

# Het thermisch binnenklimaat

Kennisbank Bouwfysica  
Auteur: ir. A.C. van der Linden

## 1 Inleiding

Of een gebouw voldoet aan de eisen die eraan worden gesteld vanuit het "beoogd gebruik", wordt voor een belangrijk deel bepaald door de kwaliteit van het binnenmilieu. Naast de vanuit oogpunt van gezondheid rechtstreeks van belang zijnde zaken als zuiverheid van de binnenlucht, afwezig zijn van schadelijke straling en dergelijke is er een groot aantal comfortaspecten dat van belang is. Daarbij moet worden gedacht aan geluid (achtergrondgeluid veroorzaakt door activiteiten in het gebouw of door externe bronnen, zoals verkeer), licht (hinderlijke reflecties, verblinding door onafgeschermd lichtbronnen, enz.), warmte en vocht.

Hoe een individuele gebouwgebruiker een van de afzonderlijke aspecten beoordeelt, is mede afhankelijk van de mate waarin aan de eisen ten aanzien van de overige voldaan wordt. Daarnaast wordt het oordeel nog beïnvloed door andere (psychologische) aspecten voortkomend uit de organisatie (werksfeer, voorzieningen).

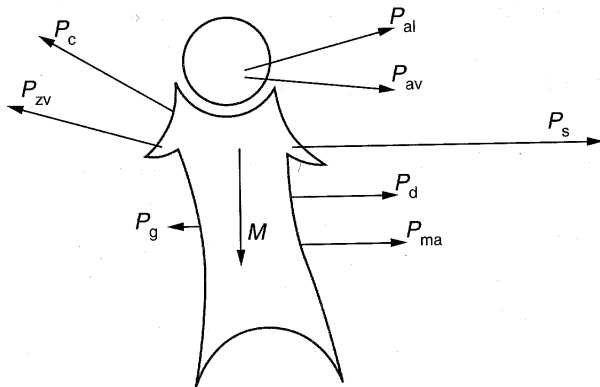
Over de wijze waarop en mate waarin deze onderlinge beïnvloeding een rol speelt, is nog weinig bekend. Algemeen wordt aangenomen dat als de afzonderlijke parameters binnen hun eigen "comfortgrenzen" blijven, de onderlinge beïnvloeding gering is. In duidelijke klachtensituaties kan men dit aspect echter niet verwaarlozen.

Deze module gaat specifiek in op het "thermisch comfort". Daarbij gaat het vooral om temperatuur en luchtvochtigheid, maar bij voorbeeld ook om luchtsnelheden. Er moet onderscheid worden gemaakt in algemene thermische behaaglijkheid en in plaatselijke onbehaaglijkheid (tocht, koudestraling, enz.).

## 2 Thermo-fysiologische mensmodellen

Voor het beoordelen van het thermisch binnenklimaat moet men beschikken over een methode om uit de meetbare, fysische parameters af te leiden welke waardering de mens voor het binnenklimaat zal hebben. Uiteraard zullen daarbij de situatie waarin deze mens zich bevindt (rustig zitten, zwaar werken) en de soort kleding die hij draagt, invloed hebben. Behalve bij het ontwerpen van nieuwe gebouwen heeft men zo'n methode nodig bij het beoordelen van het klimaat in bestaande gebouwen.

Door verschillende onderzoekers zijn zogenaamde thermo-fysiologische mensmodellen ontwikkeld. Een van de meest bekende is het "model van Fanger" [1]. Deze gaat uit van een energiebalans voor de mens in een stationaire situatie. Hierin wordt de energie - die in het lichaam door de stofwisseling is vrijgemaakt - gelijk gesteld aan de afgevoerde energie (zie figuur 1). Uiteraard kan de warmtebalans worden beïnvloed door het wijzigen van de kleding.



Energiebalans van de mens:	
M	ontwikkelde energie (stofwisseling)
$P_{ma}$	uitwendig verrichte mechanische arbeid
$P_d$	dampdiffusie door de huid
$P_{zv}$	warmte-afvoer door zweetverdamping
$P_{av}$	met de ademhaling afgevoerde warmte
$P_{al}$	met de ademhaling afgevoerde waterdamp
$P_c$	warmte-uitwisseling met de binnenlucht

figuur 1. energiebalans van de mens in zijn omgeving

Door het toevoegen van comforteisen inzake huidtemperatuur en zweetvorming aan de energiebalans, komt Fanger op een behaaglijkheidsvergelijking. Hiervoor zijn experimenten met proefpersonen verricht. Bij dit soort onderzoek nemen de proefpersonen plaats in een kamer waarin een bepaald thermisch klimaat wordt aangeboden, waarna ze moeten aangeven wat hun "thermische sensatie" is.

Daarbij is een schaal (ASHRAE) gebruikt, zoals weergegeven in tabel 1. De neutrale situatie op deze schaal is gedefinieerd door een luchttemperatuur van  $T_l = 29 \text{ }^\circ\text{C}$  en een gelijke, uniforme stralingstemperatuur ( $T_s$ ), een relatieve luchtvochtigheid van  $RV = 30 \%$ , en een luchtsnelheid van  $v = 0,1 \text{ m/s}$ , voor een ongeklede mens bij een expositietijd van 1 uur. Bij dezelfde omstandigheden zal de kwalificatie "zeer heet" bij  $T_l = T_s = 45 \text{ }^\circ\text{C}$  liggen en de uitspraak "zeer koud"  $T_l = T_s = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5	ontoelaatbaar heet
4	zeer heet
3	heet
2	warm
1	enigszins warm
0	neutraal
-1	enigszins koel
-2	koel
-3	koud
-4	zeer koud
-5	ontoelaatbaar koud

tabel 1. schaal voor het toekennen van een getalwaarde aan een bepaalde waardering van het binnenklimaat

De vergelijkingen van Fanger gelden voor het gebied tussen een waardering van -2 en 2. Uit zijn vergelijkingen volgt een "Predicted Mean Vote" (PMV) die met de getallen op de schaal van tabel 1 kan worden vergeleken.

Op een waardering van een binnenklimaat volgens de vergelijkingen van Fanger hebben allerlei dingen, zoals leeftijd, verschil in sekse, land van herkomst (ras), etc., in de laboratoriumsituatie, geen meetbare invloed. Als er al verschillen zijn, komen die wellicht eerder voort uit het feit dat verschillende personen bij dezelfde omstandigheden een ander metabolisme (de door de stofwisseling in het lichaam ontwikkelde energie) hebben. Het model

van Fanger is beperkt, doordat het alleen geldt binnen het door hem gedefinieerde behaaglijkheidsgebied. Bovendien gaat het model uit van een stationaire situatie, zodat men voor een kort verblijf in een ruimte (tot een half uur) of voor kortdurende activiteiten geen waardering van het klimaat kan maken. Daarnaast blijkt uit recent onderzoek dat de "comforttemperatuur" die mensen in praktijksituaties aangeven niet altijd overeenkomt met de thermisch neutrale temperatuur zoals die uit de PMV-berekening volgt.

Er zijn ook modellen gemaakt die meer rekening houden met het dynamische karakter van de processen, tot volledig dynamische modellen toe, waarin het menselijk lichaam in vier lagen is verdeeld. Deze zijn echter maar in beperkte mate bruikbaar voor de bouwpraktijk. Een van de meest bruikbare modellen met beperkte dynamische mogelijkheden is dat van Gagge. Hierbij is het menselijk lichaam niet tot een blok met interne warmteproductie en met warmteverliezen naar de omgeving geschematiseerd, zoals bij Fanger, maar tot een model met twee concentrische lagen waarin warmteopslag (accumulatie) mogelijk is. Hiervan stelt de buitenste laag de huid voor. De twee lagen (kern en huid) wisselen warmte uit door convectie (via een geschematiseerde bloedsomloop) en door geleiding. Het model streeft naar temperaturen voor kern en schil van 37 °C, en tracht deze te bereiken door het regelen van de bloedsomloop (uitwisseling van warmte tussen kern en schil) en zweetafscheiding. Bepalend voor de mate van behaaglijkheid zijn in het koude gebied de huidtemperatuur en in het warme gebied de natheid van de huid. Het model dat in een computerprogramma is vervat, werkt met tijdstappen van in beginsel één minuut. Voor betrouwbare uitspraken moet worden gerekend met een expositietijd van minstens een half uur tot maximaal 4 uur. Over het algemeen wordt met het model van Fanger gewerkt. Het verschaft in normale situaties waarbij men binnen het behaaglijkheidsgebied blijft (woningen, kantoren, scholen etc.) voldoende inzicht in de zaken waar het bij behaaglijkheid om gaat.

### 3 Behaaglijkheidsmodel van Fanger

Fanger gaat uit van een balans tussen de in het lichaam opgewekte energie en de afgevoerde energie. In formule ziet deze balans er als volgt uit (zie ook figuur 1):

$$M = P_{ma} + P_d + P_{zv} + P_{av} + P_{al} + P_c + P_s + P_g \quad (1)$$

Hierin is:

M	door stofwisseling in het lichaam ontwikkelde energie in W
$P_{ma}$	uitwendig verrichte mechanische arbeid in W
$P_d$	door dampdiffusie afgegeven energie (huid) in W
$P_{zv}$	warmteafvoer door zweetverdamping in W
$P_{av}$	met ademhaling afgevoerde voelbare warmte in W
$P_{al}$	met ademhaling afgevoerde latente warmte in W
$P_c$	convectief afgegeven warmte in W
$P_s$	door straling aan de omgeving afgegeven warmte in W
$P_g$	door geleiding afgegeven warmte (meestal te verwaarlozen) in W

Uit de bovenstaande vergelijking wordt de uitwendig verrichte arbeid weggewerkt en worden comforteisen betreffende huidtemperatuur en zweetproductie toegevoegd. Van de huidtemperatuur stelt Fanger dat deze rechtevenredig afneemt met toenemend metabolisme; van de zweetproductie stelt hij dat deze daarbij rechtevenredig toeneemt.

De mate waarin van de evenwichtssituatie wordt afgeweken (het verschil tussen interne warmteproductie en warmteverliezen van het lichaam), is een maat voor de thermische behaaglijkheid. In de formule voor de PMV (Predicted Mean Vote) is dit de uitdrukking tussen de vierkante haken. De daarvoor geplaatste uitdrukking is het uit experimenten bepaalde verband tussen de afwijking van de evenwichtssituatie en de met de ASHRAE opgestelde schaal (tabel 1) waarop de PMV is afgestemd.

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0,303 \cdot e^{-0,031 \cdot M^*} + 0,028) \cdot [RM^* - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot RM^* - p_i) - \\ & 0,42 \cdot (RM^* - 58,15) - 17 \cdot 10^{-6} \cdot M^* \cdot (5867 - p_i) - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot M^* \cdot (34 - T_i) - \\ & 39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{kl} \cdot ((T_{kl} + 273)^4 - (T_s + 273)^4) - f_{kl} \cdot \alpha_c \cdot (T_{kl} - T_i)] \end{aligned} \quad (2)$$

Hierin is:

$M^*$	metabolisme M per $m^2$ lichaamsoppervlak in $W/m^2$
$RM^*$	metabolisme per $m^2$ lichaamsoppervlak minus uitwendig verrichte arbeid in $W/m^2$
$p_i$	dampspanning van de binnenlucht in Pa
$T_i$	temperatuur van de binnenlucht in $^{\circ}C$
$T_{kl}$	oppervlaktetemperatuur van de kleding in $^{\circ}C$
$T_s$	gemiddelde stralingstemperatuur van de omwandingen in $^{\circ}C$
$\alpha_c$	warmte-overgangscoefficiënt voor convectie in $W/m^2K$
$f_{kl}$	verhouding tussen de oppervlakte van het geklede en het ongeklede lichaam (-)

In de internationale norm ISO 7730 Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specifications of the condition for thermal comfort" [2] is de behaaglijkheidsvergelijking vastgelegd zoals op de vorige bladzijde weergegeven. Aanbevolen wordt de formule alleen te gebruiken voor het gebied  $-2 < \text{PMV} < +2$ .

#### LITERATUURLIJST

1. "Thermal Comfort", P.O. Fanger, McGraw Hill, New York, 1972.
2. "Gematigde thermische binnenomstandigheden. Bepaling van de PMV- en de PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid" (ISO 7730:1994), Uitgegeven door het Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, (nieuwste versie) NEN-EN-ISO 7730, mei 1996.

## Variabelen in de behaaglijkheidsvergelijking

Kennisbank Bouwfysica  
Auteur: ir. A.C. van der Linden

### 1 De variabelen

In deze module worden de in te vullen parameters in de behaaglijkheidsvergelijking, voor zover nodig, afzonderlijk besproken.

#### 1.1 Metabolisme

Om het metabolisme onafhankelijk te maken van de bouw en het figuur van de individuele mensen wordt dit in de formule uitgedrukt per m<sup>2</sup> lichaamsoppervlakte.

Voor de lichaamsoppervlakte wordt volgens Dubois aangehouden:

$$A_{Du} = 0,203 \cdot G^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad (1)$$

Hierin is:

$A_{Du}$	lichaamsoppervlakte volgens Dubois in m <sup>2</sup>
G	lichaamsgewicht (massa) in kg
l	lichaamslengte in m

Als gemiddelde wordt veelal aangehouden:

vrouwen  $A_{Du} = \text{ca. } 1,65 \text{ m}^2$

mannen  $A_{Du} = \text{ca. } 1,80 \text{ m}^2$

voor  $M^*$  in de formule 2 van “Het thermisch binnenklimaat” geldt derhalve:

$$M^* = M / A_{Du}$$

Voor het uitdrukken van de hoeveelheid uitwendig verrichte arbeid is het mechanisch rendement  $\eta$  ingevoerd. Het metabolisme verminderd met de uitwendig verrichte arbeid, de inwendig ontwikkelde warmte (energie), volgt daarom uit:

$$RM^* = (1 - \eta) \cdot M^*$$

Met name bij een laag metabolisme is het mechanisch rendement praktisch verwaarloosbaar. Vooral voor praktijksituaties is het pas sinds kort mogelijk om het metabolisme en het mechanisch rendement nauwkeurig te bepalen; in laboratoria gebruikt men hiervoor een tredmolen of een trimfiets. Door Woerlee is een formule opgesteld waarmee men het rendement van de verrichte arbeid op een ergometerfiets globaal kan bepalen.

$$\eta = 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot (M^*)^3 - 3,1 \cdot 10^{-6} \cdot (M^*)^2 + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot M^* - 0,086 \quad (2)$$

Deze formule geldt voor  $58 < M^* < 350 \text{ W/m}^2$

Soms ziet men het metabolisme  $M^*$  uitgedrukt in "met" (1 met = 58 W/m<sup>2</sup>). In tabel 1 is een aantal waarden voor het metabolisme en het uitwendig mechanisch rendement gegeven.

activiteit	metabolisme (M) in W bij 1,8 m <sup>2</sup> lichaamsoppervlak	rendement ( $\eta$ )
liggen	85	0
zitten	105	0
staan	125	0
naaien, strijken, koken en afwassen	135 – 210	0
schoonmaken	210 – 355	0 – 0,1
lezen/schrijven	105 – 130	0
typen	120 – 150	0
lesgeven	165	0
machinebankwerk	290	0 – 0,1
zagen (hand)	420 – 500	0,1 – 0,2
badminton, tennis, tafeltennis	350 – 520	0 – 0,1
schermen	790	0
worstelen	910	0 – 0,1

tabel 1. enkele waarden voor metabolisme en rendement van de uitwendig verrichte arbeid

## 1.2 Kledingweerstand ( $I_{clo}$ ) en kledingfactor ( $f_{kl}$ )

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de effectieve en de intrinsieke kledingweerstand. De effectieve kledingweerstand  $I_{clo,e}$  is gedefinieerd als het verschil in de totale warmteweerstand tussen huid en omgeving bij de geklede en de ongeklede mens. Ook bij de ongeklede mens is er uiteraard sprake van een zekere warmteweerstand; deze wordt gevormd door de warmteovergangscoefficiënt voor convectie en voor straling. In de effectieve kledingweerstand is ook het effect van het door de kleding vergrootte oppervlak waar vanaf warmteoverdracht plaatsheeft, begrepen.

De intrinsieke kledingweerstand is de feitelijke weerstand van de kledinglaag, zij het gemiddeld over het totale lichaam, inclusief de onbedekte plekken.

De warmteovergangswaarde aan het buitenoppervlak is hierbij kleiner geworden (betrokken op het oppervlak van het naakte lichaam) omdat door de kleding het (warmte afgevend) buitenoppervlak is vergroot. Fanger en de meeste andere onderzoekers gebruiken deze intrinsieke warmteweerstand van de kleding.

