

Behaaglijkheidstheorie

Door
Ing. D.J de Rotte

Opleiding Hogere Installatietechnicus
Post H.B.O.-opleiding aan de Hogeschool
te 's Hertogenbosch

Documentnummer: CV1.1
's Hertogenbosch, uitgave XIc-1992

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	2	
1	Inleiding.....	3
1.1	Activiteit.....	3
1.2	Milieu.....	3
1.3	Tijd.....	4
1.4	Persoonlijk.....	4
2	Behaaglijkheid.....	5
2.1	Behaaglijkheidsgrootheden.....	5
3	De menselijke warmteregulatie.....	6
3.1	Warmteafgifte door convectie.....	6
3.2	Warmteafgifte door straling.....	7
3.3	Warmteafgifte door vochtdiffusie.....	7
3.4	Warmteafgifte door transpiratie.....	8
3.5	Warmteafgifte door latente warmte in de waterdamp van uitgeademde lucht.....	8
3.6	Warmteafgifte door voelbare warmte in de uitgeademde lucht.....	9
3.7	Warmtetransport door kleding.....	9
3.8	Metabolisme.....	10
3.9	Verrichte arbeid.....	10
3.10	Geleiding.....	10
4	Warmteopslag in en onttrekking aan het menselijk lichaam.....	12
5	Behaaglijkheidsvergelijkingen.....	13
5.1	Behaaglijkheidvergelijking van Fanger.....	13
5.1.1	Behaaglijkheidsparameters.....	14
5.2	Behaaglijkheidvergelijking van Bedford.....	14
5.3	Behaaglijkheidvergelijking van Van Zuien.....	15
5.4	Behaaglijkheidvergelijking van Yaglou.....	15
5.5	Temperatuurindex voor Fabrieken en Werkplaatsen.....	16
6	Het meten van behaaglijkheid.....	17
6.1	De Katathermometer.....	17
6.2	De Globe-temperatuur.....	18
6.3	De effectieve temperatuur.....	18
6.4	De equivalente temperatuur.....	18
6.5	De gemiddelde stralingstemperatuur.....	18
7	Behaaglijkheidsdiagrammen.....	19
7.1	Het behaaglijkheidsgebied in het Mollier diagram.....	19
7.2	Relatie tussen luchttemperatuur en luchtvochtigheid.....	19
7.3	Relatie tussen luchttemperatuur en de gemiddelde wandtemperatuur.....	20
7.4	Relatie tussen luchtsnelheid, luchttemperatuur en behaaglijkheid.....	20
7.5	Relatie tussen natte bol temperatuur en lucht- en stralingstemperatuur.....	20
7.6	Relatie tussen activiteit en luchtcondities.....	21
7.7	Relatie tussen lucht- en stralingstemperatuur en luchtsnelheid.....	21
7.8	Relatie tussen kleding en lucht- en stralingstemperatuur.....	22
8	Behaaglijkheidsnomogram.....	23
9	Waarderingsindex van Fanger.....	24
10	Leeftijd en sexe.....	25

1 Inleiding

Een algemene fysiologische voorwaarde waaraan moet worden voldaan om aan het in 1878 door de Fransman Claude Bernard gedefinieerde vermogen van de mens tot het voeren van een “vrij onafhankelijk bestaan” recht te doen, is de handhaving van een opmerkelijke graad van stabiliteit ten aanzien van bepaalde fysische en chemische procesfactoren, zoals temperatuur, zuurstofgehalte, natriumchloride, enz. in zijn lichaam, namelijk in het bloed en de vloeistoffen van de actieve lichaamscellen. Deze stabiliteit kan niet worden toegeschreven aan de temperatuur, enz. van de lucht en de voorwerpen die de mens omgeven.

Het is duidelijk dat de buitenste delen van het lichaam meer worden beïnvloed door, maar dan ook meer zijn aangepast aan, de variaties van het extreme milieu dan de dieper gelegen weefsels en organen. Daarbij valt tevens te bedenken dat de stabiele toestand van elk orgaan of deel van het lichaam verschillend kan zijn, maar wel normaal moet zijn voor dat orgaan of lichaamsdeel. Wanneer aan al die (verschillende) voorwaarden voor stabiliteit wordt voldaan, dan is er sprake van “gezond zijn”.

Alhoewel gezond, ondergaat de mens elke dag verschillende fasen van activiteit en vermoeidheid (afgenomen vermogen tot actief zijn). Daar staat tegenover een periode van herstel die nodig is en bestaat uit o.a. rust, slapen, recreatie, e.d. om de algehele of plaatselijke vermoeidheid ten gevolge van verrichte activiteiten dan wel uitwendige invloeden op te heffen.

Vele factoren samen bepalen of de mens in staat zal zijn om de balans te herstellen. Lukt dat de mens niet, dan leidt dat onvermijdelijk tot verdergaande vermoeidheid, wat zich kan uiten in een afgenomen vermogen tot het verrichten van zijn dagelijkse arbeid, een toegenomen gevoel van persoonlijk onbehagen of stress en vroeger of later aantasting van zijn gezondheid. In een poging om problemen van deze aard te voorkomen, is het uiteraard niet alleen nodig de ongunstige factoren op te sporen, maar om ook naar oplossingen te zoeken voor de gerezen problemen. Is het bijvoorbeeld in het algemeen te warm, dan kan een oplossing zijn zich lichter te kleden.

Bij het algemeen onderzoek is het goed te bedenken dat er een groot aantal factoren zijn die de fysiologische balans van de mens van dag tot dag beïnvloeden. Deze factoren vallen in vier hoofdgroepen uiteen:

1.1 Activiteit

- Geestelijke arbeid
concentratie, gemoedsstemming
- Spierarbeid
energiegebruik, statische en dynamische componenten van spierspanning bij lichte, middelzware of zware arbeid, (verandering van) houding
- Ontspanning
geestelijk en lichamelijk.

1.2 Milieu

- Fysisch
luchttemperatuur en –gradiënt, vochtigheid, luchtbeweging, luchtverversing, gemiddelde stralingstemperatuur van de omgeving; warmteoverdracht door convectie, straling, geleiding, verdamping en condensatie; verwarmings-, ventilatie- en luchtbehandelingssystemen; af- of toename van de barometrische druk; wisselingen in de zwaarteveldsterkte; windsterkte; contactdruk; hindering in beweging door kleding; trillingen; dag- of kunstlicht, helderheid, verdeling, glans, flikkeren, omgevingskleuren, gezichtsveld; geluid en ultrasone trillingen; elektrische velden; korte golf straling, radioactieve materialen; beschermende kleding.
- Chemisch
luchtzuiverheid, ionisatie, procentuele samenstelling; atmosferische verontreinigingen; vochtige processen contact met oplosmiddelen, oliën en in de omgeving toegepaste materialen.

1.3 Tijd

Continue of onderbroken arbeid, inspanning en ritme van de arbeid; duur van de arbeid per keer, per dag en per week; tijdstip en tijdsduur van de rustpauzes; wisseling van omgeving en duur van blootstelling aan invloeden van de omgeving.

1.4 Persoonlijk

Individuele instelling; leeftijd, geslacht, lichamelijke toestand; fitheid; voedselbalans en energieopname; persoonlijke hygiëne, wijze van kleden, gewoonten; opvoeding; geschiktheid en opleiding voor bepaalde bezigheden; aanpassing aan omgeving; economische omstandigheden, verantwoordelijkheden; familie- en gezinsomstandigheden; slaap.

In wetenschappelijke zin kan worden gezegd dat het menselijk lichaam in dienst staat van de energie, omdat alle vormen van activiteit, bewuste en onbewuste, het gebruik inhouden van energie die vrijkomt bij chemische reacties in de weefsels, samengevat onder term "metabolisme".

Daarnaast is energie in vele vormen en graden aanwezig in het milieu en oefent zijn invloed uit op het lichaam. Gelukkig roept elke soort energie, zoals licht en warmte, fysiologische reacties op, waardoor de mens zich kan aanpassen aan veranderende omstandigheden en zich tegen schade kan beschermen. Hoe kritisch het evenwicht echter is, moge uit het volgende blijken.

