



Rijksdienst voor Ondernemend  
Nederland

## Literatuurstudie thermisch comfort

EOS-LT DP 2015 WP1

Datum            Februari 2012

TU Delft, Faculteit Bouwkunde, afd. Bouwtechnologie, sectie  
Climate Design and Sustainability, ing. S. Kurvers,  
ir. K. van der Linden, prof. ir. H. Cauberg,

In opdracht van Agentschap NL (nu Rijksdienst voor  
Ondernemend Nederland)

Publicatienr    RVO-167-1501/RP-DUZA  
[www.rvo.nl](http://www.rvo.nl)

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van  
Economische Zaken.



**Literatuurstudie thermisch comfort**  
**Werkpakket 1: vraagsturing en binnenmilieu**  
**EOS-project Duurzame projectontwikkeling (EOS-LT)**

*Definitieve versie 28-02-2012*

*ing. Stanley Kurvers*  
*ir. Kees van der Linden*  
*prof. ir. Hans Cauberg*  
*TU Delft, Faculteit Bouwkunde –*  
*Afdeling Bouwtechnologie*  
*Sectie Climate Design and Sustainability*

## Inhoud

1.	Inleiding.....	3
2.	Conclusies literatuurstudie .....	4
2.1.	Invloed van adaptatie.....	4
2.2.	Thermisch comfort in woningen.....	6
2.3.	Voorstel adaptieve richtlijn voor woningen .....	7
3.	Samenvatting literatuurstudie .....	10
4.	Samenvattingen literatuurbronnen.....	14
4.1.	Thermisch comfort algemeen .....	14
4.2.	Thermisch comfort in kantoren .....	27
4.3.	Thermisch comfort in woningen.....	42

## 1. Inleiding

Het doel van deze literatuurstudie is het verkrijgen van kennis over en inzicht in het thermisch comfort in woningen en bijdragen aan een onderbouwing voor het opstellen van criteria, uitgangspunten en richtlijnen voor woningen. Achtergrond hierbij is de adaptieve woning, “waarbij comfort en gezondheid worden geregeld op basis van daadwerkelijke behoefte, alleen daar waar nodig is en waarbij de woningen reageren op omgevingscondities en menselijke activiteiten. Op basis van vraagsturing wordt een optimum bereikt tussen gezondheid en comfort enerzijds en energiegebruik anderzijds. Probleem bij deze benadering is dat de huidige gangbare criteria voor comfort en binnenluchtkwaliteit hiervoor niet bruikbaar zijn. Deze zijn gebaseerd op de klassieke benadering van thermisch comfort en binnenmilieu en geldend voor groepen onder statische omstandigheden”. De vraag die hierbij gesteld wordt is of de criteria moeten worden gedifferentieerd naar gebruikersprofielen en woningkenmerken en eventueel andere aspecten die van invloed zijn op de vraagsturing.

Deze literatuurstudie is zoveel mogelijk gericht op (adaptief) thermisch comfort. Hierbij is de nadruk gelegd op zo recent mogelijke literatuurbronnen. Tevens zijn de relevante bronnen meegenomen uit eerdere literatuuronderzoeken die door de auteurs zijn uitgevoerd [1, 2]. Het meeste onderzoek naar adaptief thermisch comfort handelt over thermisch comfort in het algemeen en richt zich op kantoren. In woningen is minder onderzoek uitgevoerd. Desondanks is onderzoek in kantoren, in het bijzonder de verschillen tussen centraal gekoelde kantoren en natuurlijk geventileerde kantoren, bruikbaar om inzicht te verkrijgen in de mechanismen van adaptief thermisch comfort in woningen.

## 2. Conclusies literatuurstudie

Uit de literatuurstudie blijkt dat thermisch comfort niet gerelateerd is aan uitsluitend een optimale temperatuur of aan een vast temperatuurgebied. Thermisch comfort is ook niet universeel te berekenen met een formule waar fysische en enkele fysiologische grootheden ingevoerd worden. De definitie geeft het al duidelijk aan: “thermisch comfort is een gemoedstoestand die tevredenheid met de thermische omgeving aangeeft”.

De huidige richtlijnen en normen voor thermisch comfort, zoals de ISO 7730, zijn afgeleid van laboratoriumonderzoek dat een abstractie van de werkelijkheid is. Het heeft er toe geleid dat in grote delen van de wereld, voor verschillende geografische en culturele groepen een universeel temperatuurgebied met nauwe grenzen wordt gebruikt. Deze temperatuurgrenzen blijken echter strenger dan nodig is en leidt in de praktijk tot ontevredenheid, gezondheidsklachten en een onnodig hoger energiegebruik.

Thermisch comfort blijkt een minder eenvoudig begrip dat tot voor kort werd aangenomen en is voor een groot deel afhankelijk van het evolutionair ontwikkelde vermogen van de mens zich aan te passen aan de omgeving en de omgeving aan te passen aan zichzelf. Een complex systeem van ervaring, verwachting, context, verschillende adaptieve mogelijkheden en adaptieve acties maakt dat mensen naar een comfortabele omgeving streven en dat bereiken binnen ruimere grenzen dan de huidige normen aangeven.