De totale warmteweerstand tussen huidoppervlak en omgeving volgt daarbij uit:

$$I_{\text{totaal}} = I_{clo,i} + I_o / f_{kl} \quad (3)$$

Hierin is:

- $I_{\text{totaal}}$  totale warmteweerstand, tussen huid en omgeving, gemiddeld over het lichaam, betrokken op de oppervlakte van het ongeklede lichaam, uitgedrukt in clo
- $I_{clo,i}$  feitelijke warmteweerstand van de kledinglaag, gemiddeld over het lichaam, uitgedrukt in clo
- $I_o$  warmteovergangswaarde (convectie en straling) tussen het ongeklede lichaam en de omgevingslucht en omwandelingen, uitgedrukt in clo
- $f_{kl}$  de kleding factor; verhouding tussen de oppervlakte van het geklede en het ongeklede lichaam

De eenheid clo is als volgt gedefinieerd: 1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>K/W.

Deze eenheid is ontstaan doordat men een "business suit" als referentie heeft gekozen.

In tabel 2 zijn waarden gegeven voor de kledingweerstand en de kledingfactor in een aantal situaties.

type kleding	waarde in clo*	kledingfactor $f_{kl}$
ongekleed	0	1,0
bikini	0,05	1,0
korte broek	0,1	1,0
normale tropische kleding (korte broek, shirt met open kraag en korte mouwen, licht ondergoed)	0,3	1,05
lichte zomerkleding (dunne lange broek, shirt met korte mouwen)	0,5	1,1
licht (zomer)kostuum	0,8	1,1
normaal kostuum (overhemd met stropdas, enz.)	1,0	1,15
zwaar kostuum met vest, lang ondergoed	1,5	1,15 – 1,2
kleding voor poolstreken	3,0 – 4,0	1,3 – 1,5

\* Voor personen zittend op een gestoffeerde stoel moet een waarde van 0,2 clo worden bijgeteld om de warmteweerstand van de stoel in rekening te brengen

tabel 2. globale indicatie van de intrinsieke kledingweerstand voor verschillende soorten kleding ( $I_{clo,i}$ ), uitgedrukt in clo (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>K/W) en voor de kledingfactor  $f_{kl}$

Het blijkt dat in dezelfde omstandigheden er vaak een verschil is in kledingweerstand bij vrouwen en mannen. Waarden die worden aangetroffen in situaties als woning, school en kantoor zijn:

vrouwen:  
     zomer 0,3 clo  
     winter 0,8 clo

mannen:  
     zomer 0,5 clo  
     winter 0,9 clo

Voor het opstellen van uitgangspunten voor het te realiseren binnenklimaat kunnen de volgende waarden worden aangehouden, gemiddeld voor mannen en vrouwen.

zomer 0,4 - 1,0 clo (gemiddeld 0,7 clo)

winter 0,6 - 1,2 clo (gemiddeld 0,9 clo)

Bij hoge buitentemperaturen in de zomer ( $T > 25^{\circ}\text{C}$ ) kan in veel gevallen 0,5 clo worden aangehouden

De spreiding rond het gemiddelde moet men zien als de aanpassing in kleding die men individueel kan realiseren om op het aangeboden binnenklimaat te reageren.

### 1.3 Stralingstemperatuur $T_s$

Als stralingstemperatuur geldt de uniforme temperatuur van een (voor warmtestraling) zwarte omgeving waarbij een persoon evenveel warmtestraling verliest als in de werkelijke situatie. In de werkelijke situatie zal de temperatuur van alle vlakken niet gelijk zijn. Ook de emissiecoëfficiënten van de vlakken kunnen verschillend zijn. Voor de meeste oppervlakken is deze echter gelijk aan  $\varepsilon = \text{ca. } 0,9$ .

De stralingstemperatuur kan worden benaderd door de temperatuur van alle omringende wanden gewogen te middelen. Als weegfactoren worden daarbij zichtfactoren (geometrische factoren) gebruikt. Fanger geeft voor een aantal standaardsituaties voor zittende en staande mensen de zichtfactoren voor bepaalde wandvlakken ten opzichte van het oppervlak van het lichaam [1]. Deze zijn ook vastgelegd in NEN-ISO 7726 [2].

In een ruimte waarin de wandtemperaturen niet zoveel verschillen, of voor personen midden in een ruimte, kan men ook wel volstaan met het eenvoudig naar oppervlakte middelen van de wandtemperaturen. Hiermee worden uiteraard ook de temperaturen van vloer en plafond bedoeld. De fout die men dan maakt, zal hooguit enkele tienden van een graad bedragen. Als een persoon zich dicht bij een vlak met een duidelijk afwijkende temperatuur bevindt (koud glasvlak, warme radiator), wordt de fout vanzelfsprekend groter. Deze kan oplopen tot  $0,5$  à  $1,0$  °C bij afstanden kleiner dan circa  $1,5$  meter.

Overigens gaat dan ook de asymmetrie van de stralingsbelasting een rol spelen. Vooral bij verwarming met stralingspanelen aan het plafond en dergelijke moet men hiermee oppassen. Over het algemeen treden geen problemen op als tegenover elkaar liggende vlakken in een vertrek niet meer dan circa  $10$  °C verschillen in gemiddelde oppervlaktetemperatuur. Methoden voor het nauwkeuriger rekening houden met stralingsasymmetrie vindt men bij Fanger [1] en McIntyre [3].

### 1.4 Warmte-overgangscoefficiënt voor convectie

Fanger geeft voor de warmteovergangscoefficiënt voor convectie  $\alpha_c$  in  $\text{W/m}^2\text{K}$  in afhankelijkheid van de luchtsnelheid  $v$  het volgende uit oudere literatuur afkomstige verband:

$$\alpha_c = 12,1 \cdot v^{0,5} \quad (\text{voor } 0,1 < v < 2,6 \text{ m/s}) \quad (4a)$$

$$\alpha_c = 2,38 \cdot (T_{kl} - T_l) \quad (\text{luchtsnelheid } < 0,1 \text{ m/s, vrije convectie}) \quad (4b)$$

ISO 7730 geeft ook deze formules. Welke formule moet worden gebruikt, is daar niet afhankelijk gesteld van de luchtsnelheid; er moet worden gekozen voor de formule die de hoogste uitkomst geeft. In de literatuur vindt men ook andere waarden voor  $\alpha_c$ .

Uit metingen aan de warmteafgifte bij mensen en poppen is door Nishi en Gagge in 1970 het volgende verband met de luchtsnelheid afgeleid:

$$\alpha_c = 8,6 \cdot v^{0,531} \quad (\text{voor } 0,15 < v < 2 \text{ m/s}) \quad (4c)$$

Bij vrije convectie wordt met een vaste waarde  $\alpha_c = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  gewerkt ( $v < 0,15 \text{ m/s}$ ). Werkende met de behaaglijkeidvergelijking van Fanger moet men uiteraard zijn formules voor  $\alpha_c$  gebruiken, zoals die ook in ISO 7730 zijn vastgelegd.



## 1.5 Temperatuur kleding-oppervlak ( $T_{kl}$ )

De voorkomende temperatuur van het oppervlak van de kleding (het buitenoppervlak van het geklede lichaam)  $T_{kl}$  in de behaaglijkeheidsformule kan iteratief worden verkregen uit de volgende formule:

$$T_{kl} = 35,7 - 0,028 \cdot RM^* - 0,155 \cdot I_{clo,j} \cdot [39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{kl} \cdot ((T_{kl} + 273)^4 - (T_s + 273)^4) + f_{kl} - \alpha_c \cdot (T_{kl} - T_i)] \quad (5)$$

Met:

$I_{clo,i}$  intrinsieke kledingweerstand in clo.  
 $T_{kl}$  temperatuur van het buitenoppervlak van de kleding in °C

De andere parameters zijn hiervoor bij de behaaglijkeheidsvergelijking al benoemd.

## 1.6 Beperkingen bij berekeningen; plaatselijk discomfort

De behaaglijkeheidsvergelijking van Fanger is opgesteld voor stationaire situaties. Voor betrouwbare uitkomsten mogen daarom temperatuurvariaties niet te groot zijn. Als voorwaarde wordt gesteld:

$$(\Delta T)^2 / t < 1,28 \cdot 10^{-3}$$

Hierin is:

$\Delta T$  verandering van de temperatuur in °C  
 $t$  tijd waarin deze temperatuurverandering plaatsheeft in seconden

Een tweede beperking ligt in het feit dat gewerkt wordt met een gemiddelde stralingstemperatuur (op alle delen van het lichaam gelijk). Dat houdt in, dat het stralingsveld niet al te asymmetrisch mag zijn. Dicht bij een koud glasvlak bij voorbeeld kan - ondanks dat de (op de juiste manier, via zichtfactoren) berekende gemiddelde stralingstemperatuur hoog genoeg is - toch een onbehaaglijke situatie ontstaan.

Globaal kan worden aangehouden dat als het verschil tussen de gemiddelde stralingstemperatuur en de oppervlaktetemperatuur van het glas maar niet meer is dan circa 8 °C er geen probleem is. Bij grotere verschillen zal men enige afstand tot het glas moeten bewaren. Bij een verschil van 15 °C is dat 0,7 à 1,0 m en bij 20 °C 1,0 à 1,5 m.

Als de luchttemperatuur sterk varieert over de hoogte kan een vermindering van het comfort optreden. Over het algemeen kan worden gesteld dat de temperatuurgradiënt niet meer dan 1,5 °C/m mag bedragen. Ook kan plaatselijk discomfort ontstaan door te hoge luchtsnelheden (tocht).

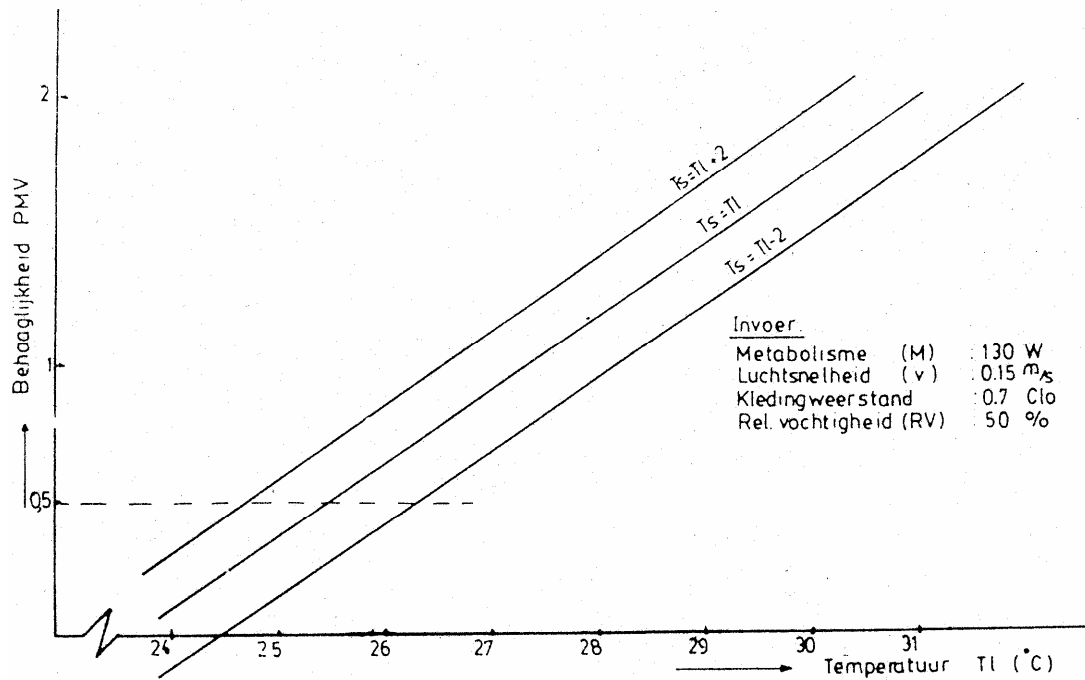
## 2 Gevoeligheid van de PMV voor de verschillende parameters

In de figuren 1 t/m 5 is de gevoeligheid van de PMV weergegeven voor de volgende parameters:

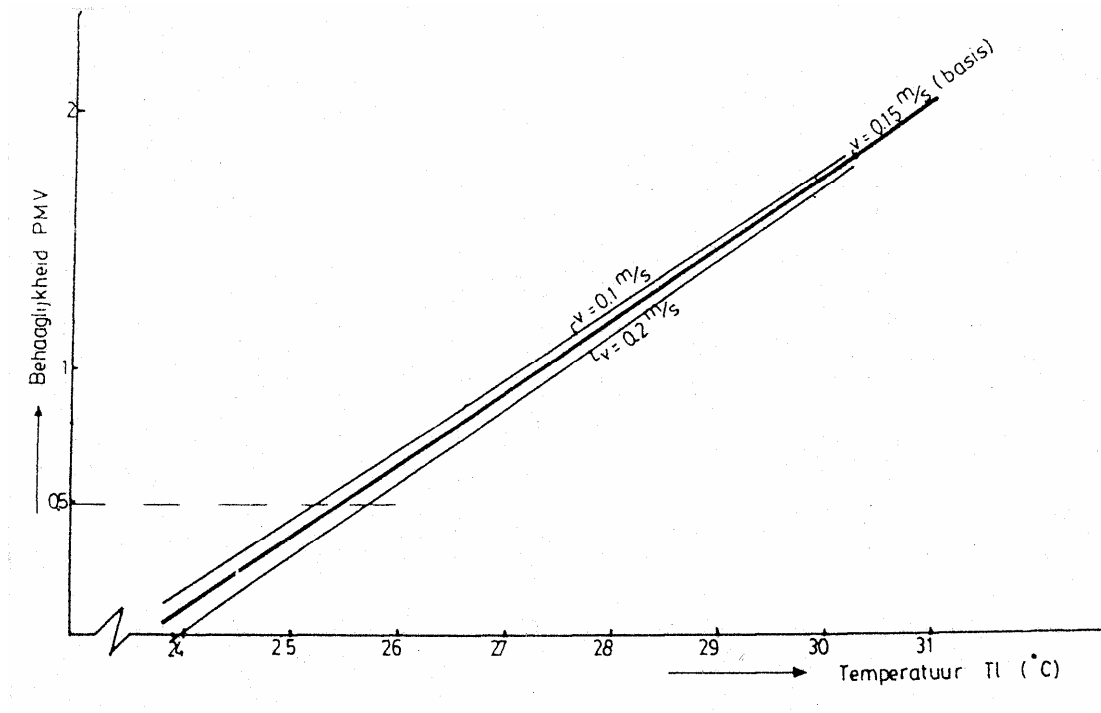
- lucht- en stralingstemperatuur;
- luchtsnelheid;
- relatieve vochtigheid;

- metabolisme;
- kledingweerstand.

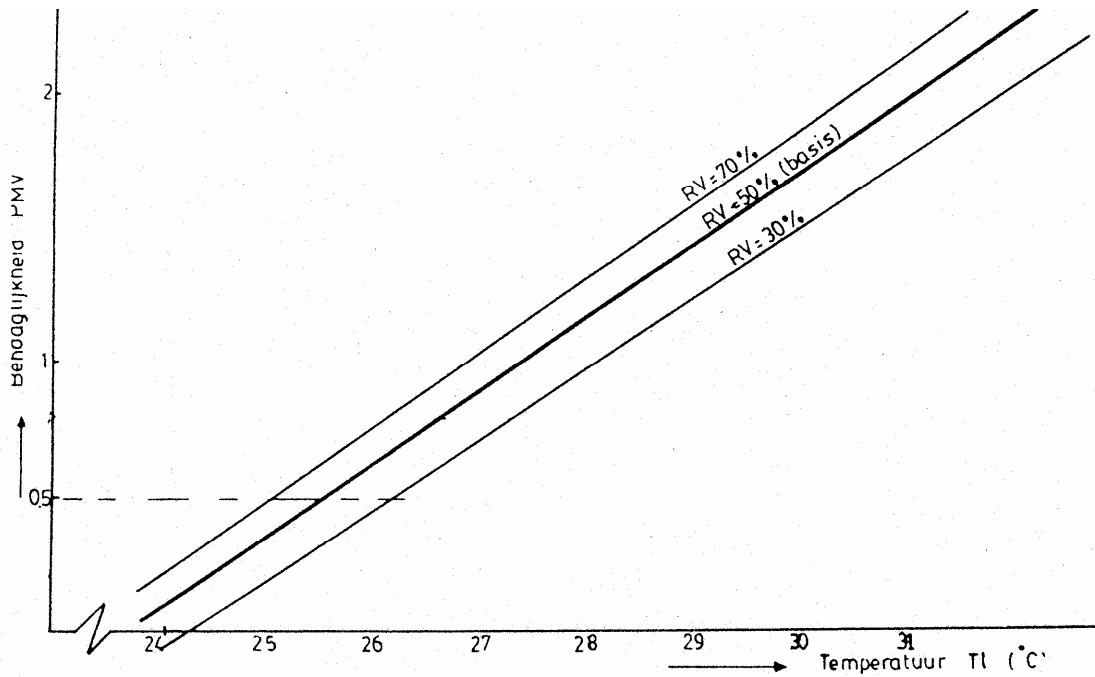
Bij figuur 1 staan de basisuitgangspunten voor de serie figuren gegeven. Uit de figuren blijkt duidelijk dat naast de lucht- en stralingstemperatuur vooral het metabolisme en de kledingweerstand het behaaglijkeidsgevoel beïnvloeden.