Als de mens zich thermisch behaaglijk voelt, is hij zich er niet van bewust dat er een continue warmtestroom is van zijn lichaam naar de omgeving. Deze warmtestroom is nodig voor de stabiliteit van de lichaamstemperatuur. Zelfs wanneer hij niets doet, produceert een volwassen mens ongeveer 115 Joule aan energie per seconde. Deze energie is afkomstig van stofwisselingsprocessen, die de energie leveren voor hartwerking, ademhaling (de onwillekeurige spieren), spiertonus en andere inwendige processen. De geleverde energie is echter groter dan de benodigde en het overschot (bij rust dus ca. 115 J) wordt aan de omgeving overgedragen.

Zou dit overschot niet kunnen worden afgegeven, dan zou de temperatuur van een mens met een massa van 70 kg en een gemiddelde soortelijke warmte van $3.485 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ per seconde $471 \cdot 10^{-3} \text{ K}$, ofwel per uur ca 1,7 K stijgen.

Als dan wordt bedacht dat bij een temperatuurstijging van 0,5 K het metabolisme reeds ongeveer 6% toeneemt, waardoor de lichaamstemperatuur nog meer toeneemt en daardoor weer het metabolisme, enz., dan zal het duidelijk zijn hoe kritisch een correcte temperatuurhandhaving wel is. Of anders gezegd: hoe bewonderenswaardig nauwkeurig de lichaamstemperatuurregeling blijkbaar werkt.

2 Behaaglijkheid

Het woord behaaglijkheid is snel uitgesproken. Het begrip behaaglijkheid is echter moeilijk in een paar woorden samen te vatten. Behaaglijkheid definiëren is zelfs een bijna niet te volbrengen opdracht.

Een optimale behaaglijkheid is nog het beste te omschrijven als een toestand waarin nagenoeg niemand iets over zijn omgeving te klagen heeft. Maar als er niets te klagen valt, rijst wel de vraag waarover dan iets te klagen zou kunnen zijn.

Pratend over zijn omgeving zou de mens kunnen klagen over de temperatuur, de verlichting, de kleur van het plafond, enzovoort. Maar ook over het weer, andere mensen, geluidshinder en nog veel meer dingen.

Met andere woorden: blijkbaar is er een groot aantal factoren die van invloed kunnen zijn op het zich behaaglijk voelen. Daarnaast is dan ook nog eens elk mens verschillend van een ander, waarmee op eenvoudige wijze wordt aangetoond dat behaaglijkheid eigenlijk een uiterst ingewikkelde zaak is.

Het zou veel te ver leiden alle daarvoor in aanmerking komende factoren uitgebreid te gaan behandelen, afgezien van het feit dat dan ook zaken als smaak, voorkeur en dergelijke ter discussie zouden staan. En over smaak valt niet te twisten.

Voor de installatietechnicus is echter wel een deelgebied van de totale behaaglijkheid van belang, namelijk de thermische behaaglijkheid.

2.1 Behaaglijheidsgrootheden

Om thermische behaaglijkheid te bereiken moet aan de voorwaarde worden voldaan dat er thermisch evenwicht is tussen de door het lichaam van de mens ontwikkelde warmte en de warmteafgifte van datzelfde lichaam aan zijn omgeving.

In deze warmteafgifte spelen vier grootheden een belangrijke rol:

- De droge bol temperatuur (luchttemperatuur) T_l
- De natte bol temperatuur T_n (en daardoor de relatieve vochtigheid ϕ)
- De lichtsnelheid v
- De temperatuur van de omwanding T_w .

Omdat de reinheid van de lucht geen directe relatie heeft met de thermische behaaglijkheid, blijft deze hier buiten beschouwing, maar het zal duidelijk zijn dat zij wel degelijk van groot belang is.

De wijze waarop het lichaam zijn warmte afstaat zal nog nader worden omschreven, maar reeds nu kan worden gesteld dat bij lagere luchttemperaturen het convectieve aandeel in de warmteafgifte groot zal zijn en bij lage wandtemperaturen het stralingsaandeel groot. Voorts zal bij toenemende luchtvochtigheid en bij dalende lichtsnelheid de warmteafgifte door verdamping afnemen.

Onder "normale" omstandigheden is de verhouding van de aandelen in de warmteafgifte ongeveer als volgt:

- Afgifte door convectie : 30%
- Afgifte door straling : 50%
- Afgifte door verdamping : 20%

In het algemeen speelt warmtegeleiding geen rol van enige betekening, zijn het dat onder omstandigheden de vloertemperatuur binnen bepaalde grenzen dient te blijven (ca. 18°C – 25°C). Daarnaast hebben door F.A. Chrenko in 1956 uitgevoerde proeven aangetoond dat bij stralingsplafonds eveneens een grens aan de toegelaten temperatuur moet worden gesteld om de warmtestroomdichtheid ten gevolge van straling op het niveau van het hoofd van de mens niet boven de 12,5 W/m², de maximaal toelaatbare waarde, te doen uitkomen.

Het is goed er bij stil te staan dat de geleiding een dominante rol speelt bij zwemmen, hetgeen betekent dat voor de thermische behaaglijkheid in dat geval de watertemperatuur een doorslaggevende factor is.

3 De menselijke warmteregulatie

Claude Bernard heeft er reeds in 1878 in zijn beroemde werk "Les Phénomènes de la Vie" (De Wondere Verschijnselen van het Leven) zijn verbazing over uitgesproken dat het menselijk lichaam onder zeer uiteenlopende omstandigheden in staat blijkt een vrijwel exact temperaturniveau van 37,5°C in het inwendige te handhaven, terwijl de orale temperatuur (thermometer onder de tong) van de gezonde mens 36,9°C is met een dagelijkse variatie van 0,53 K. Voorts is aangetoond dat de gezonde mens in staat is bij een gemiddelde huidtemperatuur van 29°C thermisch te reageren op een plotseling optredende luchttemperatuurverandering van 0,2 K nabij de huid.



Claude Bernard 1813-1878

Bij de warmteregulatie van het lichaam spelen de volgende factoren een rol:

1. Convectorie
2. Straling
3. Vochtdiffusie
4. Transpiratie
5. Latente warmte in de ademlucht
6. Voelbare warmte in de ademlucht
7. Warmtetransport door kleding
8. Metabolisme
9. Verrichte arbeid
10. Geleiding

In het volgende zal nader worden ingegaan op de verschillende factoren, waarbij zal worden getracht tot enkele (eenvoudige) vergelijkingen te komen waarin de behaaglijkheid kan worden uitgedrukt.

3.1 Warmteafgifte door convectorie

De warmteafgifte door convectorie is een gevolg van het feit dat er normaal gesproken een temperatuurverschil heerst tussen de oppervlakte van de gedragen kleding en de omgevingslucht. Dit temperatuurverschil kan zowel positief als negatief zijn. In Nederland zal er vrijwel altijd sprake zijn van een positief verschil, met misschien een enkele uitzondering tijdens extreem warme zomerdagen, maar in (sub)tropische gebieden behoort een negatief verschil tot de reële mogelijkheden.

De warmteafgifte door convectorie kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_c = A \cdot f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (T_{cl} - T_I)$$

Hierin is:

Q_c	= warmteafgifte door convectorie	[W]
A	= oppervlak van de naakte mens	[m ²]
f_{cl}	= verhouding tussen het oppervlak van een gekleed en naakt mens	[-]
α_c	= warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectorie	[W/(m ² K)]
T_{cl}	= gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de kleding	[K]
T_I	= droge bol temperatuur van de omgevingslucht	[K]

In bovenstaande formule wordt dus uitgegaan van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de kleding, gerekend over het gehele lichaam. Dat wil zeggen dat de temperatuur van eventueel onbedekte huid daarin wordt begrepen.

De factor f_{cl} zal ruwweg liggen tussen 1,0 en 1,5; het oppervlak van de naakte mens is gelijk aan zijn eigen oppervlak, terwijl de zeer zwaar geklede mens een tot ongeveer 1,5 maal zo groot oppervlak zal aannemen.