Daarnaast zijn er aanwijzingen dat mensen de voorkeur geven aan een zekere mate van variatie van de temperatuur in plaats van een constante temperatuur. Variatie binnen een dag, variatie in de verschillende seizoenen, variatie tussen verschillende ruimten in een gebouw, variatie tussen verschillende gebouwen. Maar ook hier geldt dat mensen of op de omgeving willen ingrijpen of zelf naar een andere omgeving willen gaan. Naast deze variatie willen mensen ook stimulatie, door bijvoorbeeld in de zon te gaan zitten, in koel water te zwemmen of in de sauna te gaan zitten. De formule voor de warmtebalans zal deze situaties als ontoelaatbaar kwalificeren, maar in werkelijkheid genieten mensen van deze extreme thermische situaties.

Nog een stap verder gaat de theorie dat variatie essentieel is voor de gezondheid. Onvoldoende thermische stimulatie, maar ook het gebrek aan stimulatie op het gebied van licht, geur en geluid, leidt tot onvoldoende zintuiglijke prikkeling (sensorische deprivatie) en mogelijk zelfs tot een minder goed functionerend immuunsysteem. Dit zou kunnen leiden tot klachten, ziekten en zou mogelijk ook bijdragen aan het sick building syndrome.

### 2.1. Invloed van adaptatie

Steeds meer onderzoek toont aan dat mensen adapteren aan de thermische omgeving waaraan ze worden blootgesteld door middel van gedragsmatige adaptatie, beïnvloeding en psychologische adaptatie (Hellwig, 2006; Nicol, 2006; Van Beek, 2006; Wagner, 2006; Brager, 2004; Baker, 1991, 1996, 2004; Merghany, 2004; Nikolopoulou, 2004; Nakano, 2003; Shimoda, 2003; de Dear, 1997; Humphreys, 1979). In gebouwen die niet mechanisch worden gekoeld prefereren mensen een hogere comforttemperatuur bij

hogere buitentemperaturen en accepteren ze een grotere bandbreedte in comforttemperaturen dan in mechanisch gekoelde gebouwen. Op basis van deze kennis zijn voor niet mechanisch gekoelde gebouwen zogenaamde adaptieve temperatuurgrenswaarden vastgesteld (ASHRAE, 2005; ISSO, 2004).

De acceptatie van hogere temperaturen is groter naarmate de adaptatiemogelijkheden groter zijn. Er kunnen verschillende vormen van adaptatie worden onderscheiden die met elkaar samenhangen en elkaar beïnvloeden (de Dear, 1997; Nikolopoulou, 2004; Ubbelohde, 2004):

1. *Beïnvloeding van de omgeving.* Het gaat hierbij om voelbare beïnvloeding van de omgeving en niet alleen het idee dat mensen hebben dat ze iets kunnen beïnvloeden. Dit blijkt uit onderzoek (de Dear, 1997) waar de index “personal environmental control” niet correleerde met de thermische acceptatie en uit onderzoek (Paciuk, 1990), waarbij onderscheid werd gemaakt tussen *beschikbare*, *gebruikte* en *ervaren* beïnvloeding. Het thermisch comfort correleerde het sterkst met ervaren beïnvloeding. De omgeving kan worden beïnvloed door:
  - *Ramen* en deuren openen om:
    - de temperatuur te veranderen
    - de luchtsnelheid te verhogen
    - de luchtkwaliteit te verbeteren
  - *Ventilatoren* gebruiken om de luchtsnelheid te verhogen.
  - *Zonwering* gebruiken om warmtestraling en temperatuur te verminderen.
2. *Gedragsmatige adaptatie.* Dit zijn veranderingen die iemand aanbrengt aan zijn gedrag om het warmtegevoel beter in overeenstemming te brengen met zijn of haar behoeften:
  - Aanpassen van *kleding*
  - Aanpassen van *metabolisme*
  - *Drinken* van koude dranken
  - *Verplaatsen* naar andere ruimte, veranda, terras, tuin, etcetera.
3. *Psychologische adaptatie.* Een bepaalde fysische omgeving geeft verschillende percepties, afhankelijk van de omstandigheden. In tussen- en buitenruimtes blijkt dat mensen een veel grotere spreiding in temperatuur accepteren dan zij binnen zouden doen. Hier kunnen mensen vaak geen temperaturen beïnvloeden, maar alleen van plaats veranderen. De grotere acceptatie en mogelijk ook voorkeur voor het ruimere temperatuurgebied wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door psychologische adaptatie. De acceptatie voor hogere temperaturen is sterker, naarmate de omgeving minder geconditioneerd is. Adaptatie is een continuüm, met aan een einde de klimaatkamer, gevolgd door centraal geregelde airconditioned ruimtes, vervolgens free running kantoorgebouwen, woningen, tussenruimtes (serres, e.d.) en aan het andere einde van het continuüm de buitenomgeving. Op iedere plaats op dit continuüm vind men een andere frequentieverdeling van het werkelijke thermisch comfort, afhankelijk van de adaptieve mogelijkheden.

Psychologische adaptatie is afhankelijk van:

- *Ervaringen* met het binnenklimaat over korte en lange termijn.

- *Verwachtingen* die zijn gebaseerd op ervaringen met het binnenklimaat en hierop afgestemde gedragsmatige adaptatie.
- *Variatie*. Mensen prefereren een, binnen zekere grenzen, variabel klimaat boven een stabiel of monotoon klimaat.