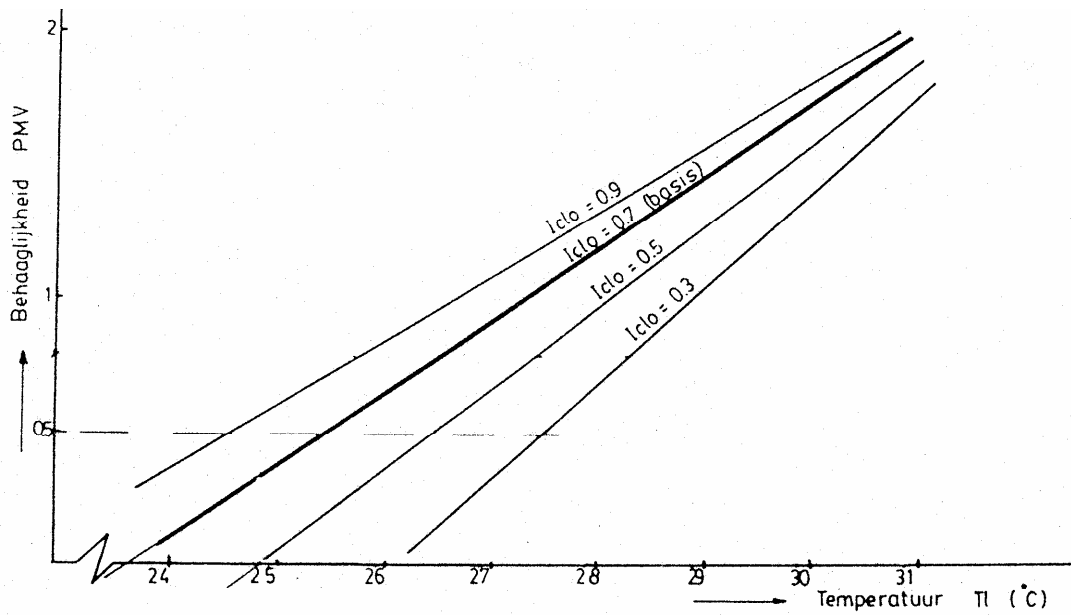
figuur 1. het effect van de luchttemperatuur ( $T_l$ ) en de stralingstemperatuur ( $T_s$ ) op de PMV



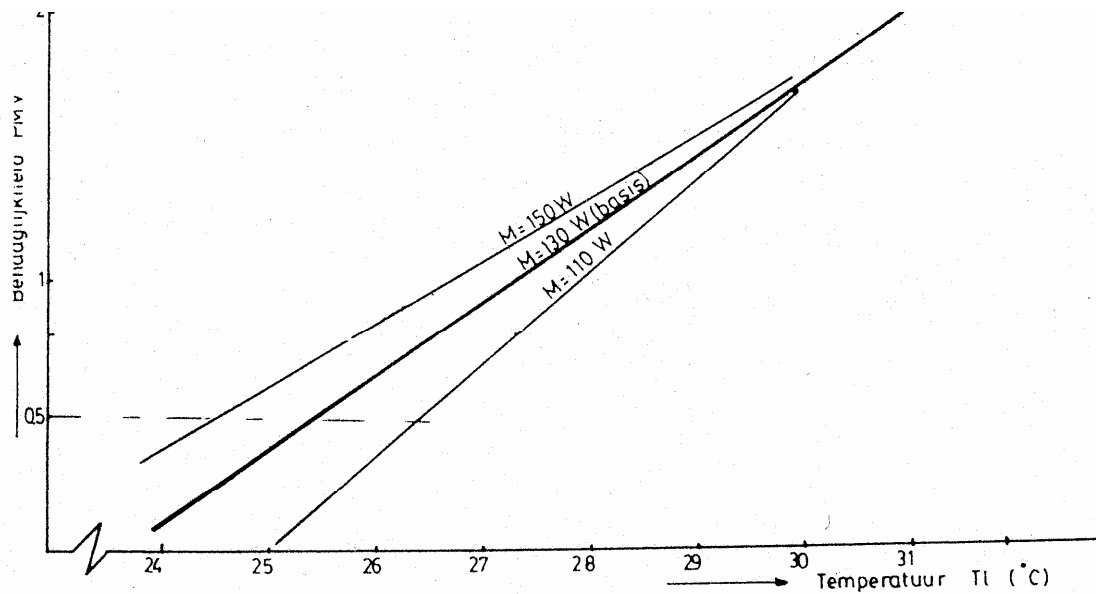
figuur 2. het effect van de luchtsnelheid (v) op de PMV



figuur 3. het effect van de relatieve vochtigheid op de PMV



figuur 4. het effect van de kledingweerstand ( $I_{clo}$ ) op de PMV



figuur 5. het effect van het metabolisme op de PMV

#### LITERATUURLIJST

1. "Thermal Comfort", P.O. Fanger, McGraw Hill, New York, 1972.
2. "Thermische binnencondities; Instrumenten en methodes voor het meten van fysische omgevingsgrootheden". NEN-ISO 7726.
3. "Indoor Climate", D. McIntyre, Applied Science Publishers - Ltd., 1980.

## Voor bepaalde PMV's benodigde temperaturen

Kenniskbank Bouwfysica

Auteur: ir. A.C. van der Linden

### 1 Benodigde temperaturen

Voor gebruik in praktijksituaties is een aantal klassen voor het metabolisme waarmee kan worden gerekend, vastgelegd (zie tabel 1).

klasse	activiteit	metabolisme in W*
I	rusten (liggend)	85
II	rustig zitten, lezen	105
III	algemeen kantoorwerk, brieven schrijven, tekenwerk	130
IV	typen, algemene laboratoriumwerkzaamheden, lesgeven	160
V	licht montagewerk, huishoudelijke werkzaamheden (strijken, afwassen)	200

tabel 1. indeling van activiteiten naar een vijftal klassen van metabolisme

Voor de verschillende klassen van metabolisme (activiteitsniveaus) kunnen gewenste c.q. toelaatbare resulterende temperaturen worden berekend. Deze zijn gegeven in tabel 2.

metabolisme in W	$I_{clo} = 0,5$ lichte zomerkleding		$I_{clo} = 0,7$ lichte werkkleding				$I_{clo} = 0,9$ normale winterkleding			
	PMV=0,5	PMV=0,8	PMV=-0,5	PMV=0	PMV=0,5	PMV=0,8	PMV=-0,8	PMV=-0,5	PMV=0	PMV=0,5
85	29	30	26	27	28	29	24	24	26	27
105	28	29	24	25	27	28	21	22	24	26
130	27	28	22	24	26	27	19	20	22	24
160	25	26	19	22	24	25	15	17	20	23
200	23	25	16	19	22	23	11	14	17	20

tabel 2. basistabel met resulterende temperaturen als functie van metabolisme, kleding en PMV (relatieve vochtigheid 50%; lichtsnelheid 0,15 m/s)

### 2 Voorspelling van het aantal (on)tevreden

Uit proeven met in totaal 1300 personen heeft Fanger afgeleid welk percentage van de mensen ontevreden is met het klimaat. Hij gebruikte hiervoor zeven punten uit de hiervoor (zie module I-1; het thermisch binnenklimaat; tabel 1) gegeven schaal voor het toekennen van een bepaalde waardering aan het binnenklimaat (0: comfortabel, -1 en +1 : comfortabel koel, respectievelijk warm, -2 en +2: koel, respectievelijk warm, -3 en +3: koud, respectievelijk heet).

Ontevreden definiëert hij als diegenen die -2 en -3, respectievelijk +2 en +3 stemmen. Bij een, volgens berekening thermisch neutrale toestand (PMV= 0), kruist slechts 55% van de mensen op de zevenpuntsschaal een 0 aan, 40% stemt -1 of +1 en 5% -2, -3, +2 of +3. Volgens de definitie voor (on)tevreden is dus 95% van de mensen niet ontevreden, maar slechts 55% stemt echt op comfortabel/neutraal (0). Zo kan men ook de verdeling van de stemmen geven voor de situaties met PMV = -1, -2, +1 en +2 (zie tabel 3).

situatie berekend	percentage van de mensen dat stemt met				PPD (%)
	0 (%)	-1 of +1 (%)	-2 of +2 (%)	-3 of +3 (%)	
PMV = +2	5	20	45	30	75
PMV = +1	27	48	20	5	25
PMV = 0	55	40	5	0	5
PMV = -1	27	48	20	5	25
PMV = -2	5	20	45	30	75

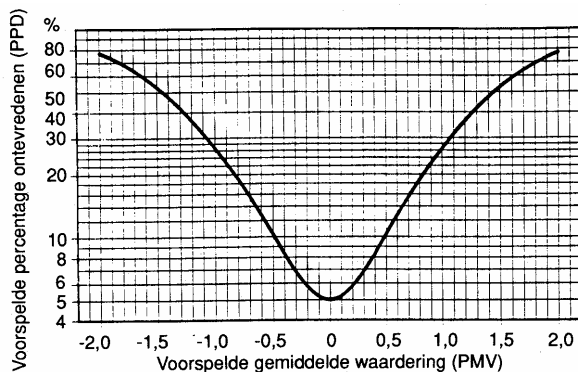
tabel 3. verdeling van de stemmen op de 7-puntsschaal bij verschillende PMV's

Het percentage van de mensen dat -2, -3, +2 of +3 stemt noemt Fanger de "ontevredenen". Hij heeft op basis van het bovengenoemde onderzoek een verband opgesteld tussen de PMV en het voorspelbare percentage ontevredenen (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD). Deze formule geldt alleen binnen het behaaglijkheidsgebied.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-0,2179 \cdot (PMV)^2 - 0,03353 \cdot (PMV)^4] \quad (1)$$

Met:

PPD Predicted Percentage of Dissatisfied in %



figuur 1. relatie tussen de PMV en de PPD

### 3 Thermisch binnenklimaat als bouwprestatie

Een van de belangrijke eigenschappen van een gebouw is het thermisch binnenklimaat. Het binnenklimaat moet de activiteiten van de te huisvesten functie zo goed mogelijk ondersteunen.

Voor 1970 werd vrijwel uitsluitend gewerkt met lijstjes van aanbevolen binnentemperaturen. Eind jaren '60, begin jaren '70 ontstonden de eerste praktisch bruikbare toepassingen van (hybride) computermodellen waarmee ruimten in een gebouw als geheel konden worden gemodelleerd en waarmee het temperatuurverloop in een gebouw kon worden voorspeld. Daarmee ontstond ook de behoefte aan meer genuanceerde ontwerprichtlijnen en beoordelingscriteria. Tot die tijd werden installaties in gebouwen - zowel voor de winter als voor de zomer - ontworpen op basis van een gewenste binnentemperatuur op grond van een gegeven ("ontwerp")buitentemperatuur. Met name voor het beoordelen van een ontwerp voor de zomersituatie boden de nieuwe hulpmiddelen grote mogelijkheden.

In eerste instantie werd gewerkt met criteria zoals: "de binnentemperatuur in de zomer mag bij een dynamische berekening niet meer dan 3 °C boven de op een bepaald moment heersende buitentemperatuur komen".

Met de publicatie van "Thermal Comfort" [1] kwam een manier beschikbaar om een criterium te formuleren waarin de mate van "tevredenheid" van gebruikers als maatstaf kon worden genomen bij het beoordelen van het thermisch binnenklimaat.

Algemeen aanvaard werd het later ook in ISO 7730 [2] vastgelegde uitgangspunt dat bij een "goed" thermisch binnenklimaat de algemene thermische behaaglijkheid zich bevindt tussen de grenzen  $-0,5 < PMV < 0,5$ . Bij  $PMV = -0,5$  of  $0,5$  geldt  $PPD = 10\%$ .

Doordat mensen zich echter verschillend kleden en doordat men een jasje (of trui) kan aantrekken of uittrekken, kan men zelf wat bijsturen. Vandaar dat er nog niets aan de hand is als de PMV naar  $-0,5$  of  $+0,5$  gaat, zeker als men de gebruikers ook nog mogelijkheden geeft voor individuele beïnvloeding van het binnenklimaat.

### 3.1 TO-uren

Gezien deze mogelijkheid tot "bijsturen" en gezien het feit dat het vaak onevenredig kostbare voorzieningen met zich meebrengt om in alle situaties aan het gewenste binnenklimaat te voldoen, is door de toenmalige Rijks Geneeskundige Dienst in samenwerking met de Rijksgebouwendienst bepaald (als uitgangspunt voor de rijkshuisvesting) dat de genoemde grenzen van een "goed" binnenklimaat maximaal gedurende 10% van de arbeidstijd mogen worden overschreden. Als ontwerputgangspunt blijft  $PMV = 0$  gelden.

Nadrukkelijk wordt nog gesteld dat deze richtlijn uitsluitend de algemene thermische behaaglijkheid betreft. In de praktijk kan ook sprake zijn van plaatselijke onbehaaglijkheid door (koude)straling, te grote temperatuurgradiënten, lage oppervlaktetemperaturen van de vloer en tocht. Ook daarvoor zijn richtwaarden voor het ontwerp gegeven.

Wanneer het binnenklimaat binnen de voor deze plaatselijke onbehaaglijkheid gestelde grenzen blijft, mag worden aangenomen dat de algemene thermische behaaglijkheid een goed ontwerputgangspunt vormt.

Voor de zomersituatie zijn deze algemene uitgangspunten door de Rijksgebouwendienst ten behoeve van ontwerpactiviteiten voor een kantoor situatie "vertaald" naar de volgende toegelaten temperatuuroverschrijdingen, waarbij het buitenklimaat van het jaar 1964 als referentie geldt [3]:

- 25 °C mag maximaal 100 uur per jaar worden overschreden;
- 28 °C mag maximaal 10-20 uur per jaar worden overschreden.

De genoemde 100 uur is 10% van de arbeidstijd gedurende de zomermaanden.

De genoemde 25 °C is de op een heel getal afgeronde waarde van de temperatuur die bij gemiddelde kantooromstandigheden hoort bij  $PMV = 0$ . Volgens de aangehouden uitgangspunten is deze waarde in feite 25,5 °C. De grens van 28 °C komt ongeveer overeen met  $PMV = 1$ .

### 3.2 Weeguren

In de tweede helft van de jaren '80 ontstond bij de Rijksgebouwendienst het inzicht dat als voor alle typen gebouw gebruik wordt gemaakt van dezelfde TO-criteria, het feitelijk aangeboden klimaat in, wat thermische massa betreft, "lichte" gebouwen, aanmerkelijk slechter zou zijn dan in "zware" gebouwen. Dit valt eenvoudig in te zien. Bij een geringe thermische massa is de gemiddelde temperatuur in een vertrek gedurende de "overschrijdingsuren" beslist hoger dan in een zwaar gebouw. Zonder verdere bewijsvoering kan worden aangenomen dat in die situatie ook de thermische belasting van de mensen in het

vertrek dan hoger is. Om het verschil in beoordeling van "lichte" en "zware" gebouwen te verminderen, is door de Rijksgebouwendienst een criterium, gebaseerd op "gewogen overschrijdingsuren" ontwikkeld [4, 5, 6].

Voor het in rekening brengen van de mate van overschrijding is het "Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)" van Fanger als maatstaf genomen.