3.2 Warmteafgifte door straling

De mens staat in een constante stralingswarmte-uitwisseling met de hem omgevende wanden (en voorwerpen). Deze warmte-uitwisseling is een zeer complex proces, waarin directe en indirecte straling, afstanden, oppervlakterelaties, e.d. een belangrijke rol spelen. Voor een nadere beschouwing wordt verwezen naar de leerstof Vormfactoren (VIb TN).

De warmteafgifte door straling kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_s = A_{\text{eff}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \{T_{\text{cl}}^4 - (\text{MRT})^4\}$$

Dit kan ook worden geschreven als:

$$Q_s = f_{\text{eff}} \cdot f_{\text{cl}} \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \{T_{\text{cl}}^4 - (\text{MRT})^4\}$$

Na invulling van een aantal constanten volgt de volgende vergelijking:

$$Q_s = 3,90 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot f_{\text{cl}} \cdot \{T_{\text{cl}}^4 - (\text{MRT})^4\}$$

Hierin is:

Q_s	= warmteafgifte door straling	[W]
A_{eff}	= effectieve oppervlak dat aan stralingsuitwisseling deelneemt	[m ²]
F_{eff}	= effectieve stralingsfactor van het gehele lichaam	(ca. 0,71)
ε	= stralingsemissiecoëfficiënt van kleding	(ca. 0,97)
σ	= constante van Stefan-Boltzmann	[5,67 · 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]
MRT	= gemiddelde stralingstemperatuur van de omgevingen	[K]
T_{cl}	= gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de kleding	[K]
T_l	= droge bol temperatuur van de omgevingslucht	[K]

Opm.: De factor f_{eff} geldt strikt genomen slechts voor de staande mens. In zittende toestand daalt deze factor van 0,71 tot 0,50. Daardoor daalt de afgifte tot:

$$Q_s = 2,75 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot f_{\text{cl}} \cdot \{T_{\text{cl}}^4 - (\text{MRT})^4\}$$

3.3 Warmteafgifte door vochtdiffusie

Het menselijk lichaam bestaat voor een zeer aanzienlijk deel uit vocht (water). Vereenvoudigd voorgesteld heerst in de huid een verzadigde dampdruk behorende bij de temperatuur van de huid. De omgevingslucht zal in het algemeen een lagere dampdruk hebben. En aangezien de huid vochtdoorlatend is, zal er ten gevolge van het dampdrukverschil een vochttransport plaatsvinden. Dit vochttransport is dus iets geheel anders dan transpiratie, die optreedt bij toenemende behoefte aan warmteafgifte door bijvoorbeeld het leveren van (grote) inspanning.

De warmteafgifte door vochtdiffusie door de huid kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_d = \beta \cdot r \cdot A \cdot (p_h - p_l)$$

Hierin is:

Q_d	= warmteafgifte door vochtdiffusie	[W]
β	= stofoverdrachtscoëfficiënt	[kg/(m ² ·s·Pa)]
r	= verdampingswarmte van water	[J/kg]
A	= oppervlak van de naakte mens	[m ²]
p_h	= verzadigde waterdampdruk bij huidtemperatuur	[Pa]
p_l	= waterdampdruk van de omgevingslucht	[Pa]

3.4 Warmteafgifte door transpiratie

Transpiratie is één van de manieren waarop het menselijk lichaam zijn overschot aan warmte kan afvoeren. Voor het verdampen van water is veel energie nodig. Ontstaat er in het lichaam een groot overschot aan warmte dan kan transpiratie in hoge mate meehelpen dit overschot weg te werken. Reeds geringe hoeveelheden verdampt water onttrekken een grote hoeveelheid energie aan het lichaam. De verliezen aan water door transpiratie moeten echter door vochtinname worden gecompenseerd.

De warmteafgifte door transpiratie kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_{tr} = C_1 \cdot A \cdot \left(\frac{M - W}{A} - C_2 \right)$$

Hierin is:

Q_{tr}	= warmteafgifte door transpiratie	[W]
M	= metabolisme (warmteontwikkeling in het lichaam)	[W]
W	= door het lichaam verrichte uitwendige arbeid	[W]
A	= oppervlak van de naakte mens	[m ²]
C_1	= constante	
C_2	= constante	

Er wordt vanuit gegaan dat in behaaglijke toestand alle transpiratievocht zal verdampen. Tevens is alleen transpiratie mogelijk indien

$$\frac{M - W}{A} > C_2$$

Belangrijke factoren zijn het metabolisme en de verrichte arbeid. Metabolisme is niets Anders dan de warmteproductie door verbranding van voedsel. Het zal duidelijk zijn dat de verrichte arbeid afgetrokken kan worden van het metabolisme en dat de rest via warmteregulatie zal moeten worden afgevoerd.

3.5 Warmteafgifte door latente warmte in de waterdamp van uitgedemde lucht

Door het ademen komt een hoeveelheid omgevingslucht in de longen. Deze omgevingslucht bevat een zekere hoeveelheid waterdamp. De uitgedemde lucht (meestal van hogere temperatuur, althans in Nederland) is nagenoeg verzadigd met waterdamp. Het verschil in vochtgehalte tussen uitademen en inademen bepaalt dus de warmtehoeveelheid die als latente warmte zal worden afgevoerd.

De latente warmte in waterdamp in de uitgedemde lucht kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_{la} = \phi_m \cdot r \cdot (x_{ex} - x_l)$$

Hierin is:

Q_{la}	= latente warmte in de waterdamp	[W]
ϕ_m	= massastroom uitgeademde lucht	[kg/s]
r	= verdampingswarmte van water	[J/kg]
X_l	= waterdampgehalte van de ingeademde lucht	[kg/kg]
X_{ex}	= waterdampgehalte van de uitgeademde lucht	[kg/kg]

De massa ingeademde lucht is rechtevenredig met M , want de hoeveelheid ingeademde lucht bepaalt de hoeveelheid zuurstof en deze hoeveelheid zuurstof staat weer in direct verband met de te verbranden hoeveelheid voedsel.

Verder is X_{ex} vrijwel constant en X_l tenslotte evenredig met p_l .

Daardoor kan de latente warmte worden weergegeven door:

$$Q_{la} = C_3 \cdot M \cdot (C_4 - p_l)$$

Met C_3 en C_4 als constanten.

3.6 Warmteafgifte door voelbare warmte in de uitgeademde lucht

Niet alleen bevat de uitgeademde lucht meer waterdamp dan de ingeademde lucht, maar tevens is de uitgeademde lucht (ook weer in Nederland) warmer dan de omgevingslucht. Bij elke ademtocht wordt dan ook een bepaalde hoeveelheid voelbare warmte afgevoerd.

De warmteafgifte door voelbare warmte in de uitgeademde lucht kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_{vo} = \phi_m \cdot C_p \cdot (T_{ex} - T_l)$$

Hierin is:

Q_{vo}	= voelbare warmte in de uitgeademde lucht	[W]
ϕ_m	= massastroom uitgeademde lucht	[kg/s]
C_p	= soortelijke warmte van droge lucht bij constante druk	[J/(kg·K)]
T_l	= temperatuur van de ingeademde lucht	[kg/kg]
T_{ex}	= temperatuur van de uitgeademde lucht	[kg/kg]

C_p en T_{ex} zijn nagenoeg constant, waardoor de vergelijking is te schrijven als:

$$Q_{vo} = C_5 \cdot M \cdot (C_6 - T_l)$$

Met C_5 en C_6 als constanten.

3.7 Warmtetransport door kleding

Kleding kan worden beschouwd als de "omwanding" van het naakte lichaam. Nu is (onder normale omstandigheden) de huid warmer dan het oppervlak van de kleding. Voor kleding kan dan ook een "transmissieberekening" worden gemaakt.

Het is de gewoonte het kledingoppervlak daarbij om te rekenen naar het menselijk oppervlak en dan een (rekenkundige) warmteweerstand van de kleding in te voeren, de zogenoemde clo-waarde (clo van clothing).