## 2.2. Thermisch comfort in woningen

Het meeste onderzoek naar adaptatie en de drie hier boven genoemde mechanismes is uitgevoerd in kantooromgevingen. Er zijn aanwijzingen, dat de adaptatiemechanismen in woningen groter zijn dan in kantoren en dat de acceptatie van hogere temperaturen in woningen ook groter is door:

- *Verwachting* van hogere temperaturen. In woningen is psychologische adaptatie groter door ervaringen en verwachtingen voor hogere temperaturen, onder voorwaarde dat er geen airconditioning is.
- Meer *beïnvloedingsmogelijkheden*. De acceptatie is groter, omdat er meer mogelijkheden zijn om de temperatuur, de lichtsnelheid en de luchtkwaliteit te beïnvloeden door het gebruik van ramen, deuren en zonwering. Dit geldt voor de aanwezigheid van deze voorzieningen, maar ook hoeft er met minder kamergenoten rekening te worden gehouden.
- Meer *gedragsaanpassing*. In de eigen woning kan men kiezen in welke ruimte men wil verblijven, in de tuin, in de koelste kamer, op het terras of helemaal niet thuis blijven maar naar het strand of park gaan. Op kantoor zijn de aanwezigen aan de werkplek gebonden en zijn de mogelijkheden om kleding aan te passen veel beperkter dan in de woonomgeving.

Dit betekent dat in woningen adaptief thermisch comfort de mogelijkheid biedt een energie-efficiënt, comfortabel en gezond binnenklimaat te realiseren door doordachte en samenhangende keuzes te maken op het gebied van architectuur (design, vorm, lay-out, oriëntatie gevel, oriëntatie vertrekken, glasoppervlak, raamontwerp), bouwfysica (bouwmassa, glasoppervlak, isolatie, zonwering) en installatietechniek (ventilatie, regeling, warmteterugwinning).

Bijzondere aandacht verdienen slaapvertrekken. Tijdens de slaap heeft de mens minder adaptatiemogelijkheden en verwacht iemand die slaapt (onbewust) in de nacht een dalende temperatuur.

Ouderen zijn gevoeliger voor hogere en lagere temperaturen. Bovendien zullen ouderen minder in staat zijn te adapteren, zowel fysiologisch als gedragsmatig. Daarom ligt het voor de hand voor ouderen een nauwer temperatuurgebied te handhaven, met een voorkeur voor passieve oplossingen, omdat de kans op disfunctionerende actieve oplossingen groter is en de effecten bij ouderen verregaander zijn.

De Adaptieve Comfort Standaard (ACS) van ASHRAE 55 en de ISSO 74 (Alpha) zijn de criteria die het meest overeen komen met de omstandigheden in woningen. Wel zijn er verschillen tussen de omstandigheden op kantoor en in de woning. Zo heeft het activiteitsniveau in woningen een grotere bandbreedte dan in een kantoor en varieert het meer in een korte tijd.



Naast een na te streven temperatuurgebied binnen een bandbreedte in een woningen is het van groot belang zinvolle adaptatiemogelijkheden te hebben en dat het binnenklimaat voorspelbaar is (in zekere mate het weer volgen). Ook dient er voldoende variabiliteit in de woning te zijn (warmere en koelere ruimtes), evenals variatie in de tijd ('s morgens koeler dan 's middags) .

In de VS wordt voor woningen in Californië een aangepaste versie van de adaptieve richtlijn van ASHRAE 55 gebruikt:

1. Het binnenklimaat dient te voldoen aan de grenzen voor 80% acceptatie zoals vastgelegd in de ACS van ASHRAE Standard 55.
2. Indien niet aan de waarden van de ACS van ASHRAE Standard 55 kan worden voldaan moeten de bewoners de beschikking hebben over *beide* van de volgende opties:
  - a. Adaptieve mogelijkheden:
    1. verplaatsen naar een locatie met andere thermische omstandigheden
    2. veranderen van de luchtsnelheid (raam openen, plafond ventilator gebruiken)
    3. Setpoint van de nachtventilatie aanpassen
  - b. Mechanische koeling gebruiken.

### 2.3. Voorstel adaptieve richtlijn voor woningen

Een richtlijn voor thermisch comfort (in woningen) zou niet alleen een temperatuurgebied of temperatuurgrens moeten hebben, maar ook criteria voor verschillende vormen van adaptatie.

De meeste onderzoeksgegevens voor thermisch comfortcriteria zijn de afgelopen jaren verzameld in kantoorgebouwen, waarbij onderscheid werd gemaakt tussen gekoelde en niet gekoelde gebouwen. De data voor niet gekoelde gebouwen komen het meest overeen met de omstandigheden in woningen. Veel beter dan de omstandigheden waarin de PMV-PPD-index is ontwikkeld. In woningen zijn de adaptieve mogelijkheden echter vaak groter dan in kantoren, dus is de verwachting dat de grenzen voor woningen nog iets ruimer liggen, dan in kantoren. Daarom wordt voorgesteld de adaptieve grenzen aan te houden die volgen uit internationaal veldonderzoek, maar hier wel enkele voorwaarden aan te verbinden.

De richtlijn is dan als volgt:

- A. Het binnenklimaat moet in principe voldoen aan de grenswaarden van figuur 1.