Voor de periode gedurende welke de overschrijdingen van  $PMV = +0,5$  ( $PPD = 10\%$ ) plaatsheeft, wordt een weging recht evenredig met de toename van de PPD toegepast, ofwel een uur met 20% ontevreden wordt twee keer zo zwaar meegeteld als een uur met 10% ontevreden. De wijze waarop de acceptatie van het binnenklimaat door de gebruikers van het gebouw samenhangt met het product " $PPD \cdot \text{tijd}$ ", is niet nader onderzocht. Echter, er mag verwacht worden, dat de aldus gewogen uren beter aansluiten bij de mate van acceptatie van het binnenklimaat door gebouwgebruikers dan ongewogen uren. Daarnaast is de wijze waarop de richtwaarde voor het aantal toe te laten gewogen overschrijdingsuren is bepaald zodanig, dat de gewenste differentiatie in de eis voor verschillende bouwtypen bereikt wordt binnen het eerder aangenomen algemene uitgangspunt.

De weegfactor heeft bij  $PMV = 0,5$  ( $PPD = 10$ ) de waarde 1. Dat betekent dat bij  $PMV = 1,0$  ( $PPD = 26$ ) de weegfactor de waarde 2,6 krijgt, enz. (zie tabel 4).

<b>PMV</b>	<b>PPD</b>	<b>weegfactor</b>
0,5	10	1,0
0,7	15	1,5
1,0	26	2,6
1,5	51	5,1
2,0	77	7,7

tabel 4. factor voor het wegen van overschrijdingsuren

Uiteraard kan hetzelfde worden gedaan voor onderschrijdingen van  $PMV = -0,5$  (winter).

Ook voor waarden boven  $PMV = 2,0$  wordt de weegfactor op dezelfde manier berekend. Hoewel het model van Fanger slechts geldt voor het gebied  $-2,0 < PMV < 2,0$  wordt dit niet als bezwaar gezien. Uren waarin het binnenklimaat boven de  $PMV = 2,0$  komt, dienen eigenlijk niet voor te komen. In een gebouw dat aan de eisen voldoet zullen deze uren ook niet of nauwelijks voorkomen en waar dat wel het geval is, worden ze in ieder geval zeer streng meegerekend.

Op basis van een aantal computersimulaties is vastgesteld dat voor een "gemiddeld" gebouw de gemiddelde  $PMV$  bij een 100-urige overschrijding van de grenswaarde ( $PMV = 0,5$ ), circa  $PMV = 0,7$  bedraagt.

Bij deze waarde hoort een  $PPD = 15$  en een weegfactor met de waarde 1,5.

De richtwaarde voor het aantal gewogen overschrijdingsuren (nu GTO genoemd) dat een "goed" binnenklimaat representeert, is daarom op 150 gesteld. Om te controleren of dit een goed uitgangspunt is, is een groot aantal computersimulaties uitgevoerd voor verschillende typen gebouw en installatie [6]. In het betreffende onderzoek van de Rgd is aangetoond dat er een goede aansluiting is tussen het oude Rgd-TO-criterium en het nieuwe GTO-criterium.

Tabel 5 uit het onderliggende rapport vat de resultaten van de vergelijking samen.



gebouwmassa*)	Geen mechanische koeling	Mechanische koeling
extreem licht	70 à 85	max. 95
middellicht	80 à 95	max. 115
zwaar	90 à 110	max. 115

extreem licht: houten vloeren/plafonds, lichte wanden (swm < 5 kg/m<sup>2</sup>)

middellicht : betonvloeren/verlaagd plafond, lichte wanden (swm ca. 50 kg/m<sup>2</sup>)

zwaar: zware betonvloeren/verl. plafond. zware wanden (swm ca. 100 kg/m<sup>2</sup>)

swm: specifieke werkzame massa: massa van een bepaalde "meewerkende diepte" van de vertrekomwandingen, gedeeld door de oppervlakte van deze omwandingen.

tabel 5. waarden voor het jaarlijks aantal uren dat de "vaste temperatuur" van 25°C wordt overschreden bij een aantal GTO-uren van 150 (gewogen overschrijdingsuren van PMV = 0,5)

In de tabel is voor een aantal verschillende situaties aangegeven hoeveel uur, gedurende de zomerperiode, de vaste luchttemperatuur van 25°C wordt overschreden, als het aantal gewogen overschrijdingsuren GTO = 150 bedraagt.

Uit de tabel blijkt een aantal zaken:

- voor lichtere gebouwen is de GTO-eis beduidend strenger;
- voor zware gebouwen zonder koeling, de oorspronkelijke referentie, komen oude en
- nieuwe eisen goed overeen (100 uur versus 90-110 uur);
- voor zwaardere gebouwen met koeling is de GTO-eis (terecht) minder streng.

Het laatste vindt zijn oorzaak in het feit dat door de koeling, de mate van overschrijden sterk wordt beperkt, zodat er meer uren toelaatbaar zijn.

Zowel de gewogen als ongewogen overschrijdingsuren zijn gebaseerd op hetzelfde uitgangspunt voor een "goed" binnenklimaat: 90% van de tijd  $-0,5 < PMV < 0,5$ .

De aansluiting tussen de "oude" en de "nieuwe" Rgd-criteria is goed.

Uitgaan van de GTO-richtwaarde geeft de gewenste nuancering voor het verschil in de mate van overschrijden van de grenzen bij verschillende gebouw-/installatietypen.

De discussie die over de GTO-methode (nog steeds) bestaat, geeft echter aan dat de communiceerbaarheid niet optimaal is.

Niettemin wordt het GTO-criterium in de praktijk, naast andere criteria, door adviseurs en ontwerpers algemeen gebruikt. De weeguren vormen ook de beoordelingsmaatstaf voor het binnenklimaat in de voor de vroege ontwerpfase bedoelde publicatie 300 van ISSO en SBR "Energie-efficiënte kantoorgebouwen; binnenklimaat en energiegebruik" [7].

### 3.3 Weeguren en adaptatiegedrag van de mens aan binnenklimaatomstandigheden

Met de weegurenmethode is ook de mogelijkheid beschikbaar gekomen om de aanpassingen die gebouwgebruikers in kleding en luchtsnelheid (ramen openen) zullen doen als reactie op hogere binnentemperaturen, in de beschouwing te betrekken.

In de studie van de Rijksgebouwendienst is aangenomen dat boven bepaalde binnentemperatuurgrenzen de kledingweerstand teruggaat van 0,7 naar 0,5 clo. Ook wordt bij hogere binnentemperaturen voor gebouwen met te openen ramen een hogere luchtsnelheid ingevoerd. Een en ander betekent, ter vergelijking, dat de temperatuurgrens waarboven de uren geteld worden bij gemiddelde kantooromstandigheden verschuift van 25,5 °C naar ruim 27 °C. Verschillen die voortkomen uit gebouw- en installatietype worden bij het invoeren van de gegevens voor het uitvoeren van de simulatieberekeningen uiteraard automatisch meegenomen.

Op deze wijze is het mogelijk voor alle gebouwen een uniforme richtwaarde van 150 weeguren aan te houden.

Omdat mensen in geheel gesloten gebouwen en centrale temperatuurregeling kritischer zijn op het thermisch binnenklimaat (o.a. doordat ze het zelf niet kunnen beïnvloeden), is het wel verstandig om bij geheel gesloten gebouwen strenger te zijn bij het toetsen aan de richtwaarde en eerder te streven naar 100-150 weeguren. Bij gebouwen met te openen ramen en mogelijkheden voor het individueel beïnvloeden van de temperatuur - afhankelijk van de overige kwaliteiten van de huisvesting – zijn soms ook waarden hoger dan 150 toelaatbaar.

## LITERATUUR

1. "Thermal Comfort", P.O. Fanger, McGraw Hill, New York, 1972.
2. "Gematigde thermische binnenomstandigheden. Bepaling van de PMV- en de PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid" (ISO 7730:1994), Uitgegeven door het Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, (nieuwste versie) NEN-EN-ISO 7730, mei 1996.
3. "Binnenklimaatcondities in kantoorruimten van nieuwe gebouwen", Rijksgebouwendienst, Hoofdafdeling Bouw, Afdeling Warmte- en Luchttechniek, 's Gravenhage, januari 1979.
4. "Beoordeling van het thermisch binnenklimaat", G.F.M. Brouwers en A.C. van der Linden, Klimaatbeheersing v18 n7 pp 257-264, 1989.
5. "Bouwfysische kwaliteit Rijkshuisvesting"; wettelijke eisen en Rgd-richtlijnen, Rijksgebouwendienst, 's Gravenhage, september 1999 (te downloaden via <http://www.Rijksgebouwendienst.nl/bouwfys/Bouwfysica.htm>).
6. "Ontwerp binnencondities en thermische behaaglijkheid in gebouwen", Stichting ISSO, researchrapport 5, Rotterdam, 1990.
7. "Energie-efficiënte kantoorgebouwen, binnenklimaat en energiegebruik", Stichting ISSO / Stichting Bouwresearch, publicatie 300, Rotterdam, 1994.

## Verdere uitbouw van statische comfortmodellen

Kenniskbank Bouwfysica

Auteur: ir. A.C. van der Linden

### 1 Internationale ontwikkelingen; adaptieve modellen

De binnenklimaatcriteria zijn gebaseerd op statische behaaglijkheidsmodellen. Daarbij kunnen de volgende kanttekeningen worden gemaakt [1]:

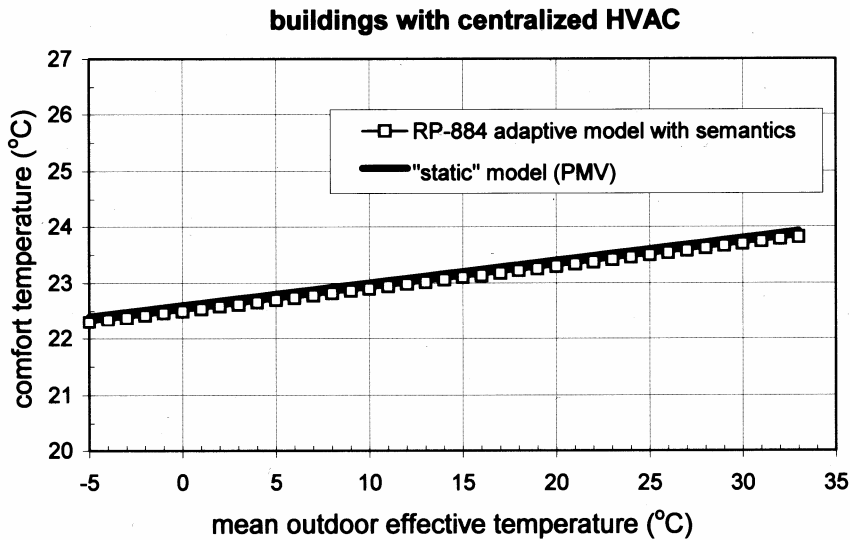
1. De kledingweerstand moet worden opgegeven. Afgezien van de onzekerheid die in de waarde bestaat, zelfs gegeven het kleding-ensemble, is dit een van de variabelen die een persoon over het algemeen juist zal gebruiken om zijn tevredenheid met het klimaat te optimaliseren in plaats van dat dit een vastgestelde bepalende factor is.
2. Het metabolisme dat hoort bij een bepaalde activiteit kan een grote spreiding vertonen; systematische onderzoeksresultaten op dit gebied zijn schaars.
3. De modellen zijn gekalibreerd aan de hand van steady-state situaties. Het effect van dynamisch gedrag van de thermische condities valt dus buiten de scope van deze modellen.
4. Het statische model gaat uit van het idee, dat alleen thermo-fysiologische aspecten de thermische sensatie bepalen. Inmiddels bestaat er echter een aanzienlijke hoeveelheid onderzoeksgegevens die aantoont, dat ook niet-thermische factoren een belangrijke rol spelen. Vooral de mate waarin een persoon zelf invloed kan uitoefenen op de omgeving, maar ook het verwachtingspatroon ten aanzien van het thermische binnenklimaat zijn belangrijke factoren.

De eerste twee punten kunnen in principe worden opgevangen door bij gebruik van de statische modellen de invoergrootheden kledingweerstand en metabolisme te variëren. Bij de Rgd-weegurenaanpak wordt dit al gedaan. Wel is het nodig opnieuw te bepalen van welk metabolisme en kledingweerstand moet worden uitgegaan in verschillende werksituaties en bij verschillende binnen- en buitentemperaturen.

Het derde punt is naar verwachting maar van beperkt belang, omdat de beschouwde situatie (kantoorarbeid) min of meer stationair is.

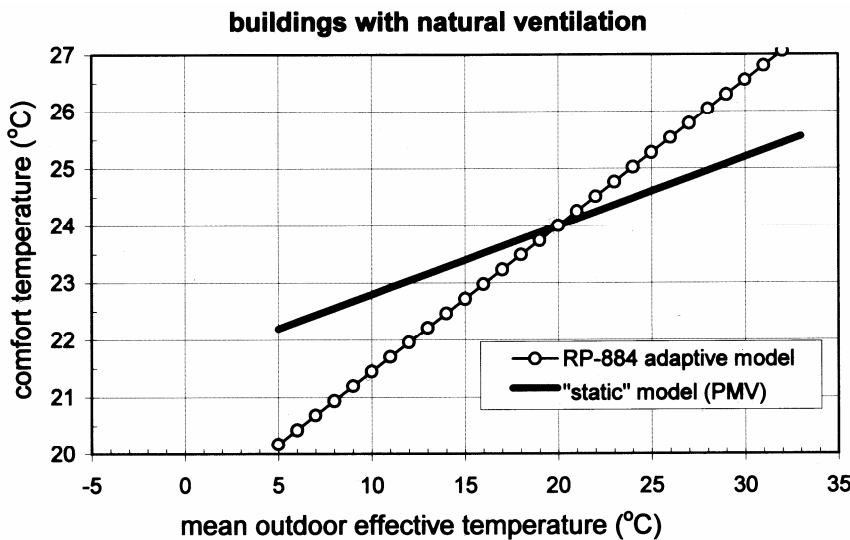
Het vierde punt is het belangrijkste. Recente onderzoeken dragen nieuwe inzichten aan over de waardering van gebouwgebruikers voor het aangeboden binnenklimaat.

Voor gebouwen met centraal geregelde binnentemperatuur en zonder te openen ramen worden - wanneer rekening wordt gehouden met aanpassing van de kledingweerstand bij verschillende buitentemperaturen - met het statische model van Fanger overigens dezelfde "comforttemperaturen" gevonden als met het adaptief model van Brager en De Dear (zie figuur 1). Dit model is opgesteld op basis van verzamelde gegevens van veldonderzoek [2].



figuur 1. comforttemperatuur in relatie tot gemiddelde buitentemperatuur bij gesloten gebouwen met een centraal geregelde klimaatinstallatie

Voor gebouwen met te openen ramen en met mogelijkheden voor persoonlijke beïnvloeding van het binnenklimaat constateren Brager en De Dear dat de gebouwgebruikers een van de “neutrale thermische situatie” - zoals berekend met het PMV-model - afwijkende “comforttemperatuur” aangeven [3]. Bij lage buitentemperaturen ligt de comforttemperatuur lager dan met het PMV-model wordt berekend en bij hogere buitentemperaturen hoger (figuur 2).



figuur 2. comforttemperatuur in relatie tot gemiddelde buitentemperatuur bij natuurlijk geventileerde gebouwen met mogelijkheden voor individuele beïnvloeding van het binnenklimaat

In de praktijk blijkt, dat de comforttemperatuur voor natuurlijk geventileerde gebouwen veel sterker meebeweegt met de buitentemperatuur dan verklaard kan worden met het statische PMV-model. Daarin rekening houden met aanpassing van kledingweerstand en vergroten van de luchtsnelheid in het vertrek bij hogere temperaturen, verklaart slechts de helft van het

waargenomen verschil. De Dear en Brager maken in hun artikel aannemelijk, dat de andere helft met name te maken heeft met de psychologische aanpassing aan een binnenklimaat dat het buitenklimaat veel sterker volgt dan in een geklimatiseerd gebouw. Dit leidt tot de conclusie dat de recente thermische geschiedenis die een persoon heeft ondergaan een belangrijke rol speelt, samen met de verwachting die een gebruiker heeft ten aanzien van zijn/haar gebouwde omgeving.

*De "mean outdoor temperature" zoals gebruikt door Brager en De Dear is overigens een gemiddelde over een langere periode (week, maand). Dat betekent dat voor de Nederlandse zomersituatie, waarin de gemiddelde dagtemperatuur over een periode van een aantal dagen nooit de 23-25 °C overschrijdt, er ook nooit met een grotere afwijking ten opzichte van waarden gevonden met het PMV-model dan 1 °C hoeft te worden gerekend.*

## 2 **Gewenste ontwikkelingen (lopend onderzoeksproject voor de Nederlandse situatie)**

Zoals onder andere uit bovenstaande figuren blijkt, is het zaak om de functionele eisen voor behaaglijkheid (temperaturen) in gebouwen opnieuw te bezien. Het is duidelijk dat daarbij verschil moet worden gemaakt tussen gebouwen met centrale luchtbehandeling en gesloten gevels, en natuurlijk geventileerde gebouwen met relatief veel beïnvloedingsmogelijkheden van het binnenklimaat door de gebruiker [3].