Het warmtetransport door de kleding kan worden omschreven door de vergelijking:

$$Q_{cl} = \frac{1}{R_{cl}} \cdot A \cdot (T_h - T_{cl})$$

Hierin is:

Q_{cl}	= warmtetransport door de kleding	[W]
R_{cl}	= warmteweerstand van de kleding incl. overgangsweerstand	[m ² ·K/W]
A	= oppervlak van de naakte mens	[m ²]
T_h	= huidtemperatuur	[K]
T_{cl}	= oppervlaktetemperatuur van de kleding	[K]

3.8 Metabolisme

Op gezette tijden neemt de mens een bepaalde hoeveelheid voedsel tot zich. Het belangrijkste doel hiervan is de energievoorziening van zijn lichaam. Buiten beschouwing latende dat er te veel of te weinig voedsel kan worden genuttigd en daardoor zich allerlei ongewenste gevolgen kunnen voordoen, is het in ieder geval zo dat voor de verbranding van voedsel een bepaalde hoeveelheid zuurstof nodig is die door inademing wordt opgenomen. Er is dus een relatie tussen het ademen en de voedselverbranding.

Bij deze verbranding komt echter een hoeveelheid warmte vrij. Deze vrijgekomen warmte wordt met het begrip metabolisme aangeduid. Het is deze warmte dus die afgevoerd moet worden. Daarbij dient te worden bedacht dat arbeid ook een vorm van warmte is. Een bepaald deel van het metabolisme behoeft dan ook niet als surplus te worden afgevoerd. Soms wordt het verschil tussen metabolisme en verrichte arbeid (overigens ten onrechte) "netto metabolisme" genoemd. Het gebruik van deze uitdrukking wordt afgeraden.

3.9 Verrichte arbeid

Zoals hiervoor reeds opgemerkt, zal een deel van de vrijgekomen verbrandingswarmte van het voedsel worden benut voor het verrichten van (uitwendige) arbeid.

Uiteraard is dat deel in sterke mate afhankelijk van de zwaarte van de arbeid. In het algemeen is het zo dat bij toenemende arbeidsinspanning meer voedsel zal worden genuttigd. Onder "normale" omstandigheden is het aandeel van de arbeid in het metabolisme betrekkelijk klein.

3.10 Geleiding

In het overgrote deel van alle gevallen is het aandeel van de geleiding in het warmtetransport te verwaarlozen. Dat betekent echter niet dat de geleiding geen rol speelt.

Bij aanraking van voorwerpen door het menselijk lichaam stelt zich een zogenoemde contacttemperatuur in. Deze temperatuur is afhankelijk van de stoffeïenschappen van de huid en het aangeraakte voorwerp.

Een belangrijk voorbeeld is de aanraking van vloeren. Een vloer wordt "voetwarm" genoemd wanneer deze bij aanraking geen onaangename indruk maakt. Aangenomen kan worden dat een vloer als aangenaam wordt ervaren wanneer voldaan wordt aan de volgende voorwaarde:

$$T_{vloer} \geq 25,4 - \frac{5152}{b_{vloer}}$$

Hierin is:

T_{vloer}	= oppervlaktetemperatuur van de vloer	[°C]
b_{vloer}	= contactcoëfficiënt van de vloer	[J/(m ² ·K·s ^{0,5})]
b	= $(\lambda \cdot \rho \cdot c)^{0,5}$	
λ	= warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/(m·K)]
ρ	= dichtheid	[kg/m ³]
c	= soortelijke warmte	[J/(kg·K)]

Voor diverse stoffen is de waarde van b te bepalen. Enkele voorbeelden zijn:

Materiaal	b	T_{\min}
Beton	1.680	22
Hout	700	18
Linoleum	525	15

Experimenteel is vastgesteld dat een houten vloer van 18 °C als “voetwarm” wordt ervaren. Een betonnen vloer van 22 °C geeft dus dezelfde warmte-indruk als een houten vloer van 18 °C en als een linoleumvloer van 15 °C.

Dit belangrijke gegeven is een aanwijzing dat, wanneer geen bijzondere maatregelen getroffen worden, betonnen vloeren in het algemeen aanleiding zullen geven tot klachten.

4 Warmteopslag in en onttrekking aan het menselijk lichaam

In oudere literatuur wordt nog al eens het begrip warmtestuwing gehanteerd. De stuwing zou één van de termen van de behaaglijkheidvergelijking moeten zijn. Hiermede wordt aangegeven dat de mens in staat zou zijn een deel van de ontwikkelde warmte in het lichaam op te slaan of omgekeerd, indien nodig, een extra aandeel in de warmteafgifte te leveren naast het metabolisme.

Bij een soortelijke warmte van $3.485 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ moet een mens met een massa van 70 kg er rekening mee houden dat wanneer hij slechts 10% van het metabolisme van bijvoorbeeld 120 W als warmte in zijn lichaam wil opslaan, dit leidt tot een temperatuurverhoging van 0,18 K. Bij onttrekking van warmte een temperatuuurdaling van 0,18 K.

In feite is reeds bij een metabolisme van laag niveau sprake van een aanzienlijke aanslag op het biologische evenwicht. Dat is de reden dat thans warmtestuwing niet meer als term wordt meegerekend, maar wordt beschouwd als een onbehaaglijke factor in de warmte-uitwisseling met de omgeving.

5 Behaaglijkheidsvergelijkingen

De eenvoudigste vergelijking waarin het thermisch evenwicht, nodig voor de behaaglijkheid, kan worden uitgedrukt luidt:

$$M - W - Q_d - Q_{tr} - Q_{la} - Q_{vo} = Q_s + Q_c$$

Tevens geldt:

$$Q_{cl} = Q_s + Q_c$$

Professor P.O. Fanger van de Universiteit van Kopenhagen in Denemarken heeft zeer omvangrijk onderzoek gedaan naar de omstandigheden die kunnen leiden tot een optimaal gevoel van behaaglijkheid. Mede door hem zijn de meeste van de gegeven vergelijkingen ontwikkeld.

Verder heeft hij vastgesteld dat de huidtemperatuur T_h (dus ook de verzadigde dampdruk p_h) en de transpiratie bij optimale behaaglijkheid een functie zijn van het metabolisme per m^2 lichaamsoppervlak.

Tenslotte stelde hij de uitwendige arbeid gelijk aan het rendement van het metabolisme, dus:

$$W = \eta \cdot M$$

5.1 Behaaglijkheidsvergelijking van Fanger

Na enig omrekenen en invullen van de experimenteel vastgestelde constanten volgt de behaaglijkheidsvergelijking van Prof. Fanger:

$$\begin{aligned} & \frac{M}{A} \cdot (1 - \eta) - 3,07 \cdot 10^{-3} \cdot [5766 - 7,168 \cdot \frac{M}{A} \cdot (1 - \eta) - p_i] - \\ & 0,42 \cdot [\frac{M}{A} \cdot (1 - \eta) - 58,15] - 2,336 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{M}{A} \cdot (5833 - p_i) - \\ & 1,95 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{M}{A} \cdot (307 - T_i) = \\ & 3,90 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (T_{cl}^4 - \{MRT\}^4) + f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (T_{cl} - T_i) \end{aligned}$$

Te bedenken is dat ook geldt:

$$\frac{1}{R_{cl}} \cdot (T_h - T_{cl}) = 3,90 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (T_{cl}^4 - \{MRT\}^4) + f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (T_{cl} - T_i)$$

De hier gegeven vergelijkingen gelden voor alle toestanden van optimale behaaglijkheid.

Voor α_c volgt de getalwaarde uit:

$$\alpha_c = 2,05 \cdot (T_{cl} - T_i)^{0,25}$$

$$\text{voor } 2,05 \cdot (T_{cl} - T_i)^{0,25} > 10,4 \cdot \sqrt{v} \text{ en}$$

$$\alpha_c = 10,4 \cdot \sqrt{v}$$

$$\text{voor } 2,05 \cdot (T_{cl} - T_i)^{0,25} < 10,4 \cdot \sqrt{v}$$

Hierin is v = de gemiddelde lichtsnelheid in [m/s].

Bij nadere beschouwing blijkt dat bij eliminatie van T_{cl} en substitutie van T_h er zes variabelen overblijven waarvan de behaaglijkheid afhankelijk is,

$$\text{Behaaglijkheid} = f \left(\frac{M}{A}, R_{cl}, T_l, MRT, v, p_l \right)$$

(f_{cl} houdt verband met R_{cl} en η is vrijwel altijd te verwaarlozen, behalve bij zeer zware arbeid). De behaaglijkheidsformule van Fanger is veel te ingewikkeld om er gemakkelijk mee te kunnen werken. Ingevoerd in een computer behoeft zij echter geen problemen op te leveren.