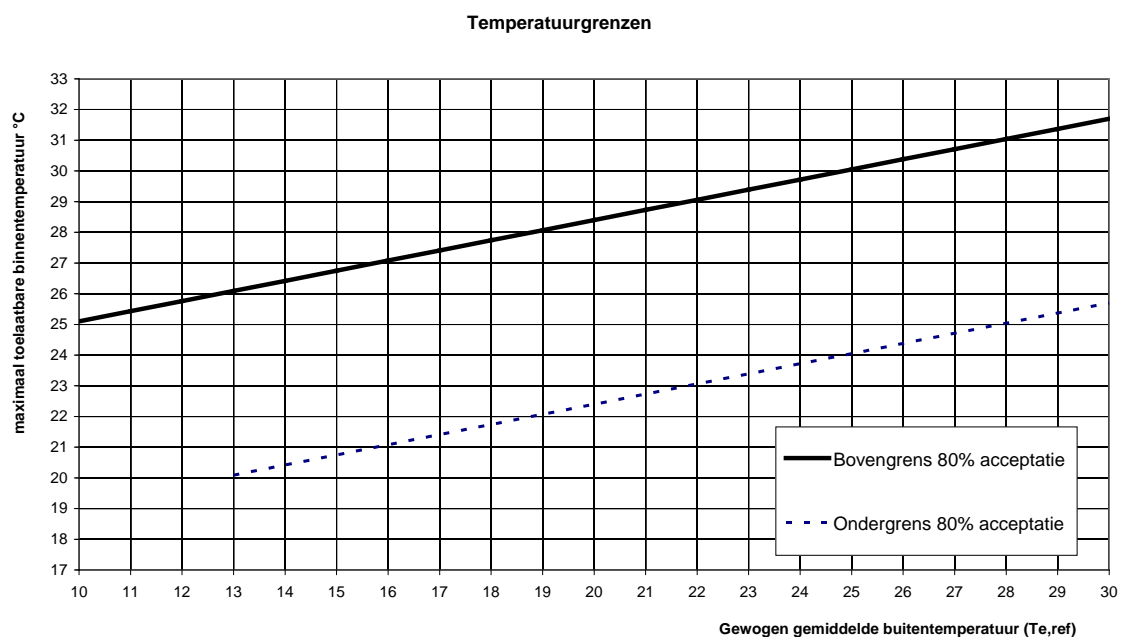
Incidentele overschrijdingen van de grenswaarden zullen altijd optreden en kunnen worden toegelaten, omdat deze temperaturen door de bewoners worden geaccepteerd en gecompenseerd, afhankelijk van de adaptieve mogelijkheden die de bewoners ter beschikking hebben. De volgende richtwaarden voor de overschrijdingsduur kunnen worden aangehouden<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> De richtwaarden voor overschrijdingen zijn beperkt gebaseerd op onderzoeksresultaten, maar zijn gekozen mede op basis van ervaringen met binnenklimaatontwerp. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat

- B. In woningen waarin de bewoners beperkte adaptieve mogelijkheden hebben, mogen de grenzen maximaal circa 30 uur op jaarbasis worden overschreden.
- C. In woningen waarin de bewoners ruime adaptieve mogelijkheden hebben, mogen de grenzen maximaal 100 uur op jaarbasis worden overschreden.

Adaptieve mogelijkheden zijn bijvoorbeeld het naar eigen behoefte aan kunnen passen van kleding en metabolisme, het vrij zijn in het kiezen van een andere locatie in of buiten de woning, het openen van ramen en het gebruik van (plafond) ventilatoren.



*Figuur 1: Maximaal toelaatbare operationele binnentemperatuur voor een binnenklimaat in woningen, afhankelijk van de gewogen gemiddelde buitentemperatuur  $T_{e,ref}$ . De grenswaarden gelden voor een binnenklimaat dat niet mechanisch wordt gekoeld. (gebaseerd op NEN-EN 15251, 2007).*

Op de verticale as is de operationele binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).

Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven.

De relatie tussen de door gebouwgebruikers verwachtte en acceptabele binnentemperatuur (in niet-gekoelde gebouwen) en de buitentemperatuur wordt weergegeven met de ‘running mean outdoor temperature’,  $T_{rm}$ , waarbij de gemiddelde dagtemperaturen worden gewogen op basis van de tijd tot vandaag.

$$t_{rm} = (1 - 0,8) \cdot \{t_{od-1} + 0,8 \cdot t_{od-2} + 0,8^2 t_{od-3} \dots\} \quad (1)$$

---

overschrijdingen van de grenswaarden met circa 1K in de regel door de bewoners niet zullen worden opgemerkt.

$t_{od-1}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren  
 $t_{od-2}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum eergisteren  
 $t_{od-3}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum eereergisteren  
 $t_{od-4}$  = etc.

of:

$${}_n t_{rm} = (0,2) \cdot t_{od-1} + 0,8 \cdot {}_{n-1} t_{rm} \quad (2)$$

${}_n t_{rm}$  = de 'running mean outdoor temperature' op dag n, en  ${}_{n-1} t_{rm}$  die van de dag ervoor.  
 $t_{od-1}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren

De grenzen gelden voor een gewogen gemiddelde buitentemperatuur van 10°C tot 30°C voor de bovengrens en voor 13°C tot 30°C voor de ondergrens. Beneden 10°C wordt voor het verwarmingsseizoen de bovengrens uit NEN-EN 15251 aangehouden (26°C) en beneden 13°C wordt voor het verwarmingsseizoen de ondergrens uit NEN-EN 15251 aangehouden (20°C).

