die geen deel uitmaakt van de ontwerpnorm. De bestralingssterkte kan worden berekend uit:

$$R = \sigma \cdot \epsilon_{sk} \cdot [(\theta_{pr} + 273)^4 - (\theta_{sk} + 273)^4]$$

waarin:

- R = bestralingssterkte in W/m^2
- σ = constante van Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)
- ϵ_{sk} = emissiecoëfficiënt van de huid (0,95 voor langgolvlige straling)
- θ_{pr} = plane radiant temperature in $^{\circ}C$
- θ_{sk} = huidtemperatuur in $^{\circ}C$ (bijvoorbeeld $36^{\circ}C$)

De plane radiant temperature wordt gedefinieerd als de uniforme temperatuur van de halve ruimte die dezelfde bestralingssterkte geeft op één zijde van een klein vlakje als optreedt in de werkelijke, niet-uniforme omgeving.

De grenswaarde van $2000 W/m^2$ correspondeert met een blootstellingstijd van circa 60 seconden vóór het optreden van ondraaglijke pijn volgens Buettner.

In [2.41] wordt een overzicht gegeven van de effecten van warmtestraling op de onbedekte huid:

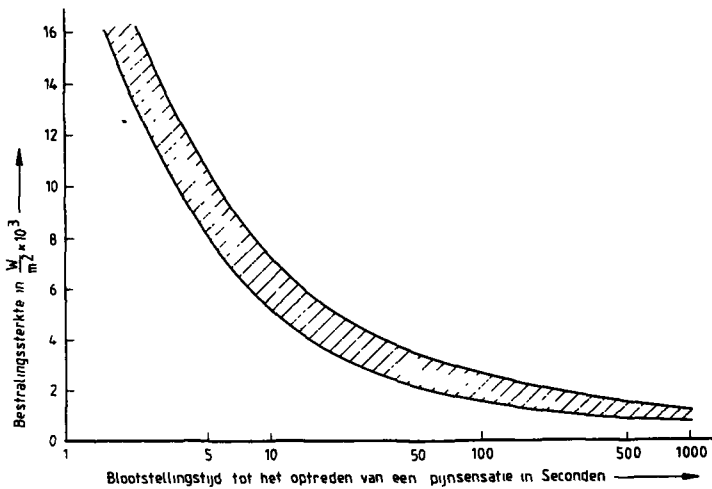
bestralingssterkte (W/m^2)	effect/consequenties
35	voelbaar
465-815	onbehaaglijke warmtesensatie bij langdurige blootstelling
1750-3500	pijnsensatie, slechts enkele minuten te verdragen

De waarde voor de pijnsensatie komt redelijk overeen met de door Buettner en ISO gegeven waarden.

In [2.41] wordt gewezen op de invloed van de golflengte. Een bestralingssterkte van $600 W/m^2$ ten gevolge van de zon op de onbedekte huid wordt als aangenaam ervaren. Een zelfde bestralingssterkte ten gevolge van een roodgloeiend metaaloppervlak wordt als onaangenaam ervaren. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat de langgolvlige straling

afkomstig van het metaaloppervlak een geringere indringdiepte heeft dan de kortgolvlige zonnestraling.

Voor de beoordeling van de bestralingssterkte op onbedekte delen van de huid worden in [2.42] grenzen gegeven in de vorm van een curve met de toelaatbare blootstellingstijd als functie van de bestralingssterkte. De toelaatbare blootstellingstijd heeft betrekking op de blootstellingstijd waarbij pijn begint op te treden. De curve wordt gegeven in figuur 2.3.



Figuur 2.3 Toelaatbare blootstellingstijd van onbedekte huid als functie van de bestralingssterkte [2.42].

Bij een bestralingssterkte van $2000 \frac{W}{m^2}$ is een blootstellingstijd van circa één minuut toelaatbaar. Dit komt overeen met de grenswaarden volgens Buettner.

Op grond van het bovenstaande wordt voor de beoordeling van de belasting ten gevolge van stralingsbronnen bij matige en zware arbeid de volgende beoordeling voorgesteld:

bestralingssterkte (W/m ²)	plane radiant temperature (°C)	beoordeling
< 35	< 50	niet belastend
35 tot 250	50 tot 80	licht belastend
250 tot 500	80 tot 100	matig belastend
500 tot 1000	100 tot 140	zwaar belastend
1000 tot 2000	140 tot 200	zeer zwaar belastend
> 2000	> 200	niet toelaatbaar zonder bescherming van de huid

2.5 Conclusies

Het is mogelijk om op basis van grootheden die kunnen worden berekend met de in de ISO-documenten genoemde of beschreven rekenmodellen een beoordeling van de mate van de thermische belasting van het lichaam als geheel te geven.

Voor warme omgevingen kan het percentage nat huidoppervlak als beoordelingsmaatstaf worden gebruikt. In koude omgevingen kan de benodigde kledingisolatie als beoordelingsmaatstaf worden toegepast. Voor het opstellen van algemene beoordelingscriteria voor plaatselijke koudebelasting (van handen, voeten en hoofd) is nader onderzoek wenselijk. Op dit moment kan voor de beoordeling van de koudebelasting van de handen de huidtemperatuur van de rug van de hand worden genomen. Voor de beoordeling van de koudebelasting van het hoofd kan de Wind Chill Index worden toegepast.

De literatuurstudie naar criteria voor de beoordeling door tocht, temperatuurwisselingen en stralingsasymmetrie in industriële ruimten heeft slechts ten dele voldoende informatie opgeleverd voor het opstellen van voorlopige beoordelingscriteria. Nader onderzoek naar acceptatie van tocht, temperatuurwisselingen en stralingsasymmetrie in industriële ruimten is noodzakelijk voor verdere onderbouwing van criteria.

De beoordeling van tocht in industriële ruimten voor personen die lichte arbeid kan plaatsvinden op basis van onderzoeksgegevens voor zittende personen. Voor het geven van criteria voor de beoordeling van tocht bij matige tot zware activiteiten ontbreken voldoende gegevens.

De beoordeling van tocht in de buitenlucht kan, met behulp van de Wind Chill Index, gebeuren op basis van windsnelheid en luchttemperatuur. Het activiteitsniveau blijft hierbij buiten beschouwing.

Bij de beoordeling van de belasting door temperatuurwisselingen dient onderscheid gemaakt te worden tussen snelle en langzame temperatuurwisselingen. De toelaatbare wisselingen zijn daarnaast afhankelijk van de activiteit van de personen.

Voor de beoordeling van belasting door stralingsasymmetrie kan in geval van lichte arbeid het verschil in plane radiant temperature in twee tegeovergestelde richtingen worden toegepast. Bij matig zware en zware arbeid kan de belasting door warmtestraling worden beoordeeld aan de hand van de bestralingssterkte van de blote huid in de richting van de stralingsbron.

Bij de beoordeling van de plaatselijke thermische belasting ontbreekt, behalve in het geval van de beoordeling van de warmtestraling, de factor tijd. In de literatuur werd hierover geen informatie gevonden. Het lijkt redelijk aan te bevelen dat slechts gedurende 10% van de werktijd sprake mag zijn van een belastende situatie ten gevolge van de plaatselijke thermische belasting.

2.6 Literatuur

[2.1] Knoll, B. H. Ph. L. den Ouden

Vaststelling van een meetmethode voor het thermisch klimaat, waarmee de thermische belasting van werkende mensen kan worden afgeleid.
Rapport R85/249a, MT-TNO, Afdeling Binnenmilieu, 1987.

[2.2] ISO 7730

Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
International Organization for Standardization, Genève, 1984.

-
- [2.3] ISO 7243
Hot environments - Estimation of the heat stress on a working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature).
International Organization for Standardization, Genève, 1982.
- [2.4] ISO/DIS 7933
Hot environments - analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate.
International Organization for Standardization, Genève, 1988.
- [2.5] ISO/TC159/SC5/GT1/N146
Evaluation of cold environments.
International Organization for Standardization, Genève, 1988.
- [2.6] ISO/DIS 8996
Determination of metabolic rate.
International Organization for Standardization, Genève, 1987.
- [2.7] ISO/DP 9920
Estimation of the thermal characteristics of a clothing ensemble.
International Organization for Standardization, Genève, 1988.
- [2.8] Cox, C.W.J.
Een inventarisatiemethode voor klimaatomstandigheden in bedrijven: opstelling van de methode en evaluatie van de beproeving. Proefinventarisatie, deelrapport 1.
Rapport R87/197b, MT-TNO, Afdeling Binnenmilieu, 1987.
- [2.9] McIntyre, D.A.
Indoor Climate
Applied Science Publishers LTD., London, 1980.
- [2.10] Berglund, L.G., D.J. Cunningham
Parameters of human discomfort in warm environments.
ASHRAE Transactions, 1986, vol. 92 (2B), p.732-746.

-
- [2.11] Gagge, A.P., Y.Nishi, R. Gonzalez
Standard effective temperature.
Symposium Thermal Comfort and Moderate Heat Stress Building Research
Establishment, 1972.
- [2.12] Mens en arbeidsomstandigheden,
Bolijn, A.J., 1988.
- [2.13] Schalkoort, T.A.J., J.H.B.M. Willems
Warm-lassen. Analyse en beoordeling van klimaatgegevens ten behoeve van het
onderzoek naar de gevolgen van werknemers.
Studie-rapport S6, Directoraat-Generaal van de Arbeid, Voorburg, 1985.
- [2.14] Berglund, L.G.
Thermal acceptability.
ASHRAE Transactions 1979, vol. 85 (2), p. 825-834.
- [2.15] Havenith, G., R. Heus
Effect van houding, beweging en wind op de kledingisolatie.
Studie-rapport S43-1, Directoraat-Generaal van de Arbeid, Voorburg, 1989.
- [2.16] Werken bij lage temperaturen. Eindrapport van de werkgroep B2.
Nederlandse Vereniging voor Koeltechniek, 1983.
- [2.17] Gagge, A.P., A.P. Fobelets, L.G. Berglund
A standard predictive index of human response to the thermal environment.
ASHRAE Transactions, 1986, Volume 92, Pt. 2.
- [2.18] Stolwijk, J.
A mathematical model of physiological temperature regulation in man.
NASA CR 1855 (1971).
- [2.19] Gordon, R.G., R.B. Roemer, S.M. Horvath
A mathematical model of the human thermoregulatory system-Transient cold
exposure response.
IEEE Transactions on biomedical engineering, Vol.BME 23, No.6, november 1976.

-
- [2.20] Wissler, E.H.
An evaluation of human thermal models.
USAF Office of Scientific Research, Washington DC, 1982.
- [2.21] Aptel, M.
Comparison between required clothing insulation and that actually worn by workers
exposed to artificial cold.
Applied Ergonomics, 1988, 19, 4, p. 301-305.
- [2.22] Aptel, M.
Le travail au froide artificiel dans l'industrie alimentaire.
Description des astreintes et recommandations.
INRS, Cahiers de notes documentaires no. 126, 1er trimestre 1987.
- [2.23] Cox, C.W.J.
Grenswaarden voor de koudebelasting in de werksituatie. Tweede versie.
Memorandum M89/007, MT-TNO, januari 1989.
- [2.24] Haventith, G.
Individual parameters in thermoregulation control; a review.
Rapport IZF 1985-26, IZF-TNO, 1985.
- [2.25] Siple, P.A., C.F. Passel
Measurement of dry atmosphere cooling in subfreezing temperatures.
Proc. Am. Philos. Soc., vol. 89, p. 177-189.
- [2.26] Linde, E. van de
Persoonlijke communicatie, april 1989.
- [2.27] Olesen, B.W.
Local thermal discomfort.
Technical Review Bruel&Kjaer, nr. 1, 1985.
- [2.28] Niet passende ventilatie.
Tijdschrift voor Sociale Gezondheidszorg 61, 1983, nr. 2, p. 441-444.

-
- [2.29] ASHRAE Standaard 55-1981
Thermal environment conditions for human occupancy.
American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineers,
Atlanta, 1981.
- [2.30] Fanger, P.O., A.K. Melikow, H. Hanzawa, J. Ring
Air turbulence and sensation of draught.
- [2.31] Werken in buitenlucht.
Tijdschrift voor Sociale Gezondheidszorg, 61 (1983), nr. 19/A&SV 21 (1983) nr. 3.
- [2.32] Jones, B.W., K. Hsieh, M. Hashinaga
The effect of air velocity on thermal comfort at moderate activity levels.
ASHRAE Transactions, 1986, PO-86-14.
- [2.33] Temperatuurwisselingen.
Tijdschrift voor Sociale Geneeskunde, 60, 1982, nr. 24/A&SV 20 (1982),
nr. 4, p. 788-789.
- [2.34] Sprague, C.H., P.E. McNall
The effect of fluctuating temperature and relative humidity on the thermal sensation
(thermal comfort).
ASHRAE Transactions, 76, 1970, p. 146-156.
- [2.35] Ham, Ph.J.
Een literatuurstudie naar toepassing van stralingsverwarming en bijbehorende
temperatuurprofielen.
Rapport R87/016, MT-TNO, Delft, 1987.
- [2.36] Fanger, P.O., L. Bahhidi, B.W. Olesen, G. Langkilde
Comfort limits for heated ceilings.
ASHRAE Transactions, 86 (2), 1980, p. 141-156.
- [2.37] Fanger, P.O., B.M. Ipsen, G. Langkilde, B.W. Olesen, N.K. Christensen, S. Tanabe
Comfort limits for asymmetric thermal radiation.
Energy and Buildings, 8, 1985, p. 225-236.

-
- [2.38] Langkilde, G., L. Gunnarsen, N. Mortensen
Limits during radiant heating of industrial spaces.
Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [2.39] Buettner, K.
Effects of extreme heat on man.
Journal of American Medical Association, October 1950, vol. 144, p. 732-738.
- [2.40] ISO/DIS 7933, versie 1986
Hot environments - analytical determination and interpretation of thermal stress
using calculation of required sweat rate.
International Organization for Standardization, Genève, 1986.
- [2.41] Munker, H.
Hitzeschutz am Arbeitsplatz
Nr. 16 Schriftenreihe Arbeitsschutz
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Dortmund, 1978
- [2.42] DIN 33403, Teil 3, Entwurf
Klima am arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung.
Beurteilung des Klimas im Erträglichkeitsbereich
Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1981
- [2.43] DIN 1946, Teil 2
Raumluftechnik Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln)
Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1983.

3. DE METING VAN DE GEMIDDELDE STRALINGSTEMPERATUUR

3.1 Inleiding

Bij het uitvoeren van de proefinventarisatie [3.1] is gebleken dat het wenselijk is te beschikken over apparatuur voor een directe, snelle en nauwkeurige meting van de gemiddelde stralingstemperatuur. Een snelle meting is met name van belang bij situaties met een wisselende gemiddelde stralingstemperatuur, bijvoorbeeld ten gevolge van het productieproces. De bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur op indirecte wijze door middel van meting van de plane radiant temperature in zes richtingen, zoals toegepast in de proefinventarisatie, vergt in dergelijke situaties teveel tijd.

ISO 7726 [3.2] schrijft voor de meting van de gemiddelde stralingstemperatuur, voor de klasse S (thermische belasting), de volgende maximale onnauwkeurigheden voor:

vereist:

-40 tot 0°C	:	$(5+0,02*\theta_{mrt})$ °C
0 tot 50°C	:	5°C
50 tot 150°C	:	$(5+0,08*\theta_{mrt})$ °C

gewenst:

-40 tot 0°C	:	$(0,5+0,01*\theta_{mrt})$ °C
0 tot 50°C	:	0,5°C
50 tot 150°C	:	$(0,5+0,04*\theta_{mrt})$ °C

met θ_{mrt} : gemiddelde stralingstemperatuur

Verder wordt opgemerkt dat wanneer de meting wordt uitgevoerd met een globe (zwarte bol) de onnauwkeurigheid met betrekking tot de gemiddelde stralingstemperatuur 20 °C kan bedragen, afhankelijk van de omgeving en de nauwkeurigheid waarmee de luchtsnelheid, de luchttemperatuur en de globetemperatuur worden gemeten.

Ten aanzien van de responsietijd wordt in ISO 7726 opgemerkt dat deze zo kort mogelijk dient te zijn. Onder de responsietijd wordt de tijd verstaan die verstrijkt voordat de aanwijzing van een meetapparaat een verandering heeft ondergaan gelijk aan 90% van de maximale waarde van de verandering van de grootte.

Er is een inventarisatie gemaakt van -eventueel toekomstig- commercieel verkrijgbare apparatuur voor de meting van de gemiddelde stralingstemperatuur. Op basis van de beschikbare documentatie en enkele proefmetingen in het laboratorium is de apparatuur beoordeeld.

3.2 Beschrijving van de apparatuur

Momenteel wordt er door één firma, de firma Hund (in Nederland vertegenwoordigd door de firma Dräger) een apparaat voor de directe meting van de gemiddelde stralings-temperatuur geleverd (de Hund-MDRM warmtestralingsmeter, verder te noemen warmtestralingsmeter, zie figuur 3.1). Het apparaat is ontwikkeld door de afdeling "Arbeitssicherheitstechnik einschl. Ergonomie" van de Gesamthochschule Wuppertal in West-Duitsland [3.3].

De opnemer bestaat uit een kubus van verguld messing met afgesneden hoeken. In elk vlak van de kubus zijn een matzwarte en een goudkleurige, bolvormige stralingsontvanger aangebracht. Ten gevolge van de verschillende absorptie-eigenschappen van de ontvangers zullen zij bij een stralingsbelasting verschillende temperaturen aannemen. Het temperatuurverschil tussen de ontvangers is een maat voor de warmtestraling uit de omgeving. Om de invloed van convectie zoveel mogelijk te beperken zijn over de ontvangers "vensters" van polyethyleen (50 µm dik) geplaatst. Deze "vensters" kunnen bij vervuiling of beschadiging worden vervangen. De waarden voor de 6 verschillende richtingen worden door middel van een elektronische schakeling getransformeerd tot een waarde voor de gemiddelde stralingstemperatuur. Als referentie-temperatuur dient de temperatuur van de binnenzijde van een kubusvlak. De opnemer is door middel van een kabel verbonden met een uitleeseenheid (150x80x40 mm, 220 g). Naast de gemiddelde stralingstemperatuur kan de effectieve bestralingssterkte ten opzichte van een referentietemperatuur van 32°C worden uitgelezen. De uitleeseenheid is voorzien van een analoge uitgang.

De onnauwkeurigheid van het apparaat is volgens opgave [3.3] als volgt:

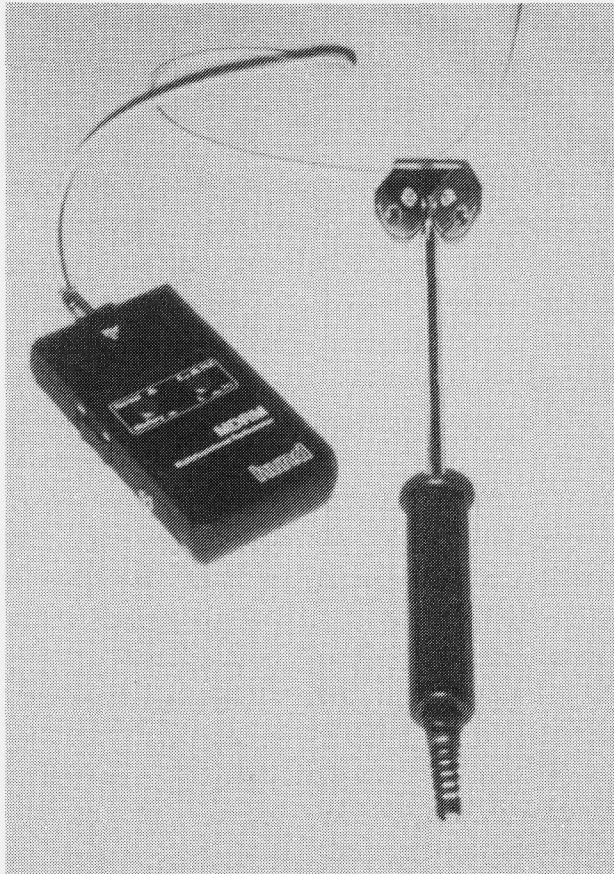
$$\begin{aligned} 0-50^{\circ}\text{C} &: (0.3+0.009 \cdot 10_{\text{mrt}}) ^{\circ}\text{C} \\ 50-150^{\circ}\text{C} &: (0.7+0.0325 \cdot 10_{\text{mrt}}) ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Hiermee is de nauwkeurigheid van het apparaat voor gemiddelde stralingstemperaturen tussen 0 en 50°C groter dan de gewenste nauwkeurigheid van ISO 7726 [3.2]. De nauw-

keurigheid van het apparaat voor gemiddelde stralingstemperaturen tussen 50 en 150°C ligt tussen de vereiste en de gewenste nauwkeurigheid volgens ISO 7726.

De responsietijd van het apparaat voor het bereiken van 90% van de eindwaarde bedraagt volgens opgave van de leverancier circa 10 s.

De opgegeven responsietijd van het apparaat is getoetst met behulp van metingen in het laboratorium. Faciliteiten voor het toetsen van de opgegeven nauwkeurigheid van de meting van de gemiddelde stralingstemperatuur waren niet beschikbaar. Er zijn indicatieve metingen verricht waarbij de directe meting met de warmtstralingsmeter en de indirecte bepaling (via meting van de globetemperatuur en de plane radiant temperature) zijn vergeleken. De resultaten worden gegeven in de paragrafen 3.4 en 3.5.



Figuur 3.1 Hund-MDRM warmtstralingsmeter.

3.3 Bepaling van de responsietijd

In het laboratorium is de responsietijd van de warmtestralingsmeter bij een sprongbelasting bepaald. In een situatie met een nagenoeg uniform verdeelde stralingstemperatuur werd een stralingsbron geplaatst. Door deze eenzijdige stralingsbelasting steeg de gemiddelde stralingstemperatuur van 25,0°C naar 34,4°C. Na het verwijderen van de stralingsbron daalde de temperatuur weer naar 25,1°C. Gedurende de meting werd de gemiddelde stralingstemperatuur continu geregistreerd met een meetinterval van 1 s. De luchttemperatuur en de luchtsnelheid tijdens de meting bedroegen respectievelijk 24,9°C en 0,10 m/s.

De uit de metingen afgeleide responsietijden worden vermeld in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Responsietijden van de warmtestralingsmeter.

responsietijden (s) voor het bereiken van 90% van de eindwaarde	
daling	15
stijging	9

De afgeleide waarde van de responsietijd komt voor de stijging van de gemiddelde stralingstemperatuur goed overeen met de opgegeven waarden in de documentatie [3.3]. De waarde afgeleid voor de daling van de gemiddelde stralingstemperatuur wijkt af. Er kan echter gesproken worden van een snelle responsietijd van het apparaat.

3.4 Vergelijking van de meting met de warmtestralingsmeter en de globe-temperatuur-meting

De gemiddelde stralingstemperatuur gemeten met de warmtestralingsmeter is vergeleken met de gemiddelde stralingstemperatuur berekend uit de globetemperatuur, de luchttemperatuur en de luchtsnelheid.

Er is een proefopstelling gemaakt waarbij de warmtestralingsmeter en de globe (doorsnede 150 mm) dezelfde hoeveelheid stralingswarmte ontvingen van een stralingsbron. Dit werd gerealiseerd door de beide sensoren symmetrisch ten opzichte van de bron te plaatsen. Uit

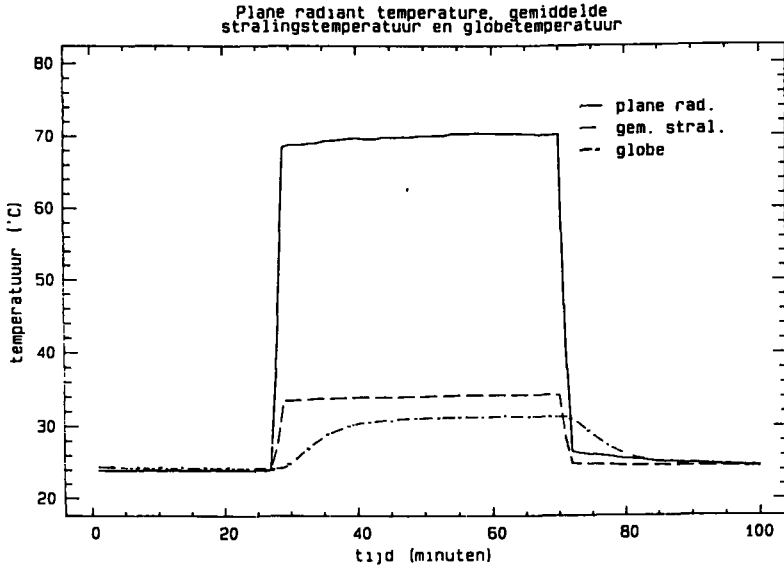
een controle-meting van de plane radiant temperature ter plaatse van de twee sensoren bleek dat de ontvangen stralingswarmte voor beide sensoren gelijk was. Globetemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur (warmtestralingsmeter), luchttemperatuur, luchtsnelheid en plane radiant temperature in de richting van de stralingsbron werden continu geregistreerd met een datalogger (Grant Squirrel 1201). Er werd een intervaltijd van 10 s tussen de metingen aangehouden. De minuutgemiddelde waarde werd weggeschreven. De luchtsnelheid werd gemeten met een richtingsongevoelige anemometer volgens het constante-temperatuur-principe

Bij de metingen werden met betrekking tot de luchtsnelheid twee situaties onderscheiden: één met een lage gemiddelde luchtsnelheid van 0,08 m/s en één met een hoge gemiddelde luchtsnelheid van 0,55 m/s. De luchttemperatuur bedroeg 24,7°C. De gemiddelde stralingstemperatuur werd berekend uit de globetemperatuur, de luchttemperatuur en de luchtsnelheid conform ISO 7726 [3.2]. De resultaten van de metingen en de berekeningen worden gegeven in de figuren 3.2 tot en met 3.7.