5.1.1 Behaaglijkheidsparameters

Behalve de reeds genoemde behaaglijkheidsgrootheden brengt Prof. Fanger nog twee grootheden in rekening, zodat er nu met zes variabelen moet worden gewerkt.

Deze zijn:

- De luchttemperatuur
- De gemiddelde stralingstemperatuur
- De lichtsnelheid
- De luchtvochtigheid
- De activiteit (arbeid)
- De warmteweerstand van de kleding.

De eerste vier variabelen bepalen het (binnen)klimaat, dat aangepast moet zijn aan de te verrichten arbeid en de te dragen kleding.

De activiteit is vrij nauwkeurig te bepalen als de soort arbeid, alsmede de werkomstandigheden bekend zijn.

Het metabolisme van een aantal activiteiten is in de volgende tabel opgenomen in watt per vierkante meter lichaamsoppervlak.

Het lichaamsoppervlak van mannen is 1,8 m² en van vrouwen 1,65 m².

Activiteit	$\frac{M}{A}$ in W/m ²
Slapen	50
Zitten	60
Kantoorwerk	70
Staand werk in winkel, laboratorium, keuken	85 – 120
Normaal lopen	150
Timmeren	350

De warmteweerstand voor kleding R_{cl} wordt uitgedrukt in "clo". Gekozen is voor standaard kantoor-kleding gelijk aan 1 clo (1 clo = 0,155 m²·K/W).

De volgende tabel geeft enige waarden voor veel voorkomende situaties.

Kleding	R_{cl} in clo	f_{cl}
Naakt	0	1,0
Bikini	0,01	1,0
Kort broekje	0,1	1,0
Tropenkleding: korte broek, overhemd met korte mouw	0,3	1,05
Zomerkleding: lichte broek, overhemd met korte mouw	0,5	1,1
Licht tropenkostuum	0,8	1,1
Normale kantoor-kleding	1,0	1,15
Gekleed kostuum met vest	1,5	1,15-1,20
Zware winterkleding	2	1,20-1,30
Poolkleding	3 – 4	1,30-1,50

5.2 Behaaglijkheidvergelijking van Bedford

Reeds in 1936 publiceerde T. Bedford de resultaten van onderzoeken naar de invloed van omgevingstemperaturen op het zich behaaglijk gevoelen tijdens het werk.

Voor Nederlandse omstandigheden omgewerkt luidt deze vergelijking:

$$S = P - 0,1 \cdot (T_l - 273) - 0,0968 \cdot (T_s - 273) - 0,0279 \cdot f + 0,0367 \cdot \{37,8 - (T_l - 273)\} \cdot \sqrt{v}$$

Hierin is:

P	= 7,83 voor de winter	8,45 voor de zomer	
T _l	= luchttemperatuur		[K]
T _s	= stralingstemperatuur		[K]
f	= waterdampdruk		[mbar]
v	= luchtsnelheid		[m/s]

Voor de uitkomst S geldt:

S	= 1: veel te warm;
S	= 4: behaaglijk;
S	= 7: veel te koud.

5.3 Behaaglijkheidsvergelijking van Van Zuilen

De Nederlandse Professor Van Zuilen heeft de door Bedford ontwikkelde formule sterk vereenvoudigd, waardoor deze er als volgt uitziet:

$$S = P + 0,25 \cdot \{(T_l - 273) + (T_s - 273)\} + 0,1 \cdot \{x - \{37,8 - (T_l - 273)\} \cdot \sqrt{v}\}$$

Hierin is:

P	= -9,2 voor de winter	-10,6 voor de zomer	
T _l	= luchttemperatuur		[K]
T _s	= stralingstemperatuur		[K]
x	= absolute vochtigheid van de lucht		[g/kg]
v	= luchtsnelheid		[m/s]

Voor de uitkomst S geldt:

S	= +3: veel te warm (+ 5K);
S	= 0: behaaglijk;
S	= -3: veel te koud (-5 K).

5.4 Behaaglijkheidsvergelijking van Yaglou

Reeds in 1925 heeft de Amerikaan C.P. Yaglou publicaties het daglicht doen zien over de door hem genoemde effectieve temperatuur index in relatie tot de kleding.

Later, in 1947, verscheen nog een publicatie over een verbeterde methode voor het bepalen van de zogenoemde effectieve temperatuur index. Tenslotte beval hij in 1956 het gebruik aan van de zogenoemde Wet Bulb Globe Thermometer.

De Engelsman T. Bedford bracht nog enkele correcties op te methode aan, die moeten lijden tot de *gecorrigeerde effectieve temperatuur*.

De Wet Bulb Globe Temperature Index kan worden bepaald uit:

$$WBGT = 0,7 \cdot (T_{nb} - 273) + 0,2 \cdot (T_{gl} - 273) + 0,1 \cdot (T_l - 273)$$

Hierin is:

WBGT	= Wet Bulb Globe Temperature Index	
T _{nb}	= natte bol temperatuur	[K]
T _{gl}	= globe temperatuur	[K]
T _l	= luchttemperatuur	[K]

De globe temperatuur wordt bepaald met een speciale thermometer , waarvan het kwikreservoir is geplaatst in het centrum van een matzwarte bol van ca. 150 mm middellijn en geringe massa. Deze temperatuur is ongeveer gelijk aan het gemiddelde van de lucht- en stralingstemperatuur.

5.5 Temperatuurindex voor Fabrieken en Werkplaatsen

In het Veiligheidsbesluit voor Fabrieken en Werkplaatsen 1938 is de zogenoemde Temperatuurindex ingevoerd. In principe is deze index een vereenvoudigde vorm van de effectieve temperatuur.

De temperatuurindex volgt uit:

$$L = \frac{42 \cdot (T_l - 273) - 8 \cdot (T_{nb} - 273)}{34 + (T_l - 273) - (T_{nb} - 273)}$$

Hierin is:

T_l = luchttemperatuur [K]

T_{nb} = natte bol temperatuur [K]

Voorwaarden

1. $(T_l - T_s) \leq 5$ K
2. $v < 1$ m/s
3. $12 \leq L \leq 32$

De bepaling heeft door de nieuwe Arbeidsomstandighedenwet in zoverre haar zin verloren, dat in deze wet verdergaande maatregelen worden voorgeschreven.

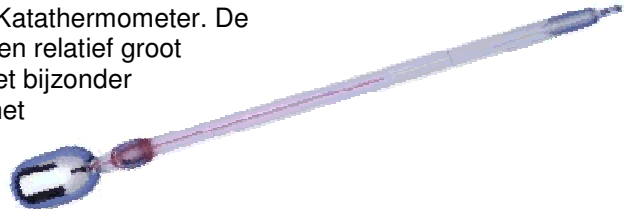
6 Het meten van behaaglijkheid

Om een zo objectief mogelijke beoordeling van de behaaglijkheid te kunnen geven, zijn een aantal betrekkelijk eenvoudige instrumenten ontwikkeld.

Dat neemt niet weg dat de subjectieve beoordelingen van individuele personen daarmee nooit zullen kunnen worden weerlegd. Niet ieder mens ondervindt zijn omgeving op dezelfde wijze.

6.1 De Katathermometer

Één van de ontwikkelde instrumenten is de Katathermometer. De Katathermometer is een thermometer met een relatief groot vloeistofreservoir. Deze thermometer is in het bijzonder gevoelig voor stralingsinvloeden. In feite is het een poging om de reactie van het menselijk lichaam te kunnen imiteren.