### 3. Samenvatting literatuurstudie

De belangrijkste conclusies van de bestudeerde literatuur worden hieronder puntsgewijs samengevat:

#### **Thermisch comfort – algemeen**

- Jaarlijks onderzoek van de Building Owners and Management Association in de Verenigde Staten geeft aan dat klachten over warmte en koude al jaren in de top twee van klachten in gebouwen staan. Dus kennelijk lukt het met de enorme inspanningen op het gebied van gebouw- en installatieontwerp niet om gebouwgebruikers tevreden over de temperatuur te krijgen (Stoops, 2004).
- De mens is evolutionair gezien een “buiten dier”. Pas sinds ongeveer de laatste 100 jaar van de 3 miljoen jaar leeft de mens overwegend binnen (Baker, 2004).
- Als gevolg van de beperkingen van een in de klimaatkamer ontwikkeld rekenmodel is het binnenklimaat in grote delen van de wereld het zelfde en stabiel, terwijl uit veldonderzoek blijkt dat mensen, geografisch, cultureel en in de tijd, verschillende temperaturen prefereren (Shove, 2004).
- De huidige criteria voor thermisch comfort worden door ontwerpers en ingenieurs meestal zoor waar aangenomen, omdat ze gebaseerd zijn op fysische uitgangspunten. Fysica wordt door velen gezien als de meest pure vorm van wetenschap. Het berekenen van thermische behaaglijkheid met behulp van een formule is veel acceptabeler dan rekening houden met medische, sociale en psychologische invloeden, zelfs als de formule resultaten geeft die niet overeen komen met de menselijke perceptie (Stoops, 2004).
- Mensen verschillen, fysiologisch gezien, binnen en tussen verschillende sociale omgevingen en omdat gebouwen worden ontworpen om verschillende mensen te huisvesten is de het uitdaging om met deze variatie om te gaan bij het ontwerpen van gebouwen. De paradox is dat dit er juist toe heeft geleid het thermisch binnenklimaat in grote delen van de wereld hetzelfde is geworden en juist niet tegemoet komt aan de menselijke verschillen (Shove, 2004).

#### **Adaptatie, beïnvloeding en comforttemperatuur**

- Als mensen het binnenklimaat kunnen beïnvloeden door bijvoorbeeld het openen en sluiten van te openen ramen ligt hun neutrale temperatuur<sup>2</sup> dichter bij de gemiddelde omgevingstemperatuur. Hiermee wordt de bandbreedte waarbinnen mensen zich thermisch comfortabel voelen vergroot (Brager, 2004).
- Adaptatie is een fundamentele menselijke behoefte en het bieden van adaptieve mogelijkheden geeft een ruimer comfortgebied dan het gebied dat met “neutraal” wordt aangeduid (Nicol, 2001).
- De ervaren beïnvloedingsmogelijkheden in de natuurlijk geventileerde gebouwen veel groter dan in de geconditioneerde gebouwen (Hellwig, 2006).
- In de natuurlijk geventileerde gebouwen zijn de werknemers tevredener over de temperatuur dan in de mechanisch geventileerde gebouwen (Hellwig, 2006).

---

<sup>2</sup> De neutrale temperatuur is de operationele temperatuur waarbij een maximum percentage van de aanwezigen “neutraal” hebben gestemd op de 7-punts ASHRAE-schaal.

- Ook binnen een dag is het effect van adaptatie meetbaar, een temperatuur van bijvoorbeeld 25°C dat in de ochtend nog “enigszins warm” wordt genoemd is in de middag als “precies goed”. (Wagner, 2006).
- Adaptatie wordt voorgesteld als een continuüm, met aan de ene kant klimaatkamers en aan de andere kant de buitenomgeving. Daar tussen in zitten, na de klimaat kamer, centraal geregelde airconditioned ruimtes en vervolgens free running gebouwen (Nikolopoulou, 2004).
- Temperatuurstijgingen tot 1,5°C/uur worden niet opgemerkt. Het binnenklimaat hoeft dus niet stabiel te zijn (Brager, 2004).