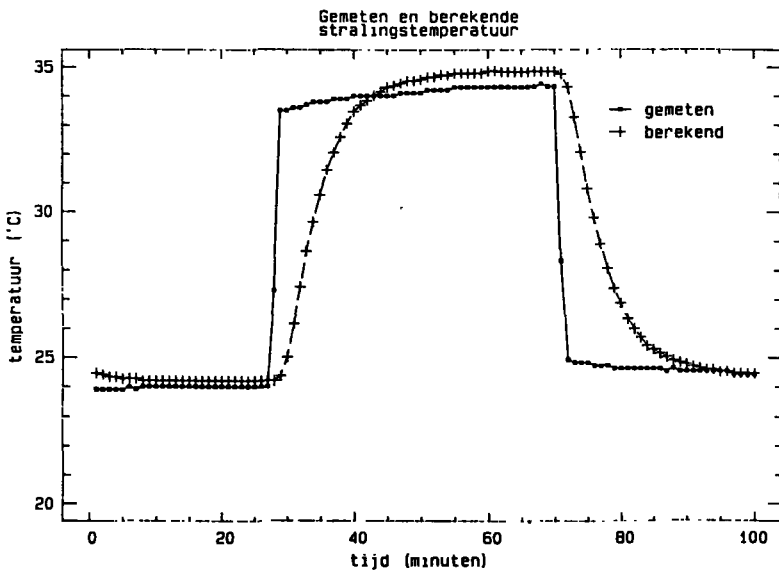
Voor de situatie met de lage luchtsnelheid, waarin de natuurlijke convectie de warmte-overdracht van de globe naar de lucht bepaalt, bestaat er een goede overeenstemming tussen gemeten en berekende gemiddelde stralingstemperatuur in de stationaire situatie. Het verschil is kleiner dan 0,5°C. Door de lange responsietijd van de globe treedt er een groot verschil op tussen de gemeten en de berekende gemiddelde stralingstemperatuur bij een verandering van de stralingsbelasting. De bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur op basis van de globetemperatuur is dan ook niet geschikt voor situaties met een wisselende stralingsbelasting.

In de situatie met de hoge luchtsnelheid (0,55 m/s) is de gedwongen convectie maatgevend voor de warmte-overdracht van de globe naar de lucht. Het verschil tussen de gemeten en de berekende stralingstemperatuur is groter dan in de situatie met de lage luchtsnelheid. De berekende gemiddelde stralingstemperatuur is circa 2°C hoger dan de gemeten waarde. Het verschil kan mogelijk ten dele veroorzaakt zijn door de richtingsgevoeligheid van de warmtestralingsmeter bij een eenzijdige stralingsbelasting (zie 3.5). Het verschil is zodanig dat nog wordt voldaan aan de vereiste nauwkeurigheid van 5 K volgens ISO 7726 [3.2]. Bij afwezigheid van de stralingsbron is het verschil tussen de berekende en gemeten waarde in de stationaire situatie, ook voor de situatie met de hoge luchtsnelheid, gering.

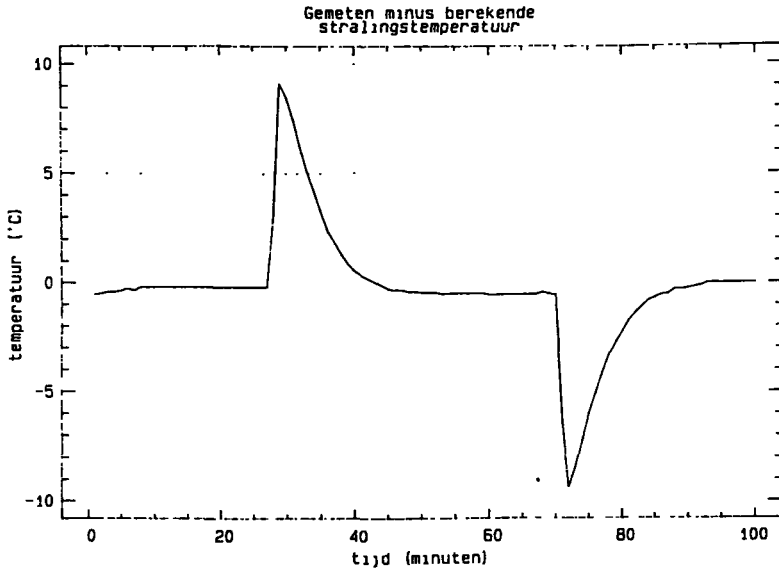
Uit de metingen is een reponstijd van de globe af te leiden van circa 13 minuten.



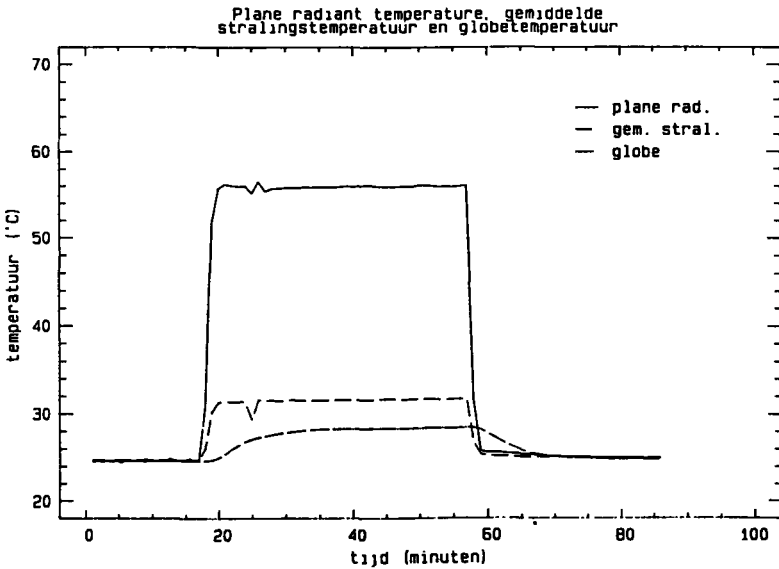
Figuur 3.2 Verloop van de plane radiant temperature, de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de globetemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Gemiddelde luchtsnelheid 0,08 m/s.



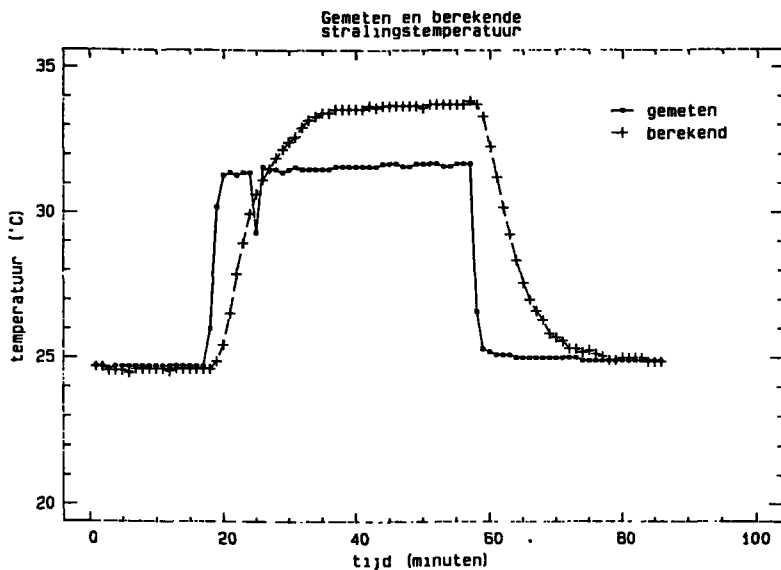
Figuur 3.3 Verloop van de met de warmtestralingsmeter gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de uit de globetemperatuur berekende gemiddelde stralingstemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Gemiddelde luchtsnelheid 0,08 m/s.



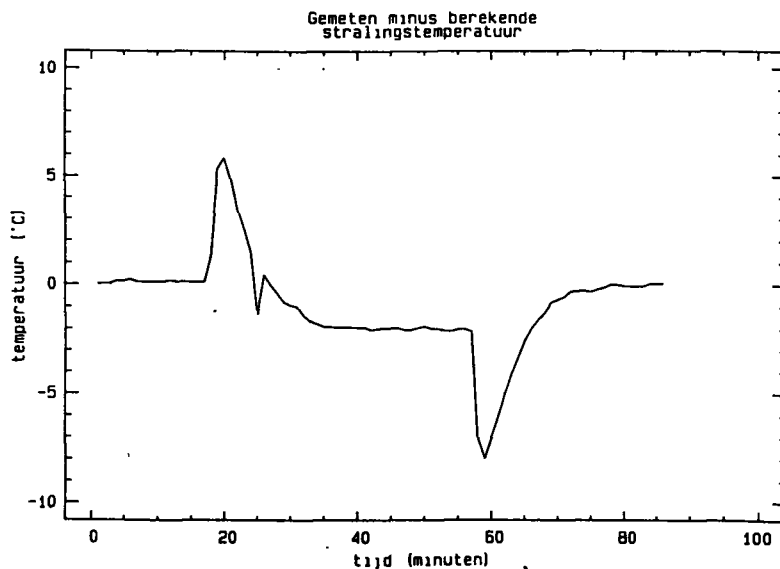
Figuur 3.4 Verloop van het verschil tussen gemeten en berekende gemiddelde stralingstemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Luchtsnelheid 0,08 m/s.



Figuur 3.5 Verloop van de plane radiant temperature, de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de globetemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Gemiddelde luchtsnelheid 0,55 m/s.



Figuur 3.6 Verloop van de met de warmtestralingsmeter gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de uit de globetemperatuur berekende gemiddelde stralingstemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Gemiddelde luchtsnelheid 0,55 m/s.



Figuur 3.7 Verloop van het verschil tussen gemeten en berekende gemiddelde stralingstemperatuur als functie van de tijd bij een sprongbelasting. Luchtsnelheid 0,55 m/s.

3.5 Vergelijking van de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de uit de plane radiant temperature berekende gemiddelde stralingstemperatuur.

De gemiddelde stralingstemperatuur kan worden berekend uit de plane radiant temperature in zes richtingen (loodrecht op de vlakken van een kubus) [3.4]. Voor een staand persoon met bekende oriëntatie luidt de formule als volgt:

$$\theta_{mrt} = (0,08*(\theta_{pr,boven}+\theta_{pr,onder})+0,23*(\theta_{pr,rechts}+\theta_{pr,links})+0,35*(\theta_{pr,voor}+\theta_{pr,achter}))/ (2*(0,08+0,23+0,35))$$

met θ_{mrt} : gemiddelde stralingstemperatuur in °C
 θ_{pr} : plane radiant temperature in °C

De op deze wijze berekende gemiddelde stralingstemperatuur is vergeleken met de met de warmtestralingsmeter gemeten gemiddelde stralingstemperatuur. Er zijn twee situaties onderscheiden: een uniforme omgevingstemperatuur en een éézijdige stralingsbelasting. De plane radiant temperature is gemeten met behulp van de stralingsopnemer van de klimaatmeetset van Bruel&Kjaer (Indoor Climate Analyzer Type 1213)

De resultaten van de metingen en de berekeningen worden samengevat in tabel 3.2.

De berekende en gemeten waarden komen goed overeen. Tijdens de metingen bij de eenzijdige stralingsbelasting bleek dat de opnemer enigzins richtingsafhankelijk is. De maximale en de minimale waarden bij de diverse standen ten opzichte van de stralingsbron verschilden 2°C. Dit betekent dat de gewenste nauwkeurigheid volgens ISO 7726 [3.2] niet zal worden gehaald bij een eenzijdige stralingsbelasting.

Tabel 3.2 Vergelijking van de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur en de uit de plane radiant temperature berekende gemiddelde stralingstemperatuur.

Gemeten gemiddelde stralings-temperatuur (°C)	Plane radiant temperature (°C)						Berekende gemiddelde stralings-temperatuur (°C)
	voor	achter	links	rechts	boven	onder	
Uniforme stralingsbelasting							
24,9	24,7	24,8	25,3	24,6	24,5	25,3	24,7
Eenzijdige straling							
31,1	46,7	25,4	25,6	25,6	24,7	27,7	31,2

Voor het meten van de warmtestraling uit één richting wordt door de firma Hund de zogenaamde Hund-UDRM geleverd. Dit apparaat werkt volgens hetzelfde principe als de Hund-MDRM, maar beschikt slechts over één stel stralingssensoren. Uit door IZF-TNO verrichte metingen bleek dat de Hund-UDRM een zekere richtingsafhankelijkheid bezit [3.5]. Daarnaast bleek dat het apparaat bij een puntvormige stralingsbron die recht voor het meetinstrument is geplaatst de bestralingssterkte met circa 20% overschat. Volgens Lotens is dit het gevolg van de hoekkarakteristiek van het apparaat die niet exact de cosinusfunctie volgt [3.5]. Het is mogelijk dat deze tekortkoming ook bij de Hund-MDRM optreedt gezien het feit dat van hetzelfde meetprincipe gebruik wordt gemaakt. Nader onderzoek is gewenst om duidelijkheid te verschaffen.

3.6 Conclusies

Momenteel is er één apparaat commercieel verkrijgbaar waarmee een directe en snelle meting van de gemiddelde stralingstemperatuur mogelijk is, de Hund-MDRM warmtestralingsmeter.

De responsietijd van het apparaat bleek bij een proefmeting boven de opgegeven responsietijd te liggen, maar is met 15 seconden als zeer kort te beschouwen.

De opgegeven nauwkeurigheid is voor gemiddelde stralingstemperaturen tussen 0 en 50°C beter dan de gewenste nauwkeurigheid volgens ISO 7726 [3.2]. Voor gemiddelde stralingstemperaturen tussen 50 en 150°C ligt de opgegeven nauwkeurigheid tussen de gewenste nauwkeurigheid en de vereiste nauwkeurigheid volgens ISO (zie paragraaf 3.1).

Uit metingen bleek dat het apparaat enigzins richtingsgevoelig is bij een eenzijdige stralingsbelasting. De grootte van deze richtingsgevoeligheid is zodanig dat bij een eenzijdige stralingsbelasting de gewenste nauwkeurigheid van ISO niet zal worden gehaald. De door ISO vereiste nauwkeurigheid wordt wel gehaald. Nader onderzoek naar de meetonnauwkeurigheid van de warmtestralingsmeter bij een eenzijdige stralingsbelasting is gewenst.

Vergelijking van de gemiddelde stralingstemperatuur gemeten met de warmtestralingsmeter en de gemiddelde stralingstemperatuur op basis van de meting van de plane radiant temperature in zes richtingen gaf bij een uniforme stralingsbelasting en bij een eenzijdige stralingsbelasting resultaten die goed (uniforme stralingsbelasting) en redelijk (eenzijdige stralingsbelasting) met elkaar overeenkwamen.

Een vergelijking van de gemiddelde stralingstemperatuur gemeten met de warmtestralingsmeter en de gemiddelde stralingstemperatuur bepaald op basis van de globetemperatuur liet bij luchtsnelheden van respectievelijk 0,08 en 0,55 m/s verschillen zien van respectievelijk 0,5 en 2 K in de stationaire situatie. De gemiddelde stralingstemperatuur op basis van de globetemperatuur was hoger dan de gemeten gemiddelde stralingstemperatuur. De verschillen kunnen mogelijk worden verklaard door de richtingsgevoeligheid van de warmtestralingsmeter bij de aangebrachte eenzijdige stralingsbelasting.

Samenvattend kan worden gesteld dat met behulp van de warmtestralingsmeter een directe, snelle en nauwkeurige meting van de gemiddelde stralingstemperatuur mogelijk is. De nauwkeurigheid voldoet aan de gewenste nauwkeurigheid volgens ISO 7726 [3.2]. Gebruik van de warmtestralingsmeter wordt aanbevolen in situaties waarin de gemiddelde stralingstemperatuur snel wisselt.

Voor min of meer stationaire situaties is de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur uit de meting van de globetemperatuur een bruikbaar alternatief. Hierbij dienen dan wel de luchttemperatuur en de luchtsnelheid te worden gemeten. De luchtsnelheid dient met een richtingsonafhankelijke anemometer te worden gemeten.

In situaties waar een snelle meting niet direct noodzakelijk is biedt de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur uit de meting van de plane radiant temperature een goed alternatief.

3.7 Literatuur.

- [3.1] Cox, C.W.J.
Een inventarisatiemethode voor klimaatomstandigheden in bedrijven:
opstelling van de methode en evaluatie van de beproeving.
Proefinventarisatie, deelrapport 1.
Rapport R87/197b, MT-TNO, Afdeling Binnenmilieu, 1987.
- [3.2] Thermal environments.
Specifications relating to appliances and methods for measuring physical
characteristics of the environment. ISO 7726
International Organization for Standardization, 1982, Geneva.
- [3.3] Hettinger, Th., H. Peters, M. Noack, B.H. Müller
Die Eignung von Klimaindizes zur Beurteilung der Klimabelastung in der Eisen-
und Stahlindustrie. Entwicklung einer felddauglichen Strahlungsmesssonde.
Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal,
Arbeitssicherheitstechnik einschl. Ergonomie, Wuppertal 1986.
- [3.4] Instruction Manual Indoor Climate Analyzer Type 1213
Brüel&Kjaer, Naerum, Denmark, 1985.
- [3.5] Lotens, W.A.
IZF-TNO, persoonlijke communicatie, 1989.

4. PERSONAL MONITORING VAN KLIMAAT

4.1 Inleiding

Het vastleggen van de klimaatgrootheden (luchttemperatuur, gemiddelde stralings-temperatuur, luchtsnelheid en relatieve vochtigheid) voor het bepalen van de thermische belasting van een werknemer is relatief eenvoudig, wanneer deze zich constant op dezelfde werkplek bevindt of wanneer de klimaatgrootheden ruimtelijk constant zijn en constant zijn in de tijd.

Het vastleggen van het klimaat waaraan een werknemer met wisselende werkplekken in een ruimte met ruimtelijke variaties en variaties in de tijd van de klimaatgrootheden is blootgesteld vormt een probleem [4.1].

Volgens [4.2] is in een dergelijke situatie een continue registratie van de klimaatgrootheden (en de persoonsparameters) of vastlegging gedurende opeenvolgende tijdsintervallen noodzakelijk.

Voor het vastleggen van de klimaatgrootheden worden in geval van ruimtelijke variaties en variaties in de tijd worden door Malchaire [4.2] twee methodieken beschreven:

1. zone-methodiek;
2. "ambulatory measurement".

Bij de eerste methodiek wordt de ruimte waarin arbeid wordt verricht verdeeld in zones waarin de klimaatgrootheden ruimtelijk constant kunnen worden beschouwd. In elke zone worden vervolgens de klimaatgrootheden, afhankelijk van hun verloop in de tijd, continu of periodiek vastgelegd. Op basis van de registratie van het verblijf van de werknemer in de verschillende zones kan het klimaat waaraan hij is blootgesteld ("persoonlijk klimaat") worden bepaald. Bij het toepassen van deze methodiek is een voorstudie van de situatie noodzakelijk.

Er wordt aangenomen dat op de grens van twee zones de klimaatgrootheden verschillen. Om de discontinuïteit niet te groot te maken kan in de praktijk vaak een groot aantal zones nodig zijn. Dit leidt tot een grote meetinspanning c.q. arbeidsintensieve metingen. Wanneer het klimaat in de verschillende zones periodiek wordt vastgelegd dient het klimaat op tussenliggende tijdstippen te worden bepaald door interpolatie, uitgaande van een lineair verloop in de tijd. De zone-methodiek is volgens [4.2] niet toepasbaar in situaties met snel veranderende klimaatgrootheden (bijvoorbeeld eenzijdige, fluctuerende warmtestraling in de staalindustrie).

De tweede methodiek ("ambulatory measurement") bestaat uit het volgen van de werknemer tijdens het werk en meting van alle klimaatgrootheden op de plaatsen waar hij werkt op elk moment. In situaties met snel wisselende klimaatgrootheden is toepassing van deze methode (volgens [4.2]) eenvoudiger dan toepassing van de zone-methodiek. Daarnaast kan er een nauwkeurigere schatting van de blootstelling worden gemaakt, mits geschikte instrumenten worden gebruikt.

Voor toepassing van "ambulatory measurement" zijn instrumenten met een korte responsietijd noodzakelijk. Bij de metingen dienen de gemiddelde waarden van de klimaatgrootheden gedurende korte tijdintervallen (bijvoorbeeld één minuut) systematisch aan het einde van elk interval te worden vastgelegd. In [4.2] wordt opgemerkt dat dit in de praktijk vaak niet haalbaar zal zijn. Als voorbeeld wordt genoemd twee metingen per minuut van elke klimaatgrootheid, elke meting gemiddeld over vier seconden. Een tijdconstante van 10 seconden van de apparatuur wordt wenselijk/ noodzakelijk geacht. Dit komt overeen met een responsietijd (90%) van circa 23 seconden.

Het volgen van de werknemer bij deze methodiek kan het normale verloop van de werkzaamheden verstoren.

Naast de twee boven omschreven methodieken kan het vastleggen van het klimaat waaraan een werknemer is blootgesteld gebeuren met een meetset, die de klimaatgrootheden continu registreert en die door de werknemer zelf wordt gedragen. Deze "personal monitoring" van het klimaat kan een aanzienlijke beperking van de meetinspanning opleveren, terwijl de nauwkeurigheid van de vastlegging toeneemt.

Een dergelijke meetset (opnemers en apparatuur voor opslag van de meetwaarden) dient een voldoende laag gewicht te hebben en een zodanige vorm dat de werknemer niet of slechts in geringe mate in zijn activiteiten wordt gestoord. Hierbij speelt de plaats op het lichaam waar de set wordt gedragen een rol.

Evenals bij "ambulatory measurement" dienen de verschillende opnemers voor de klimaatgrootheden een korte responsietijd te hebben. De meetwaarden dienen te worden opgeslagen met behulp van een data-logger, die onderdeel uitmaakt van de meetset. Voldoende kleine dataloggers zijn tegenwoordig commercieel verkrijgbaar.

Een prototype voor een meetset voor de personal monitoring van de klimaatgrootheden op basis van commercieel verkrijgbare opnemers en apparatuur is ontwikkeld en beproefd in het laboratorium.

4.2 Beschrijving van de meetset

Uitgangspunt voor de meetset voor personal monitoring van klimaatgrootheden is een datalogger van het type Squirrel van de firma Grant (Grant Squirrel 1201). Deze datalogger, met afmetingen 180 mm x 160 mm x 60 mm en een gewicht van 990 g, is in een leren houder geplaatst. Deze houder wordt met behulp van een clip aan een riem of een draagtuigje bevestigd.

Aan de buitenzijde van de houder is een aluminium koker aangebracht (lengte 145 mm, doorsnede 35 mm) die de in de koker geplaatste sensoren afschermt tegen straling. In het kokertje is een mini-ventilator geplaatst (Micronel V301L 006 DA GK) die wordt gevoed met een 5,6 V zink-lucht batterij (Duracell Activair Battery DA164). De batterij is aan de zijkant van het kokertje bevestigd. Met behulp van de mini-ventilator wordt lucht door het kokertje gezogen met een snelheid van circa 2 m/s.