De thermometer wordt als volgt gebruikt:

Eerst wordt hij tot even boven 38 °C verwarmd. Daarna wordt met een stopwatch gemeten hoeveel seconden het duurt totdat de thermometer van 38 °C tot 35 °C is afgekoeld (in de te beoordelen ruimte). Is nu de waterwaarde van het vloeistofreservoir bekend (in de praktijk van de thermometer), dan kan het afkoelingsgetal worden berekend uit:

$$A = \frac{F}{t}$$

Hierin is:

A = afkoelingsgetal

F = waterwaarde per cm² van het reservoiroppervlak

t = tijd in seconden

Gebleken is dat het afkoelingsgetal niet constant is voor één en hetzelfde behaaglijkheidsgevoel. Daarom is de zogenoemde Katawaarde ingevoerd. Deze Katawaarde is te berekenen uit:

$$B = \frac{T_l}{A}$$

Hierin is:

B = Katawaarde

T_l = luchttemperatuur

A = afkoelingsgetal

De Katatwaarde is dus ook te schrijven als:

$$B = \frac{T_l \cdot t}{F}$$

De grenzen van het behaaglijkheidsgebied worden bepaald door de Katawaarden 3 en 5.

De invloed van de luchtvochtigheid wordt met een “natte” Katathermometer gemeten. Dit is dezelfde thermometer, maar dan met een vochtig weefsel om het reservoir aangebracht. De invloed van de lichtsnelheid is alleen door correctiefactoren te verrekenen.

6.2 De Globe-temperatuur

Zoals reeds eerder in paragraaf 5.4 aangegeven, kan de invloed van convectie en straling met de globe-temperatuur, ook wel de zwarte bol thermometer genoemd, meten.

6.3 De effectieve temperatuur

De effectieve temperatuur is een door de Amerikaan C.P. Yaglou ingevoerd begrip. Hij ontwikkelde een temperatuurschaal waarin luchttemperatuur, luchtvochtigheid en luchtbeweging werden uitgedrukt in een temperatuur van praktisch stilstaande verzadigde lucht, die hetzelfde gevoel van warmte geeft als de ruimtelucht waarin de waarnemer zich bevindt.

Er zijn twee schalen ontwikkeld; één voor licht geklede personen en één voor personen met een ontbloot bovenlichaam. Beide schalen hebben betrekking op zittende personen en personen die lichte arbeid verrichten.

De effectieve temperatuur houdt geen rekening met stralingswarmte of – koude. Dat is de reden waarom de Engelsman T. Bedford voorstelde de gecorrigeerde effectieve temperatuur in te voeren, door de globe-temperatuur te gebruiken in plaats van de droge bol temperatuur. Door deze handelswijze wordt in het algemeen een iets hogere waargenomen temperatuur vastgesteld.

6.4 De equivalente temperatuur

Volledigheidshalve dient nog de equivalente temperatuur schaal te worden vermeld. Hierin is getracht de invloed van de luchttemperatuur, straling van de omgeving en luchtbeweging op het warmteverlies van een zwart lichaam, dat dezelfde temperatuur heeft als de kleding van een zich thermisch behaaglijk gevoelende persoon, in rekening te brengen. De schaal houdt echter geen rekening met luchtvochtigheid en verdampingswarmte.

Metingen worden verricht door een speciaal voor dit doel ontworpen instrument, maar kunnen ook geschieden door het gelijktijdig meten van luchttemperatuur, globe-temperatuur en luchtsnelheid, waarvan de resultaten in een nomogram worden uitgezet.

De op die manier bepaalde equivalente temperatuur is de droge bol temperatuur van in een vertrek stilstaande lucht, waarbij de omwandelingen dezelfde temperatuur als de lucht hebben en het warmteverlies hetzelfde is als in het te meten vertrek wordt ondervonden.

6.5 De gemiddelde stralingstemperatuur

De gemiddelde stralingstemperatuur (GST) is een denkbeeldige, voor de gehele omgeving gelijkmatige oppervlaktetemperatuur zodanig, dat het daarbij uitgewisselde stralingsvermogen tussen de omgeving en een zeer klein lichaam in een punt binnen die omgeving even groot is als bij de werkelijke (onderling verschillende) oppervlaktetemperaturen.

In de literatuur, zoals in de behaaglijkheidvergelijking van Fanger wordt veelal de Engelse uitdrukking Mean Radiant Temperature (MRT) gebruikt.

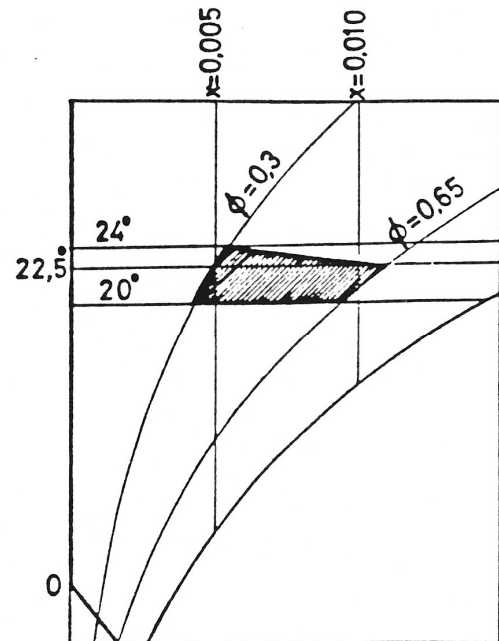
Voor een verdere analyse van stralingsuitwisseling zij verwezen naar de leerstof Vormfactoren.

7 Behaaglijkheidsdiagrammen

Voor het dagelijks gebruik zijn behaaglijkheidsvergelijkingen vaak te omslachtig, zeker die van Fanger. Om een snelle indruk van de te verwachten behaaglijkheid te krijgen, zijn daarom (met behulp van de computer) allerlei diagrammen ontwikkeld. In de meeste daarvan zijn relaties gelegd tussen behaaglijkheid en lichtsnelheid, luchtvochtigheid, luchttemperatuur en clo-waarde.

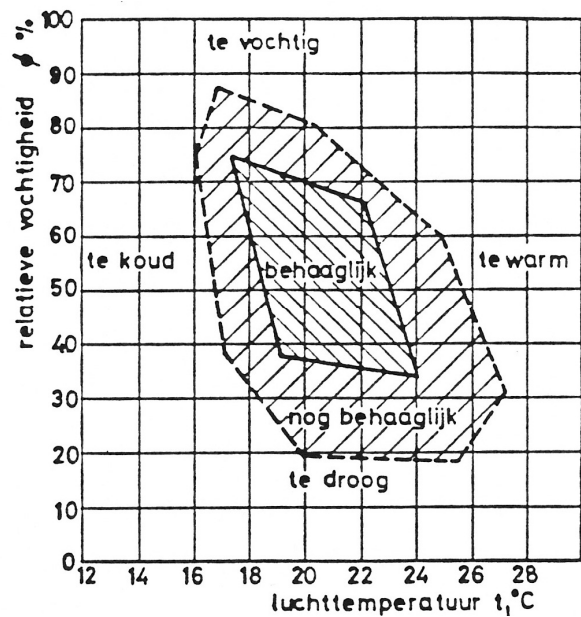
7.1 Het behaaglijkheidsgebied in het Mollier diagram

Voor een algemene bepaling van de grenzen van het behaaglijkheidsgebied voor normale omstandigheden (comfort installaties) is dit gebied in het Mollier diagram ingetekend, zoals in onderstaande figuur weergegeven.



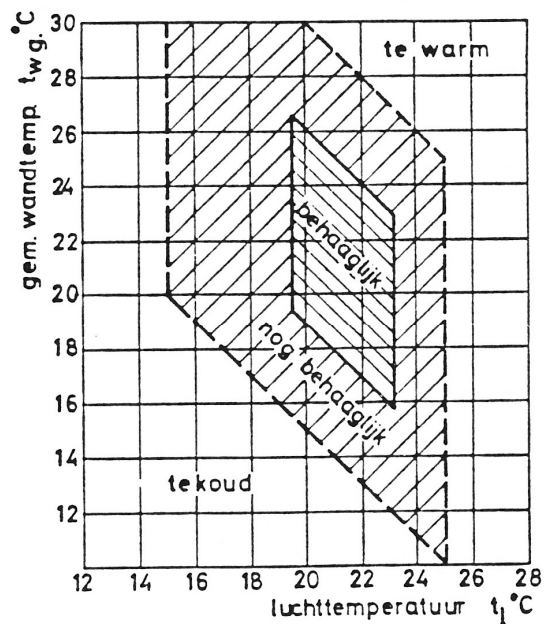
7.2 Relatie tussen luchttemperatuur en luchtvochtigheid

In onderstaande figuur is de relatie tussen luchttemperatuur, -vochtigheid en behaaglijkheid weergegeven.