Daarnaast is het van belang prestatie-indicatoren te ontwikkelen die kunnen dienen voor de communicatie tussen verschillende actoren (opdrachtgever, ontwerper, adviseur).

Daarvoor moet zo'n indicator aansluiten bij bekende begrippen, zoals de temperatuur. Ook kan worden gewerkt met referentie-(typen van) gebouwen.

Daarnaast moet een prestatie-eis in termen van een dergelijke indicator ook kwantitatief houvast bieden om technische/fysieke oplossingen te ontwikkelen en te toetsen.

Voor de ontwikkeling van een en ander is op 1 september 2000 een project gestart voor de verwerking van de nieuwste inzichten in prestatie-eisen voor de Nederlandse situatie [5]. Dit project wordt in samenwerking met ISSO (Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van Gebouwinstallaties) uitgevoerd door TUD-CiTG/GBT in samenwerking met Boerstra Binnenmilieuadvies. Het project wordt financieel ondersteund door NOVEM en Rijksgebouwendienst.

### 2.1 **Nieuwe criteria**

Bij het opstellen van nieuwe criteria zal een zo goed mogelijke aansluiting bij de huidige praktijk worden gezocht. In principe kunnen adviseurs met criteria in de vorm van de huidige goed uit de voeten.

De nieuwe kennis van door gebruikers gewenste comforttemperaturen (Brager en De Dear) zal in de criteria worden opgenomen. Dit betreft met name het in veldonderzoek aangetoonde verband tussen comforttemperatuur en buitentemperatuur.

Voor een deel biedt de huidige "weegurenmethode" hiervoor al voldoende mogelijkheden. Dit betreft de adaptatiemogelijkheden die mensen gebruiken om zich aan te passen aan hogere temperaturen door lichtere kleding te dragen en (in gebouwen met te openen ramen) de luchtsnelheid in het vertrek te vergroten. Deze aanpassing wordt ook al van oudsher in de simulatieberekeningen als invoervariabele meegenomen. Wel moet nader worden vastgelegd wat de juiste uitgangspunten zijn voor deze berekeningen.

De door Brager en De Dear vastgestelde afwijking van de door gebouwgebruikers aangegeven "comforttemperatuur" en de berekende "neutrale temperatuur" (PMV = 0) als gevolg van psychologische adaptatie, moet apart worden behandeld. Een mogelijkheid lijkt om de grens waarboven de overschrijdingsuren worden geteld te verschuiven in afhankelijkheid van de gemiddelde buitentemperatuur van de voorafgaande periode.

Wat betreft de criteria zal ook afstemming worden gezocht met de in ontwikkeling zijnde nieuwe versie van ASHRAE 55: "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy". Door het uitvoeren van een aantal simulatieberekeningen kan de aansluiting van een nieuw geformuleerd criterium bij de huidige aanpak worden geëvalueerd. Een echte validatie kan echter alleen worden verkregen door veldonderzoek. Onderdeel van het project vormt dan ook het opstellen van een plan voor een langer lopend veldonderzoek.

## 2.2 Communiceerbaarheid

In veel gevallen is het op dit moment zo, dat een adviseur de (in abstracte termen) geformuleerde functionele eisen van de opdrachtgever/klant vertaalt in kwantitatieve prestatie-eisen en vervolgens een of meer oplossingen voorstelt, die aan deze kwantitatieve eisen voldoen. De klant kan vervolgens mede op basis van andere randvoorwaarden en prestaties een keuze maken. Hoewel formeel wel rekenschap wordt afgelegd aan de klant in termen van kwantitatieve prestaties speelt de communicatie zich eigenlijk af op het vlak van de (niet gekwantificeerde) functionele eisen. Voor de vertaling naar technische oplossingen moet de klant geheel vertrouwen op de adviseur.

Daarbij zal voorlopig nog worden teruggerepen op de bij de Rijksgebouwendienst ontwikkelde criteria, met daarbij in het achterhoofd dat voor gebouwen met gesloten gevels deze uitgangspunten nog zo gek niet zijn en dat ze voor natuurlijk geventileerde gebouwen wat aan de strenge kant zijn.

Om een betere communicatie over het thermisch binnenklimaat mogelijk te maken, moet echter worden gezocht naar een "vertaling" van de weeguren, of een andere indicator als die in de loop van het project bepaald mocht zijn, naar een indicator die meer intuïtief kan worden begrepen. Richtingen waarin de gedachten gaan, betreffen het werken met referenties (voorbeelden van binnenklimaten), en/of beter aansluitende kwantitatieve begrippen, ook kan worden gedacht aan een soort "rapportcijfers".

## 2.3 Ontwerp- en beoordelingshulpmiddelen voor de vroege ontwerpfase

Voor de vroege ontwerpfase kan worden gedacht aan instrumenten vergelijkbaar met de bestaande ISSO/SBR publicatie 300: "Energie efficiënte kantoorgebouwen; binnenklimaat en energiegebruik" [4]. De gegevens zullen moeten worden aangepast aan de nieuwe binnenklimaatindicator, waarbij uiteraard onderscheid wordt gemaakt tussen gebouwen met en zonder invloed van de gebruikers op het binnenklimaat. Daarnaast is ook een actualisering nodig ten aanzien van gebruikte isolatiewaarden en nieuwe klimaatsystemen (onder andere klimaatplafonds). Verder ligt het voor de hand dit soort gegevens niet meer (alleen) in een boek maar (ook) op CD of op het internet aan te bieden. Ook kan worden gedacht aan een (al dan niet eenvoudig) computerprogramma in plaats van tabellen en/of figuren met gegevens. Bij het project hoort wel het verkennen van de mogelijkheden en het opstellen van een projectplan, maar niet de realisatie van de instrumenten. Met name bij instrumenten voor deze fase moet aandacht worden besteed aan de communiceerbaarheid van de resultaten.

## 2.4 Ontwerp- en beoordelingshulpmiddelen voor definitief ontwerp / bestek

Voor de fase van definitief ontwerp en bestek kan gebruik worden gemaakt van de bestaande voor bepaling met behulp van de nieuwe indicator geschikt gemaakte simulatieprogramma's (onder andere VABI VA114, Suncode, enzovoort).

Tot het project behoort ook het aangeven van welke berekeningen met de programma's moeten kunnen worden gemaakt en de wijze waarop de uitkomsten moeten worden gepresenteerd (communiceerbaarheid). Daarnaast zullen getalswaarden voor de invoervariabelen worden aangegeven waarvan bij de berekeningen gebruik moet worden gemaakt om aan te sluiten bij de nieuwe indicator en criteria.

## 2.5 Beoordelingshulpmiddelen bestaande gebouwen

Een goed bruikbare methode is metingen doen in een gebouw en daarnaast een computersimulatie uitvoeren. Als het computermodel wordt gevoed met de meetgegevens van buitenklimaat (eventueel van het KNMI) en gegevens over het feitelijke gedrag van de gebruikers in het gebouw, kan het model worden "gefit" en kunnen met dit model via berekeningen met een "standaardjaar" uitspraken worden gedaan over de mate waarin het gebouw aan de op binnenklimaatgegevens van een heel jaar gebaseerde criteria voldoet. Hiervoor zal een protocol worden beschreven.

Omdat de hierboven beschreven werkwijze zeer arbeidsintensief is, daardoor kostbaar en in de praktijk vaak niet haalbaar, zal daarnaast een andere, meer globale methode worden ontwikkeld. Gedacht wordt aan een instrument waarmee gebouwen rechtstreeks kunnen worden beoordeeld op basis van binnen- én buitentemperatuurmetingen van beperkte duur (een à twee dagen tot een week).

Voor een aantal prototypen van gebouwen zal via simulatieberekeningen een relatie worden gelegd tussen de kwaliteit van het binnenklimaat over een korte periode en het binnenklimaat over een geheel jaar.

Als deze relatie wordt bepaald voor een aantal prototypen van buitenklimaat over een of twee weken, moet het mogelijk zijn om een bij het actuele gemeten buitenklimaat redelijk passend prototype buitenklimaat te kiezen en op basis daarvan het resultaat van de binnenklimaatmetingen als het ware op te schalen naar het resultaat dat zou zijn gevonden als gedurende een heel (standaard) jaar zou zijn gemeten.

Als dit een reële weg blijkt, zal zo'n methode worden ontwikkeld en beschreven. Als een en ander niet mogelijk blijkt, zullen ook andere mogelijkheden op hun haalbaarheid worden onderzocht.

## 2.6 Praktijkevaluatie

Na afronding van het project is het de bedoeling, dat de resultaten zullen worden vastgelegd in een ISSO-publicatie. De nieuwe criteria en instrumenten zullen daarmee in de praktijk kunnen worden ingezet. Er zal worden gezorgd voor een goede aansluiting met de huidige praktijk. Om tot de noodzakelijke validering van een en ander te komen, zullen voorstellen voor een veldonderzoek worden gedaan waarin resultaten van praktijkevaluaties van op basis van de nieuwe instrumenten ontwikkelde of beoordeelde gebouwen worden verzameld. Op basis van dit veldonderzoek kan de methode na verloop van tijd zonodig worden bijgesteld.

## LITERATUUR

1. "Evaluatie van prestatie-indicatoren voor thermische behaaglijkheid in gehouwen", ir. M.S. de Wit en ir. A.C. van der Linden, TU-Delft/CiTG/GBT en ir. A.K. Raue, Boerstra Binnenmilieu Advies, uitgegeven als ISSO-rapport PG-110, Rotterdam, november 1999.
2. "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference", R.J. de Dear en G.S. Brager, ASHRAE Transactions, Technical paper for the Winter Meeting, 1998.
3. "Beoordeling van het thermisch binnenklimaat", G.F.M. Brouwers en A.C. van der Linden, Klimaatbeheersing v18n7, pp. 257-264, 1989.
4. "Energie-efficiënte kantoorgebouwen, binnenklimaat en energiegebruik", Stichting ISSO/Stichting Bouwresearch, publicatie 300, Rotterdam, 1994.

## Plaatselijk discomfort

Kennisbank Bouwfysica  
Auteur: ir. A.C. van der Linden

Tot nu toe is de algemene thermische behaaglijkheid besproken. Bij het ontwerpen en beoordelen van gebouwen heeft kijken naar deze algemene thermische behaaglijkheid alleen maar zin als aan een aantal factoren ter beperking van plaatselijke onbehaaglijkheid is voldaan.

### 1 Verticale temperatuurgradiënt

Als de algemene behaaglijkheid ligt in het gebied van  $-0,5 < PMV < 0,5$  en er geen sprake is van stralingsasymmetrie (zie hierna) of tocht, dan is een verschil in luchttemperatuur tussen hoofd (1,1 m) en enkels (0,1 m) van 3 °C toelaatbaar. Wanneer de overige omstandigheden niet bekend zijn, kan als vuistregel een toelaatbare verticale gradiënt van 2,5 °C/m worden aangehouden.

### 2 Asymmetrische thermische straling

De asymmetrie in de stralingstemperatuur door bij voorbeeld een koud raam mag niet meer bedragen dan 10 °C. In verticale richting (verwarmings- en koelplafonds) mag de asymmetrie niet meer dan 5 °C zijn. Met asymmetrie wordt hier bedoeld de stralingstemperatuur die men ontvangt vanuit een halve bol naar de ene kant (bij voorbeeld de raamzijde) en de andere kant van de ruimte. Ook geldt dat in verticale richting. Daarbij moet men dus bedenken dat het hierbij niet alleen gaat om de temperatuur van het raam of plafond, maar om de gemiddelde stralingstemperatuur van alle vlakken die men binnen een halve bol ziet.

Om deze stralingstemperatuur te berekenen, moet men gebruik maken van zichtfactoren. Deze zijn voor een zittende en staande mens gegeven (zie module I-6; "Bijlagen thermisch comfort").

### 3 Vloertemperatuur

In ruimten waar mensen met normaal schoeisel verblijven, wordt een oppervlaktetemperatuur van minimaal 19 °C aanbevolen en van maximaal 28 °C. In veel gebouwen wordt 's nachts een lagere temperatuur aangehouden dan overdag in verband met het efficiënt omspringen met energie. Daardoor moeten aan het begin van de dag ook de constructies weer worden opgewarmd. Als de vloer te koud blijft, ondervindt men hiervan hinder. De genoemde minimum temperatuur dient dan ook bij voorkeur hooguit 1,5 uur na het begin van de werktijd te zijn bereikt. Vooral bij vloeren boven buitenlucht moet men hier bijzondere aandacht aan geven. Deze moeten afdoende worden geïsoleerd en aan de bovenzijde worden afgewerkt met een materiaal met een geringe warmtecapaciteit (lichte afwerklaag, tapijt). De maximum temperatuur is van belang bij een gebouw met vloerverwarming. Bij het ontwerpen van een vloerverwarming moet men hiermee rekening houden.

### 4 Luchtsnelheid

Bij het ontwerp van mechanische ventilatie-installaties, airconditioning en luchtverwarming moet men bij het kiezen van de uitblaasornamenten opletten dat de luchtsnelheden in de



verblijfzone niet te hoog worden. In tabel 1 is voor de verschillende activiteitsniveaus aangegeven welke gemiddelde lichtsnelheid bij een bepaalde luchttemperatuur maximaal toelaatbaar is. Verder geldt dat de lichtsnelheid niet te sterk mag fluctueren. De genoemde waarden zijn afgeleid uit het Duitse normblad DIN1946. Een en ander geldt uiteraard niet alleen voor door klimaatinstallaties veroorzaakte luchtstromingen, maar is ook bruikbaar voor het beoordelen van veroorzaakte problemen door natuurlijke oorzaken (tocht, koudeval, enz.). Overigens beginnen er meer genuanceerde beoordelingsmogelijkheden voor de lichtsnelheid (tocht) te komen. Van groot belang blijkt ook de fluctuatie in de lichtsnelheid uitgedrukt in de turbulentiegraad te zijn.

lucht- temperatuur in °C	maximaal toelaatbare lichtsnelheid v in m/s bij activiteitenklasse			
	I/II	III	IV	V
20	0,15	0,15	0,20	0,20
22	0,15	0,20	0,20	0,20
24	0,20	0,20	0,20	0,30
26	0,30	0,30	0,30	0,40
28	0,30	0,40	0,40	0,40

tabel 1. maximaal toelaatbare lichtsnelheid bij de verschillende activiteitenklassen en bij verschillende luchttemperaturen in de situatie  $T_i = T_s$

## 5 Relatieve luchtvochtigheid

Om redenen van (thermische) behaaglijkheid bedraagt de bovengrens  $RV = 70\%$  of een vochtgehalte van  $x = 12 \text{ g/kg}$ . Naar beneden toe is er uit behaaglijkheidsoogpunt geen grens te noemen. De vaak gehanteerde ondergrens van  $RV = 30\%$  vindt zijn ontstaan in het feit dat onder deze waarde er een verhoogde kans bestaat op het ontstaan van statische elektriciteit en verhoogde stofontwikkeling met daarmee gepaard gaande irritatie van slijmvliezen. Uit oogpunt van algemene behaaglijkheid is het daarom zinvol ook aan deze genoemde ondergrens voor de relatieve vochtigheid aandacht te besteden.

## Bijlagen thermisch comfort; diagrammen en formules voor de bepaling van geometrische factoren voor de zittende en staande mens (overgenomen uit ISSO researchrapport 5).