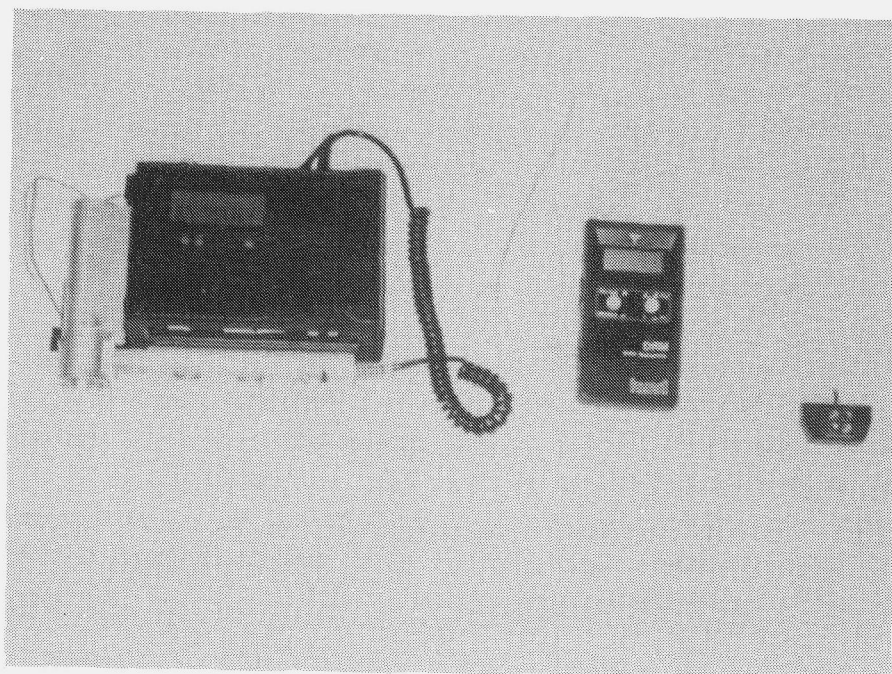
De luchttemperatuur wordt gemeten met behulp van een in de koker aangebrachte thermistor (YSI 44202, 2000 ohm bij 25°C). De relatieve vochtigheid wordt gemeten met een Vaisala-probe (Vaisala VH-L). De opnemer in deze probe wordt gevormd door een dunne capacitieve kunststoffilm. Deze probe is in dwarsrichting op de koker geplaatst. Het gedeelte met de opnemer steekt door een opening in de koker.

Voor de meting van de "plane radiant temperature" is gekozen voor een gemodificeerde versie van de zogenaamde Hund-UDRM warmtestralingsmeter. Het meetprincipe is gelijk aan dat van de MDRM (zie 3.2). Met de UDRM wordt slechts in één richting gemeten. De opnemer is losgekoppeld van het apparaat. Hierdoor kan de opnemer op een geschikte plaats op het lichaam worden aangebracht. De modificatie is door de firma Dräger uitgevoerd. De uitleeseenheid van de stralingsmeter (afmetingen 150x90x40 mm, 220 g) kan in een zak van de kleding van een persoon worden geplaatst. Ten aanzien van de nauwkeurigheid van dit meetinstrument is nader onderzoek gewenst (zie paragraaf 3.5).

In figuur 4.1 is de meetset voor personal monitoring van klimaat in zijn huidige vorm weergegeven. Het gewicht van de meetset bedraagt circa 1600 g, exclusief de stralingsmeter.

De onderdelen van de meetset zijn commercieel verkrijgbaar, de set als geheel niet. De set kan ook worden samengesteld uit andere apparatuur en opnemers, mits zij dezelfde eigenschappen hebben als de hier toegepaste apparaten en opnemers.

In het laboratorium is de responsietijd van het meetstelsel bepaald en zijn enkele draagproeven uitgevoerd, om na te gaan of een werknemer niet te veel door de meetset wordt gehinderd in zijn activiteiten.



Figuur 4.1 Meetset voor personal monitoring van klimaat. Links de leren houder met daarin de data-logger en aan de zijkant de koker ten behoeve van de stralingsafscherming. Aan de onderzijde bevindt zich de Vaisala-probe. Rechts de uitleeseenheid van de warmtestralingsmeter met de losgekoppelde opnemer.

De meting van de luchtsnelheid met behulp van de meetset voor personal monitoring is -nog- niet op bevredigende wijze opgelost.

Een anemometer die deel kan uitmaken van de meetset voor personal monitoring van het klimaat dient aan de volgende criteria te voldoen:

-
- de opnemer dient ongevoelig te zijn voor de richting van de snelheid;
 - de opnemer dient een korte responsietijd te hebben;
 - de opnemer dient op een batterij-voeding te kunnen werken (dit betekent dat de anemometer ook bij een afwijkende voedingsspanning voldoende nauwkeurig dient te zijn);
 - de opnemer met voeding en eventuele verwerkingseenheid dient zodanig kleine afmetingen te hebben dat bevestiging op een persoon geen hinder veroorzaakt bij het uitvoeren van werkzaamheden;
 - de anemometer/verwerkingseenheid dient een uitgangssignaal te hebben dat kan worden geregistreerd;

Het type anemometer dat het meest geschikt is voor binnenklimaatmetingen is de zogenaamde thermo-anemometer waarvan de werking berust op de afkoeling van een klein verwarmd bolletje. Deze thermo-anemometers zijn relatief richtingsongevoelig en hebben vaak een korte responsietijd. Dergelijke anemometers hebben vaak een relatief grote voedings- en verwerkingseenheid die werkt op netspanning. Toepassing voor de meetset voor personal monitoring is dan niet mogelijk. Bij toepassing in de meetset voor personal monitoring vormen daarnaast de relatief hoge mechanische kwetsbaarheid en de invloed van luchtverontreiniging op de meting een probleem.

Ten aanzien van de richtingsgevoeligheid is er het probleem van de "schaduwwerking" van het lichaam. De anemometer zou bij voorkeur boven het hoofd van de werknemer aangebracht dienen te worden. Wanneer een helm gedragen wordt is dit relatief eenvoudig op te lossen. In andere gevallen ligt een oplossing minder voor de hand.

Een mogelijke verstoring van de meting van de luchtsnelheid kan ook worden veroorzaakt door de eigen convectie van een persoon. De anemometer zou bij voorkeur buiten deze convectieve stroming moeten worden geplaatst.

Sinds kort is er een thermo-anemometer commercieel verkrijgbaar waarvan de verwerkingseenheid (met geringe afmetingen) is gekoppeld aan de opnemer. De vereiste voeding van 12 Vdc kan met behulp van batterijen worden gerealiseerd. De verwerkingseenheid geeft een gelineariseerd uitgangssignaal af.

De eerste beproevingen van deze anemometer in het laboratorium wezen uit dat de anemometer relatief ongevoelig is voor de voedingsspanning. Dit betekent dat batterijvoeding in principe mogelijk is. Bij controle in een windtunnel bleek de absolute nauwkeurigheid van de anemometer te voldoen aan de vereiste nauwkeurigheid volgens

ISO 7726 [4.3] (klasse S), wanneer de anemometer loodrecht werd geplaatst op de stromingsrichting. De anemometer gaf hierbij een te lage luchtsnelheid aan.

De richtingsgevoeligheid van de anemometer is relatief groot. Plaatsing van de opnemer onder een hoek van 30° met de stromingsrichting gaf een afwijking van 0,17 m/s bij een ingestelde snelheid van 0,50 m/s. Hiermee wordt niet aan de vereiste nauwkeurigheid volgens ISO 7726 voldaan.

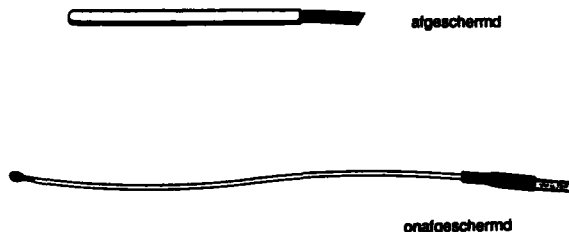
Nader onderzoek van de anemometer is gewenst.

4.3 Responsietijden

Voor de bepaling van de responsietijden van de meetset voor personal monitoring is de set blootgesteld aan sprongbelastingen van temperatuur, vochtigheid en warmtestraling. Gezien de verlopen van de signalen (zie figuur 4.3 t/m 4.6) is er bij de verschillende opnemers uitgegaan van een zuiver eerste orde systeem. De responsietijden voor het bereiken van 63% van de eindwaarde (tijdconstante) en 90% van de eindwaarde zijn bepaald. De tijd tussen twee metingen bedroeg 1 s, de kortst mogelijke instelling van de datalogger.

4.3.1 Luchttemperatuur.

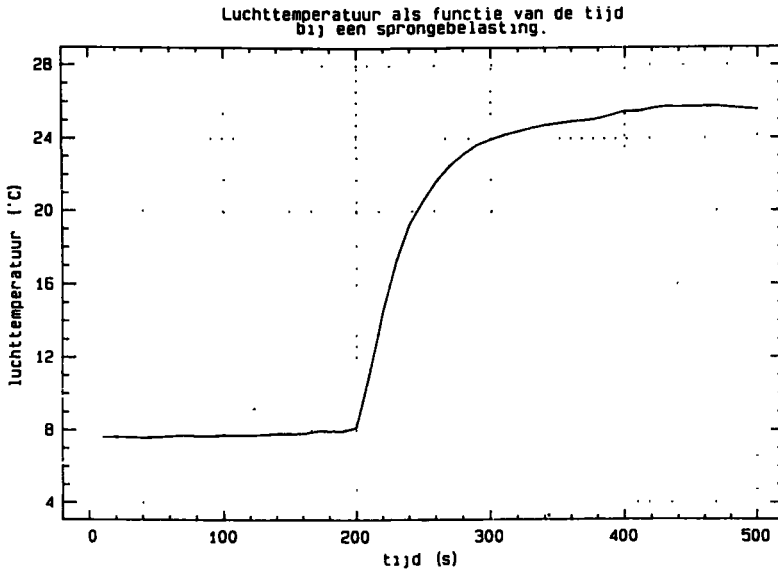
Er zijn twee typen thermistors beproefd: een onafgeschermd thermistor en een met behulp van een aluminium hulsje afgeschermd thermistor (zie figuur 4.2). De thermistors werden blootgesteld aan een sprongbelasting van 15 à 20°C. Karakteristieke verlopen van de gemeten temperaturen worden gegeven in de figuren 4.3 en 4.4. De uit de metingen afgeleide responsietijden zijn vermeld in tabel 4.1.



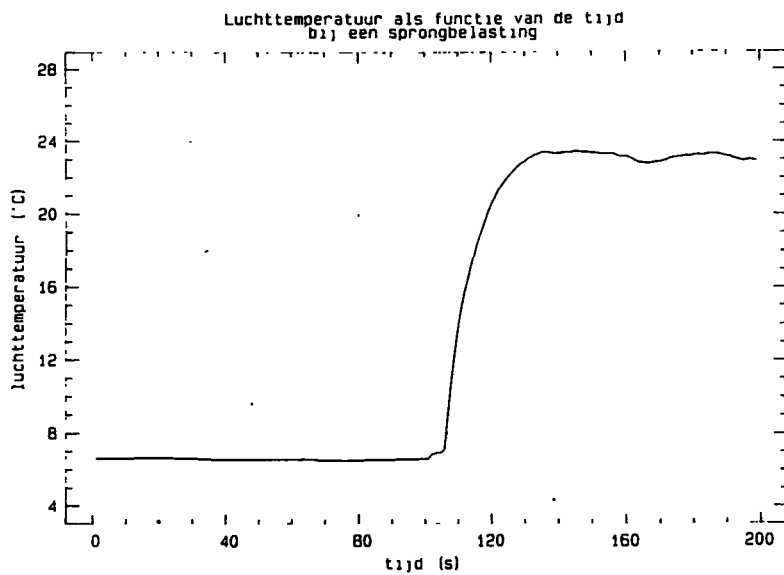
Figuur 4.2 De toegepaste thermistors.

Tabel 4.1 Responsietijden voor een sprongbelasting van de luchttemperatuur.

Opnemer	Responsietijd (s)	
	63% van de eindwaarde	90% van de eindwaarde
Thermistor met beschermhuis	53	154
Thermistor zonder beschermhuis	9	18



Figuur 4.3 Verloop van de gemeten luchttemperatuur bij een sprongbelasting. Thermistor met beschermhuisje.



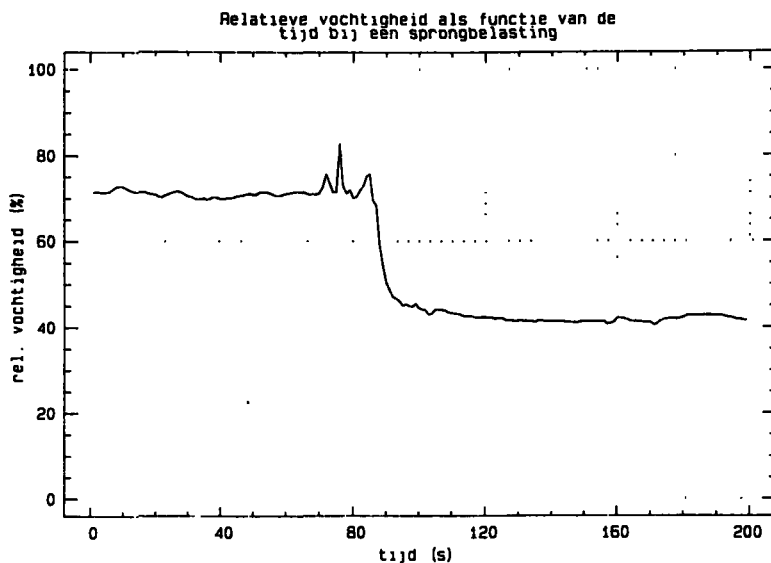
Figuur 4.4 Verloop van de gemeten luchttemperatuur bij een sprongbelasting.
Thermistor zonder beschermhuls.

4.3.2 Relatieve vochtigheid.

De Vaisala-probe werd blootgesteld aan een sprongbelasting van circa 40% relatieve vochtigheid. Het karakteristieke verloop van de gemeten relatieve vochtigheid wordt getoond in figuur 4.5. Uit de metingen zijn de onderstaande responsietijden afgeleid.

Tabel 4.2 Responsietijden voor een sprongbelasting van de relatieve vochtigheid.

responsietijd (s)	
63% van de eindwaarde	90% van de eindwaarde
9	19



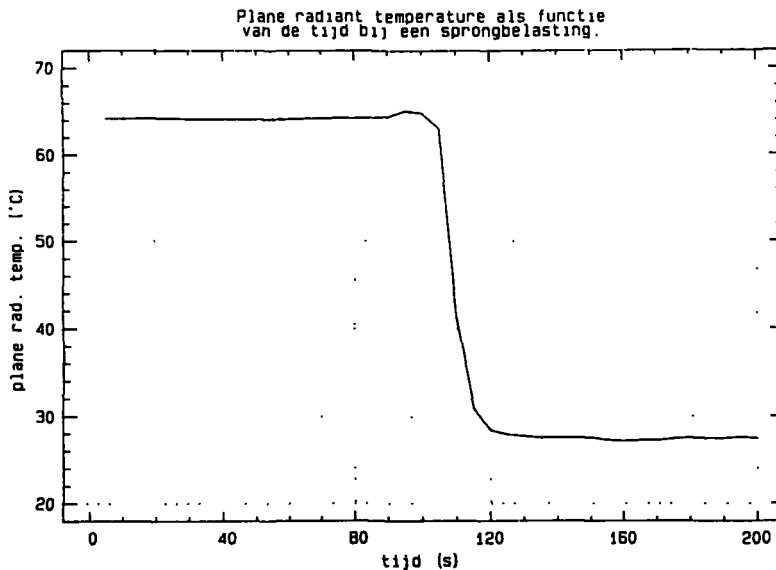
Figuur 4.5 Verloop van de gemeten relatieve vochtigheid bij een sprongbelasting.

4.3.3 Plane radiant temperature.

De opnemer voor de plane radiant temperature werd blootgesteld aan een sprongbelasting van circa 37°C. Het karakteristieke verloop van de gemeten plane radiant temperature wordt gegeven in figuur 4.6. De berekende responsietijden worden gegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3 Responsietijden voor een sprongbelasting van de plane radiant temperature.

responsietijd (s)	
63% van de eindwaarde	90% van de eindwaarde
9	16



Figuur 4.6 Verloop van de gemeten plane radiant temperature bij een sprongbelasting.

4.3.4 Samenvatting van de resultaten.

Met de meetset voor personal monitoring van klimaatomstandigheden worden korte responsietijden gerealiseerd. De responstijd voor het bereiken van 63% van de eindwaarde is korter dan 10 seconden voor alle geselecteerde sensoren. De responstijd voor het bereiken van 90% van de eindwaarde is korter dan 20 s. ISO 7726 [4.3] stelt dat voor de drie beschouwde grootheden een zo kort mogelijke responsietijd (90%) moet worden nagestreefd.

4.4 Draagproeven.

De meetset voor personal monitoring van de klimaatgrootheden heeft een relatief hoog gewicht (circa 1600 g). Bij draagproeven die werden uitgevoerd in het laboratorium bleek bevestiging van de data-logger aan een riem (om het middel), waarbij de set op de rug wordt gedragen, acceptabel. Deze wijze van bevestiging van de datalogger werd in de praktijk toegepast door Havenith [4.7] voor de vastlegging van rectaal- en huidtemperatuur. Ook hier werden tevredenstellende resultaten bereikt. De meetset kan eventueel aan een draagtuigje ("rugzakconstructie") worden bevestigd. In de praktijk wordt bijvoorbeeld gewerkt met een door een persoon gedragen gasdetector aan een draagtuigje.

De opnemer voor de meting van de warmtestraling bleek zonder problemen op de borst worden gedragen te kunnen worden.

Draagproeven in de praktijk zullen moeten aantonen of de meetset geen belemmering voor de uit te voeren werkzaamheden oplevert.

4.5 Bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur.

Met behulp van de meetset voor personal monitoring is het mogelijk de plane radiant temperature te meten. Deze grootheid geeft inzicht in de belasting door eenzijdige warmtestraling. De gemiddelde stralingstemperatuur kan worden berekend uit de plane radiant temperature in zes richtingen (zie 3.5). Het meten van de plane radiant temperature in zes richtingen met de meetset voor personal monitoring is om praktische redenen niet mogelijk. Er is nagegaan of het mogelijk is de gemiddelde stralingstemperatuur te berekenen uit de waarden voor de plane radiant temperature voor de voorzijde en de achterzijde van het lichaam enerzijds en de waarden voor de voorzijde, de achterzijde, de linkerzijde en de rechterzijde anderzijds. Hierbij is gebruik gemaakt van meetgegevens uit onderzoeken in een zuivelproductenfabriek en een staalfabriek [4.4, 4.5]. In tabel 4.4 worden enkele voorbeelden van het cijfermateriaal gegeven.

Tabel 4.4 *Vergelijking van de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur uit de plane radiant temperature in zes, twee en vier richtingen.*

voor	plane radiant temperature (°C)					gem. stral.temperatuur (°C)		
	achter	links	rechts	boven	onder	exact	twee(*)	vier(*)
24,4	18,2	19,0	19,3	21,3	16,4	19,9	21,3	20,2
30,7	20,3	23,9	23,2	27,0	21,6	24,5	25,5	24,5
10,3	11,2	7,9	11,4	8,9	7,6	9,7	10,8	10,3
20,1	21,3	20,0	20,7	23,0	16,6	20,3	20,7	20,6
54,2	14,0	18,6	18,6	24,6	14,0	25,5	34,1	26,3
93,4	30,3	37,5	37,3	59,9	37,0	49,5	61,9	49,6
33,1	24,0	38,5	35,0	22,4	19,2	31,2	28,6	32,7
52,9	33,3	14,4	50,0	32,6	29,0	33,3	43,1	37,7

(*): *gemiddelde van respectievelijk twee (voor/achter) en vier waarden (voor/achter/links/rechts)*

Uit de tabel blijkt dat in situaties met een uniforme verdeling van de plane radiant temperatures het verschil tussen de gemiddelde stralingstemperatuur berekend op exacte wijze en berekend uit de het gemiddelde van de plane radiant temperature aan voor- en achterzijde slechts gering is. Bij grote verschillen in plane radiant temperature tussen de verschillende richtingen wordt het verschil groot. De berekening van de gemiddelde stralingstemperatuur uit de plane radiant temperature aan voor-, achter-, linker- en rechterzijde geeft acceptabele verschillen met de exacte berekening.

Het bovenstaande impliceert dat de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur uit de metingen van de plane radiant temperature met behulp van de meetset voor personal monitoring in situaties met grote verschillen in plane radiant temperature tot toepassing van vier opnemers en verwerkingseenheden zou leiden. Dit zal in de praktijk waarschijnlijk niet realiseerbaar zijn in verband met de hinder die de werknemer zal ondervinden van de hiervoor benodigde apparatuur.

Voor de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur zou de toepassing van een zogenaamde mini-globe kunnen worden toegepast die bijvoorbeeld op de helm van een werknemer kan worden geplaatst (zie 4.6). Onder een mini-globe wordt hier een globe verstaan van kunststof met een diameter van 50 à 60 mm, waarin een thermistor als temperatuuropnamer is opgenomen. Deze mini-globe heeft evenwel volgens de leverancier een tijdconstante van 300 seconden. Snelle wisselingen van de gemiddelde stralingstemperatuur kunnen dus niet nauwkeurig worden geregistreerd. Voor de bepaling van de

gemiddelde stralingstemperatuur uit de meting van de globetemperatuur dienen bovendien de luchtsnelheid en de luchttemperatuur bekend te zijn (zie hoofdstuk 3).

4.6 Ontwikkelingen in het buitenland.

Tijdens het onderzoek bleek dat Rodahl (Noorwegen) bezig is met een vergelijkbare ontwikkeling op het gebied van personal monitoring [4.6]. Hij maakt hierbij gebruik van dezelfde datalogger als toegepast in het onderhavige onderzoek. In plaats van de meting van de afzonderlijke klimaatgrootheden wordt door Rodahl de zogenaamde Wet Globe Temperature (WGT), ook wel bekend onder de naam Botsball temperature, gemeten. De WGT wordt gemeten als de temperatuur van een globe die is voorzien van een zwarte laag katoen die verzadigd is met water. De WGT is derhalve gevoelig voor de luchttemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur, de luchtsnelheid en de luchtvochtigheid. Rodahl gebruikt een globe met een diameter van 60 mm. die op de helm van een werknemer wordt gemonteerd. Bevochtiging van de laag katoen vindt plaats vanuit een reservoir dat eveneens op de helm wordt bevestigd en dat via een slangetje is verbonden met de Botsball.

Naast de WGT wordt ook de kerntemperatuur (rectaaltemperatuur of trommelvlies-temperatuur) en de hartslag gemeten. Door de leverancier van de logger worden opnemers hiervoor geleverd. De logger wordt door de proefpersonen op de rug gedragen (aan een riem om het middel). Bij praktijkproeven met het meetsysteem in staalbedrijven bleek het meetsysteem te voldoen.

Ten aanzien van de meting van de WGT kan worden opgemerkt dat snel veranderende belastingen niet nauwkeurig kunnen worden vastgelegd in verband met de relatief lange responsietijd van deze meting. Rodahl stelt dat de WGT in vijf minuten in evenwicht is met de omgeving.

4.7 Conclusies

Er is een meetset voor de personal monitoring samengesteld waarmee de luchttemperatuur, relatieve vochtigheid en de plane radiant temperature kunnen worden gemeten. De responsietijden van de meetset voor de bovengenoemde grootheden zijn korter dan 20 seconden. Snel wisselende omstandigheden ten gevolge van het productieproces of beweging van de werknemer kunnen dus nauwkeurig worden vastgelegd. De meetset kan

aan een riem of een draagtuigje worden bevestigd en zal een werknemer naar verwachting slechts geringe hinder geven. De meting van de klimaatgrootheden kan worden aangevuld met fysiologische metingen zoals de huidtemperatuur, kerntemperatuur en de hartslag. Een studie van de fysiologische reactie op wisselende klimaatomstandigheden in de praktijk wordt hierdoor mogelijk.

Meting van de luchtsnelheid met de meetset is -nog- niet gerealiseerd. Een geschikte en voldoende nauwkeurige anemometer ontbreekt.

Een ander probleem vormt de bepaling van de gemiddelde stralingstemperatuur. Voor een redelijk nauwkeurige bepaling in situaties met sterke verschillen in stralingsintensiteit is de meting van de plane radiant temperature in minimaal vier richtingen noodzakelijk. Met de op dit moment beschikbare apparatuur kan dit niet op een praktische wijze worden gerealiseerd. Een alternatief vormt de meting van de temperatuur van een globe met een kleine diameter (60 mm). Hierbij dient echter wel de luchtsnelheid en de luchttemperatuur gemeten te worden. De meting van de temperatuur van een mini-globe heeft een relatief lange responsietijd.

Een nadere toetsing van de bruikbaarheid van de meetset voor personal monitoring dient plaats te vinden door toepassing in de praktijk.