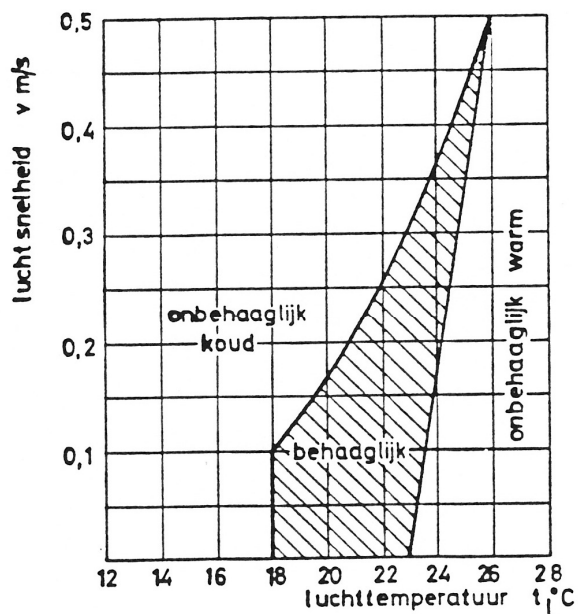
7.3 Relatie tussen luchttemperatuur en de gemiddelde wandtemperatuur

Onderstaande figuur geeft duidelijk aan dat bij hogere stralingstemperaturen met een lagere luchttemperatuur kan worden volstaan.



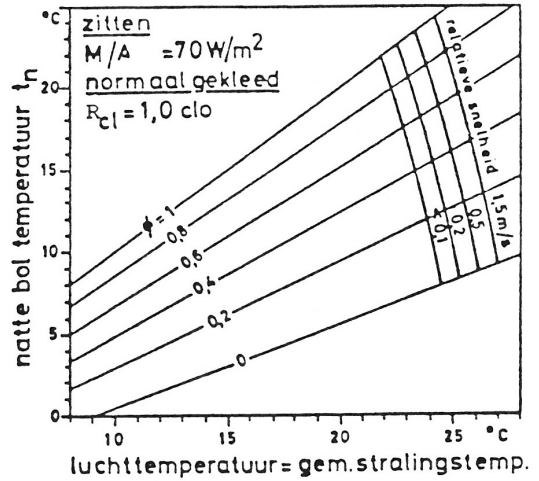
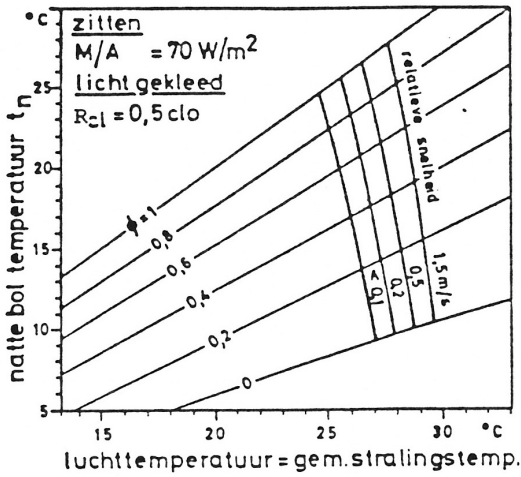
7.4 Relatie tussen luchtsnelheid, luchttemperatuur en behaaglijkheid

Bij een toenemende luchtsnelheid zal al snel sprake zijn van een onbehaaglijke situatie. Boven een luchtsnelheid van 0,5 m/s is zonder bijzondere maatregelen behaaglijkheid niet meer te verwachten. In onderstaande figuur zijn deze relaties vastgelegd.



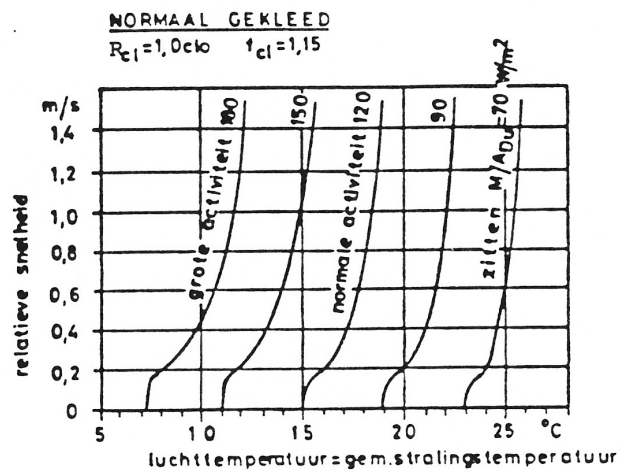
7.5 Relatie tussen natte bol temperatuur en lucht- en stralingstemperatuur

Uit onderstaande figuren blijkt dat tevens de kleding een belangrijke rol speelt. In deze figuren is het verband gelegd tussen luchttemperatuur (= stralingstemperatuur), natte bol temperatuur, luchtsnelheid en relatieve vochtigheid aan de ene kant en de wijze van kleden aan de andere kant.



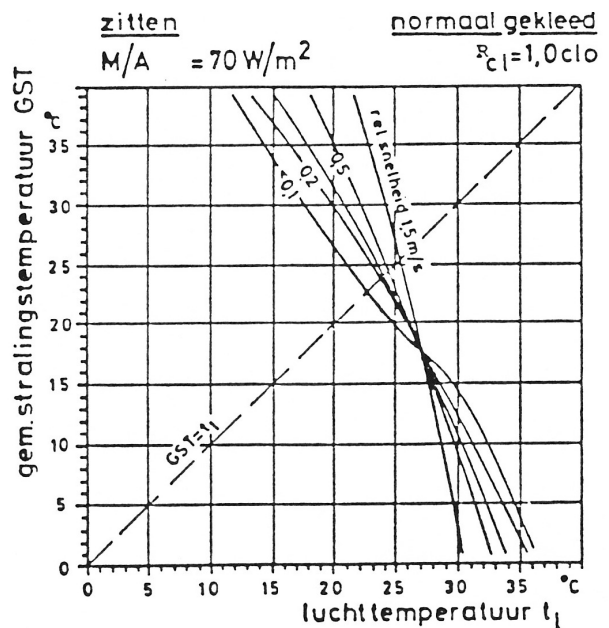
7.6 Relatie tussen activiteit en luchtcondities

Uit de figuur hiernaast blijkt overduidelijk dat bij toenemende activiteit de lucht- en stralingstemperatuur lager dienen te worden gekozen.



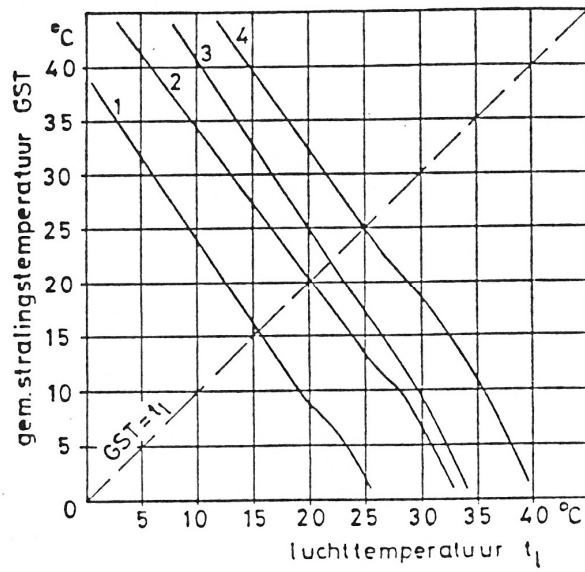
7.7 Relatie tussen lucht- en stralingstemperatuur en luchtsnelheid

De figuur hiernaast toont de naar verhouding geringe spreiding van de behaaglijkheid in afhankelijkheid van de luchtsnelheid bij bepaalde lucht- en stralingstemperatuurcombinaties.



7.8 Relatie tussen kleding en lucht- en stralingstemperatuur

Uiteraard zal de behaaglijkheid sterk worden beïnvloed door de wijze van kleden. Onderstaande figuur is hier een voorbeeld van.