Kennisbank Bouwfysica  
Auteur: ir. A.C. van der Linden

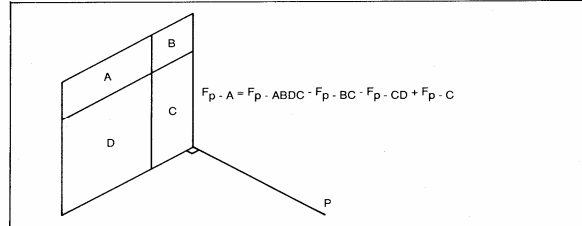
### BIJLAGE 1

ISSO-researchrapport 5

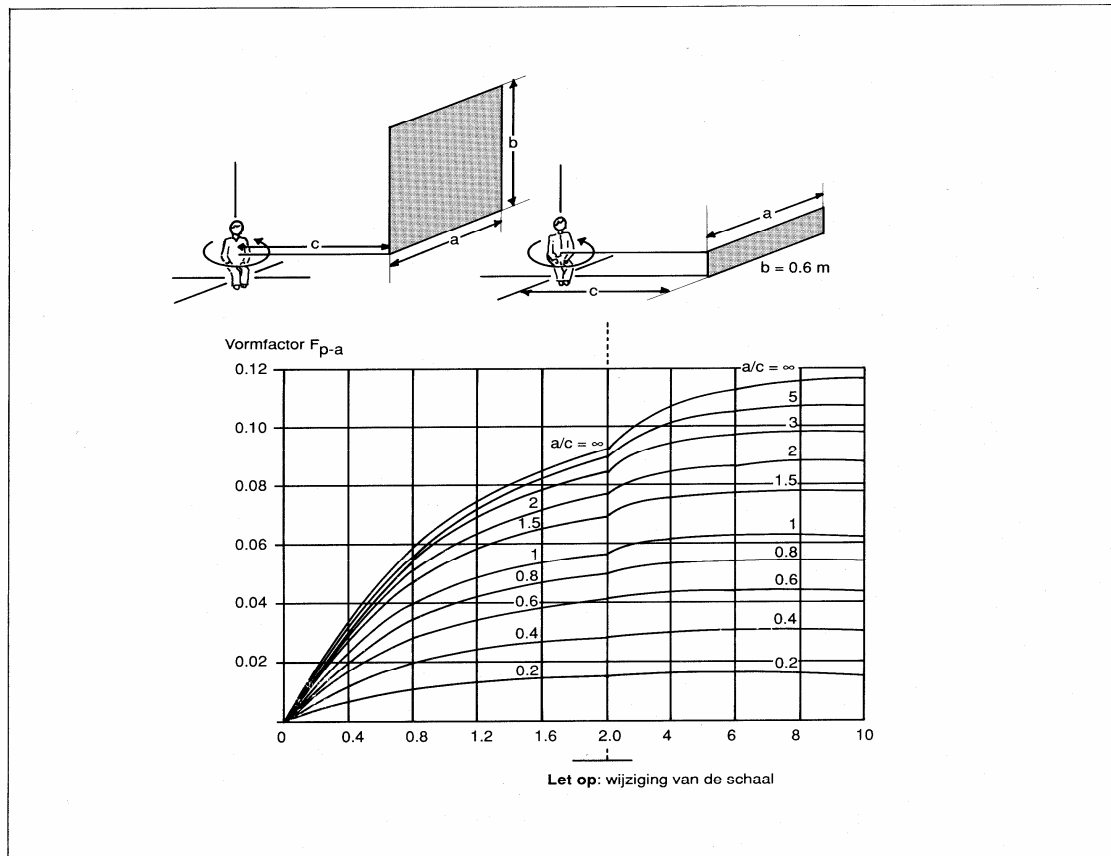
#### Diagrammen en formules voor de bepaling van de geometrische factoren.

Bepaling van de geometrische factoren van een persoon ten opzichte van rechthoekige vlakken.

De geometrische factoren van een persoon ten opzichte van rechthoekige vlakken kunnen worden bepaald met behulp van de diagrammen 21 tot en met 24 [1]. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen staande en zittende personen. Met behulp van de diagrammen is men in staat in een groot aantal situaties de geometrische factoren te bepalen. In figuur 20 is de geometrische factor van een persoon met zijn zwaartepunt in punt P gegeven.

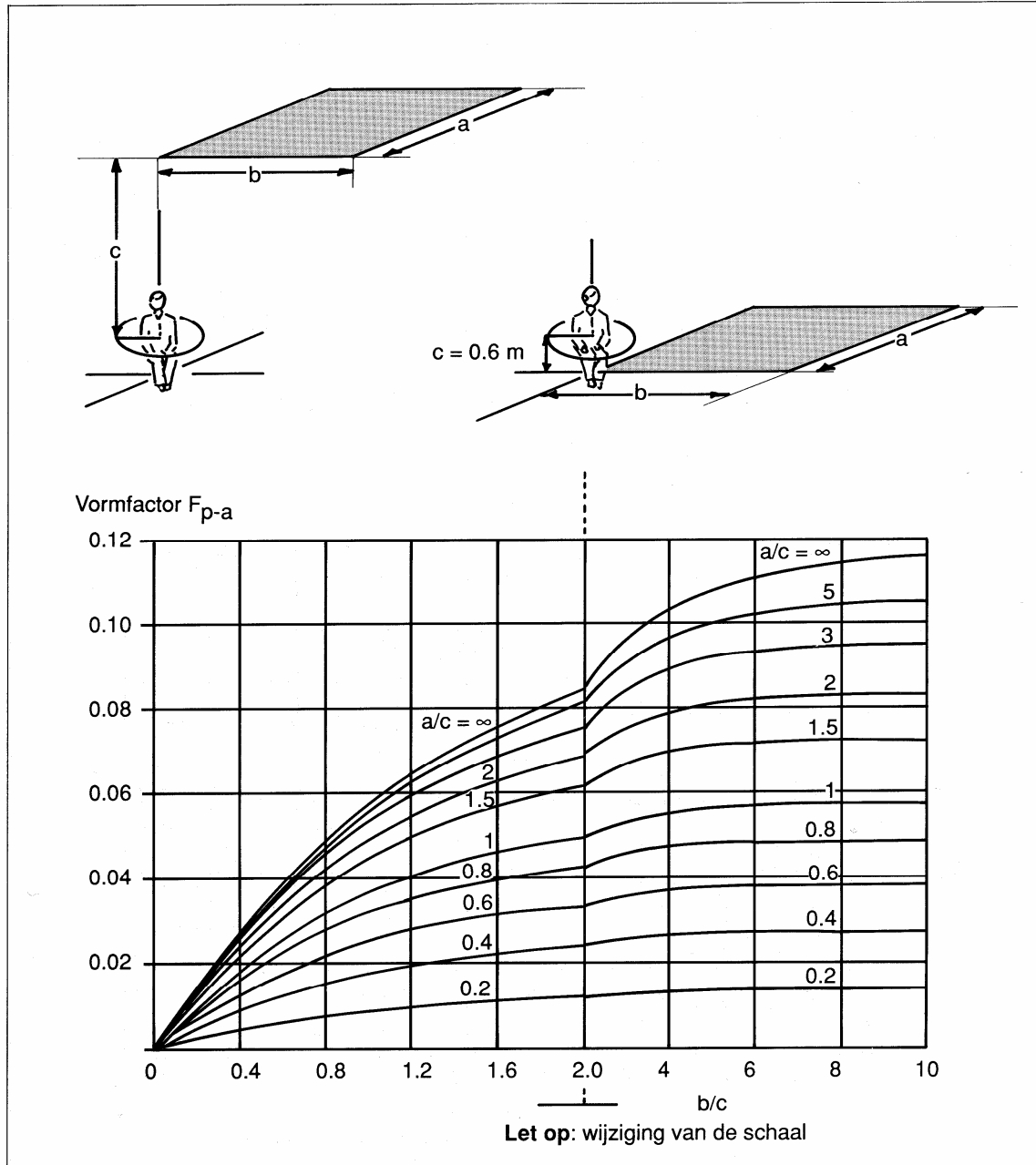


Figuur 20:  
Bepaling van de geometrische factor van een persoon met zijn zwaartepunt in P ten opzichte van een willekeurige vlak A [1].



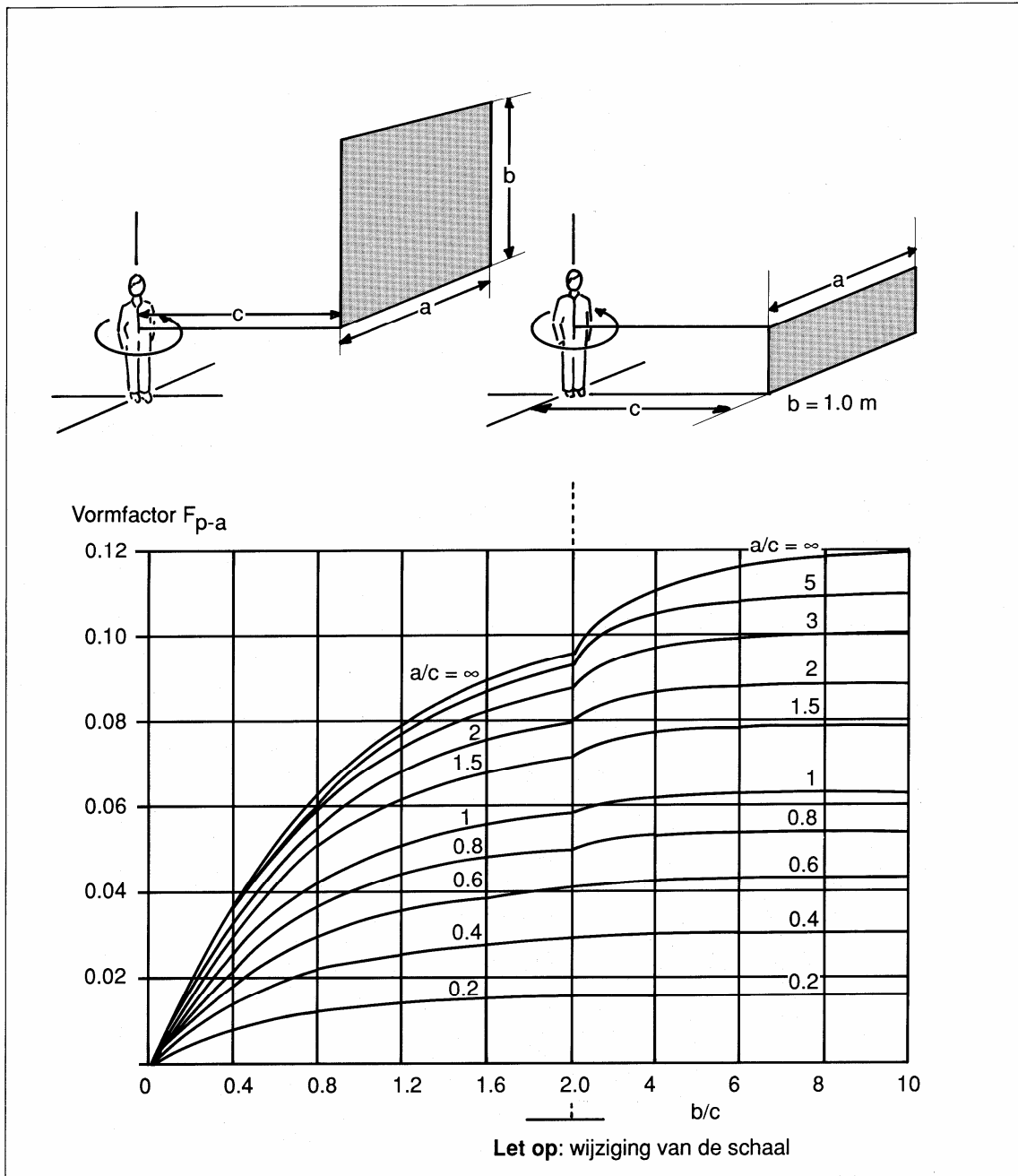
Figuur 21:  
Gemiddelde waarde van de geometrische factor tussen een zittende persoon en een verticale rechthoek (boven of onder zijn middelpunt) wanneer de persoon rond een verticale as kan draaien; te gebruiken wanneer de plaats van de persoon bekend is maar niet zijn kijkrichting [1].

Voorbeeld:  $a = 4 \text{ m}$ ,  $b = 3 \text{ m}$ ,  $c = 5 \text{ m}$   
 $b/c = 0,6$   
 $a/c = 0,8$   
 $F_{p-a} = 0,029$



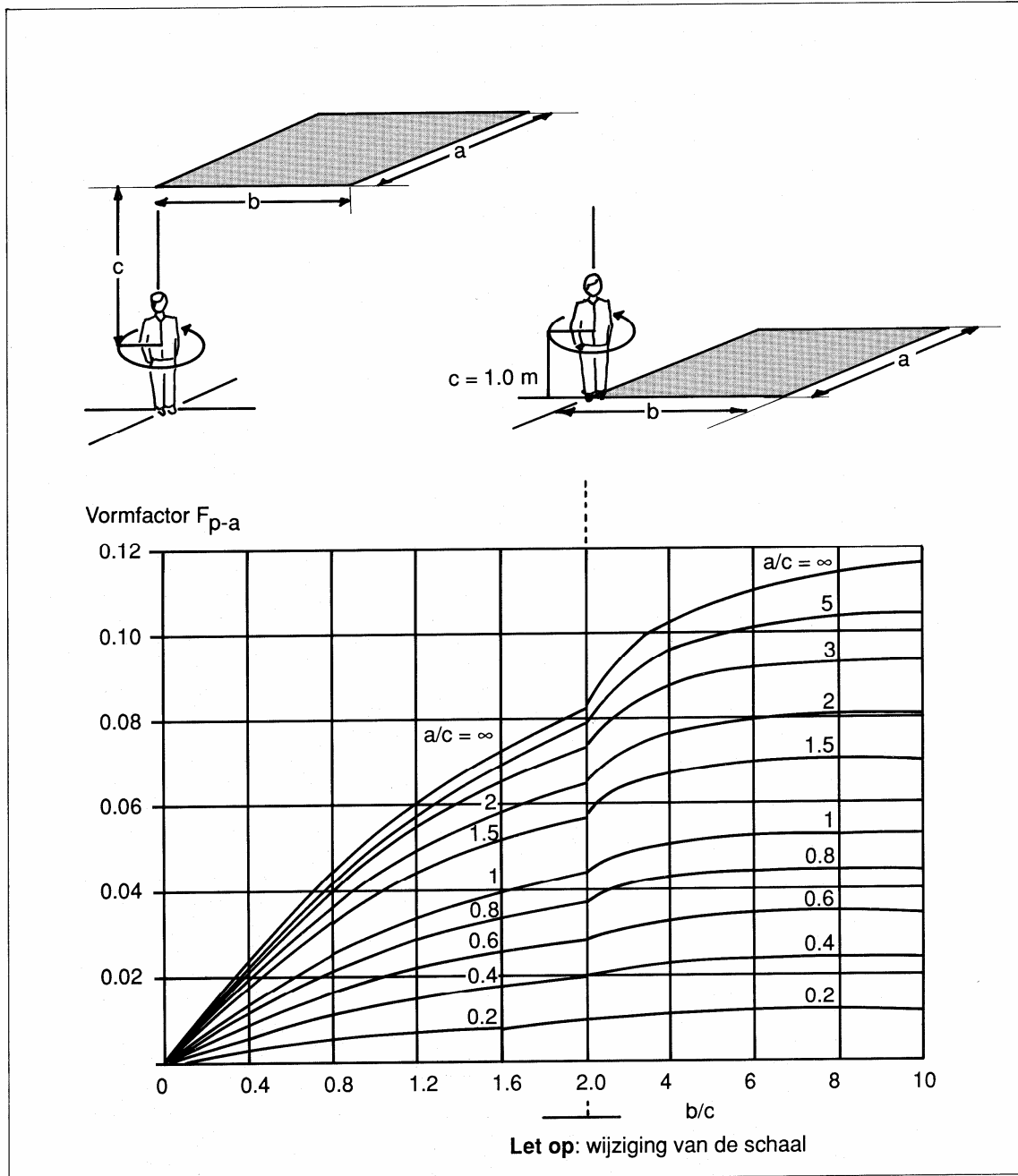
Figuur 22:  
Gemiddelde waarde van de geometrische factor tussen een zittende persoon en een horizontale rechthoek (in het plafond of op de vloer) wanneer de persoon rond een verticale as kan draaien; te gebruiken wanneer de plaats van de persoon bekend is maar niet zijn kijkrichting [1].

Voorbeeld:  $a = 3 \text{ m}$ ,  $b = 6 \text{ m}$ ,  $c = 2 \text{ m}$   
 $b/c = 3,0$   
 $a/c = 1,5$   
 $F_{p-a} = 0,067$



Figuur 23:  
Gemiddelde waarde van de geometrische factor tussen een staande persoon en een verticale rechthoek (boven of onder zijn middelpunt) wanneer de persoon rond een verticale as kan draaien; te gebruiken wanneer de plaats van de persoon bekend is maar niet zijn kijkrichting [1].

Voorbeeld:  $a = 4,5 \text{ m}$ ,  $b = 2 \text{ m}$ ,  $c = 3 \text{ m}$   
 $b/c = 0,67$   
 $a/c = 1,5$   
 $F_{p-a} = 0,047$



Figuur 24:  
Gemiddelde waarde van de geometrische factor tussen een staande persoon en een horizontale rechthoek (in het plafond of op de vloer) wanneer de persoon rond een verticale as kan draaien; te gebruiken wanneer de plaats van de persoon bekend is maar niet zijn kijkrichting [1].