### **Thermisch comfortmodellen en temperatuurcriteria**

- Het fysiologische model van Fanger is misleidend, omdat het geen rekening houdt met het dynamisch opslaan van warmte en geen rekening houdt met menselijk gedrag dat streeft naar adaptatie (Baker, 2004).
- Het gemodificeerde PMV-model van Mayer geeft voor mechanisch geventileerde gebouwen de beste voorspelling van het thermisch comfort (Hellwig, 2006).
- Het adaptieve model in ASHRAE 55 geeft voor natuurlijk geventileerde gebouwen de beste voorspelling van het thermisch comfort (Hellwig, 2006).
- Criteria voor thermisch comfort, zoals de ISO 7730, zijn gebaseerd op laboratoriumonderzoek dat tot doel had het minimaliseren van thermische onbehaaglijkheid voor een groep. De proefpersonen droegen dezelfde kleding, verbleven enkele uren in de klimaatkamer, deden dezelfde kunstmatige taken en waren gericht op het invullen van vragen over hun thermische sensatie. Er was geen contact met buiten, geen invloed van voorgaande ervaringen, geen werkstress, geen collega's, in feite bevonden de proefpersonen zich in een abstractie van de werkelijkheid (Stoops, 2004).
- Bij onderzoek wordt eerst gekeken naar discomfort, een individu is thermisch comfortabel als hij of zij het niet te warm of te koud heeft (aangegeven op de 7 punts- thermische sensatieschaal). Het is niet de temperatuur die wordt geprefereerd, maar de temperatuur waar men niet over klaagt. De criteria zijn dus ontworpen op het minimaliseren van het percentage ontevreden en niet op het maximaliseren van het percentage tevreden (Stoops, 2004).
- Mensen prefereren vaak een andere thermische omgeving dan neutraal op de ASHRAE-schaal (Humphreys, 2007).
- Voor de meerderheid van de onderzochte gebouwen, zowel natuurlijk geventileerd, als airconditioned, gaf de PMV een onjuiste waarde voor het comfort van de groep en was alleen in een smal gebied, rondom “thermisch neutraal” voldoende nauwkeurig (Humphreys, 2001).
- Wanneer er in een PMV-berekening rekening wordt gehouden de invloed van maatregelen die bewoners nemen, zoals het bedienen van ramen, zonwering, verhogen van de luchtsnelheid, het aanpassen van kleding, langzamer bewegen, koele dranken drinken, dan zien we dat deze zogenoemde “adaptieve stapjes” de comfortgrens verschuiven van 25°C naar circa 29°C (Baker, 1996).
  - Uit twee omvangrijke veldonderzoeken in voornamelijk kantoren en slechts enkele woningen zijn comfortgrenzen afgeleid die afhankelijk zijn van een lopend gemiddelde buitentemperatuur. Beide onderzoeken komen tot ongeveer

dezelfde temperatuurgrenzen (de Dear en Brager, 1998, Nicol en Humphreys, 2005).

### **Thermisch comfort in woningen**

- In woningen waar de bewoners op meerdere plaatsen kunnen verblijven (meerdere woonkamers, veranda, binnenplaats, dakterras, tuin) bleek dat het aantal uren dat een PPD van 20% wordt overschreden in een zomersituatie teruggebracht werd van 530 naar 115 uur. De PPD daalde van 66-67% naar circa 0% (Merghany, 2004).
- Slaapvertrekken zijn het gevoeligst voor discomfort. De comforttemperatuur ligt lager (thermofysiologisch) en de adaptieve mogelijkheden zijn beperkt. Slaapvertrekken dienen koeler te zijn dan woonvertrekken, hoeveel wordt niet aangegeven (Mayens, 2002).
- De bandbreedte van thermisch comfort in woningen is enorm en veel groter dan in kantoren. Zo bleek in Californische huizen de temperatuur “dragelijk” tussen 10 en 36°C (Ubbelohde, 2004).
- Tussen comfort en discomfort ligt een enorm “niemandsland” (Ubbelohde, 2004).
- De Adaptieve Comfort Standaard (ACS) van ASHRAE 55 komt het meest overeen met de omstandigheden in woningen. Op enkele aspecten wijken woningen af:
  - In een huis heeft het activiteitsniveau een grotere bandbreedte dan in een kantoor en varieert veel meer in een korte tijd.
  - De ACS is niet van toepassing op kinderen, ouderen en minder validen.
  - In een huis hebben we met een kleinere steekproef te maken dan in een kantoor, waardoor de thermische voorkeur veel meer kan afwijken van ACS.
  - De ACS richt zich meer op een steady state situatie, terwijl de thermische situatie in veel huizen veel dynamischer is.
  - De ACS geldt alleen voor natuurlijk geventileerde omstandigheden en niet voor het ACC huis in hete klimaatgebieden, waarin natuurlijke koeling gecombineerd wordt met een back-up airconditioning.
  - In woningen zijn de adaptieve mogelijkheden veel groter dan in kantoren door het aanpassen van kleding, activiteit, locatie en het openen van ramen en deuren (Ubbelohde, 2004).
  - Het “compressorloze” huis in de VS wordt desondanks ontworpen op basis van een aangepaste versie van de adaptieve richtlijn van ASHRAE 55 (Ubbelohde, 2004).

### **Temperatuurvariatie en gezondheid**

- Regelmatige lichamelijke inspanning verbetert de cardiovasculaire gezondheid. Het cardiovasculaire systeem wordt geregeld door het sympathisch autonome zenuwstelsel, evenals het thermoregulatiesysteem. De twee systemen zijn gerelateerd. In de medische wetenschap zijn er aanwijzingen dat ook stimulatie van het thermoregulatiesysteem een gunstig effect op de gezondheid heeft. Onze binnenruimtes zijn er echter zodanig geconditioneerd dat thermische stimulatie zo veel mogelijk wordt vermeden en we ons thermoregulatiesysteem zo min mogelijk oefenen (Stoops, 2004).

### **Ouderen**

- Ouderen ervaren de thermische omgeving anders dan jongeren als gevolg van fysiologische, gedragsmatige en psychologische verschillen (Van Hoof, 2006).