4.8 Literatuur

[4.1] Cox, C.W.J.

Een inventarisatiemethode voor klimaatomstandigheden in bedrijven:
opstelling van de methode en evaluatie van de beproeving.

Proefinventarisatie, deelrapport 1.

Rapport R87/197b, MT-TNO, Afdeling Binnenmilieu, 1987.

[4.2] Malchaire, J.

Methodology of investigation of hot working conditions in the field.

In: Proceedings of Seminar on Heat Stress Indices,

eds. B. Metz, Th. Hettinger, L.A. Morris, J. Malchaire, J.G. Fox

Commision of the European Communities, Health and Safety Directorate,
25-26 October 1988, Luxemburg.

[4.3] Thermal environments.

Specifications relating to appliances and methods for measuring physical characteristics of the environment. ISO 7726
International Organization for Standardization, 1982, Geneva.

[4.4] Cox, C.

Vaststelling van de klimaatbelasting van werknemers in een zuivelproduktenfabriek.
Proefinventarisatie, deelrapport II
Rapport R87/140a, MT-TNO, september 1987.

[4.5] Cox, C.

Vaststelling van de klimaatbelasting van werknemers in een staalfabriek.
Proefinventarisatie, deelrapport III
Rapport R87/150a, MT-TNO, september 1987.

[4.6] Rodahl, K., N. Enger, T. Guthe

Ambulatory monitoring of environmental stress
In: Proceedings of 3rd International Conference on Environmental Ergonomics,
8-12 August 1988, Helsinki, Finland
Eds. R. Ilmarinen and A. Päsche.

[4.7] Havenith, G.

Bepaling van kledingisolatie en metabolisme op de werkplek.
Rapport C-16, IZF-TNO, 1987.

5. KENTALLEN

5.1 Inleiding

Voor de keuze van maatregelen of technische oplossingen voor het verbeteren van klimaatomstandigheden in bedrijven is inzicht nodig in het thermische gedrag van de bedrijfsruimten. Het thermisch gedrag van ruimten kan worden gekarakteriseerd met behulp van zogenaamde kentallen [5.1]. Voorbeelden van dergelijke kentallen zijn bijvoorbeeld het ventilatievoud of de specifieke warmtebelasting.

In bedrijven waar maatregelen of technische oplossingen voor het verbeteren van klimaatomstandigheden worden getroffen zouden deze kentallen systematisch moeten worden bepaald. De kentallen zouden kunnen worden verzameld in een database. Wanneer daarnaast de doorgevoerde maatregelen en oplossingen zouden worden beoordeeld op hun effectiviteit kunnen, wanneer dit bij een voldoende aantal gevallen is gebeurd, voor andere bedrijven maatregelen worden geselecteerd op basis van de kentallen.

De kentallen dienen betrekking te hebben op:

- vorm en afmetingen;
- warmtetransport door transmissie en ventilatie;
- accumulerend vermogen van de gebouwconstructie; - interne warmtebronnen;
- zonbelasting.

In de volgende paragrafen zal worden ingegaan op mogelijke kentallen voor het karakteriseren van het thermisch gedrag van bedrijfsruimten. Hoewel de kentallen vrijwel allemaal betrekking hebben op de warmtebalans van een ruimte wordt er op gewezen dat de kentallen niet moeten worden gezien als onderdelen van een fysisch model voor de beschrijving van het klimaat in bedrijfsruimten zoals bijvoorbeeld beschreven in [5.2]. Voorbeelden van het gebruik van de kentallen aan de hand van twee ruimten, waarvan de gegevens bij de afdeling Binnenmilieu aanwezig waren, worden aansluitend gegeven.

5.2 Kentallen

5.2.1 Vorm en afmetingen

De afmetingen van een ruimte kunnen worden beschreven met lengte (l), breedte (b), hoogte (h) en volume (V). De vorm kan worden gekarakteriseerd met behulp van de dimensieloze lengte, breedte en hoogte. De dimensieloze lengte, breedte en hoogte worden

berekend door respectievelijk lengte, breedte en hoogte te delen door de equivalente diameter. De equivalente diameter (D) wordt berekend uit $6 \cdot V / \Sigma A_i$, waarin V (m^3) staat voor volume en A_i (m^2) voor de oppervlakte van vlak i .

5.2.2 Warmtetransport door transmissie

Het warmteverlies door transmissie van een ruimte kan worden gekarakteriseerd met:

$$T1 = \Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i \quad [W/K]$$

waarin Σ : sommatie over alle wanden

k_i : warmtedoorganscoëfficiënt van de constructie of wand,
genormeerd op de buitentemperatuur, ($W/m^2 \cdot K$)

A_i : oppervlakte van wand i of constructie i (m^2)

a_i : correctiefactor i.v.m. temperatuurverschil over constructie i (-)

Voor de buitentemperatuur kan worden uitgegaan van de ontwerpwaarden voor de buitentemperatuur zoals die in NEN 5066 [5.3] en NEN 5067 [5.4] worden gehanteerd. Voor de winter betekent dit een buitentemperatuur van $-7^\circ C$ en voor de zomer een buitentemperatuur van $28^\circ C$.

Wanneer de transmissie wordt genormeerd op de buitentemperatuur dient k_i te worden gecorrigeerd voor het temperatuurverschil over de constructie wanneer deze grenst aan een andere ruimte met een van de buitentemperatuur afwijkende temperatuur (bijvoorbeeld de begane grondvloer).

a_i kan worden berekend uit:

$$a_i = \delta t_i / \delta t_{bi-bu}$$

waarin: δt_i : temperatuurverschil over constructie i ($^\circ C$)

δt_{bi-bu} : temperatuurverschil tussen binnen en buiten ($^\circ C$)

Bijvoorbeeld:

$$k_i = 1 \text{ W/m}^2 \cdot K, \delta t_i = 10^\circ C, \delta t_{bi-bu} = 20^\circ C: a_i = 0,5$$

Voor de temperatuur van de grond kan in de winter worden uitgegaan van een temperatuur van $7^\circ C$ en in de zomer van $13^\circ C$.

Voor de berekening van a_i is het noodzakelijk dat de temperatuur in de beschouwde ruimte (waarvoor de kentallen worden berekend) en de temperaturen in de aangrenzende ruimten bij de normbuitentemperaturen bekend zijn, bijvoorbeeld uit metingen of op basis van de temperaturen waarop wordt geregeld. Wanneer dit niet het geval is dienen schattingen toegepast te worden. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van gegevens van metingen bij temperaturen die afwijken van de norm-buitentemperaturen.

Het transmissieverlies van ruimten met verschillende volumes kan worden vergeleken door het bepalen van het quotiënt van de warmtecapaciteit van de lucht en $\delta a_i \cdot k_i \cdot A_i$.

In formulevorm:

$$T_2 = \rho_{01} \cdot c_{l1} \cdot V / \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i \quad [s]$$

waarin ρ_{01} : soortelijke massa van lucht [kg/m³]
 c_{l1} : soortelijke warmte van lucht [J/kg.K]
 V : volume van de ruimte [m³]

5.2.3 Warmtetransport door ventilatie

Het warmtetransport door ventilatie van een ruimte kan worden gekarakteriseerd door:

$$V_1 = \rho_{01} \cdot c_{l1} \cdot q_v \quad [W/K]$$

waarin: q_v : volumestroom ventilatielucht ten gevolge van lekken en ventilatievoorzieningen (roosters, ramen, deuren) [m³/s]

Ook hier kan weer een vergelijking tussen ruimten met verschillende volumes worden gemaakt op basis van het quotiënt van de warmtecapaciteit van de lucht in de hal en $\rho_{01} \cdot c_{l1} \cdot q_v$:

$$V_2 = \rho_{01} \cdot c_{l1} \cdot V / \rho_{01} \cdot c_{l1} \cdot q_v = V / q_v \quad [s]$$

Deze verhouding is de reciproke waarde van het ventilatievoud (symbool n), dat in de praktijk vaak wordt uitgedrukt in $1/h$ en kan worden bepaald als:

$$n = q_v \cdot 3600 / V \quad [1/h]$$

De ventilatievolumestroom door natuurlijke ventilatie kan globaal worden bepaald op basis van plaats en grootte van de openingen overeenkomstig het P-blad Industriële ventilatie [5.5]. Voor de bepaling van de infiltratie via naden en kieren dient het netto oppervlak van deze naden en kieren te worden geschat. Voor steenachtige gebouwen kan worden uitgegaan van een oppervlak van $2 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ wandoppervlak. Voor gebouwen met een stalen gevel kan dit oplopen tot $20 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ wandoppervlak.

De infiltratiestroom ten gevolge van de wind kan worden berekend uit:

$$q_{v,\text{wind}} = 0,5 * A_{\text{inf}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

waarin: $q_{v,\text{wind}}$: infiltratiestroom ten gevolge van de wind $[\text{m}^3/\text{s}]$
 A_{inf} : totale geschatte oppervlak van naden en kieren $[\text{m}^2]$

De infiltratiestroom ten gevolge van de thermische krachten kan worden berekend uit:

$$q_{v,\text{therm}} = 0,3 * A_{\text{inf}} * v \delta h \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

waarin: $q_{v,\text{therm}}$: de ten gevolge van de thermische krachten optredende infiltratiestroom $[\text{m}^3/\text{s}]$
 δh : gemiddelde hoogteverschil tussen toe- en afvoeropeningen $[\text{m}]$

De totale infiltratiestroom wordt vervolgens berekend uit:

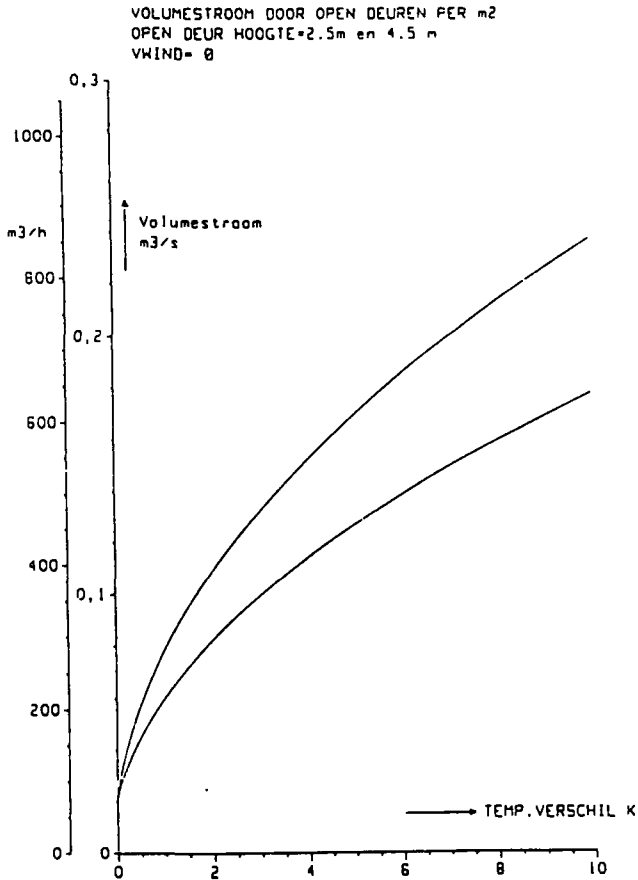
$$q_{v,\text{inf,tot}} = \sqrt{q_{v,\text{wind}}^2 + q_{v,\text{therm}}^2} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

waarin: $q_{v,\text{inf,tot}}$: de totale infiltratiestroom $[\text{m}^3/\text{s}]$

De bepaling van de ventilatiestroom door bewust aangebrachte ventilatie-openingen kan met behulp van dezelfde formules gebeuren zij het dat A_{inf} wordt vervangen door het oppervlak van alle toevoeropeningen in de gevels (A_{vent}). Een voorwaarde bij toepassing van deze berekeningswijze is echter dat er in het dak minstens openingen met een oppervlak gelijk aan 1/3 van het oppervlak aan openingen in de gevels zijn en dat de toevoeropeningen regelmatig verdeeld zijn over de gevels.

Bij grote openingen tussen hallen of werkruimten zal er, bij een temperatuurverschil tussen die ruimten, afhankelijk van de hoogte van de openingen, volumestromen over die

openingen optreden. De grootte van deze volumestromen kan worden afgeleid met behulp van figuur 5.1.



Figuur 5.1 Luchtvolumestromen per m² opening in een wand tussen twee ruimten. Hoogte van de opening 2,5 of 4,5 m. [5.5].

Indien meetgegevens beschikbaar zijn van de lichtsnelheden in de openingen kunnen de ventilatievolumestromen hieruit berekend worden.

De volumestromen ten gevolge van mechanische ventilatie kunnen worden bepaald op basis van de gegevens van de installatie.

5.2.4 Accumulerend vermogen van de gebouwconstructie

Het warmte-accumulerend vermogen van een constructie kan worden berekend uit:

$$C_j = \sum A_i \cdot d_i \cdot \rho_{oi} \cdot c_i \quad [J/K]$$

waarin d_i : dikte van laag i [m]

ρ_{oi} : soortelijke massa van laag i [kg/m^3]

c_i : soortelijke warmte van laag i [J/kgK]

C_j : warmte-accumulerend vermogen van constructie of wand j [J/K]

Bij geïsoleerde constructies dienen alleen de lagen tot aan de binnenzijde van de isolatie-laag meegenomen te worden in de berekening. Bij binnenwanden dient de helft van de dikte van de constructie in de berekening meegenomen te worden.

Het warmte-accumulerend vermogen van de gehele gebouwconstructie wordt vervolgens berekend uit:

$$C_1 = \sum C_j \quad [J/K]$$

Delen door de warmtecapaciteit van de lucht geeft een dimensieloos kental voor het specifiek accumulerend vermogen ten behoeve van de vergelijking van ruimten met verschillende volumes:

$$C_2 = \sum C_j / (\rho_{oi} \cdot c_i \cdot V) = \sum (\sum A_i \cdot d_i \cdot \rho_{oi} \cdot c_i) / (\rho_{oi} \cdot c_i \cdot V) \quad [-]$$

Uit het warmteverlies door transmissie en ventilatie en het warmte-accumulerend vermogen kan de tijdconstante van een ruimte worden bepaald. Hierbij wordt de ruimte, ter vereenvoudiging, als een 1e-orde-systeem beschouwd. De tijdconstante is een maat voor de afkoel- cq opwarmsnelheid van de ruimte. Op tijdstip $t = \tau$ is het temperatuurverschil tussen de ruimte en de omgeving gestegen c.q gedaald tot 1/e maal het oorspronkelijke verschil. τ Wordt als volgt berekend:

$$\tau = C_1 / U \quad [s]$$

waarin: $C_1 = \sum (\sum A_i \cdot d_i \cdot \rho_{oi} \cdot c_i)_j \quad [J/K]$

$U = \sum a_i \cdot k_j \cdot A_i + \rho_{oi} \cdot c_i \cdot q_v \quad [W/K]$

5.2.5 Interne warmtebronnen

De warmte-afgifte ten gevolge van de interne warmtebronnen (bijvoorbeeld proceswarmte) kan op de eerste plaats worden gekarakteriseerd met behulp van het vrijkomende vermogen ϕ_{bron} (P1). Dit kan worden bepaald uit opgave van het elektrische vermogen of worden bepaald uit electriciteits-, gas of olieverbriuk. Hierbij dient rekening gehouden te worden met het uitwendig rendement van de bronnen en de gelijktijdigheid. De vrijkomende warmte kan bestaan uit stralingswarmte en convectieve warmte.

De interne warmtebronnen in een bedrijfsruimte kunnen geconcentreerd zijn op één of meerdere plaatsen of min of meer gelijkmatig verdeeld zijn. Over het algemeen bevinden zij zich in de verblijfszone nabij de vloer.

De mate van concentratie van de interne warmtebronnen kan worden gekarakteriseerd met de onderstaande verhoudingen:

$$P2 = A_{\text{bron}}/A_{\text{vloer}} [-] \text{ of } P3 = V_{\text{bron}}/V [-]$$

De thermiek ten gevolge van interne warmtebronnen kan worden gekarakteriseerd met de verhouding $\phi_{\text{bron}}/A_{\text{bron}}$ [W/m^2] (P4).

Door verschillende auteurs worden indelingen van bedrijven gemaakt op basis van de interne warmtebelasting uitgedrukt in de verhouding van vrijkomende warmte en volume van de ruimte (de specifieke warmtebelasting $P5 = \phi_{\text{bron}}/V$ [W/m^3]) [5.6].

Oppl [5.6] hanteert de volgende indeling:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{bron}}/V < 23 \text{ W}/\text{m}^3 & : \text{ koud bedrijf} \\ 23 < \phi_{\text{bron}}/V < 116 \text{ W}/\text{m}^3 & : \text{ warm bedrijf} \\ \phi_{\text{bron}}/V > 116 \text{ W}/\text{m}^3 & : \text{ heet bedrijf} \end{aligned}$$

Hansen en Spitzner [5.6] spreken van een warm bedrijf wanneer ϕ_{bron}/V tussen 12 en 58 W/m^3 ligt. Volgens Schnauffer [5.7] is sprake van een warm bedrijf bij een specifieke warmtebelasting tussen 23 en 58 W/m^3 .

De specifieke warmtebelasting van een ruimte kan volgens Schnauffer [5.7] worden gebruikt voor de selectie van het ventilatiesysteem. In een heet bedrijf zou men normaliter altijd en in een warm bedrijf meestal op natuurlijke wijze kunnen ventileren door gebruik te maken van de thermiek. Bij een koud bedrijf zou men meestal aangewezen zijn op mechanische ventilatie.

Een andere wijze voor het karakteriseren van de interne warmteproductie waarbij rekening wordt gehouden met het volume is berekening van $P_6 = \phi_{\text{bron}} / (\rho_{\text{l}} \cdot c_{\text{l}} \cdot V)$ (in K/s). Dit kental geeft de stijging van de temperatuur van de lucht in de hal weer indien er geen warmte-afvoer zou plaatsvinden.

De invloed van de interne warmtebronnen op de luchttemperatuur in een ruimte kan verder worden gekarakteriseerd door:

$$P_7 = \delta T = \phi_{\text{bron}} / (\rho_{\text{l}} \cdot c_{\text{l}} \cdot q_v) \quad [\text{K}]$$

Deze verhouding geeft de temperatuurstijging van de afvoerlucht ten gevolge van de interne warmtebronnen ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van de toevoerlucht, indien er geen zoninstraling en geen warmtetransport door transmissie zou optreden.

De gemiddelde temperatuur van de toevoerlucht kan worden berekend uit het gewogen gemiddelde van de temperaturen van de verschillende toevoerluchtstromen.

5.2.6 Zoninstraling

De warmtebelasting ten gevolge van de zon wordt in het algemeen vooral bepaald door de zonnestraling die via de glasvlakken een ruimte binnenkomt. De zoninstraling is met name in de maanden mei tot en met september een belangrijke post in de warmtebalans. Het karakteriseren van de zonbelasting (via de glasvlakken) kan door middel van het berekenen van een gewogen glasoppervlak plaatsvinden.

$$A_{\text{glas,gew}} = \sum f_{\text{or}} \cdot ZTA \cdot A_{\text{glas,or}} \quad (\text{m}^2)$$

waarin: f_{or} : correctiefactor voor verschillende hoeveelheden opvallende straling per oriëntatie [-]
 ZTA : zontoetredingsfactor [-]
 $A_{\text{glas,or}}$: glasoppervlak per oriëntatie [m^2]

De correctiefactoren voor de verschillende oriëntaties worden gegeven in tabel 5.1. De correctie-factoren zijn gebaseerd op de maximale hoeveelheid opvallende straling in de maanden mei tot en met september. Tevens is rekening gehouden met het feit dat binnenkomende zonnestraling in de ochtend in grotere mate kan worden geaccumuleerd

dan in de middag. Daarom is in de correctiefactoren voor de noord-oost- en de oostgevel een factor 0,5 en in de correctiefactor voor de zuid-oostgevel een factor 0,75 verwerkt.

Tabel 5.1. Correctiefactoren voor verschillende hoeveelheid opvallende straling per oriëntatie ter berekening van het gewogen glasoppervlak.

oriëntatie	correctiefactor
horizontaal	1,00
noord	0,24
noordoost	0,34
oost	0,45
zuidoost	0,61
zuid	0,69
west	0,89
noordwest	0,67

Waarden voor ZTA kunnen worden ontleend aan tabel 5.2.

Bij hellende glasvlakken dient het oppervlak te worden gesplitst in een horizontaal vlak en een verticaal vlak door vermenigvuldiging van het oppervlak met respectievelijk $\sin \alpha$ en $\cos \alpha$. α is de hoek die het vlak maakt met de normaal op een horizontaal vlak.

Tabel 5.2. Overzicht van ZTA-waarden voor enkele raam- en zonweringscombinaties.

Omschrijving	ZTA
blank enkel glas	0,8
blank enkel glas, binnenzonwering	0,31
blank enkel glas, buitenzonwering	0,15
blank enkel glas, zonnescherm	0,15
blank dubbel glas	0,7
blank dubbel glas, binnenzonwering	0,36
blank dubbel glas, buitenzonwering	0,12
blank dubbel glas, zonnescherm	0,12

5.3 Voorbeeld van toepassing: zuivelfabriek

5.3.1. Omschrijving.

In de produktiehal van een zuivelfabriek worden de verschillende zuivelprodukten op mechanische wijze verpakt en leeg emballagemateriaal (kratten en containers) ontvangen en gereinigd.

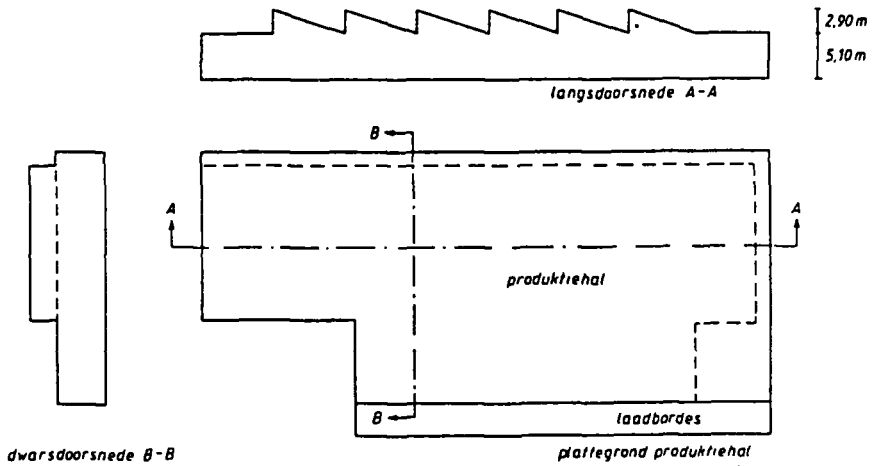
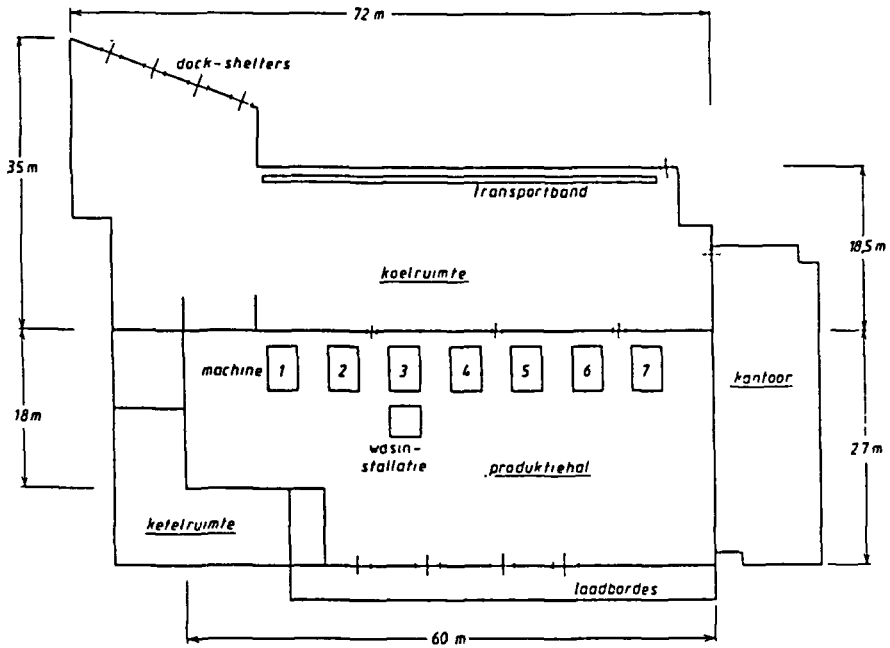
Schematische plattegronden en doorsneden worden gegeven in figuur 5.2. De produktiehal bevindt zich op de begane grond en grenst met één gevel en het dak aan de buitenlucht. Eén van de binnenwanden grenst aan de koelruimte. Onder de hal bevindt zich de installatieruimte.