Voorbeeld:  $a = 1 \text{ m}$ ,  $b = 15 \text{ m}$ ,  $c = 1,5 \text{ m}$   
 $b/c = 10$   
 $a/c = 0,67$   
 $F_{p-a} = 0,039$

# Gebouw en klimaatinstallaties

## (Klimatiseringsconcepten, inleiding)

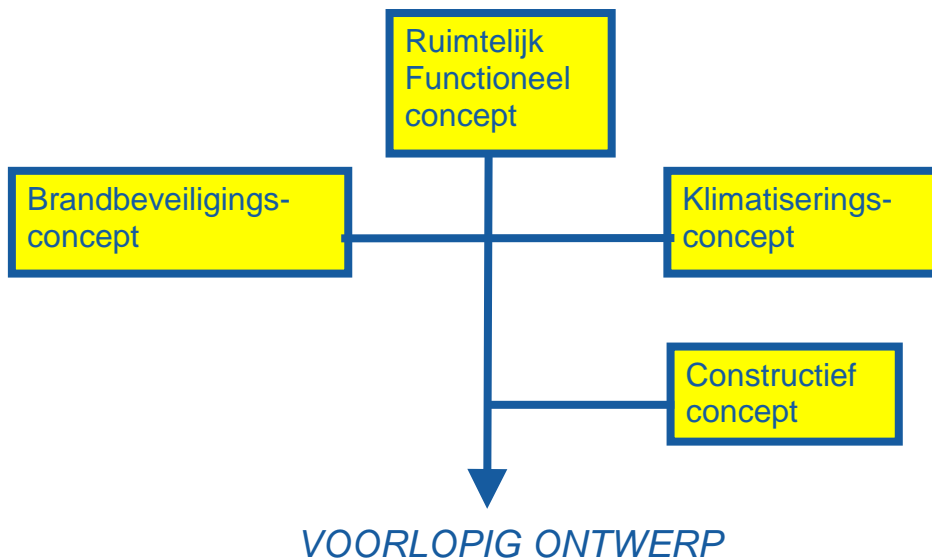
Kennisbank Bouwfysica

Auteur: Ruud van Herpen MSc.

### 1 Denken in concepten

De kunst van het ontwerpen is om een idee concreet vorm te geven, rekening houdend met de randvoorwaarden die vanuit omgeving en gebruiker worden gesteld. Het beginstadium is dus abstract en krijgt geleidelijk een steeds concretere vorm. Wanneer in de abstracte vorm een heldere visie binnen vastomlijnde kaders aanwezig is, spreekt men ook wel van een concept.

Zo kunnen er concepten ontwikkeld worden vanuit de constructieve opzet (wisselwerking gebouw – gebruik – constructie), vanuit de brandveiligheid (wisselwerking gebouw – gebruik – brandveiligheid), maar ook vanuit de klimatisering (wisselwerking gebouw – gebruik – klimaatinstallaties). Deze concepten hebben met elkaar gemeen dat ze optimaal rekening houden, of zelfs profiteren van de eigenschappen van het gebouw en het gebruik ervan. Het gaat dus om *maatwerk* voor het betreffende gebouw; een gedegen fysisch inzicht is daarvoor onontbeerlijk. De kunst van de ontwerper is om deze verschillende concepten met elkaar te verenigen en in het ruimtelijk-functionele concept te integreren. Zie figuur 1.



Figuur 1. Door de concepten vanuit de verschillende disciplines te integreren en steeds verder te concretiseren komt men uiteindelijk tot een voorlopig ontwerp.

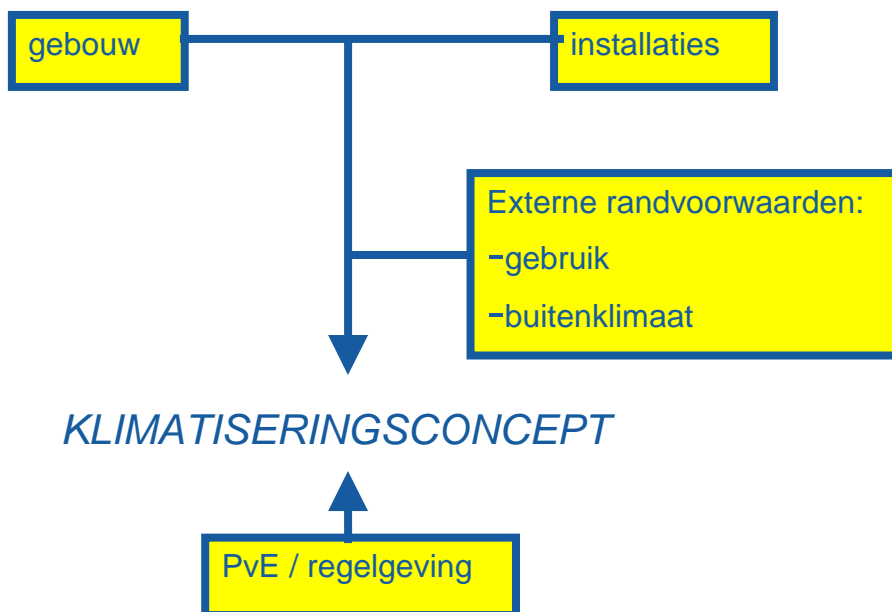
Bij meer complexe bouwwerken en gebouwen is het noodzakelijk om een ontwerpteam samen te stellen waarin, naast de opdrachtgever en de architect, de verschillende specialismen (constructie, brandveiligheid, klimatisering en bouwfysica) vertegenwoordigd zijn. Alleen dan kunnen de concepten worden geïntegreerd in het ontwerp. Met andere woorden:

Denken in concepten is synoniem met Integraal Ontwerpen!

## 2 Het klimatiseringsconcept

In aansluiting op het voorgaande kan een klimatiseringsconcept als volgt gedefinieerd worden: Het klimatiseringsconcept is een visie waarin de bouwtechnische en installatietechnische eigenschappen integraal worden beschouwd, afgestemd op het ontwerp en het gebruik van het bouwwerk of gebouw, met als doel om een optimaal binnenklimaat te bereiken. Wat onder optimaal binnenklimaat moet worden verstaan hangt af van het programma van eisen en van de regelgeving.

In de regelgeving liggen de eisen ten aanzien van gezondheid (ventilatie) en energiezuinigheid vast (zie Bouwbesluit, afhankelijk van de gebruiksfunctie). Comforteisen zijn hierin slechts in zeer beperkte mate opgenomen, deze zullen dus vooral vanuit het programma van eisen worden ingebracht. Overigens zijn er wel organisaties die standaard richtlijnen en eisen hebben ontwikkeld met betrekking tot het thermisch comfort. De bekendste zijn de richtlijnen van de Rijksgebouwendienst.



Figuur 2. Invloedsfactoren voor het klimatiseringsconcept.

De invloedsfactoren die in figuur 2 het klimatiseringsconcept beïnvloeden kunnen iets concreter gemaakt worden:

### *Gebouw*

De relevante gebouweigenschappen die het thermisch binnenklimaat van een gebouw beïnvloeden zijn:

- De thermische isolatie van de gebouwschil ( $R_c$ ).
- De warmtecapaciteit (warmte-accumulerend vermogen) van het gebouw, binnen de thermische schil ( $C$ ).
- De daglichtopeningen in de gebouwschil. Hierbij speelt een aantal grootheden een rol. Niet alleen de totale oppervlakte aan daglichtopeningen is relevant ( $A_{glas}$ ), maar vooral

ook de oriëntatie ervan, de warmtedoorgangscoefficient van het glas ( $U_{\text{glas}}$ ) en de zontoetredingsfactor (ZTA).

### Klimatiseringsinstallaties

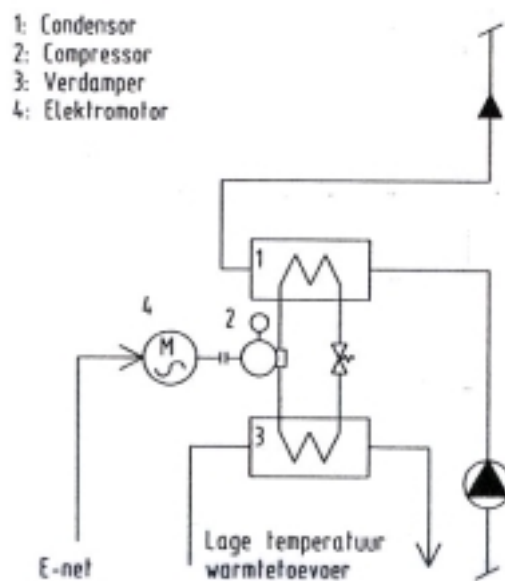
Relevante installaties voor de klimatisering van het binnenklimaat in een gebouw (in Engelse literatuur aangeduid met HVAC – heating, ventilation and air conditioning) zijn:

- Mechanische ventilatie (toevoer, afvoer, recirculatie)
- Verwarmingsinstallatie
- Koelinstallatie
- Luchtbevochtiging
- Luchtfiltrering

Naast echte mechanische opwekking wordt meer en meer gebruik gemaakt van lange termijn energieopslag en van omgevingsbronnen, met name bij het verwarmen en koelen van een gebouw. Zonnecollectoren zijn hiervan wellicht het bekendste voorbeeld. Echter, ook een warmtepomp maakt gebruik van een omgevingsbron. Bij een warmtepomp wordt een omgevingsbron met een laag exergieniveau (d.w.z. grote hoeveelheden medium met een relatief lage temperatuur, b.v. bodemwarmte of afgewerkte binnenlucht) naar een hoger exergieniveau gebracht (kleinere hoeveelheden medium met een hogere temperatuur (b.v. CV-water)).

### WARMTEPOMP MET ELEKTROMOTOR

Een warmtepomp is een apparaat dat warmte aan bijvoorbeeld lucht of water kan onttrekken. Voor de aandrijving wordt gebruik gemaakt van een elektromotor. De warmte die daarbij vrijkomt kan voor verwarmingsdoeleinden worden gebruikt. Doordat een warmtepomp de warmte vrij letterlijk "overpompt" wordt aan de ene zijde gekoeld, terwijl aan de andere zijde wordt verwarmd. Warmtepompen zijn dus apparaten die tegelijkertijd kunnen verwarmen en koelen. Hierdoor kunnen warmtepompen een nuttige rol spelen in situaties waarin gelijktijdig een warmte- en een koudebehoefte bestaat.



Figuur 3. Schematische weergave van een (elektrische) warmtepomp



### *Externe randvoorwaarden*

Uiteraard zijn er randvoorwaarden waarmee in het ontwerp rekening gehouden moet worden. Het zijn feitelijk deze randvoorwaarden waarop het ontwerp moet worden gedimensioneerd:

- Buitenklimaat: seizoenen, buitentemperatuur, luchtvochtigheid en zonnestraling. Niet alleen de grootheden zelf, maar ook het verloop ervan in een etmaalcyclus of seizoenen is van belang.
- De interne warmtelast ten gevolge van verlichting en apparatuur. Dit is afhankelijk van de gebruiksfunctie en het programma van eisen.
- De interne warmtelast ten gevolge van aanwezige personen. Het aantal personen hangt af van de gebruiksfunctie en bezettingsgraadklasse, maar ook van het reële aantal personen op basis van een programma van eisen.
- De interne vochtlast ten gevolge van aanwezige personen. In een woonomgeving komt daar ook de interne vochtlast ten gevolge van specifieke woonactiviteiten bij (koken, baden, wassen, etc..).

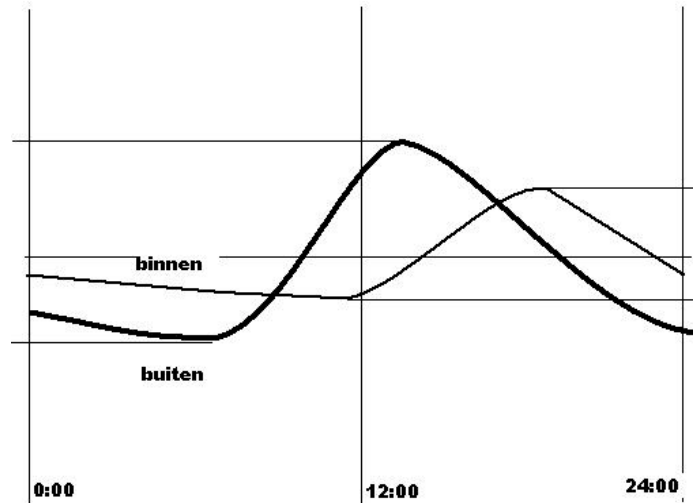
## 3 **Klimaat en bouwwijze**

De traditionele bouwwijze verschilt per cultuur. De oorzaak hiervan is wellicht niet eens zozeer gelegen in cultuurverschillen, maar meer in de voor handen zijnde bouwmaterialen en de heersende klimaatcondities. Deze laatste twee factoren hebben geleid tot een evolutie van de traditionele bouwwijzen die lokaal bepaald is.

De bouwwijze in een *warm en droog buitenklimaat* valt doorgaans op door de relatief zware steenachtige bouwwijze, waarin kleine daglichtopeningen zijn uitgespaard. Een warm en droog buitenklimaat is een landklimaat, met grote temperatuurverschillen in de etmaalcyclus (overdag warm, 's nachts koud). Het voordeel van de zware bouwwijze is dat de extremen in het temperatuurverloop worden afgetopt en in tijd verschuiven (zie figuur 4). Daardoor is het overdag in dergelijke gebouwen relatief behaaglijk, minder warm dan in de buitenlucht. Door relatief kleine openingen toe te passen wordt de zoninstraling (doorgaans de belangrijkste warmtelast gedurende de zomerperiode) beperkt. De isolatie van de gebouwschil is in een warm en droog buitenklimaat minder relevant.

De bouwwijze in een *warm en vochtig buitenklimaat* valt op door de relatief luchtopen bouwwijze (grote gevelopeningen, welke grotendeels opengezet kunnen worden). Om zoninstraling via de grote openingen beperkt te houden worden hier veelal grote overstekken toegepast. Omdat de etmaalcyclus in een warm en vochtig buitenklimaat minder grote extremen bevat, is het uitdempen van deze extremen minder zinvol. Een relatief lichte bouwwijze volstaat hier dan ook. De isolatie van de gebouwschil is in een warm en vochtig buitenklimaat in het geheel niet relevant.

De bouwwijze in een *koud en droog buitenklimaat* kenmerkt zich door de hoge thermische isolatie van de gebouwschil. Hoewel ook hier de extreme temperaturen in een etmaalcyclus een groot interval beslaan, liggen deze altijd onder de beoogde ruimtetemperatuur. Het aftoppen en verschuiven van deze extremen levert dan ook weinig voordeel voor het binnenklimaat op. Een lichte bouwwijze volstaat hier en is in veel gevallen zelfs wenselijk om een snelle opwarming van het gebouw na nachtverlaging of weekendverlaging te kunnen bereiken. Een goede thermische isolatie van de gebouwschil is in een droog en koud buitenklimaat noodzakelijk.



Figuur 4. Voorbeeld van een etmaalcyclus voor de buitenluchttemperatuur en het bijbehorende verloop van de binnenluchttemperatuur (verschuiving en aftopping van de extremen), bij een relatief zwaar gebouw.

Bij een *gematigd buitenklimaat* treedt er enigszins een spanningsveld op. In de zomerperiode kan een zware bouwwijze voordeel bieden voor het binnenklimaat, al zal dit voordeel minder groot zijn dan in een warm en droog buitenklimaat. Daarnaast is een goede thermische isolatie ook noodzakelijk vanwege de klimaatcondities in de winterperiode. Om de energieverliezen ten gevolge van de opwarming van het gebouw te beperken is dan juist een niet al te zware bouwwijze wenselijk. Juist bij een gematigd buitenklimaat zijn gebouwssimulatieberekeningen zinvol. Deze kunnen inzicht geven in het volgende spanningsveld:

- Levert een te hoge warmte-isolatie niet teveel koelbehoefte in de zomersituatie op (opsluiten van warmte)?
- Levert een te lage warmte-isolatie niet teveel warmtebehoefte in de wintersituatie op (grote transmissieverliezen)?
- Levert een te zware gebouwschil niet teveel warmtebehoefte in de wintersituatie op (opwarmtoeslag)?
- Levert een te lichte gebouwschil niet teveel koelbehoefte in de zomersituatie op?