- Eenduidige eisen voor temperaturen voor ouderen zijn niet mogelijk (Van Hoof, 2006).
  - Tijdens de hittegolf in de Verenigde Staten in 1995 vielen er meer doden dan tijdens eerdere hittegolven, omdat mensen nu minder vaak verkoeling zochten in parken, zwemgelegenheden en andere natuurlijke afkoelingsmogelijkheden, maar binnen bleven en (onterecht) vertrouwden op de airconditioning. De grote pieken in energievraag leidden tot stroomuitval en zeer hoge binnentemperaturen.
  - Voor toekomstige woningen wordt gesuggereerd passieve, architectonische oplossingen te kiezen voor het beheersen van het binnenklimaat, aangevuld met technologische systemen in de vorm van automatisch sluiten van ramen, individuele temperatuurprofielen per kamer en airconditioning voor extreme weersomstandigheden (Van Hoof, 2006).

### **Buiten en tussengebieden**

Parken, terrassen, pleinen en tuinen worden intensief gebruikt bij temperaturen buiten de bandbreedte van het conventionele thermisch comfort model. De intensiteit van het gebruik van dergelijke buitenruimtes hangt van de mogelijkheden die de ruimtes bieden tot adaptatie van de gebruikers. Het werkelijke comfort blijkt veel groter te zijn dan het theoretisch berekende als gevolg van de vele beschikbare adaptatiemogelijkheden. (Nikolopoulou, 2004).

## 4. Samenvattingen literatuurbronnen

De samenvattingen zijn geselecteerd naar onderzoek dat zich richt op thermische behaaglijkheid in het algemeen, op onderzoek gericht op kantoren en op onderzoek dat zich specifiek op woningen richt. Hierbij moet worden opgemerkt dat kennis verkregen bij onderzoek in kantoren voor een deel ook bruikbaar is voor woningen, zolang de verschillen tussen kantoren en woningen op de juiste wijze worden onderkend.

### 4.1. Thermisch comfort algemeen

**N. Baker, “Human nature”, in *Environmental Diversity in Architecture*, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.**

Baker zet uiteen dat, hoewel de mens grotendeels binnen verblijft, hij evolutionair gezien een “buiten dier” is. Tot 15 generaties geleden, een te verwaarlozen periode op de evolutietijdschaal, verbleven mensen het grootste deel van de dag buiten. De vroege mens leefde buiten, zonder kleding en zonder hut. Door beschutting te zoeken in grotten, onder bomen of juist in de zon te zitten adapteerde de mens zich aan klimatologische variaties. Drie en een half miljoen jaar later, vlak voor de industriële revolutie, leefde onze voorouders nog steeds buiten. Het land bewerken, zaaien, oogsten, irrigeren, draineren, vissen, jagen, bomen zagen, hutten bouwen, het gebeurde allemaal buiten. Mensen bezaten intensieve kennis van weer, wind, bewolking, regen en temperatuur. Maar in ook woningen volgde de binnentemperatuur de buitentemperatuur, omdat ramen nog niet werden toegepast, er veel werd geventileerd omdat men op open vuren kookte en omdat de isolatie beperkt was. Vanaf de industriële revolutie werd er in toenemende mate binnen gewerkt en gewoond, maar tot halverwege de vorige eeuw was er een nauwe relatie tussen het binnen- en buitenklimaat. De uitvinding van koeling door Carrier was het begin van het ontstaan van een van de omvangrijkste industrietakken ter wereld. Airconditioning maakte het mogelijk het binnenklimaat vrijwel onafhankelijk van het buitenklimaat te maken. Rond 1970 heeft de techniek de natuur veroverd.

Veldonderzoek van de afgelopen 20 jaar laat zien dat thermische diversiteit niet alleen door de mens wordt getolereerd, maar juist ook wordt geprefereerd. Waarom wordt er dan nog uitgegaan van een optimale thermische omstandigheid. Waarschijnlijk omdat er een optimale thermische situatie kan worden voorspeld met behulp van een conceptueel eenvoudig fysisch thermodynamisch model. Het meest gebruikt is het model van Fanger dat uitgaat van een statisch model waarbij de warmtebalans op elk moment in evenwicht moet zijn. Iedere afwijking van de balans wordt door het model aangemerkt als niet neutraal (en leidt tot ontevreden). Dit is een misleidend uitgangspunt, de warmtebalans is erop gericht een evenwicht te behouden over langere tijd. Een toename van het metabolisme van 100% leidt pas na 40 minuten in een stijging van de lichaamstemperatuur van 1K.

De tweede omissie ligt op in het psychologische vlak en betreft de relatie tussen thermische sensatie en ontevredenheid. Deze relatie is onderzocht in een laboratorium,



waar de proefpersonen zich niet konden aanpassen door het veranderen van kleding, metabolisme, temperatuur of bijvoorbeeld het raam openen of sluiten. Door het afwezig zijn van deze adaptieve mogelijkheden is het thermisch comfort gebied onrealistisch beperkt.

Baker beschrijft enkele veldonderzoeken waaruit blijkt dat adaptieve mogelijkheden de bandbreedte waarbinnen mensen zich thermisch comfortabel voelen aanzienlijk vergroot. Een voorbeeld is een onderzoek waarbij zeven mensen gedurende enkele weken werden gevolgd bij het werken in een kantoor. In die periode verrichtten ze 345 adaptieve acties (ramen en zonwering bedienen, kleding aanpassen en op een nadere plaats gaan zitten). De gemiddelde geprefereerde temperatuur bedroeg 29,5°C, wat 5 K hoger dan berekend met het PMV-model. Onderzoek waarbij de thermische condities van mensen werden vergeleken liet zien dat mensen die buiten verblijven veel toleranter voor temperaturen zijn dan waanneer ze dezelfde temperaturen binnen ervaren. De auteur besluit met een pleidooi voor diversiteit in de omgeving (temperatuur, lucht, licht, geluid), waarbij adaptieve mogelijkheden een centrale rol spelen.