De buitenwanden en de wand tussen hal en koelruimte bestaan uit een ongeïsoleerde spouwmuur. De binnenwanden bestaan uit wanden van steens metselwerk. Er is een betonvloer aanwezig waarop tegels zijn aangebracht. Het dak wordt gevormd door betonnen dakplaten voorzien van een bitumineuze dakbedekking. In het dak zijn een aantal sheds aangebracht waarvan het glas op het noordwesten is georiënteerd. Ook in de buitenwand (zuidwestgevel) is een strook glas aanwezig.

De verpakkingsmachines, deels door electriciteit en deels door aardgas aangedreven, zorgen voor een interne warmtelast van maximaal 604 kW. De gemiddelde warmtebelasting over de dag bedraagt circa 374 kW.

De hal wordt op natuurlijke wijze geventileerd via de open deuren bij het laadbordes, de open deuren naar de aangrenzende ruimten en de geopende klappen in de sheds in het dak.

De gegevens zijn ontleend aan [5.8].



Figuur 5.2 Plattegrond en doorsneden van de zuivelfabriek.

5.3.2 Vorm en afmetingen.

Lengte : 60 m.
 Breedte : 27 m.
 Hoogte : 6,5 m (gemiddeld)
 Volume : 8860 m³

Equivalente diameter : $D = 6 \cdot V / \Sigma A_i = 6 \cdot 8860 / 4300 = 12,4$ m
 Specifieke lengte : $l/D = 60/12,4 = 4,83$
 Specifieke breedte : $b/D = 27/12,4 = 2,18$
 Specifieke hoogte : $h/D = 6,5/12,4 = 0,52$

5.3.3 Warmteverlies door transmissie

Berekening van $\Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i$ voor de wintersituatie:

constructie	A_i (m ²)	k_i (W/m ² .K)	a_i (-)	$a_i \cdot k_i \cdot A_i$ (W/K)
vloer	1480	2,55	-0,29	-1095
dak	1585	3,50	1	5550
noordwestwand				
metselwerk	147	2,30	0,29	100
glas	217	5,80	1	1260
noordoostwand				
spouwmuur	306	1,45	0,24	105
glas	84	2,30	1	195
zuidoostwand	138	2,30	-0,58	-185
zuidwestwand				
spouwmuur	125	1,45	1	181
metselwerk	164	2,30	0,29	110
glas	54	5,80	1	315
				----- +
$T1 = \Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i =$				6535 W/K

Bij de berekening van de waarden van a_i is, bij het ontbreken van meetgegevens bij voldoende lage temperaturen (-7°C), een schatting gemaakt van de temperaturen in de produktiehal en de aangrenzende ruimten op basis van metingen bij een buitentemperatuur van circa 16°C [5.8]:

- Meting: - buitentemperatuur 16°C
- luchttemperatuur in de hal: 23°C (gemiddeld)
 - temperatuurverschil binnen-buiten: 7°C
 - ventilatievolumestroom: $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie 5.3.4)
 - luchttemperaturen aangrenzende ruimten:
 - installatieruimte : 20°C
 - opslagruimte : 18°C
 - koelruimte : 6°C
 - kantoren : 20°C

Wintersituatie:

- buitentemperatuur: -7°C
- ventilatievolumestroom: $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie 5.3.4)
- correctie temperatuurverschil binnen-buiten i.v.m. lagere ventilatie:
 $31/12,5*7 = 17,5^{\circ}\text{C}$
- temperatuur in de hal: circa 10°C
- luchttemperaturen aangrenzende ruimten:
 - installatieruimte : 15°C
 - opslagruimte : 5°C
 - koelruimte : 6°C
 - kantoren : 20°C

Berekening van $\sum a_i \cdot k_i \cdot A_i$ voor de zomersituatie:

constructie	A_i (m ²)	k_i (W/m ² .K)	a_i (-)	$a_i \cdot k_i \cdot A_i$ (W/K)
vloer	1480	2,55	0,71	2680
dak	1585	3,50	1	5550
noordwestwand				
metselwerk	147	2,30	0,71	240
glas	217	5,80	1	1260
noordoostwand				
spouwmuur	306	1,45	4,83	2145
glas	84	2,30	1	195
zuidoostwand	138	2,30	0,67	210
zuidwestwand				
pouwmuur	125	1,45	1	180
metselwerk	164	2,30	0,71	270
glas	54	5,80	1	315
				————— +
$T1 = \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i =$				13045 W/K

Bij de berekening van de waarden van a_i is, bij het ontbreken van meetgegevens bij voldoende hoge temperaturen (28°C), een schatting gemaakt van de temperaturen in de produktiehal en de aangrenzende ruimten op basis van metingen bij een buitentemperatuur van circa 16°C [5.8]:

- Meting: - buitentemperatuur 16°C
- luchttemperatuur in de hal: 23°C (gemiddeld)
 - temperatuurverschil binnen-buiten: 7°C
 - ventilatievolumestroom: 31 m³/s (zie 5.3.4)
 - luchttemperaturen aangrenzende ruimten:
 - installatieruimte : 20°C
 - opslagruimte : 18°C
 - koelruimte : 6°C
 - kantoren : 20°C

Zomersituatie:

- buitentemperatuur: 28°C
- ventilatievolumestroom: 31 m³/s (zie 5.3.4)
- temperatuur in de hal: circa 35°C
- luchttemperaturen aangrenzende ruimten:
 - installatieruimte : 30°C
 - opslagruimte : 30°C
 - koelruimte : 6°C
 - kantoren : 30°C

Bij de berekeningen van de k-waarden is gebruik gemaakt van SBR- publicatie 9 [5.9].

Het quotiënt van de warmtecapaciteit van de lucht en het warmteverlies door transmissie bedraagt:

$$\text{wintersituatie} : T2 = \rho_{01} \cdot c_1 \cdot V / \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i = (1200 \cdot 8860) / 6535 = 1625 \text{ s}$$

$$\text{zomersituatie} : T2 = \rho_{01} \cdot c_1 \cdot V / \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i = (1200 \cdot 8860) / 13045 = 815 \text{ s}$$

5.3.4 Warmtetransport door ventilatie

Uit metingen van de luchtsnelheden in de verschillende toevoeropeningen is de ventilatievolumestroom afgeleid [5.5].

Zomersituatie:

$$\text{ventilatievolumestroom: } q_v = 31 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V1 = \rho_{01} \cdot c_1 \cdot q_v = 37200 \text{ W/K}$$

$$V2 = V/q_v = 285 \text{ s} \quad n = q_v \cdot 3600/V = 12,6 \text{ h}^{-1}$$

Wintersituatie:

$$\text{ventilatievolumestroom: } q_v = 12,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

(geringer dan in de zomer door het gedeeltelijk sluiten van de deuren; zie [5.5])

$$V1 = \rho_{01} \cdot c_1 \cdot q_v = 15000 \text{ W/K}$$

$$V2 = V/q_v = 710 \text{ s} \quad n = q_v \cdot 3600/V = 5,1 \text{ h}^{-1}$$

5.3.5 Accumulerend vermogen

constructie	ρ_{oi} (kg/m ³)	c_i (J/kg/K)	d_i (m)	A_i (m ²)	$\Sigma \rho_{oi} * c_i * d_i * A_i$ (kJ/K)
vloer, beton	2400	840	0,09	1480	268530
dak, beton	2400	840	0,09	1590	288490
noordwestwand, steens metselw.	1600	840	0,11	147	21730
noordoostwand, steens metselw./ spouwmuur	1600	840	0,11	84	12420
zuidoostwand, steens metselw.	1750	840	0,21	306	94460
zuidwestwand, spouwmuur/ steens metselw.	1600	840	0,11	138	20400
	1750	840	0,21	125	38590
	1600	840	0,11	165	24390

$$C1 = \Sigma(\Sigma \rho_{oi} * c_i * d_i * A_i)_j = 769010 \text{ (kJ/K)}$$

Bij de berekening van het accumulerend vermogen van de binnenwanden is de helft van de dikte in de berekening meegenomen. De waarden voor soortelijke warmte en soortelijke massa zijn ontleend aan [5.9].

Het specifieke warmteaccumulerend vermogen bedraagt:

$$C2 = \Sigma(\Sigma \rho_{oi} * d_i * c_i * A_i)_j / \rho_{oi} * c_i * V = 769010 * 103 / (1200 * 8860) = 72,3 \text{ (-)}$$

De tijdconstante τ bedraagt:

$$C1/U = \Sigma(\Sigma \rho_{oi} * d_i * c_i * A_i)_j / (\Sigma a_i * k_i * A_i + \rho_{oi} * C1 * q_v) =$$

$$\text{wintersituatie: } 769010 * 103 / (6535 + 15000) = 35710 \text{ s (9,9 uur)}$$

$$\text{zomersituatie: } 769010 * 103 / (13045 + 37200) = 15305 \text{ s (4,3 uur)}$$

5.3.6 Interne warmtebronnen

De interne warmteproductie door de aanwezige machines (P1) bedraagt gemiddeld over een dag 374 kW [5.8], verdeeld over 8 bronnen. Er zijn geen gegevens bekend over de warmteproductie per bron. Het door de warmtebronnen in beslag genomen vloeroppervlak bedraagt in totaal circa 50 m².

De verhouding $P2 = A_{\text{bron}}/A_{\text{vloer}}$ bedraagt 0,03.

De verhouding $P4 = \phi_{\text{bron}}/A_{\text{bron}}$ bedraagt 7480 W/m².

De specifieke warmtebelasting door de interne warmtebronnen bedraagt:

$$P5 = \phi_{\text{bron}}/V = 374000/8860 = 42 \text{ W/m}^3$$

De produktie zal hiermee gekarakteriseerd worden als een warm bedrijf.

Het quotiënt van de interne warmteproductie en de warmtecapaciteit van de lucht in de hal bedraagt:

$$P6 = \phi_{\text{bron}}/(\rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{p}} \cdot V) = 374000/10632000 = 0,035 \text{ K/s}$$

De verhoging van de temperatuur van de afvoerlucht ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van de toevoerlucht ten gevolge van de interne warmtebronnen wordt:

$$\text{zomer: } P7 = \delta T = \phi_{\text{bron}}/(\rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{p}} \cdot q_{\text{v}}) = 374000/37200 = 10,1 \text{ K.}$$

$$\text{winter: } P7 = \delta T = \phi_{\text{bron}}/(\rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{p}} \cdot q_{\text{v}}) = 374000/15000 = 24,9 \text{ K.}$$

5.3.7 Zoninstraling

Glasoppervlakken:

Noordwestgevel : 217 m² enkel glas ZTA = 0,80

Zuidwestgevel : 84 m² enkel glas ZTA = 0,80

Het gewogen glasoppervlak bedraagt:

$$A_{\text{glas, gew}} = \sum \text{for} \cdot \text{ZTA} \cdot A_{\text{glas, or}} = (0,67 \cdot 0,8 \cdot 217 + 0,81 \cdot 0,8 \cdot 84) = 171 \text{ m}^2.$$

5.4 Voorbeeld van toepassing: staalfabriek

5.4.1 Omschrijving

In een hal van een staalbedrijf wordt metaal op elektrolytische wijze vertind. De hal ligt geheel ingesloten tussen andere hallen (zie figuur 5.3). Alleen de dakopbouwen (sheds) steken boven de daken van de aangrenzende hallen uit. De hal heeft een rechthoekig grondvlak met afmetingen 176,7 x 32,0 m².

Op het dak zijn 7 sheds aanwezig met een trapeziumvorm (zie figuur 5.3). De schuine vlakken van de sheds bestaan uit enkel glas dat is beschilderd ter beperking van de zonnestraling. In de vijf sheds vanaf de westwand is een afzuigventilator aangebracht. In de noord- en zuidwand zijn ramen aanwezig, die kunnen worden geopend (zie figuur 5.3). De ramen zijn in de zomer geheel geopend en in de winter gedeeltelijk.

In de noord-, zuid- en westwand van de hal zijn verder vrije doorgangen aanwezig die verbinding geven met de aangrenzende hallen.

De buitendeuren in de aangrenzende hallen zijn in de zomer geheel geopend. In de winter zijn deze gesloten. De temperatuur in de aangrenzende hallen bleek tijdens metingen in zomer en winter nagenoeg gelijk aan aan die in hal waar de vertinning plaatsvond.

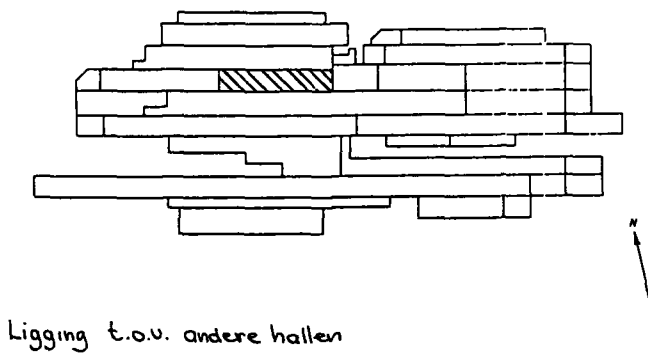
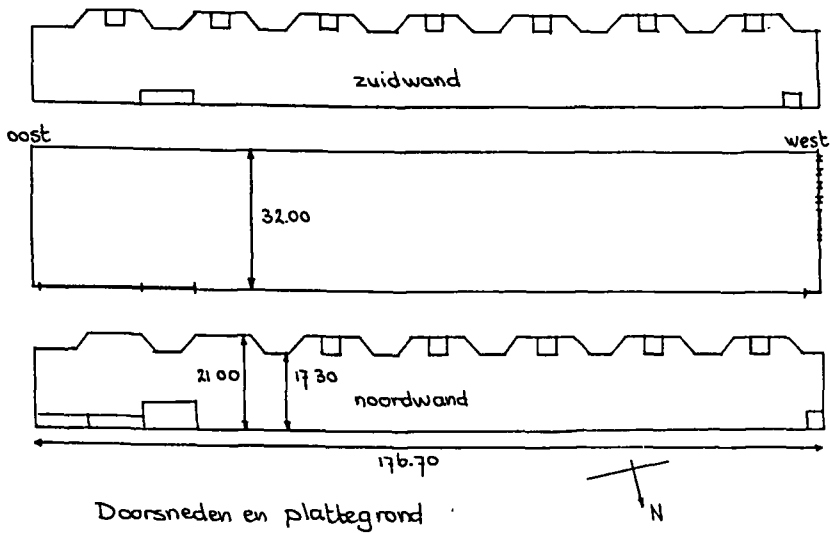
Het dak van de hal bestaat uit bimsbetonplaten met een dikte van 8 cm, aan de bovenzijde voorzien van een bitumineuze dakbedekking. De wanden bestaan uit steens metselwerk met een dikte van 14 cm. De vloer is van beton, 25 cm dik.

In de hal staan twee elektrolytische vertinningsinstallaties. Het toegevoerde elektrische vermogen bedraagt 4700 kJ/s. Volgens opgave van de staalfabriek komt hiervan 2000 kJ/s vrij aan de omgevingslucht. De rest van de warmte wordt afgegeven aan het koelwater.

De gegevens zijn ontleend aan [5.10].

5.4.2 Vorm en afmetingen

Lengte : 176,7 m.
Breedte : 32,0 m.
Hoogte : 19,0 m. (gemiddeld)
Volume : 107500 m³.



Figuur 5.3 Plattegrond en doorsneden van de staalfabriek.

Equivalente diameter	: $D = 6 \cdot V / \sum A_i = 6 \cdot 107500 / 19505 = 33,1 \text{ m.}$
Specifieke lengte	: $l/D = 176,7 / 33,1 = 5,34$
Specifieke breedte	: $b/D = 32 / 33,1 = 0,97$
Specifieke hoogte	: $h/D = 19 / 33,1 = 0,57$

5.4.3 Warmteverlies door transmissie

De wanden van de hal grenzen alle, met uitzondering van de kopwanden van de sheds (noord- en zuidwand), aan andere hallen waar een nagenoeg gelijke temperaturen heersen. Dit betekent dat alleen transmissieverlies optreedt via het dak, de sheds en de vloer.

Berekening van $\sum a_i \cdot k_i \cdot A_i$ voor de wintersituatie:

constructie	A_i (m ²)	k_i (W/m ² .K)	a_i (-)	$a_i \cdot A_i \cdot k_i$ (W/K)
dak	4250	2,5	1	10625
sheds				
glas	2035	5,8	1	11805
metselwerk	315	2,7	1	850
ramen	129	5,8	1	750
vloer	5655	3,3	0,10	1865

$$T1 = \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i = 25895 \text{ W/K}$$

Bij de berekening van de factor a_i van de vloer is op de volgende wijze gebruik gemaakt van de meetgegevens uit [5.10]:

Meting:

- buitentemperatuur: 8,5°C
- gemiddelde temperatuur in de hal: 24°C
- temperatuurverschil binnen-buiten: 15,5°C

Wintersituatie:

- buitentemperatuur: -7°C
- temperatuurverschil binnen-buiten: 15,5°C
- gemiddelde temperatuur in de hal: 8,5°C

- temperatuur van de grond: 7°C

Berekening van $\Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i$ voor de zomersituatie:

constructie	A_i (m ²)	k_i (W/m ² .K)	a_i (-)	$a_i \cdot A_i \cdot k_i$ (W/K)
dak	4250	2,5	1	10625
sheds				
glas	2035	5,8	1	11805
metselwerk	315	2,7	1	850
ramen	129	5,8	1	750
vloer	5655	3,3	3	55985

$$T1 = \Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i = 80015 \text{ W/K}$$

Bij de berekening van de factor a_i van de vloer is op de volgende wijze gebruik gemaakt van de meetgegevens uit [5.10]:

Meting:

- buitentemperatuur: 8,5°C
- gemiddelde temperatuur in de hal: 24°C
- temperatuurverschil binnen-buiten: 15,5°C
- ventilatievolumestroom buitenlucht: 54 m³/s

Zomersituatie:

- buitentemperatuur: 28°C
- correctie temperatuurverschil binnen-buiten i.v.m. hogere ventilatie (zie 5.4.4):
54/117*15,5 = 7,2°C
- gemiddelde temperatuur in de hal: 35°C
- temperatuur van de grond: 13°C

Bij de berekeningen van de k-waarden is gebruik gemaakt van SBR- publikatie 9 [5.9].

Het specifieke warmteverlies door transmissie bedraagt:

$$\text{wintersituatie: } T2 = \rho_{01} \cdot c_{p1} \cdot V / \Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i = (1200 \cdot 107500 / 25895) = 4980 \text{ s}$$

$$\text{zomersituatie : } T2 = \rho_{01} \cdot c_{p1} \cdot V / \Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i = (1200 \cdot 107500 / 80015) = 1610 \text{ s}$$

5.4.4 Warmtetransport door ventilatie

De ventilatievolumestroom kan worden afgeleid uit de metingen van de ingaande en uitgaande volumestromen [5.10].

Wintersituatie:

volumestroom buitenlucht : 54 m³/s

volumestroom lucht afkomstig
uit aangrenzende hallen : 75 m³/s

$$V1 = \rho_{o1} \cdot c_1 \cdot q_v = 154800 \text{ W/K}$$

$$V2 = V/q_v = 835 \text{ s} \quad n = q_v \cdot 3600/V = 4,3 \text{ h}^{-1}$$

Zomersituatie:

volumestroom buitenlucht : 117 m³/s

volumestroom lucht afkomstig
uit aangrenzende hallen : 99 m³/s

$$\rho_{o1} \cdot c_1 \cdot q_v = 259200 \text{ W/K}$$

$$V/q_v = 500 \text{ s} \quad n = q_v \cdot 3600/V = 7,2 \text{ h}^{-1}$$

5.4.5 Accumulerend vermogen

constructie	ρ_{oi} (kg/m ³)	c_i (J/kg.K)	d_i (m)	A_i (m ²)	$\Sigma \rho_{oi} \cdot c_i \cdot d_i \cdot A_i$ (kJ/K)
vloer	2400	840	0,25	5655	2850120
wand oost	1600	840	0,14	555	52215
wand west	1600	840	0,14	555	52215
wand zuid					
binnenwand	1600	840	0,14	3055	287415
buitenwand	1600	840	0,14	415	78085
wand noord					
binnenwand	1600	840	0,14	3055	287415
buitenwand	1600	840	0,14	415	78085
dak	1000	840	0,08	3605	242255

$$C1 = \Sigma(\rho_{oi} \cdot c_i \cdot d_i \cdot A_i)_j \quad 3927805 \text{ kJ/K}$$

Bij de berekening van het accumulerend vermogen van de binnenwanden is de helft van de dikte in de berekening meegenomen. De waarden voor de soortelijke warmte en de soortelijke massa zijn ontleend aan [5.9].

Het specifieke warmte-accumulerende vermogen bedraagt:

$$C2 = \Sigma(\rho_{01} \cdot c_1 \cdot d_i \cdot A_i) / \rho_{01} \cdot c_1 \cdot V = 3927805 \cdot 103 / 1,2 \cdot 1000 \cdot 107500 = 30,4 \quad (-)$$

De tijdconstante τ bedraagt:

$$\tau = C1/U = \Sigma(\rho_{01} \cdot c_1 \cdot d_i \cdot A_i) / (\Sigma a_i \cdot k_i \cdot A_i + \rho_{01} \cdot c_1 \cdot q_v) =$$

$$\text{wintersituatie} : \tau = 3927805 \cdot 10^3 / (25895 + 154800) = 21737 \text{ s} = 6,0 \text{ uur}$$

$$\text{zomersituatie} : \tau = 3927805 \cdot 10^3 / (80015 + 259200) = 11579 \text{ s} = 3,2 \text{ uur}$$

5.4.6 Interne warmtebronnen

De interne warmteproductie door de aanwezige machines (P1) bedraagt 2000 kW, gelijk verdeeld over twee bronnen. Het vloeroppervlak dat door de machines in beslag wordt genomen bedraagt circa 190 m² per machine. De machines hebben elk een volume van circa 1050 m³.

De verhouding $P2 = A_{\text{bron}}/A_{\text{vloer}}$ bedraagt $380/5655 = 0,067$

De verhouding $P3 = V_{\text{bron}}/V$ bedraagt $2100/107500 = 0,020$.

De verhouding $P4 = \phi_{\text{bron}}/A_{\text{bron}}$ bedraagt $2000000/380 = 5265 \text{ W/m}^2$.

De specifieke warmtebelasting door de interne warmtebronnen bedraagt:

$$P5 = \phi_{\text{bron}}/V = 2000000/107500 = 18,6 \text{ W/m}^3$$

De hal zou hiermee volgens Oppl [5.9] en Schnauffer [5.10] gekarakteriseerd worden als een koud bedrijf (!) en volgens Hansen en Spitzner [5.9] als een warm bedrijf.

Het quotiënt van de interne warmteproductie en de warmtecapaciteit van de lucht in de hal bedraagt:

$$P6 = \phi_{\text{bron}} / (\rho_{01} \cdot c_1 \cdot V) = 2 \cdot 10^6 / 129 \cdot 10^6 = 0,0155 \text{ K/s}$$

De verhoging van de luchttemperatuur in de ruimte ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van de toevoerlucht ten gevolge van de interne warmtebronnen wordt:

$$\text{winter: } P7 = \delta T = \phi_{\text{bron}} / (\rho_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{p}} \cdot q_{\text{v}}) = 2000000 / 154800 = 12,9 \text{ K}$$

$$\text{zomer: } P7 = \delta T = \phi_{\text{bron}} / (\rho_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{p}} \cdot q_{\text{v}}) = 2000000 / 259200 = 7,7 \text{ K}$$

5.4.7 Zoninstraling

Glasoppervlak:

Noordgevel : 54 m² enkel glas ZTA = 0,80

Zuidgevel : 75 m² enkel glas ZTA = 0,80

Westgevel : 1020 m² enkel glas ZTA = 0,20, $\alpha = 45^\circ$

splitsen in 720 m² verticaal oppervlak en 720 m² horizontaal oppervlak

Oostgevel : 1020 m² enkel glas ZTA = 0,20 $\alpha = 45^\circ$

splitsen in 720 m² verticaal oppervlak en 720 m² horizontaal oppervlak

Het gewogen glasoppervlak bedraagt:

$$A_{\text{glas, gew}} = \sum \text{for} \cdot ZTA \cdot A_{\text{glas, or}} = (0,24 \cdot 0,80 \cdot 54 + 0,69 \cdot 0,80 \cdot 75 + 0,89 \cdot 0,20 \cdot 720 + 1 \cdot 0,20 \cdot 720 + 0,45 \cdot 0,20 \cdot 720 + 1 \cdot 0,20 \cdot 720) = 612 \text{ m}^2.$$

5.5 Overzicht van de resultaten

In tabel 5.3 wordt een overzicht van de berekende kentallen van de twee voorbeelden gegeven.