Naast de bovenstaande algemene gebouweigenschappen speelt ook een aantal ontwerpafhankelijke variabelen een rol, zoals de grootte en situering van de daglichtopeningen, de zonwering of zonwerende glaseigenschappen, ruimte-afmetingen en indeling van het gebouw. Tenslotte komt daarbij ook een aantal gebruikafhankelijke variabelen waardoor de interne warmtelast wordt bepaald (personen, apparatuur, verlichting).

Het doel van de gebouwssimulatieberekeningen hierin is om met de bovengenoemde randvoorwaarden en uitgangspunten tot een onderling goed afgestemd bouwkundig en installatietechnisch ontwerp te komen.

# Bepalen van interne warmtelast

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: Peter Erdsieck en Ruud van Herpen

## 1 Inleiding

Onder interne warmtelast wordt de warmte verstaan die in een gebouw geproduceerd wordt door personen, verlichting en apparatuur. De interne warmtelast is met name van belang voor het dimensioneren van onder andere ventilatievoorzieningen en eventuele koelcapaciteit voor bij voorbeeld concertzalen en kantoorgebouwen. De hoogte van de interne warmtelast en de investerings- en exploitatiekosten van een gebouw zijn hierdoor nauw met elkaar verbonden.

In kantoorgebouwen is vooral de hoogte en de samenstelling van de interne warmtelast de laatste decennia sterk veranderd. De interne warmtelast die veroorzaakt wordt door apparatuur is sterk toegenomen. Dat komt enerzijds door toeneming van het gebruik van computerapparatuur en printers, en anderzijds door de steeds grotere capaciteit en snelheid van deze apparatuur. Tegenover de stijging van de interne warmtelast door automatiseringsapparatuur, staat een verlaging van de interne warmtelast ten gevolge van de verlichting. Door een lager verlichtingsniveau en de toepassing van meer energie-efficiënte verlichting is het energiegebruik en daarmee de interne warmtelast ten gevolge van verlichting afgenomen.

Maatregelen die gericht zijn op het reduceren van de interne warmtelast zijn over het algemeen snel rendabel, aangezien hiermee tweemaal wordt bespaard. In de eerste plaats is sprake van een besparing op het directe elektriciteitsverbruik door apparatuur. In de tweede plaats is sprake van een indirecte besparing door reductie van het benodigde koelvermogen c.q. van de benodigde hoeveelheid ventilatielucht. Het loont altijd de moeite om na te gaan of de interne warmtelast kan worden beperkt.

## 2 Berekening van de interne warmtelast

De warmte die wordt geproduceerd door personen is afhankelijk van de activiteit. Bij sportactiviteiten wordt meer lichaamswarmte geproduceerd dan bij het lezen van een krant. Een deel van de warmte komt vrij als zogenaamde voelbare warmte. Het andere deel komt vrij als zogenaamde latente warmte (verdampingswarmte).

Bij het bepalen van de interne warmtelast hebben we alleen te maken met de voelbare warmte. Voor zittend werk wordt uitgegaan van een voelbare warmte van circa 90 Watt per persoon. In schouwburgen en dergelijke - waar de bezetting soms 1 persoon per m<sup>2</sup> vloeroppervlak bedraagt - kan de interne warmtelast ten gevolge van personen oplopen tot 90 W/m<sup>2</sup>. Hier komt de interne warmtelast ten behoeve van de verlichting nog bij. Bij verlichting, apparatuur en dergelijke wordt het opgenomen elektrisch vermogen uiteindelijk volledig omgezet in warmte. De warmteproductie is hierdoor gelijk aan het opgenomen elektrisch vermogen.

Voor kantoorgebouwen geldt vooral dat de werkelijke interne warmtelast kleiner is dan de berekende waarde. Bij het berekenen van de interne warmtelast wordt namelijk uitgegaan van de zogenaamde "worst case". Dat wil zeggen: iedereen is aanwezig, alle apparatuur is

volledig in gebruik en alle verlichting brandt. In de praktijk blijkt meestal dat een groot deel van de werkplekken niet in gebruik is. Door afspraken buiten de deur, vergaderingen binnen het gebouw, verlof enzovoort zijn veel kantoorgebruikers niet meer dan 50% van de arbeidstijd op hun werkplek aanwezig. Personen met een voornamelijk administratieve functie zijn wel 80 tot 90% van de tijd aanwezig.

In een kantoorgebouw moet in een- en tweepersoonskamers rekening worden gehouden met de "worst case". Het kan namelijk altijd voorkomen dat in bepaalde kamers de bezetting toch erg hoog is. In kamers voor drie of meer personen - en zeker in kantoortuinen - is het zeer onwaarschijnlijk dat iedereen aanwezig is en alle apparatuur is ingeschakeld. Zeker voor de warmtelast van personen en apparatuur kan zonder risico worden uitgegaan van een bezetting van maximaal 70 tot 80%.

Uitgaande van gangbare beeldschermen, individuele printers, een vloeroppervlak van 10 m<sup>2</sup> per persoon en volledige bezetting, bedraagt de totale interne warmtelast circa 35 W/m<sup>2</sup>. Deze warmtelast is als volgt opgebouwd:

• personen	8 W/m <sup>2</sup>	(80 Watt <sup>1)</sup> / 10m <sup>2</sup> )
• verlichting	10 W/m <sup>2</sup>	(gemiddelde waarde verlichting)
• PC-configuratie	12 W/m <sup>2</sup>	(120 Watt <sup>2)</sup> / 10m <sup>2</sup> )
• individuele (laser)printer	5 W/m <sup>2</sup>	(50 Watt <sup>3)</sup> / 10m <sup>2</sup> )

<sup>1)</sup> De voelbare warmte waarmee rekening moet worden gehouden bedraagt 80 Watt per persoon

<sup>2)</sup> De warmteproductie van een standaard PC-configuratie met 17 inch beeldscherm bedraagt 100 tot 120 Watt. Hiervan wordt het grootste deel gebruikt voor het beeldscherm.

<sup>3)</sup> De warmteproductie van een individuele laserprinter bedraagt gemiddeld circa 50 Watt. Tijdens het printen zelf is de warmteproductie veel groter dan 50 Watt. Echter, tijdens de ruststand is het gebruik lager.

Vaak is de interne warmtelast lager omdat het vloeroppervlak per persoon hoger is of het aanwezigheidspercentage kleiner dan 100%. Uitgaande van een vloeroppervlak van 12 m<sup>2</sup> per persoon en de plaatsing van printers in apart geventileerde ruimten op de gang, bedraagt de totale interne warmtelast circa 26,5 W/m<sup>2</sup>.

Deze warmtelast is als volgt opgebouwd:

• personen	6,5W/m <sup>2</sup>	(80 Watt / 12m <sup>2</sup> )
• verlichting	10 W/m <sup>2</sup>	(gemiddelde waarde verlichting)
• PC-configuratie	10 W/m <sup>2</sup>	(120 Watt / 12m <sup>2</sup> )

Uit de voorgaande berekening blijkt dat voor de meeste kantoororganisaties moet worden uitgegaan van een interne warmtelast van 30 tot 35 W/m<sup>2</sup>. Door toepassing van een aantal "bijzondere" voorzieningen kan de warmtelast teruggebracht worden tot 20 à 25 W/m<sup>2</sup>.

### 3 Reductie warmtelast automatiseringsapparatuur

Reductie van de interne warmtelast in bij voorbeeld schouwburgen is in feite niet mogelijk, omdat deze voor het grootste deel bestaat uit de warmte van personen. In die situaties zijn veelal alleen maatregelen met betrekking tot de verlichting (op het toneel) mogelijk. Wanneer in kantoorgebouwen en dergelijke de totale warmtelast volgens opgave meer dan 35 W/m<sup>2</sup> bedraagt, is een kritisch onderzoek op zijn plaats.

Elementen die hierbij aan de orde moeten komen, zijn:

- Inventarisatie door de toekomstige gebruikers van de gebruikte automatiseringsapparatuur. Door de inventarisatie moet zowel een duidelijk beeld ontstaan van het huidige bezit als van de voorgenomen vervangingen.
- Onderzoek naar de gelijktijdigheid van het gebruik van met name apparatuur.
- Overleg met de opdrachtgever over een vervangingsbeleid waarbij alleen nog energiezuinige apparatuur wordt aangeschaft. Steeds meer organisaties gaan over tot de aanschaf van zogenaamde TFT-schermen (platte schermen) in plaats van traditionele CRT-schermen (monitor met beeldbuis).
- Overleg over de mogelijkheid om een gedeelte van het installatiebudget aan te wenden voor aparte printer- en kopieerruimten en bronafzuiging.

De warmtelast veroorzaakt door gangbare automatisering, hoeft niet meer dan  $10 \text{ W/m}^2$  vloeroppervlak te bedragen. Voor het reduceren van de interne warmtelast zijn verschillende mogelijkheden voorhanden. De belangrijkste zijn:

1. Het gebruik van energiezuinige apparatuur; door de toepassing van TFT-schermen (platte schermen) in plaats van traditionele CRT-schermen (scherm met beeldbuis), ontstaat een aanzienlijke besparing. Het energiegebruik (en daarmee de warmteproductie) van een TFT beeldscherm bedraagt 25 tot 30 Watt. Het energiegebruik van een traditioneel beeldscherm bedraagt gemiddeld 70 tot 80 Watt. Uitgaande van  $10 \text{ m}^2$  per persoon komt dit neer op een reductie van circa  $5 \text{ W/m}^2$ .
2. De toepassing van powermanagement voor PC's. Bij powermanagement wordt het beeldscherm (en de PC) in een slaapstand gezet als deze gedurende een vooraf ingestelde tijd niet wordt gebruikt. Als de PC-configuratie als gevolg van powermanagement in slaapstand gaat, neemt het energiegebruik van de hele configuratie aanzienlijk af. Het spreekt voor zich dat powermanagement alleen zinvol is in een situatie waar de werknemers regelmatig niet op hun werkplek aanwezig zijn en de apparatuur daarbij aan laten staan. De reductie die kan worden bereikt, is sterk afhankelijk van de apparatuur en het gebruik, maar kan in bepaalde situaties 2 tot  $5 \text{ W/m}^2$  bedragen. Powermanagement is niet te vergelijken met zogenaamde screensavers, die slechts beperkt energie besparen en die de interne warmtelast niet wezenlijk verlagen.
3. Het plaatsen van randapparatuur zoals laserprinters en kopieerapparatuur in aparte ruimten of in gangnissen. Door deze ruimten/nissen apart af te zuigen, wordt niet alleen de geproduceerde warmte, maar ook de geproduceerde verontreinigingen direct bij de bron afgezogen. Naast een beperking van de warmtelast heeft dit een positief effect op de binnenluchtkwaliteit. De reductie van de warmtelast bedraagt al gauw meer dan  $5 \text{ W/m}^2$ .

#### **4 Reductie warmtelast verlichting**

Ondanks de toepassing van steeds energiezuiniger verlichting is het energiegebruik (en daarmee de interne warmtelast) voor verlichting in veel gebouwen nog aanzienlijk.

Een verdere reductie is mogelijk door:

- een betere benutting van daglicht;
- het beperken van het 'onnodig' gebruik van de verlichting (vraagbeperking);
- een verdere efficiëntieverbetering van de verlichting.

Hoewel een betere benutting van daglicht een van de belangrijkste hulpmiddelen is om het energiegebruik voor verlichting te verminderen, valt dit buiten het kader van deze module.

Het beperken van het onnodig gebruik van verlichting kan worden gerealiseerd door de toepassing van intelligente regelingen zoals af- of aanwezigheidsdetectie en veegschakelingen. Beperking van onnodig gebruik is in principe ook mogelijk door gerichte gedragscampagnes, maar is meer een zaak van de beheerders van het gebouw, nadat het gebouw in gebruik is genomen. Daarnaast is het een arbeidsintensief traject, dat heel wat meer vraagt dan alleen het ophangen van posters met aansprekende teksten.

Mogelijkheden om de interne warmtelast van de kunstverlichting te verminderen, zijn:

- De toepassing van afgezogen verlichtingsarmaturen. Bij afgezogen verlichtingsarmaturen wordt de ventilatielucht langs de lamp afgezogen. Hierdoor wordt de convectieve warmte die door de lamp wordt geproduceerd, direct met de afgezogen ventilatielucht afgevoerd. De reductie van deze maatregelen bedraagt 3 à 4 W/m<sup>2</sup>.
- Het voorkomen van overdimensionering. De lichtopbrengst van de verlichting neemt op den duur (enigszins) af door vervuiling en veroudering. Om verzekerd te zijn van een bepaald minimaal verlichtingsniveau, wordt de verlichtingsinstallatie daarom zwaarder uitgevoerd dan strikt noodzakelijk. Over het algemeen wordt uitgegaan van een vermenigvuldigingsfactor 1,4. Voor omgevingen met beperkte vervuiling is echter een vermenigvuldigingsfactor van circa 1,2 haalbaar. Hiervoor is wel regelmatig onderhoud noodzakelijk.
- De toepassing van een daglichtafhankelijke regeling voor de kunstverlichting. Door de lichtinstallatie te voorzien van een daglichtafhankelijke regeling kan optimaal geprofiteerd worden van de toetreding van daglicht. Bij een eenvoudig systeem is elk verlichtingsarmatuur voorzien van een kleine lichtsensoren, die gekoppeld is aan een dimmer. Het systeem zorgt ervoor dat de lampen zodanig worden gedimd dat - in combinatie met het aanwezige daglicht - ongeveer het gewenste verlichtingsniveau wordt bereikt. Het systeem kan standaard met de armatuur worden meegeleverd en heeft een terugverdientijd van drie tot vijf jaar. Afhankelijk van de fabrikant heeft een daglichtafhankelijke regeling een kleine vertraging in het systeem, waardoor de gebruiker zich meestal niet bewust is van de aanwezigheid van een regeling. Een bijkomend voordeel van het systeem is dat het overschot aan licht bij nieuwe of pas gereinigde lampen eveneens wordt "weggedimd". Behalve een reductie van de interne warmtelast is een reductie van het energiegebruik mogelijk (tot 50%).
- De toepassing van een veegpulsschakeling voor de kunstverlichting. Een veegpulsschakeling zorgt ervoor dat op vooraf ingestelde tijden (bijna) alle verlichting in het gebouw wordt uitgeschakeld. Dit kan bijvoorbeeld zijn rond lunchtijd en om 18.00 uur. Door deze regeling worden alle lampen die "per ongeluk" zijn blijven branden, uitgeschakeld. De gebruikers die nog aanwezig zijn en de verlichting willen blijven gebruiken, kunnen deze direct weer handmatig aanschakelen. Een zeer belangrijk aandachtspunt bij een dergelijke regeling is het voorkomen van irritatie bij de gebruikers van het gebouw. Met name het te frequent schakelen leidt direct tot irritatie bij de gebruiker.
- Uitgaan van een laag algemeen verlichtingsniveau, aangevuld met werkplekverlichting. Over het algemeen blijkt het gewenste verlichtingsniveau bij beeldschermwerk lager te liggen dan het veel aangehouden niveau van 400 Lux op het werkvlak. Belangrijker dan het absolute niveau blijkt bij beeldschermwerk een gelijkmatige lichtverdeling in de ruimte en het voorkomen van ongewenste spiegelingen van armaturen in het beeldscherm. De toepassing van een laag algemeen verlichtingsniveau - aangevuld met werkplekverlichting

- kan dan een oplossing zijn. De toepassing van bureaulampen heeft als nadeel dat de warmte die door bureaulampen wordt geproduceerd niet rechtstreeks kan worden afgezogen en de bureaulampen niet voorzien kunnen worden van bij voorbeeld een veegpulsschakeling of een daglichtafhankelijke regeling.
- De toepassing van aanwezigheidsdetectie voor de kunstverlichting. De doorsnee kantoorgebruiker is minder dan 50% van de arbeidstijd daadwerkelijk op zijn eigen werkplek aanwezig. Uitgaande van een dergelijk aanwezigheidspercentage is in veel (kantoor)ruimten de toepassing van een afwezigheidsdetectie voor de kunstverlichting een zinvolle optie. De aanwezigheidsdetectie schakelt de verlichting uit als gedurende een vooraf ingestelde tijd geen beweging meer wordt waargenomen.

Voor alle schakelingen geldt dat het voorkomen van irritatie bij de gebruiker van groot belang is. Te veel verschillende schakelingen, te vaak schakelen, onbegrepen voorzieningen en dergelijke, leiden tot onvrede bij de gebruiker. Als het welzijn van de gebruiker wordt aangetast, wordt het systeem bewust en onbewust gesaboteerd en wordt de beoogde doelstelling niet gehaald.