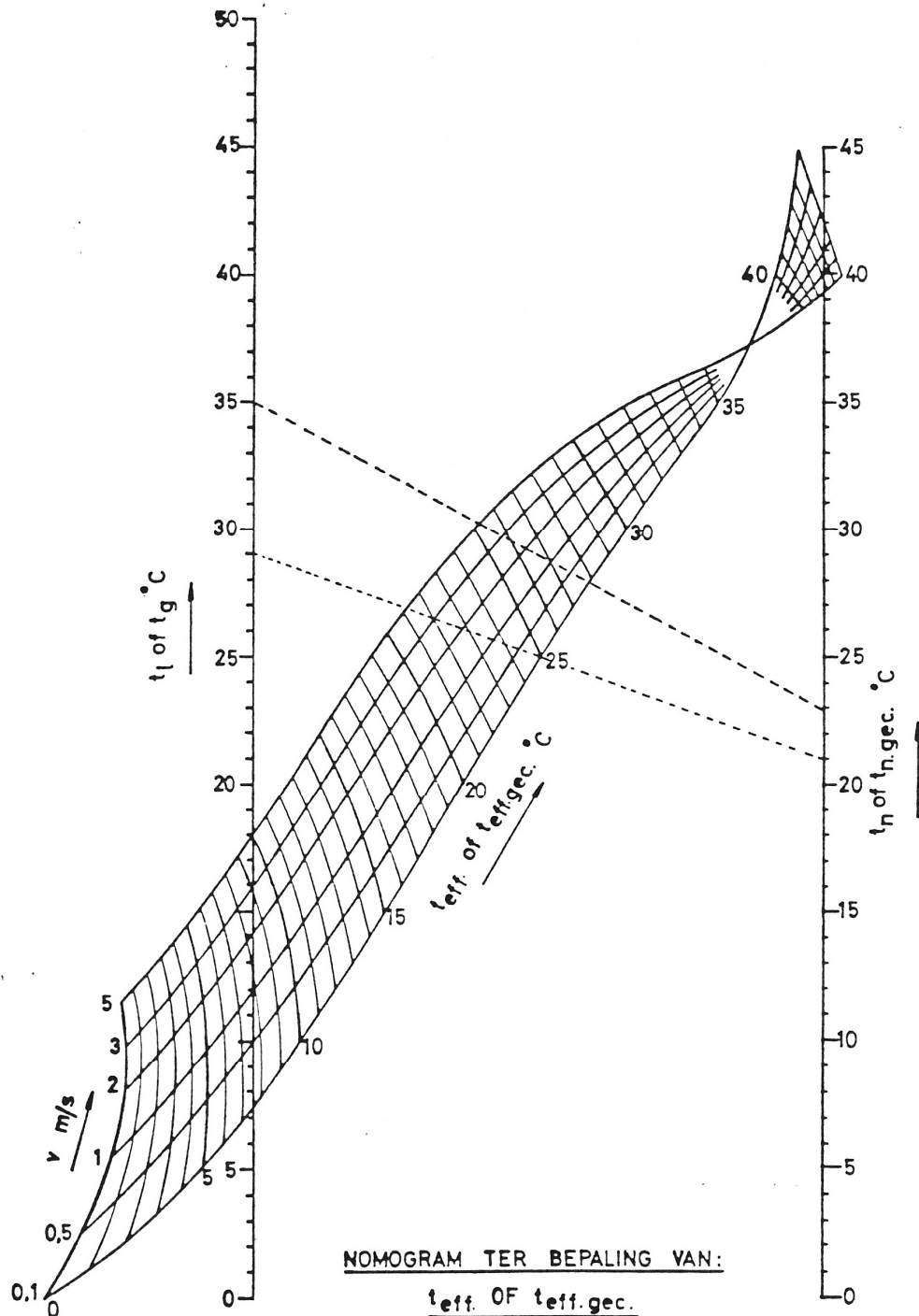


gem. luchtsnelheid = 0,15 m/s

	$\frac{M}{A}$ in $\frac{W}{m^2}$	kledingweerstand in clo
1	110	1,0
2	110	0,5
3	70	1,0
4	70	0,5

8 Behaaglijkheidsnomogram

Het in onderstaande figuur getekende nomogram is uit de Verenigde Staten afkomstig. Het is gebaseerd op de door Yaglou gedane onderzoeken en kan dienen ter bepaling van de effectieve temperatuur.



Met de door Bedford voorgestelde wijzigingen in meetmethode is dit nomogram ook geschikt om de gecorrigeerde effectieve temperatuur te bepalen.

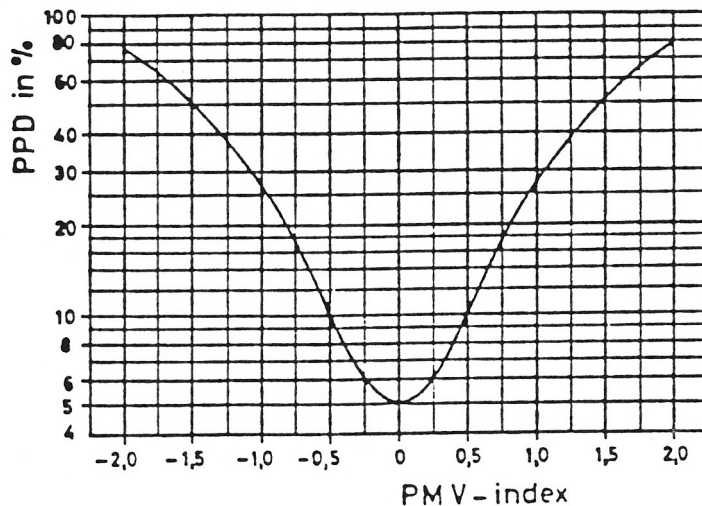
In het eerste geval wordt uitgegaan van de natte bol temperatuur en de luchttemperatuur. In het tweede geval wordt uitgegaan van de gecorrigeerde natte bol temperatuur en de Globe temperatuur. Voor beide geldt als parameter de lichtsnelheid.

Voor Europese omstandigheden heeft het nomogram weinig waarde meer.

9 Waarderingsindex van Fanger

Professor Fanger heeft op grond van de door hem ontwikkelde behaaglijkheidsvergelijking een index vastgesteld om te kunnen vastleggen hoe een groep waarnemers het (binnen)klimaat waardeert. Uiteraard zal niet elke gevraagde waarnemer hetzelfde oordeel geven. Deze beoordelingen kunnen uiteen lopen van koud tot heet. Het is echter mogelijk gebleken een voorspelling te doen van de te verwachten gemiddelde waardering van de behaaglijkheid en deze in een index vast te leggen.

Deze voorspelde gemiddelde waardering (Predicted Mean Vote-index, afgekort PMC-index) blijkt in relatie te staan tot het percentage te verwachten ontevreden waarnemers (Predicted Percentage Dissatisfied, afgekort PPD). De PMV-index loopt van -3 (koud) tot +3 (heet).



Voor de waarden -2 (koel) tot +2 (warm) is bovenstaande figuur de relatie tot het PPD grafisch weergegeven. Deze kromme is een typisch voorbeeld van de in de statistiek veel voorkomende kromme van Gauss.

Het meest opvallende is dat bij $PMV = 0$, er toch altijd nog 5% klagers zal blijven, terwijl bij enige afwijking van 0 het aantal klagers al snel zal toenemen.

10 Leeftijd en sexe

Vaak wordt beweert dat jongere mensen anders reageren dan oudere. Verder is bijna onuitroeibaar dat vrouwen het klimaat anders zouden beoordelen dan mannen. Zeer uitgebreid onderzoek door Fanger heeft aangetoond dat hiervan geen sprake is. Dat neemt niet weg dat beoordelingen wel verschillend kunnen uitvallen als mede in rekening wordt gebracht dat jongeren zich anders kleden dan ouderen en vrouwen anders dan mannen. De verschillen in beoordeling van het klimaat in een ruimte waarin mannen en vrouwen werken zijn voornamelijk toe te schrijven aan de verschillende manier van kleden (de gemiddelde jongere vrouw is lichter gekleed dan de jongere man). Er is dan echter sprake van een verschil van clo-waarde, die in de behaaglijkeheidsvergelijking duidelijk tot uitdrukking komt als één van de belangrijke parameters.