Tabel 5.3 *Overzicht van de berekende kentallen.*

Kental		Zuivelfabriek	Staal fabriek
l	(m)	60	176,7
b	(m)	27	32
h	(m)	6,5	19
D	(m)	12,4	33,1
V	(m ³)	8860	107500
l/D	(-)	4,83	5,34
b/D	(-)	2,18	0,97
h/D	(-)	0,52	0,57

Kengetal		Zuivelfabriek	Staalafabriek
T1 = $\sum a_i \cdot k_i \cdot A_i$	(W/K)		
winter		6535	25895
zomer		13045	80015
T2 = $\rho_{o1} \cdot c_j \cdot V / \sum a_i \cdot k_i \cdot A_i$	(s)		
winter		1625	4980
zomer		815	1610
V1 = $\rho_{o1} \cdot c_j \cdot q_v$	(W/K)		
winter		15000	154800
zomer		37200	259200
V2 = V / q_v	(s)		
winter		710	833
zomer		285	500
n	(1/h)		
winter		5,1	4,3
zomer		12,6	7,2
C1 = $\sum C_j = \sum (\rho_{o1} \cdot c_j \cdot d_i \cdot A_{ij})$	(kJ/K)	769010	3927805
C2 = $\sum C_j / \rho_{o1} \cdot c_j \cdot V$	(-)	72,3	30,4
$\tau = C1 / U = \sum (\rho_{o1} \cdot C_j \cdot d_i \cdot A_{ij}) / (\sum a_i \cdot k_i \cdot A_i + \rho_{o1} \cdot c_j \cdot q_v)$	(s)		
winter		35710	21737
zomer		15305	11579
P1 = \varnothing_{bron}	(kW)	374	2000
P2 = A_{bron} / A_{vloer}	(-)	0,03	0,067
P3 = V_{bron} / V	(-)		0,02
P4 = $\varnothing_{bron} / A_{bron}$	(W/m ²)	7480	5265
P5 = \varnothing_{bron} / V	(W/m ³)	42	18,6
P6 = $\varnothing_{bron} / \rho_{o1} \cdot c_j \cdot V$	(K/s)	0,035	0,0155
P7 = δT	(k)		
winter		24,9	12,9
zomer		10,1	7,7
A _{glas,gew}	(m ²)	171	612

5.6 Literatuur

[5.1] Crommelin, R.D.

Aspecten bij de keuze van ventilatiesystemen in fabrieken.
Rapport R86/126, MT-TNO, mei 1986.

[5.2] Cox, C.W.J.

Een inventarisatiemethode voor klimaatomstandigheden in bedrijven:
opstelling van de methode en evaluatie van de beproeving.
Proefinventarisatie, deelrapport 1.
Rapport R87, 197b, MT-TNO, Afdeling Binnenmilieu, 1987.

[5.3] NEN 5066

Warmteverliesberekening voor gebouwen.
Berekening van het benodigde vermogen voor het verwarmen van gebouwen.
NNI, januari, 1989.

[5.4] NEN 5067

Koellastberekeningen voor gebouwen.
NNI, juni 1985.

[5.5] Gids, W.F. de

Concept P-blad Industriële Ventilatie (in druk)
Directoraat-Generaal van de Arbeid, Voorburg, 1989.

[5.6] Oppl, L.

Die Probleme der Lüftung und Klimatisierung warmer Betriebe.
Parijs, 4e Congres International du Chauffage et de la Climatisation, 1967.

[5.7] Schnauffer, K.

Lüftung von Kompaktbauten.
Luft- und Klimatechnik, 1972/6.

[5.8] Cox, C.

Vaststelling van de klimaatbelasting van werknemers in een
zuivelproduktenfabriek.
Proefinventarisatie, deelrapport II.

-
- Rapport R87/140a, MT-TNO, september 1987.**
- [5.9] Eigenschappen van bouw- en isolatiematerialen.**
SBR-publicatie 9.
Stichting Bouwresearch.
Kluwer Technische Boeken B.V., 3e gewijzigde druk, 1982.
- [5.10] Crommelin, R.D., F.C. van Beukering, P. Boekesteijn, R. Ebens**
De verspreiding van luchtverontreiniging in fabrieksruidten onder invloed
van luchtstroming ten gevolge van warmte, wind en ventilatoren.
Metingen in de S-hal van de vertinnerijen van Hoogovens IJmuiden b.v.
Rapport C312, IG-TNO, januari 1973

6. DE RELATIE TUSSEN KLIMAAT EN PRESTATIE

6.1 Inleiding

Maatregelen en projekten gericht op de verbetering van arbeidsomstandigheden (waaronder het thermisch klimaat) kunnen uit bedrijfseconomisch gezichtspunt, met behulp van een kosten-baten-analyse worden beoordeeld en geëvalueerd [6.12].

Gegevens over de invloed van de thermische belasting op de produktiviteit c.q. prestatie bij de verrichte taken zijn noodzakelijk om de baten van maatregelen voor klimaatproblemen te kunnen kwantificeren.

Op basis van een literatuurstudie, onder andere door een on-line literatuur-recherche, is een inventarisatie gemaakt van gegevens over de invloed van de thermische belasting op de produktiviteit c.q. prestatie.

De literatuurrecherche heeft een groot aantal studies over de relatie tussen de (individuele) prestatie en de thermische belasting opgeleverd. Slechts weinig materiaal werd gevonden over de invloed van van de thermische belasting op de produktiviteit van een bedrijf als geheel. Veel studies naar de relatie tussen prestatie en klimaat zijn uitgevoerd in het laboratorium.

Ten behoeve van het overzicht is bij de bespreking van de invloed van de thermische belasting op de prestatie op basis van de literatuurgegevens een onderverdeling gemaakt in het type werk, respectievelijk fysieke arbeid en mentale arbeid, en in de aard van de thermische belasting, respectievelijk warmte of koude. Daarnaast worden verschillende theorieën waarmee de invloed van de thermische belasting op de prestatie kan worden verklaard beschreven.

Bedrijfsongevallen zullen in het algemeen, naast mogelijk persoonlijk letsel, leiden tot stilstandsverliezen en/of beschadiging van machines of produkt en daarmee een afname van de produktiviteit tot gevolg hebben. In deze literatuurstudie is daarom ook de relatie tussen de thermische belasting en het optreden van bedrijfsongevallen beschouwd.

6.2 De invloed van de thermische belasting op de prestatie: theorie

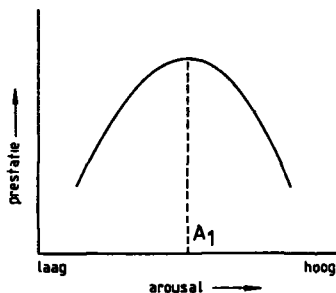
Voor het verklaren van het effect van het thermisch klimaat op de prestatie worden verschillende theoriën voorgesteld [6.7,6.17, 6.24,6.35,6.46]. De verschillende theoriën worden hieronder toegelicht.

6.2.1 De arousal-theorie

Voor het verklaren van het effect van de thermische belasting op de prestatie wordt de zogenaamde "arousal"-theorie toegepast [6.7,6.17,6.20,6.24,6.35,6.46]. Onder "arousal" wordt de mate van algemene activatie van een individu tussen slaap (minimum) en uitzinnigheid (maximum) verstaan. De mate van arousal kan niet worden gekwantificeerd met een absolute waarde.

De mate van arousal is afhankelijk van een aantal factoren. Uitgangspunt is het per individu verschillende basisniveau. Boosheid, angst, pijn en vreugde verhogen de mate van arousal. De taak die een persoon verricht is eveneens van invloed op het niveau van arousal.

De relatie tussen de mate van arousal en de prestatie heeft de vorm van een omgekeerde U (zie figuur 6.1). Deze relatie staat bekend als de Yerkes-Dodson-wet. Voor elke taak is er slechts één optimale mate van arousal bij een waarde tussen minimum en maximum [6.20,6.24,6.35,6.46]. Bij een mate van arousal lager dan het optimum verhoogt een stimulus de prestatie, bij een mate van arousal hoger dan het optimum verlaagt een stimulus de prestatie [6.46]. Bij twee taken met verschillende optima voor het verrichten van die taken zal een toename van de mate van arousal tussen de twee optima in leiden tot een toename van prestatie van de ene taak en een afname van de prestatie bij de andere taak.

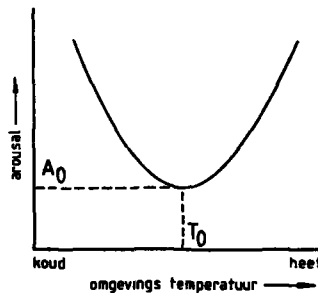


Figuur 6.1. De prestatie bij het verrichten van een taak als functie van de mate van arousal. Het optimum van de mate van arousal voor een bepaalde taak (A1) is een functie van de complexiteit van de taak [6.24].

De taak die een persoon verricht is zelf ook van invloed op het niveau van arousal. Een complexe taak geeft een grotere toename van de mate van arousal dan een eenvoudige taak. Hierbij spelen ook de vaardigheid en de ervaring van de persoon een rol [6.24, 6.35]. Bij het uitvoeren van een taak spelen daarnaast motivatie (wens om de taak goed uit te voeren) en de inspanning van de persoon een belangrijke rol. Een hoge motivatie en een grote inspanning verhogen de mate van arousal. Dit kan zowel een positief als een negatief effect op de prestatie hebben [6.46]. Zo neemt de prestatie af bij taken waarbij simultaan een aantal signalen dienen te worden waargenomen ("cue utilisation") bij een toenemende mate van arousal. Complexe taken en onbekende taken gaan gepaard met een hoge mate van cue-utilisation en zijn daardoor gevoeliger voor prestatie-afname [6.24,6.46]. Een hoge mate van arousal leidt tot een vernauwing van de aandacht naar de centrale taak, waarbij de randaspecten minder aandacht krijgen. Bij een lage mate van arousal wordt het concentreren op een taak bemoeilijkt doordat men sneller afgeleid wordt door andere (irrelevante) signalen uit de omgeving [6.46].

De mate van arousal is ook afhankelijk van de omgevingstemperatuur. De minimumwaarde voor de mate van arousal als functie van de temperatuur treedt niet op bij de thermisch neutrale temperatuur maar bij milde warmte (zie figuur 6.2) [6.24,6.46]. De mate van vasodilatatie is dan maximaal, de persoon transpireert net niet [6.46].

De verlaging van de mate van arousal door een gematigde warmtebelasting kan teniet worden gedaan door een verhoging van de mate van arousal ten gevolge van een bewuste mentale inspanning. Daarnaast kan thermisch discomfort aanleiding geven tot irritatie en als reden gebruikt worden om niet of minder hard te werken [6.46].



Figuur 6.2 De mate van arousal als functie van de temperatuur. De temperatuur T_0 behorende bij een minimaal niveau van arousal lijkt enigszins hoger te zijn dan de temperatuur behorende bij een thermische neutrale situatie [6.24].

De grootste verandering in prestatie bij een verandering in temperatuur treedt op bij complexe taken. Bij simpele taken, die het best worden verricht bij een zekere mate van externe belasting, treedt de optimale prestatie op bij temperaturen die enigzins hoger of lager zijn dan die die leiden tot minimum arousal. Bij een complexe taak, met een hoge mate van interne verhoging van de mate van arousal, treedt optimale prestatie op bij de temperatuur die correspondeert met minimum arousal [6.24]. Uit het bovenstaande blijkt dat het mogelijk is dat er bij sommige taken (met name reactievermogen en waakzaamheid) bij een toename van de omgevingsbelasting een toename van de prestatie optreedt.

De twee grootste bezwaren die worden ingebracht tegen de arousal-theorie zijn het feit dat de mate van arousal niet of slechts moeilijk in een fysiologische maat is uit te drukken [6.7,6.46] en het feit dat met de theorie wel veel effecten kunnen worden verklaard maar slechts een geringe voorspellende kracht heeft [6.6,6.7,6.17]. Hancock [6.17] stelt dat de validiteit van de arousal theorie door steeds meer onderzoekers wordt betwijfeld.

6.2.2 De distraction-theorie

Enander [6.6,6.7] noemt voor de verklaring van de invloed van de thermische belasting op de prestatie de zogenaamde distraction-theorie, zoals die oorspronkelijk door Teichner in 1958 werd voorgesteld. Op basis van deze theorie wordt gesteld dat de thermische belasting de aandacht afleidt van de uit te voeren taak en zo tot vermindering van de prestatie leidt. Volgens Enander is de theorie slechts in een beperkt aantal gevallen toepasbaar. Met behulp van de theorie kan geen verklaring worden gegeven voor de toename van de prestatie bij sommige taken onder invloed van een thermische belasting (zie paragraaf 6.3).

6.2.3 De attentie-theorie

Door Hancock [6.17] en Ramsey [6.35] wordt als oorzaak voor de afname van de prestatie onder invloed van het thermisch klimaat de vernauwing van de aandacht (attentie) ten gevolge van de thermische belasting genoemd. Een thermische belasting vraagt aandacht van een individu. Dit resulteert in een geringere aandacht voor de taak met als gevolg een afname van de prestatie. Taken die veel aandacht vragen zullen eerder worden beïnvloed dan taken die minder aandacht vragen.

Ook voor deze theorie geldt dat geen verklaring mogelijk is voor een toename van de prestatie onder invloed van een thermische belasting.

De distraction-theorie en de attentie-theorie komen in principe op dezelfde verklaring van de afname van de prestatie neer. Wyon [6.46] stelt dat de afleiding van de uit te voeren taak een indirect effect van van het klimaat is.

Ramsey [6.35] stelt dat geen enkele theorie het verband tussen prestatie en thermische belasting geheel kan verklaren. Volgens hem kan met een samenstel van de verschillende theorieën de resultaten van veel onderzoeken naar de relatie tussen klimaat en prestatie verklaren, maar blijven er uitzonderingen bestaan.

6.3 De invloed van warmte op de prestatie

6.3.1 De invloed van warmte op de prestatie bij fysieke arbeid

De prestatie bij fysiek werk onder hittebelasting is door verschillende onderzoekers bepaald op basis van praktijk- of laboratoriumonderzoek. De vergelijking van de resultaten van de verschillende onderzoeken wordt onder andere bemoeilijkt doordat er geen uniformiteit is in de toegepaste grootheden en indices om het klimaat te beschrijven [6.35]. Voor de beschrijving van het klimaat worden zowel de luchttemperatuur, de effectieve temperatuur (ET) als de WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) gebruikt. Deze grootheid en indices zijn niet altijd in elkaar om te rekenen door het ontbreken van noodzakelijke gegevens.

De effectieve temperatuur (ET) is een empirische index gebaseerd op experimenten waarbij proefpersonen bepaalde combinaties van klimaatfactoren in één ruimte vergeleken met een "standaardklimaat" met een relatieve vochtigheid van 100% en een gemiddelde luchtsnelheid van 0,12 m/s en een variabele luchttemperatuur in een aangrenzende ruimte. Een ET van 25°C geeft dus aan dat de combinatie van klimaatfactoren een warmtegevoel geeft zoals dat ervaren wordt bij een luchttemperatuur van 25°C, een relatieve vochtigheid van 100% en een luchtsnelheid van 0,12 m/s.

De onderzoeken zijn voornamelijk in het laboratorium uitgevoerd. Als proefpersonen fungeerden vaak jonge mannen, studenten of militairen. De duur van de blootstelling varieert evenals het type werk dat wordt verricht. Daarnaast spelen de mate van acclimatisatie, de vaardigheid, de ervaring en de motivatie van de personen een rol bij de resultaten van de onderzoeken [6.35].

Op basis van een literatuurstudie stelt McIntyre dat de afname van de prestatie bij fysiek werk onder hittebelasting een functie is van tijd en temperatuur [6.24]. Er kunnen grote verschillen optreden in het prestatievermogen onder hittebelasting tussen verschillende individuen [6.41].

De eerste onderzoeken naar de relatie tussen de fysieke werkprestatie en klimaat werden uitgevoerd in het begin van de 20e eeuw. Overzichten van de resultaten worden gegeven door Billington en McIntyre [6.3,6.24]. Uit de onderzoeken wordt een afname van de fysieke werkprestatie afgeleid van circa 2% per °C temperatuurstijging boven een optimale luchttemperatuur van circa 20°C [6.3].

De bovengenoemde waarden voor de afname van de fysieke werkprestatie als functie van de temperatuur worden niet bevestigd door na de Tweede Wereldoorlog uitgevoerd onderzoek. Uit laboratorium- en praktijkonderzoek is gebleken dat pas boven een effectieve temperatuur (ET) van 27 à 30°C een duidelijke afname van de fysieke werkprestatie optreedt [6.24,6.31,6.43]. Bij een ET van 34°C bedraagt de prestatie nog maar 20% van de maximale prestatie bij effectieve temperaturen tussen 22 en 30°C [6.43]. De afname van de prestatie bij fysiek werk kan volgens McIntyre [6.24] worden verklaard uit het feit dat bloed in plaats van naar de spieren naar de huid wordt getransporteerd ten behoeve van de thermoregulatie. Volgens Havenith [6.18] is er bij een combinatie van fysieke arbeid in combinatie met een thermische belasting sprake van een afname van het slagvolume van het hart waardoor er minder bloed wordt getransporteerd.

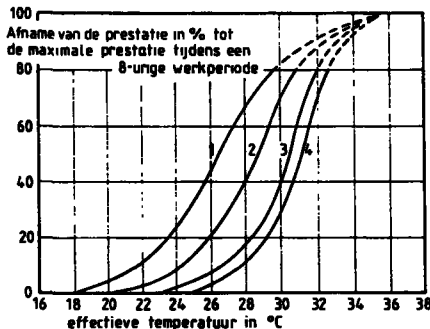
Voor temperaturen lager dan 30°C ET stellen sommige onderzoekers dat de prestatie toeneemt met temperaturen hoger dan die waarbij de personen zich thermisch comfortabel voelen. Laboratoriumonderzoek door Meese wees uit dat de optimale prestatie bij -licht-industrieel werk niet optreedt onder comfortsituaties (luchttemperatuur 20°C (18°C ET)) maar onder matig warme condities (luchttemperatuur 32°C (24°C ET)) [6.26,6.27]. Onder matig warme condities was de prestatie circa 10 à 15% hoger dan onder comfortabele condities. Bij een luchttemperatuur van 38°C (27°C ET) was er sprake van een geringere prestatie dan bij een luchttemperatuur van 32°C (24°C ET) [6.27]. Bij de luchttemperatuur van 38°C (27°C ET) was zweetverdamping de enige mogelijkheid om de warmtbelans van het lichaam in evenwicht te houden. De lagere prestatie bij deze temperatuur kan mogelijk worden verklaard uit het feit dat personen wanneer de transpiratie op het punt staat te beginnen zoveel mogelijk ontspannen om zo het transpireren tegen te gaan [6.48].

Link en Pepler [6.23,6.32] en Woods [6.42] vonden in praktijkonderzoek geen relatie tussen de totale produktiviteit van een bedrijf en de thermische belasting. Voor (bepaalde) individuen was er (bij bepaalde taken) wel een beïnvloeding van de fysieke werkprestatie door het klimaat [6.23,6.42]. Link vond een afname van de individuele prestatie van circa 2% per °C tussen 20°C ET en 27°C ET [6.23]. Woods stelt dat de thermische belasting in zijn onderzoek te laag was om effect te hebben op de prestatie en concludeert dat de prestatie werd bepaald door de hoeveelheid te verrichten werk [6.42].

Uit praktijkstudies blijkt volgens [6.31] dat bij een plotselinge blootstelling van werknemers in industriële bedrijven aan 23 tot 25°C ET een afname van de produktiviteit optreedt. De thermische belasting tijdens de voorafgaande dagen of week zou een belangrijke invloedsfactor op de respons van de arbeiders bij deze temperaturen zijn.

In [6.46] wordt een optimale temperatuur voor industrieel werk gegeven van 13 tot 29°C, uitgaande van "normale" luchtvochtigheden. Er wordt niet vermeld wat onder normale luchtvochtigheden dient te worden verstaan.

Door Risse [6.37] wordt een diagram (figuur 6.3) gegeven voor de bepaling van het prestatieverlies voor een werkperiode van 8 uur als functie van de ET voor gezonde, jonge, gemotiveerde personen. Voor matig zwaar en zwaar werk treedt er al een duidelijke afname op van de prestatie bij respectievelijk 24°C ET en 22°C ET. De afname bedraagt 5 à 10% per °C. Deze waarden wijken af van de door Wyndham [6.43] gepresenteerde waarden. De door Risse gepresenteerde gegevens zijn afkomstig uit [6.39]. Hierin wordt voor de herkomst van de gegevens verwezen naar niet nader gespecificeerde literatuur.



- 1. Zware lichamelijke arbeid
- 2. Matig zware lichamelijke arbeid
- 3. Lichte lichamelijke arbeid
- 4. Mentale arbeid

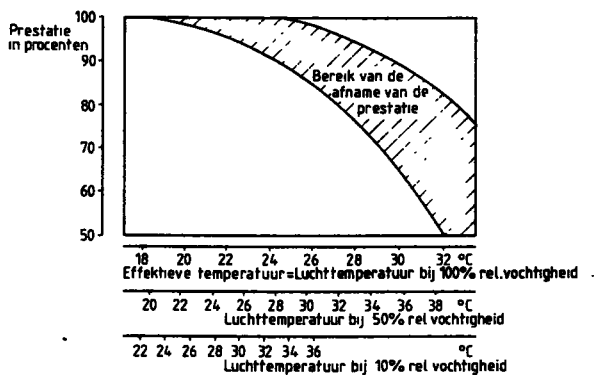
Figuur 6.3. Afname van de prestatie als functie van de effectieve temperatuur voor jonge gemotiveerde personen [6.37].

Eissing [6.8] geeft een door Grandjean voorgestelde tabel waarin de effecten van de toename van de omgevingstemperatuur op het prestatievermogen wordt gegeven (zie figuur 6.4).

Eissing [6.8] geeft een diagram waarin de resultaten van onderzoeken naar het effect van warmte op de prestatie bij mentale en fysieke arbeid worden gegeven (zie figuur 6.5). Volgens Eissing betreft het een eenvoudige en daardoor grove weergave. De figuur is gebaseerd op een groot aantal, niet nader gespecificeerde, literatuurgegevens.

20°C	behaaglijkheidstemperatuur	volledig prestatievermogen
	onbehaaglijk prikkelbaar concentratie-stoornis prestatieverlies bij mentale arbeid	psychische storingen
	toename van arbeidsfouten prestatieverlies bij werk dat handigheid vereist toename van ongelukken	psycho- fysiologische storingen
	prestatieverlies bij zware arbeid ontregeling van de water- en zout- huishouding van het lichaam hoge belasting van hart en bloed- hoge mate van vermoeidheid dreigende uitputting	fysiologische storingen vaten
35-40°C	temperatuur die nog net kan worden verdragen	

Figuur 6.4. De invloed van de ruimtetemperatuur op het prestatievermogen volgens Grandjean. Relatieve vochtigheid 50% [6.8].



Figuur 6.5. Afname van de prestatie door warmte (gebaseerd op een groot aantal literatuurgegevens) [6.8]

Conclusies.

Door het ontbreken van specifieke literatuurverwijzingen kunnen de kwantitatieve gegevens over de afname van de prestatie onder invloed van een warmtebelasting volgens Skiba [6.37] en Eissing [6.8] niet op hun waarde worden beoordeeld. De opgegeven waarden worden niet onderschreven door de overige literatuur. De waarden van Skiba en Eissing komen niet met elkaar overeen.

De resultaten van de praktijkonderzoeken leveren geen duidelijke uitspraak over de invloed van het klimaat op de produktiviteit. Een probleem bij het afleiden van een algemeen geldende conclusie vormt het grote aantal van invloed zijnde factoren. Met name de motivatie van de (proef-)personen speelt een belangrijke rol.

Ten aanzien van de resultaten van de laboratorium-onderzoeken dient men zich te realiseren dat de effecten van de thermische belasting op de prestatie onder laboratorium-omstandigheden wellicht geringer is dan in de praktijk vanwege de hogere motivatie van de personen en het feit dat thermische onbehaaglijkheid minder snel tot afleiding leidt.

Op basis van de resultaten van het (laboratorium-)onderzoek van Meese kan worden gesteld dat bij een ET tot 27°C de thermische belasting geen effect op de prestatie bij licht tot matig fysiek werk zal hebben. Bij een ET hoger dan 27°C neemt de prestatie af.

Wanneer de zwaarte van het werk en de omgevingscondities zodanig zijn dat beperking van de blootstelling van de arbeider noodzakelijk is, is er vanzelfsprekend ook sprake van een prestatieverlies. De criteria van ISO voor blootstelling aan warme omgevingen kunnen worden gebruikt voor het afleiden van temperatuurgrenzen.

6.3.2 De invloed van warmte op de prestatie bij mentale taken

Er is zeer veel onderzoek verricht naar de relatie tussen warmte en de prestatie bij mentale taken [6.35]. De onderzoeken geven tegenstrijdige resultaten te zien [6.10,6.30,6.33,6.35]. In de verschillende experimenten werd een positief, een negatief en geen effect gevonden van warmte op de prestatie. Kobrick en Fine [6.30] stellen op basis van een literatuurstudie van 96 onderzoeken naar effecten van warmte op de taakprestatie dat algemene conclusies vrijwel onmogelijk te trekken zijn op basis van de beschikbare data.

Volgens Ramsey [6.35] is dit te wijten aan het grote aantal invloedsfactoren zoals de aard van de thermische belasting, de duur van de blootstelling, de aard van de taak, de mate van acclimatisatie, het eventueel verrichten van fysiek werk, de vaardigheid van de persoon, de motivatie van de persoon, de mate van arousal, de aanwezigheid van andere belastende factoren en effecten van kleding.

6.3.2.1 Thermisch comfortabele condities

Door een groot aantal onderzoekers is de relatie tussen de mentale prestatie en thermisch comfort onderzocht. Griffiths [6.11] stelt op basis van laboratoriumonderzoek dat de optimale prestatie voor een complexe mentale taak optreedt bij de geprefereerde temperatuur voor thermisch comfort. Bij een stijging van de omgevingstemperatuur is er aanvankelijk een afname van de mentale prestatie, bij een verdere stijging van de omgevingstemperatuur neemt de prestatie vervolgens weer toe. Kobrick [6.30] stelt dat de indruk bestaat dat er een afname van de prestatie met toenemend discomfort optreedt. Kobrick merkt verder op dat optimale prestatie en comfort niet door alle personen bij dezelfde omstandigheden worden bereikt.

In een laboratoriumonderzoek waarbij kantoorwerk werd gesimuleerd vond Langkilde [6.21,6.22] dat de mentale prestatie bij temperaturen respectievelijk 4°C en 6°C hoger dan de geprefereerde comforttemperatuur slechts in geringe mate afweek van de prestatie bij de comforttemperatuur. Bij de hogere temperaturen beoordeelden de personen de lucht als benauwder en voelden zij zich slaperiger en vermoeider. De "cue utilization test" werd niet beter uitgevoerd aan de warme zijde van de neutrale conditie, in tegenstelling tot een onderzoek van Wyon [6.47].

Op basis van een literatuurstudie stelt McIntyre [6.24] dat er slechts een gering effect van de temperatuur op de prestatie is in geval van kantoorwerk verricht door gemotiveerde personen. Gonzalez [6.9] stelt dat voor taken waarin aandacht, geheugen en routine de belangrijkste componenten vormen in een omgeving die door 80% van de personen als thermisch behaaglijk wordt ervaren geen afname van de prestaties te verwachten is. Bij dit soort taken kan de prestatie worden afgeleid uit de bepaling van de thermische behaaglijkheid.

De mentale prestaties bij twee condities van thermische behaaglijkheid, in het ene geval bereikt met lichte kleding (0,6 clo) bij een gemiddelde temperatuur van 23,2°C en in het andere geval met zware kleding (1,15 clo) bij 18,7°C, waren nagenoeg gelijk [6.47]. De extra stimulus ten gevolge van de lokale koeling van hoofd, handen en ademhalingsstelsel had geen betere prestatie tot gevolg.

6.3.2.2 Gematigd warme condities

Voor taken waarbij het geheugen een belangrijke component vormt werd door Meese [6.27] de beste prestatie gevonden bij matig warme condities (luchttemperatuur 26°C tot 32°C, absolute vochtigheid 1 kPa: 21°C ET tot 24°C ET). Als verklaring wordt de verlaging van de mate van arousal juist voor de start van het transpireren gegeven.

Door Wyon werd de invloed van een gematigd warm klimaat op de prestatie bij schoolkinderen onderzocht [6.46]. De prestaties waren bij 27°C lager dan bij 20°C. Tevens waren de kinderen bij 27°C onrustiger en voelden zij zich vermoeider. Als verklaring wordt het lage niveau van arousal gegeven. De prestatie kon bij 27°C op hetzelfde niveau als bij 20°C worden gehouden door een verhoogde mentale inspanning. "Cue utilisation" was beter bij 27°C door de lagere mate van arousal.

In een ander onderzoek stelde Wyon 17-jarige scholieren bloot aan een langzaam stijgende luchttemperatuur in het gebied van 20 tot 29°C. De maximale stijging bedroeg 4 °C/h. De absolute vochtigheid was constant [6.47]. Door de scholieren werd een luchttemperatuur van 23°C als comfortabel ervaren. Wyon concludeert dat een gematigde warmtebelasting, enkele graden boven de comforttemperatuur, een duidelijke invloed heeft op de prestatie bij mentale taken wanneer de luchttemperatuur langzaam stijgt. De prestatie bij taken die helder denken en concentratie vereisen neemt dan af. De beste prestatie bij dergelijke taken treedt op bij thermisch comfort. De prestatie bij taken waarbij het geheugen en "cue-utilisation" een belangrijke rol spelen neemt toe tot een luchttemperatuur van 26°C. Volgens Wyon geeft thermisch comfort geen aanwijzing over de prestatie bij mentale taken. Het thermisch comfort dient te worden beschouwd als een bijproduct van de interactie tussen de effecten van de taak en de omgeving op het gedrag van een persoon.

Op basis van literatuurgegevens stelt McIntyre [6.24] dat leerprestaties beter zullen zijn bij een temperatuur van 22 à 23°C dan bij 26°C of meer. Bij temperaturen gelijk aan of hoger dan 27°C begint een afname op te treden waarvan de grootte afhankelijk is van de aard van de taak.

Een kwantitatieve bepaling van het verlies in arbeidsproductiviteit bij mentale arbeid wordt gegeven in een Russisch onderzoek [6.49,6.50]. Op basis van een verband tussen het percentage correcte verrichtingen (bij rekenen) en de temperatuur en een verband tussen de effectieve werktijd en de temperatuur wordt de verandering in arbeidsproductiviteit van de temperatuur bepaald ten opzichte van een temperatuur van 22°C. Uitgangspunt hierbij is dat een verhoging van de prestatie met 1% een verhoging van de arbeidsproductiviteit van 0,2% tot gevolg heeft. Dit uitgangspunt wordt niet nader toegelicht.

In [6.49] wordt melding gemaakt van een Amerikaans onderzoek waarin de prestatie in geklimatiseerde en niet-geklimatiseerde kantoren zijn vergeleken (onder identieke randvoorwaarden). De prestatie in de geklimatiseerde kantoren was gemiddeld 9,5% hoger dan in niet-geklimatiseerde kantoren. De absentie was in geklimatiseerde kantoren 2,5% lager dan in niet-geklimatiseerde kantoren.

Uit een literatuurstudie naar de invloed van het klimaat op het nemen van beslissingen concludeert Bell [6.2] dat een aantal aspecten van het nemen van een beslissing mogelijk negatief kan worden beïnvloed door een thermische belasting. Een kwantitatieve uitspraak wordt niet gedaan.

6.3.2.3 Extreme condities

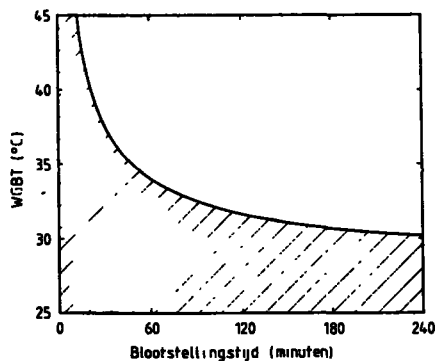
Naast het verloop van de mentale prestatie onder comfortabele en matig warme omstandigheden is door veel onderzoekers aandacht besteed aan de drempelwaarde van de temperatuur waarboven een duidelijke afname van mentale prestatie optreedt. De mentale prestatie neemt duidelijk af boven een ET van 27 à 30°C (6.3,6.10,6.13,6.15,6.24,6.29,6.37,6.40, 6.41]. Voor hitte-geacclimatiseerde Indiërs werd een temperatuur van 32 à 33°C ET gevonden waarboven een afname van de mentale prestatie optreedt [6.38].

De temperatuur waarboven een afname van de prestatie optreedt komt overeen met de temperatuur waarboven een absolute, fysiologisch niet te compenseren stijging van de lichaamstemperatuur optreedt [6.10,6.13,6.15,6.17,6.20].

Grether stelt dat de afname van de prestatie een gevolg is van het gevoel van onbehaaglijkheid, slaperigheid en het ongerief en de afleiding veroorzaakt door het transpireren [6.10]. De afname is afhankelijk van de competentie van de persoon en kan volgens Wenzel ten dele worden gecompenseerd door een verhoogde motivatie [6.41]. De zwaarte van de taak, acclimatisatie, eventueel slaapgebrek, tijddruk en duur van de taak bepalen de temperatuur waarboven een afname van de mentale prestatie optreedt [6.13, 6.41].

Bij een ET lager dan 27°C is er een effect van de thermische belasting op de reactiesnelheid en de waakzaamheid [6.10,6.38]. De reactiesnelheid neemt toe met een stijgende ET. Dit is een gevolg van de grotere snelheid van de zenuwactiviteiten bij een toename van de lichaamstemperatuur. De prestatie bij het waken neemt toe bij een ET tot 27°C en neemt daarna af [6.10].

Door Wing is, op basis van literatuurgegevens, een curve opgesteld voor de maximaal toelaatbare temperatuur als functie van de blootstellingsduur zodat geen beïnvloeding van de mentale prestatie optreedt op basis van literatuurgegevens [6.24]. Deze curve is overgenomen door NIOSH (figuur 6.6). De door Wing voorgestelde curve ligt onder de curve voor de toelaatbare temperatuur als functie van de blootstellingstijd ter voorkoming van een te grote fysiologische belastheid. Uit de curve blijkt dat bij een WBGT lager dan 30°C de mentale prestatie niet wordt beïnvloed. In situaties waarbij de globetemperatuur slechts weinig afwijkt van de luchttemperatuur, de relatieve luchtvochtigheid circa 50-70% bedraagt en de lichtsnelheid tussen 0,2 en 0,5 m/s ligt zijn WBGT en ET nagenoeg aan elkaar gelijk.



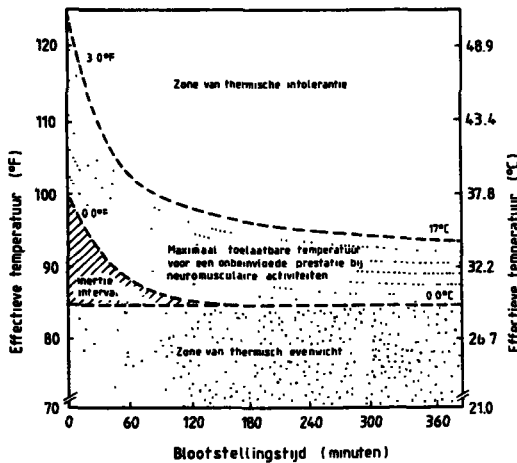
Figuur 6.6. De maximaal toelaatbare temperatuur (WBGT) als functie van de blootstellingsduur ter voorkoming van een afname van de prestatie bij mentale taken volgens Wing [6.24].

Hancock [6.13,6.17] stelt dat de analyse van Wing niet juist is. De omrekening van de ET uit de oorspronkelijke gegevens naar WBGT is volgens hem niet correct. Daarnaast zou Wing de gegevens niet correct hebben overgenomen en fouten hebben gemaakt bij de interpretatie ervan. Op basis van een nieuwe analyse van de gegevens stelt Hancock dat de temperatuur-duur-curve voor mentale arbeid overeenkomt met de temperatuur-duur-curve voor de fysiologische belastheid. Het absolute niveau van de curve is afhankelijk van acclimatisatie, motivatie, vaardigheden van de persoon en de zwaarte van de taak. De meeste controle-taken in de industrie hebben ook een motorische component waardoor de prestatie bij deze taken gevoeliger zal zijn voor een thermische belasting dan een pure mentale taak [6.17].

Hancock heeft een diagram opgesteld waarmee het effect van een thermische belasting op de prestatie bij cognitieve en neuro- musculaire taken kwalitatief kan worden afgeleid (figuur 6.7) [6.17].

Op de horizontale as is de blootstellingstijd uitgezet. Langs de verticale as is de thermische belasting uitgezet, uitgedrukt in °C en °F ET. Er worden drie zones onderscheiden. De zone van thermische intolerantie (thermal intolerance) geeft het gebied aan waarin het uitvoeren van een taak geheel onmogelijk is ten gevolge van de fysiologische belasting. De zone van thermisch evenwicht (thermal equilibrium) geeft het gebied aan waarin de condities zodanig zijn dat er geen stijging van de kerntemperatuur optreedt en er geen beïnvloeding

van de prestatie optreedt. Tussen de genoemde zones in ligt het gebied met curves die de grenzen aangeven waarbij nog juist geen beïnvloeding van de prestatie optreedt bij cognitieve en neuromusculaire taken. De ligging van de curves, aangeduid met de bijbehorende stijging van de kerntemperatuur, is afhankelijk van de aard van de taak. Tenslotte is in het diagram het zogenaamde inertie-interval opgenomen in verband met het gegeven dat de kerntemperatuur ongevoelig is voor een snelle verandering van de omgevingscondities. Hancock merkt op dat de individuele prestatie wordt beïnvloed door motivatie en vaardigheid van de persoon.



Figuur 6.7. Verband tussen de thermische belasting en de prestatie bij cognitieve en neuromusculaire taken volgens Hancock [6.17].

Ten aanzien van het gebruik van het diagram in de praktijk van industriële bedrijven merkt Hancock op dat dit wordt beperkt door het gebruik van de ET als index voor de thermische belasting. Voor industriële situaties zou gebruik van WBGT geschikter zijn. Omrekening van de ET naar de WBGT is mogelijk mits alle benodigde gegevens bekend zijn (zie ook [6.35]).

Een andere moeilijkheid bij de praktische toepassing is de vraag of de afname van de prestatie bij dezelfde verandering van de kerntemperatuur optreedt wanneer er lichamelijke arbeid wordt verricht. Dit is niet bekend. Hancock stelt dat de toename van de kerntemperatuur in de stationaire situatie ten gevolge van de activiteit mogelijk de nieuwe

basiswaarde vormt. De absolute niveaus van de kerntemperatuur waarbij een afname van de prestatie optreedt wordt gevonden door het optellen van de bovengenoemde stijgingen van de kerntemperatuur bij de nieuwe basisniveaus [6.17].

Ramsey [6.33] stelt eveneens dat de data van de door Wing toegepaste onderzoeken de theorie van een algemeen verband tussen prestatie en -mentale- taak niet onderschrijven. Op basis van literatuur- en eigen onderzoekgegevens heeft Ramsey curven voor gelijke prestatie afhankelijk van temperatuur (WBGT) en duur opgesteld voor taken met een combinatie van waarneming en een motorische actie ("perceptual motor task"). Op basis van de relatie prestatie-thermische belasting kunnen twee groepen taken worden onderscheiden. De eerste groep omvat reactietijd- en eenvoudige mentale taken, waarbij een afname van de prestatie bij een bepaalde temperatuur pas optreedt bij een bepaalde (blootstellings-)duur. De tweede groep omvat het volgen van een signaal ("tracking"), waakzaamheid en complexe mentale taken waarbij de prestatie afhankelijk is van de thermische belasting, maar onafhankelijk is van de blootstellingsduur. Voor de beide groepen zijn curven van gelijke prestatie als functie van WBGT en blootstellingstijd afgeleid.

Recentelijk is door Ramsey een uitbreiding van de studie met nieuwe gegevens gerapporteerd [6.35]. Op basis van de gegevens stelt Ramsey dat de prestatie bij taken uit de eerste groep (eenvoudige mentale taken en reactietijd) waarschijnlijk niet zal afnemen ten gevolge van een warmtebelasting. Bij korte blootstellingstijden zal er zelfs sprake zijn van een toename van de prestatie. Voor de tweede groep (perceptual motor tasks, waakzaamheid en complexe mentale taken) stelt Ramsey dat er een significante afname van de prestatie zal optreden bij een WBGT van 30 tot 33°C, onafhankelijk van de blootstellingsduur. Dit wordt geïllustreerd in figuur 6.8 [6.33]. De niveaus waarbij de significante afname van de prestatie optreedt valt samen met de door ISO en NIOSH voorgestelde limietwaarden voor de hitte-belasting van personen die zittend of licht werk verrichten.

6.3.2.4 Combinatie van warmte en geluid

In het voorgaande is reeds gewezen op de mogelijke invloed van andere omgevingsfactoren op de relatie tussen prestatie en thermische belasting. Het effect van een gecombineerde belasting door warmte en geluid is door een aantal onderzoekers beschouwd. Hancock stelt op basis van een literatuurstudie dat voorlopig geconcludeerd dient te worden dat er geen

interactie plaatsvindt tussen de effecten van klimaatbelasting en lawaai op de prestatie maar dat nader onderzoek gewenst is [6.16]

6.3.2.5 Discussie en conclusies

Het geven van algemene conclusies, zeker in kwantitatieve zin, over het effect van warmte op de prestatie bij mentale taken op basis van de beschikbare literatuurgegevens wordt bemoeilijkt door het grote aantal invloedsfactoren dat een rol speelt.

Hierdoor zijn de resultaten van verschillende studies niet zonder meer vergelijkbaar. Evenals voor de relatie prestatie-termische belasting voor fysieke arbeid geldt dat veel onderzoek naar de relatie bij mentaal werk is uitgevoerd in het laboratorium. De opmerking over het toepassen van de resultaten in praktijksituaties zoals die zijn gemaakt voor de fysieke arbeid gelden hier ook.

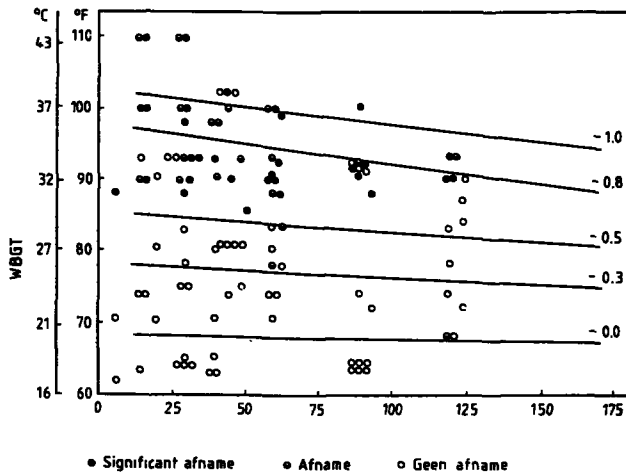
Veel onderzoek is verricht naar het optreden van een afname van de mentale prestatie onder extreme condities.

Op grond van de literatuurgegevens kan worden geconcludeerd dat de prestatie bij mentale taken afneemt wanneer de thermische belasting zodanig is dat een stijging van de kern-temperatuur optreedt. Voor personen die zittend of licht werk verrichten is dit het geval bij een ET van 27 à 30°C of 30°C à 33 °WBGT. Reactietijd en de prestatie bij eenvoudige mentale taken zullen waarschijnlijk niet afnemen bij een extreme belasting. Bij korte blootstellingstijden is er waarschijnlijk zelfs een toename van prestatie te verwachten.

Complexe taken, waarbij helder denken en concentratie zijn vereist worden het best uitgevoerd onder thermisch comfortabele omstandigheden. Bij routine-werk wordt de prestatie nagenoeg niet beïnvloed door de thermische belasting. Taken waarbij het geheugen een belangrijke rol speelt worden het best uitgevoerd onder matig warme condities.

De resultaten van het effect van de thermische belasting op de prestatie bij mentale taken zijn niet zonder meer toepasbaar op de industriële arbeidsplaats. Hier heeft men vaak te maken hebben met een combinatie van fysiek en mentaal werk.

Een factor die in de praktijk een belangrijke rol zou kunnen spelen bij de relatie tussen klimaat en prestatie is de ontevredenheid en irritatie van werknemers ten gevolge van de thermische belasting.



• Significante afname ◐ Afname ○ Geen verandering

Figuur 6.8 Curven van gelijke presentatie als functie van de temperatuur (WBGT) en tijd voor "perceptual motor tasks", weerbaarheid en complexe mentale taken [6.33].

Legenda:

0.0 : geen afname van de prestatie

1.0 : significante afname van de prestatie De tussenliggende waarden corresponderen met een toenemende waarschijnlijkheid van een afname van de prestatie.

6.4 De invloed van koude op de prestatie

6.4.1 De invloed van koude op prestatie bij fysieke arbeid

Bij het onderzoek naar de relatie tussen de fysieke werkprestatie en koudebelasting ligt de nadruk op het werk dat met de handen wordt uitgevoerd. Koude veroorzaakt een afname van de prestatie bij fysiek werk (met de handen) door een afname van de gevoeligheid van de vingers, een afname van de handigheid ten gevolge van stijve vingers, een afname van de spierkracht en een toename van de taaiheid van de gewrichtsmeer [6.5,6.9,6.24,6.27]. Handelingen met kleine voorwerpen en bewegingen van de vingers zijn het meest gevoelig voor koude. Een afkoeling van het lichaam bij constante temperatuur van de handen heeft geen invloed op de prestatie bij werk met de handen. Een afkoeling van de onderarm heeft daarentegen wel een afname van de prestatie tot gevolg. Een sterke afkoeling van het

gehele lichaam kan taken beïnvloeden die gevoelig zijn voor rillen [6.5]. Koude kan indirect tot een geringere prestatie leiden doordat beschermende kleding beweging en daarmee de prestatie beperkt. Tevens kan er sneller vermoeidheid optreden [6.5].

Bij lage huidtemperaturen verliezen de vingers het vermogen om kleine details te voelen. De kritische temperatuur van de huid waaronder de gevoeligheid sterk afneemt bedraagt circa 6 à 8°C [6.5,6.24,6.31]. De gevoeligheid wordt mede bepaald door de temperatuur van dieper gelegen weefsels [6.5].

Het vermogen om fijne werkzaamheden met de hand te verrichten neemt af door het verkleumen en verstijven van de vingers bij huidtemperaturen van de hand lager dan 13 à 18°C [6.5,6.24,6.30, 6.41]. Uit de literatuur blijkt niet duidelijk waar de huidtemperatuur wordt gemeten. Enander merkt op dat dat er een aanzienlijke variatie van de huidtemperatuur over het oppervlak van de hand optreedt. Daarnaast treden er verschillen op tussen de weefsellagen op verschillende diepten. Eén enkele meting van de huidtemperatuur van de hand is daarom van beperkte waarde als indicator van de afkoeling van de hand. Aptel [6.1] stelt voor dat de handvaardigheid afneemt wanneer de temperatuur van de hand van de rug lager is dan 24°C [6.1].

Het effect van koude op de prestatie is groter naarmate de te hanteren voorwerpen kleiner zijn [6.5,6.41]. Meese vond voor een huidtemperatuur van de hand van 12°C een afname van de prestatie van 20 à 25% ten opzichte van een huidtemperatuur van 36°C [6.25]. De afname van de prestatie neemt exponentieel toe met de duur van de blootstelling ten gevolge van de geleidelijke afkoeling van de dieper gelegen weefsels. Een langzame afkoeling heeft een grotere afname in prestatie tot gevolg dan een snelle afkoeling. In de praktijk is er veelal sprake van een langzame afkoeling die uit oogpunt van prestatie en risico het ongunstigst is [6.5].

De kritische huidtemperatuur van de hand is geen praktische maat voor de beoordeling van de invloed van het klimaat op de prestatie [6.5]. Uit laboratoriumonderzoek met industriële arbeiders als proefpersonen is gebleken dat bij een luchttemperatuur van 18°C de soepelheid van de vingers begint af te nemen en de prestatie van werk met de handen afneemt met 10 à 15% [6.25,6.27, 6.46]. De gemiddelde huidtemperatuur van de vingers van de proefpersonen varieerde van 23 tot 27°C. De afname van de prestatie was afhankelijk van de taak en varieerde van 10 tot 50% bij een luchttemperatuur van 6°C (gemiddelde huidtemperatuur vingers 14-16°C) ten opzichte van een luchttemperatuur van

24°C bij een verblijf van 8 uur [6.27]. Bij een luchttemperatuur van 6°C was het aantal foutieve lassen driemaal zo groot als bij 18°C [6.48]. Mannen presteerden beter onder een koudebelasting dan vrouwen.

Bij korte blootstellingstijden treedt pas bij lagere luchttemperaturen een afname van de prestatie op zoals bleek in een onderzoek naar het effect van een blootstelling van één uur aan lage omgevingstemperaturen [6.36]. Bij een omgevingstemperatuur van 1,7°C was de prestatie bij werk met de handen 0,3 tot 15,7% lager dan bij omgevingstemperaturen van 12,8 en 23,9°C. Bij een verlaging van de temperatuur van 23,9 naar 12,8°C werd de prestatie niet beïnvloed. De afname van de prestatie bij een lage temperatuur was groter naarmate de werkzaamheden gecompliceerder waren. Vrouwen presteerden beter bij simpele taken, terwijl de mannen beter presteerden bij gecompliceerdere taken.

In een laboratoriumonderzoek naar de prestatie bij werk met de handen werd de invloed van katoenen handschoenen bestudeerd [6.40]. De afname van de prestatie bij een blootstelling van één uur bedroeg 15% bij -5°C, 20% bij -10°C en 27% bij -20°C, ten opzichte van de prestatie bij het begin van de blootstelling. Er bleek een goede correlatie te bestaan tussen de prestatie enerzijds en de huidtemperatuur van de hand en de gemiddelde huidtemperatuur anderzijds. Volgens de onderzoekers is de grootte van het effect van blootstelling aan koude op het vermogen om werk met de handen te verrichten afhankelijk van de gebruikte spieren en het niveau en de duur van de blootstelling [6.40].

Uit onderzoek van Meese bleek dat de subjectieve uitspraak over de thermische behaaglijkheid geen voorspellende waarde heeft voor de variatie in prestatie van manuele taken bij een gematigde koudebelasting [6.28].

In [6.46] wordt een optimale temperatuur voor industrieel werk gegeven van 13 tot 29°C, uitgaande van "normale" luchtvochtigheden.

Bij de beoordeling van koude op de individuele prestatie dient rekening gehouden te worden met het feit dat de respons van een individu op een blootstelling aan koude afhankelijk is van de fysiologie, de emotionele toestand, de lichaamssamenstelling, de etnische afkomst, de mate van bescherming, gewoonte en werkpositie [6.5]. Een aan koude gewende persoon kan beter presteren onder koudebelasting dan een niet aan koude gewende persoon. Er is echter geen eenduidig bewijs voor een fysiologische acclimatisatie aan koude. Gewenning aan koude vermindert waarschijnlijk de afleiding veroorzaakt door een koudebelasting [6.5].

Conclusies

Indien de huidtemperaturen van de handen lager zijn dan 13 à 18°C neemt de prestatie bij werk met de handen met 20 à 25% af door een afname van de handigheid door stijve vingers, een afname van de spierkracht en een afname van de soepelheid van de gewrichten. Indien de huidtemperatuur van de vingers onder 6 à 8°C ligt neemt ook de prestatie bij taken waarbij kleine details gevoeld moeten kunnen worden sterk af door de afname van de gevoeligheid van de vingers.

Bij luchttemperaturen van circa 18°C treedt er ten opzichte van een luchttemperatuur van 24°C een afname van de prestatie op van 10 à 15% bij met de handen verricht industrieel werk (afhankelijk van de taak). Bij een luchttemperatuur van circa 6°C bedraagt de afname 10 à 50%, afhankelijk van de taak. Deze waarden gelden voor een blootstelling van circa 8 uur en blote handen.

Bij kortere blootstellingstijden treedt een afname van de prestatie pas op bij lagere temperaturen. Bij een blootstelling van één uur is er bij een luchttemperatuur van circa 13°C geen effect op de prestatie. Bij een luchttemperatuur van 2°C neemt de prestatie met 0-16% af, afhankelijk van de taak.

6.4.2 De invloed van koude op de prestatie bij mentale taken

Eenvoudige mentale taken worden slechts weinig beïnvloed door een verlaagde lichaams-temperatuur [6.24]. Discomfort en koudebelasting veroorzaken een afname van de prestatie bij complexe mentale taken [6.6,6.11,6.24]. De toename van de mate van arousal ten gevolge van de koudebelasting wordt genoemd als oorzaak van deze afname [6.24]. Een aantal onderzoekers stelt dat de beste prestatie bij complexe mentale taken optreedt bij thermisch comfort [6.9,6.11]. Andere onderzoekers stellen dat de optimale prestatie optreedt bij enigszins onbehaaglijke temperaturen door de verhoging van de mate van "arousal" [6.20]. Door verschillende onderzoekers worden verschillende optimale temperaturen voor het uitvoeren van mentale taken gegeven die variëren van 15-17°C tot 27°C voor strikt mentale taken en van 13°C tot 21°C voor taken met een mentale en een motorische component [6.5]. De verschillen worden toegeschreven aan verschillen in kleding, complexiteit van de taken, leeftijd van de proefpersonen en geografische lokatie.

Voor de verklaring van de afname van de mentale prestatie onder invloed van koude worden de arousal-theorie en de distraction-theorie genoemd. Uit een laboratoriumonderzoek

waarbij de proefpersonen, gekleed in een korte broek, bij een luchttemperatuur van -12°C een "serial choice reaction test" uitvoerden bleek het aantal fouten omgekeerd evenredig met de huidtemperatuur [6.4]. Dit effect kan volgens [6.4] zowel met de arousal-theorie als met de distraction-theorie worden verklaard. De kerntemperatuur had geen invloed op het aantal fouten. De wachttijden tussen de antwoorden namen af met toenemende koudebelasting. Deze afname van de prestatie wordt het beste verklaard door de arousal-theorie. Reactie-tijd en de prestatie bij kleurherkenning werden niet beïnvloed door een koudebelasting. De prestatie bij een verbale redeneer-test nam iets toe onder koudebelasting wat werd toegeschreven aan de toename van arousal. Het effect van koude op de prestatie bij mentale taken is dus afhankelijk van de taakinhoud.

Enander stelde proefpersonen gedurende twee uur bloot aan minder extreme omstandigheden (5°C) [6.6]. Eenvoudige mentale taken werden niet beïnvloed door de koudebelasting, complexe mentale taken daarentegen wel. De complexe taken bestonden uit taken die een snelle reactie vereisten ("serial choice reaction") en aanleiding gaven tot foutieve reacties. Met behulp van de distraction-theorie kunnen de fouten die optreden (fouten ten gevolge van een snel antwoord) niet worden verklaard.

Volgens sommige onderzoekers leidt onbehaaglijkheid ten gevolge van koude (met een verlaagde huidtemperatuur) tot een versnelling van de door een persoon ervaren subjectieve tijd [6.5]. Bij een verlaagde lichaamstemperatuur ten gevolge van een grote koudebelasting wordt de subjectieve tijdwaarneming vertraagd waardoor een toename van de reactietijd optreedt.

Conclusies

De invloed van een koudebelasting op de prestatie bij eenvoudige mentale taken is gering. Complexe mentale taken worden negatief beïnvloed door een koudebelasting. Zij worden het best uitgevoerd onder comfortabele condities.

6.5 Thermisch klimaat en bedrijfsongevallen

Ongevallen zijn een gevolg van onvoorziene fouten in het werk en leiden naast mogelijk persoonlijk letsel tot een verlies van produktietijd en/of beschadiging van machines en produkt. Als een thermische belasting tot een toename van het aantal ongevallen leidt zal

zij waarschijnlijk ook leiden tot een verlies in produktiviteit [6.46]. Er is slechts in beperkte mate onderzoek verricht naar de relatie tussen de thermische belasting en het optreden van bedrijfsongevallen.

In onderzoeken door Vernon in 1919 en 1927 werden in een mijn en een munitiefabriek een toename van de frequentie van ongelukken met 4 à 5% per °C gevonden ten opzichte van de minimale frequentie bij een temperatuur van 17 à 20°C [6.3,6.24]. Bij temperaturen boven 24°C en onder 12°C bedroeg de toename meer dan 30% [6.46]. Mannen bleken gevoeliger voor warmte dan vrouwen. Bij een koudebelasting was er geen verschil. De invloed van de thermische belasting op de ongeval-frequentie was groter naarmate de leeftijd hoger was [6.46]. De resultaten van bovengenoemde studie kunnen, gezien de grote verschillen in techniek en cultuur tussen toen en nu, niet meer worden toegepast.

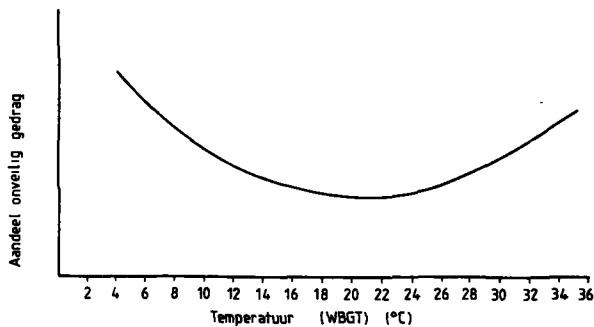
In een publicatie van recente(re) datum stelt Wyon dat bedrijfsongevallen met 30% kunnen toenemen (ten gevolge van de afname van het concentratievermogen met 20 tot 50%) als de luchttemperatuur stijgt tot 27°C [6.48]. Wyon geeft niet aan voor welke activiteiten of werkzaamheden deze waarden gelden.

Door Ramsey is de relatie tussen thermisch klimaat en onveilig gedrag op de arbeidsplaats onderzocht op basis van 17.000 observaties gedurende 14 maanden in een metaalbedrijf en een smelterij [6.34]. Uit het onderzoek bleek dat de mate van onveilig gedrag een minimum heeft voor waarden van de WBGT tussen 17 en 23°C (figuur 6.9). Deze temperaturen komen overeen c.q. liggen enigszins onder de temperaturen waarbij een persoon die licht werk verricht zich comfortabel voelt [6.34]. Bij hogere en lagere temperaturen neemt de mate van onveilig gedrag toe volgens een tweedegraads-curve (U-curve). In een thermisch neutrale en een warme omgeving is de mate van onveilig gedrag hoger bij een bepaalde temperatuur naarmate het metabolisme hoger is. In een koude omgeving daarentegen is de mate van onveilig gedrag hoger bij een matig hoog metabolisme dan bij een hoog metabolisme. Het laagste niveau wordt ook hier gevonden bij een laag metabolisme. Als mogelijke verklaring hiervoor geeft Ramsey dat bij het hoge metabolisme zoveel warmte wordt geproduceerd dat het negatieve effect van de koudere omgeving wordt gecompenseerd. Uit het onderzoek bleek dat de mate van onveilig gedrag toenam met het tijdstip op de dag. Het is nog niet duidelijk of dit een gevolg van de toename van de vermoeidheid of van andere factoren zoals de thermische omgeving [6.34].

Wyon stelt dat onderzoek naar de frequentie van bedrijfsongevallen waardevol inzicht kan geven in de thermische effecten op de menselijke efficiëntie. Geslacht en leeftijd zijn volgens hem waarschijnlijk belangrijke parameters [6.46].

Conclusies

De mate van onveilig gedrag en daarmee (de kans op) het optreden van bedrijfsongevallen is minimaal bij een WBGT tussen 17 en 23°C.



Figuur 6.9 Het algemene verband tussen de mate van onveilig gedrag op de arbeidsplaats en de thermische condities volgens Ramsey [6.34].

6.6 Conclusies

De door de verschillende onderzoekers gepresenteerde relaties tussen klimaat(-belasting) en (individuele) prestatie geven geen eenduidig beeld. De interpretatie van de gegevens wordt bemoeilijkt door het grote aantal van invloed zijnde factoren:

- de specifieke klimaatomstandigheden
- de taak die verricht dient te worden
- de duur van de taak
- de motivatie van de persoon
- de geschiktheid van de persoon voor de taak
- de individuele eigenschappen

Daarnaast worden verschillende indices gebruikt om de klimaatomstandigheden c.q. de thermische belasting te beschrijven.

Het merendeel van de onderzoeken naar de relatie tussen klimaat en prestatie betrof laboratoriumonderzoek. Er zijn slechts weinig praktijkgegevens over de invloed van het klimaat op de prestatie of de produktiviteit. Bij de interpretatie van de gegevens dient men zich te realiseren dat de effecten van het klimaat op de prestatie onder laboratoriumomstandigheden wellicht kleiner zijn dan in de praktijk vanwege de hogere motivatie van de personen en de geringere afleiding door onbehaaglijkheid onder laboratoriumomstandigheden dan onder praktijkomstandigheden. Een relatie tussen de fysiologische belasting en de prestatie wordt slechts door een beperkt aantal onderzoekers gegeven. Naast de werkomgeving is de werkdruk een factor die grote invloed heeft op de prestatie c.q. de produktiviteit.

Uit het uitgevoerde literatuuronderzoek zijn, voor zover mogelijk, kwantitatieve relaties tussen klimaat en prestatie afgeleid die onderstaand worden gegeven.

Fysieke prestatie en warmte

Bij een ET tot 27 à 30°C is er geen effect van het klimaat op de prestatie bij fysiek werk. Boven een ET van 27 à 30°C neemt de prestatie af.

Mentale prestatie en warmte

Een significante afname van de mentale prestatie treedt op boven een ET van 27 à 30°C (30 à 33 WBGT). Bij deze klimaatbelasting treedt er een fysiologisch niet te compenseren stijging van de lichaamstemperatuur op die wordt gezien als de oorzaak van de afname van de mentale prestatie.

Complexe taken, waarbij helder denken en concentratie zijn vereist, worden het best uitgevoerd onder thermisch comfortabele omstandigheden. Bij routine-werk wordt de prestatie nagenoeg niet beïnvloed door condities die leiden tot thermisch comfort of tot een enigzins warme situatie. Taken waarbij het geheugen een belangrijk onderdeel vormt worden het best uitgevoerd onder matig warme condities.

Fysieke prestatie en koude

Indien de huidtemperaturen van de handen lager zijn dan 13 à 18°C neemt de prestatie bij werk met de handen met 20 à 25% af door een afname van de handigheid door stijve vingers, een afname van de spierkracht en een afname van de soepelheid van de gewrichten. Indien de huidtemperatuur van de vingers onder 6 à 8°C ligt neemt ook de prestatie bij taken waarbij kleine details gevoeld moeten kunnen worden sterk af door de afname van de gevoeligheid van de vingers.

Bij luchttemperaturen van circa 18°C treedt er ten opzichte van een luchttemperatuur van 24°C een afname van de prestatie op van 10 à 15% bij met de handen verricht industrieel werk (afhankelijk van de taak). Bij een luchttemperatuur van circa 6°C bedraagt de afname 10 à 50%, afhankelijk van de taak. Deze waarden gelden voor een blootstelling van circa 8 uur en blote handen.

Bij kortere blootstellingstijden treedt een afname van de prestatie pas op bij lagere temperaturen. Bij een blootstelling van één uur is er bij een luchttemperatuur van circa 13°C geen effect op de prestatie. Bij een luchttemperatuur van 2°C neemt de prestatie met 0-16% af, afhankelijk van de taak.

Mentale prestatie en koude

De invloed van een koudebelasting op de prestatie bij eenvoudige mentale taken is gering. Complexe mentale taken worden negatief beïnvloed door een koudebelasting. Zij worden het beste uitgevoerd onder comfortabele condities.

Thermische belasting en bedrijfsongevallen

De mate van onveilig gedrag en daarmee (de kans op) bedrijfsongevallen is minimaal bij een WBGT tussen 17 en 23°C.

6.7. Literatuur

[6.1] Aptel, M.

Le travail au froide artificiel dans la industrie alimentaire.
Descriptions des astreintes et recommandations.
INRS, Cahiers de notes documentaires no. 126, 1er trimestre 1987.

[6.2] Bell, C.R.

Decision making in thermally stressfull environments.
Reviews on Environmental Health, V (1985), no. 2, p. 101-127.

[6.3] Billington, N.S.

The working environment
Paper 14 Symposium on heating and ventilation for a human environment.
London, 1967.

[6.4] Ellis, H.D.

The effects of cold on the performance of serial choice reaction time
and various discrete tasks.
Human Factors, 24 (1982), no. 5, p. 589-598.

[6.5] Enander, A.

Performance and sensory aspects of work in cold environments: a review.
Ergonomics, 27 (1984), no. 4, p. 365-378.

[6.6] Enander, A.

Effects of moderate cold on performance of psychomotor and cognitive tasks.
Ergonomics, 30 (1987), no. 10, p. 1431-1445.

[6.7] Enander, A.

Effects of thermal stress on human performance.
In: Proceedings of 3rd International Conference on Environmental Ergonomics,
8-12 August 1988 Helsinki, Finland
eds. R. Ilmarinen and A. Päsche.

-
- [6.8] Eissing G. (ed.)
Klima und Luft am Arbeitsplatz.
Messtechnisches Taschenbuch für den Betriebspraktiker.
Wirtschaftsverlag Bachem, Köln 1986.
- [6.9] Gonzalez, R.
Human performance. Strategies in the built environment.
ASHRAE Journal, august 1984, p. 50-52.
- [6.10] Grether, W.F.
Human performance at elevated environmental temperatures.
Aerospace Medicine, July 1973, p. 747-755.
- [6.11] Griffiths, I.D., Boyce, P.R.
Performance and thermal comfort.
Ergonomics, 14 (1971), no. 4, p. 50-52.
- [6.12] Haan, J. de, N. Terra
Baten de kosten?
Een bedrijfseconomische waardering van arbeidsplaatsverbetering.
Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden NIA, 1988.
- [6.13] Hancock, P.A.
Task categorization and the limits of human performance in extreme heat.
Aviation, Space and Environmental Medicine, August 1982, p. 778-784.
- [6.14] Hancock, P.A.
Heat stress impairment of mental performance: A revision of tolerance limits.
Aviation, Space and Environmental Medicine, March 1981, p. 177-180.
- [6.15] Hancock, P.A.
Effect of environmental temperature on display monitoring performance:
an overview with practical implications.
American Industrial Hygiene Association Journal, 45 (1984), no. 2, p. 122-126.

-
- [6.16] Hancock, P.A., Pierce, J.O.
Combined effects of heat and noise on human performance: a review.
American Industrial Hygiene Association Journal, 46 (1985), no. 10, p. 555-566.
- [6.17] Hancock, P.A., M.J. Vercruyssen
Limits of behavioral efficiency for workers in heat stress.
International Journal of Industrial Ergonomics, 3 (1988), p. 149-158.
- [6.18] Havenith, G.
Persoonlijke communicatie, 1988.
- [6.19] Jokl, M.V.
The effect of the environment on human performance.
Applied Ergonomics, 13 (1982), no. 4, p. 269-280.
- [6.20] Kamon, F.
Ergonomics of heat and cold.
Texas Reports on Biology and Medicine, 33 (1975), no. 1, p. 145-182.
- [6.21] Langkilde, G., Alexandersen, K., Wyon, D.P., Fanger, P.O.
Mental performance during slight cool or warm discomfort.
Archives. Sci. Physiol., 27 (1973), p. A511-A518.
- [6.22] Langkilde, G.
The influence of the thermal environment on office work.
In: Proceedings of symposium Indoor Climate
eds. Fanger P.O., O.Valbjørn
Danish Building Research Institute, p. 835-856 Copenhagen, 1979.
- [6.23] Link, J.M., Pepler, R.D.
Associated fluctuations in daily temperatures, productivity and absenteeism.
ASHRAE Transactions, 76 (1970), part I, p. 326-337.
- [6.24] McIntyre, D.A.
Indoor Climate.
Applied Science Publishers Ltd., 1980.

-
- [6.25] Meese, G.B., Kok, R., Lewis, M.I., Wyon, D.P.
The effects of moderate cold and heat stress on factory workers in Southern Africa.
2. Skill and performance in the cold.
South African Journal of Science, 78 (1982), p. 189-197.
- [6.26] Meese, G.B., Kok, R., Lewis, M.I.
The effect of moderate thermal stress on the potential work performance of factory workers - an interim report.
Energy and Buildings, 4 (1982), p. 289-294.
- [6.27] Meese, G.B., Kok, R., Lewis, M.I., Wyon, D.P.
A laboratory study on the effects of moderate thermal stress on the performance of factory workers.
Ergonomics, 27 (1984), no. 1, p. 19-43.
- [6.28] Meese, G.B., Schiefer, R.E., Küstner, P., Kok, R., Lewis, M.I.
Subjective comfort vote and air temperature as predictors of performance in factory workers.
European Journal of Applied Physiology, 55 (1986), p. 195-197.
- [6.29] Mortagy, A.K., Ramsey, J.D.
Monitoring performance as a function of work/rest schedule and thermal stress.
American Industrial Hygiene Association Journal, November 1983, p. 474-480.
- [6.30] Kobrick, J.L., B.J. Fine
Climate and human performance
In: The Physical Environment at Work.
Edited by D.J. Osborne and M. Gruneberg
John Wiley & Sons Ltd., 1983.
- [6.31] Parmeggiani, L. (ed.)
Encyclopedia of occupational health and safety.
3rd. rev. ed.
Geneva, ILO, 1983.

-
- [6.32] Pepler, R.D.
A study of productivity and absenteeism in apparel factory with and without airconditioning.
ASHRAE Transactions 79 (1973), part 2, p. 81-86.
- [6.33] Ramsey, J.D., Morrissey, S.J.
Isodecrement curves for task performance in hot environments.
Applied Ergonomics, 9 (1978), no. 2, p. 66-72.
- [6.34] Ramsey, J.D., Burford, C.L., Beshir, M.Y., Jensen, R.C.
Effects of workplace thermal conditions on safe work behavior.
Journal of Safety Research, 14 (1983), no. 3, p. 105-114.
- [6.35] Ramsey J.D., Y.C. Kwon
Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat.
In: Proceedings of Seminar on Heat Stress Indices.
eds. B. Metz, Th. Hettinger, L.A. Morris, J. Malchaire, J.G. Fox
Commission of the European Communities, Health and Safety Directorate,
25-26 October 1988.
- [6.36] Riley, M.W., Cochran, D.J.
Dexterity performance and reduced ambient temperatures.
Human Factors, 26 (1984), no. 2, p. 207-214.
- [6.37] Risse, F.
Arbeiten unter Hitzeeinfluss.
Sicherheitsingenieur, (1982), no. 6, p. 10-14.
- [6.38] Sharma V.M., Pichan, G., Panwar, M.R.
Differential effects of hot-humid and hot-dry environments on mental functions.
International Archives of Occupational and Environmental Health,
52 (1983), p. 315-327.
- [6.39] Skiba, R.
Taschenbuch Arbeitssicherheit.
3e Auflage, Erich Schmidt Verlag, 1979.

-
- [6.40] Tanaka, M., Tochiara, Y., Yamazaki, S., Ohnaka, T., Yoshida, K.
Thermal reaction and manual performance during cold exposure
while wearing cold-protective clothing.
Ergonomics, 26 (1983), no. 2, p.141-149.
- [6.41] Wenzel, G.H., Piekarski, C.
Klima und Arbeit.
Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozial- Ordnung,
2e Auflage, München, 1982.
- [6.42] Woods, J.E., Winakor, G., Maldonado, E., Alagheband, A., Adams, S.K.
Relationships between measures of thermal environment and measures of
workers productivity.
Final report ASHRAE RP 207, 1981.
- [6.43] Wyndam, C.H.
Research in the human sciences in the gold mining industry.
American Industrial Hygiene Association Journal, March 1974, p. 113-136.
- [6.44] Wyon, D.P.,
Thermal environment and mental work.
Symposium "Indeklima 75", March 1975.
Danish Building Research Institute, Danmark.
- [6.45] Wyon D.P., Fanger, P.O., Olesen, B.W. Pedersen, C.J.K.
The mental performance of subjects clothed for comfort at two different
air temperatures.
Ergonomics, 18 (1975), no. 4, p. 359-374.
- [6.46] Wyon, D.P.
Human productivity in thermal environments between 65 °F and 85 °F
(18-30 °C).
In: Energy conservation strategies in buildings: comfort, acceptability and health.
Edited by J.A. Stolwijk, John B. Pierce Foundation, Connecticut, USA, 1978.

-
- [6.47] Wyon, D.P., Andersen, I., Lundqvist, G.R.
The effect of moderate heat stress on mental performance.
Scandinavian Journal of Work Environment & Health, 5 (1979),
no. 5, p. 352-361.
- [6.48] Wyon, D.P.
The importance of our indoor climate.
Fläkt Review no. 71, Indoor Climate Systems, 1987.
- [6.49] Das Klima am Arbeitsplatz.
Haustechnische Rundschau, (1988), no. 1-2, p. 33.
- [6.50] Erhöhung der Arbeitsproduktivität in Projektierungsbüros und
Forschungsinstituten durch Klimatisierung.
Klima-Kälte-Heizung, (1980), no. 2, p. 61-62.