**J.L. Stoops, “A possible connection between thermal comfort and health”, Paper LBNL 55134, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2004.**

In dit artikel wordt de hypothese beschreven dat variatie in de thermische omgeving belangrijk is voor de gezondheid van mensen. Criteria voor thermisch comfort, zoals de ISO 7730, zijn gebaseerd op laboratoriumonderzoek dat tot doel had het minimaliseren van thermische onbehaaglijkheid voor een groep. De proefpersonen droegen dezelfde kleding, verbleven enkele uren in de klimaatkamer, deden dezelfde kunstmatige taken en waren gericht op het invullen van vragen over hun thermische sensatie. Er was geen contact met buiten, geen invloed van voorgaande ervaringen, geen werkstress, geen collega's, in feite bevonden de proefpersonen zich in een abstractie van de werkelijkheid. In veldonderzoek blijken mensen een ruimer gebied behaaglijk te vinden dan de criteria voorspellen. De auteur geeft aan dat onderzoek naar thermisch comfort merkwaardige kenmerken heeft. Comfort is een abstract begrip dat gerelateerd is aan begrippen zoals welzijn, behaaglijkheid, tevredenheid, etcetera. Bij onderzoek wordt eerst gekeken naar discomfort, een individu is thermisch comfortabel als hij of zij het niet te warm of te koud heeft (aangegeven op de 7 punts- thermische sensatieschaal). Het is niet de temperatuur die wordt geprefereerd, maar de temperatuur waar men niet over klaagt. De criteria zijn dus ontworpen op het minimaliseren van het percentage ontevreden en niet op het maximaliseren van het percentage tevreden.

De medische wetenschap heeft in de laatste decennia een duidelijk verband kunnen leggen tussen regelmatige flinke inspanning en cardiovasculaire gezondheid. Regelmatige inspanning is een kritische factor voor een gezond hart- en vaatstelsel, naast risicofactoren als voeding, lichaamsgewicht en roken. Tijdens de inspanning wordt een zekere mate van discomfort ervaren, maar na de inspanning wordt als gevolg van endorfine een kalm en tevreden gevoel ervaren. Het thermoregulatiesysteem wordt, evenals het cardiovasculaire systeem, geregeld door het sympathisch autonome zenuwstelsel; de twee systemen zijn gerelateerd. Bij een inspanning neemt het

metabolisme toe en wordt het cardiovasculaire systeem geactiveerd. De vrijkomende warmte wordt geregeld door het thermoregulatiesysteem. Er is echter geen medische overeenstemming dat het thermoregulatiesysteem geoefend moet worden voor een betere gezondheid. Feitelijk conditioneren we onze binnenruimtes juist zodanig dat discomfort zo veel mogelijk wordt vermeden en we ons thermoregulatiesysteem zo min mogelijk oefenen.

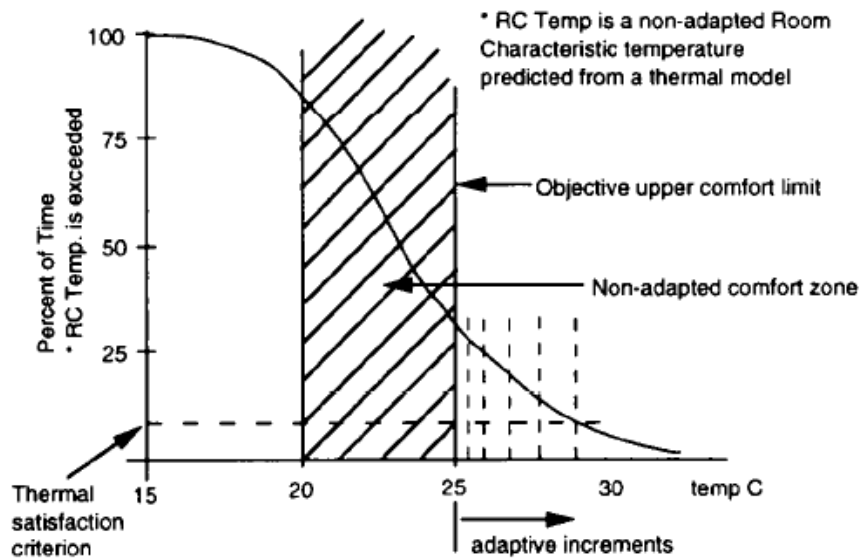
Jaarlijks onderzoek van de Building Owners and Management Association in de Verenigde Staten geeft aan dat klachten over warmte en koude al jaren in de top twee van klachten in gebouwen staan. Dus kennelijk lukt het met de enorme inspanningen op het gebied van gebouw- en installatieontwerp niet om gebouwgebruikers tevreden over de temperatuur te krijgen. Wanneer we op een andere manier kijken naar thermische tevredenheid en vakanties als voorbeeld nemen dan valt het op dat mensen vaak naar plaatsten met extreme thermische omstandigheden gaan. Veel mensen gaan naar landen waar ze onder hoge temperaturen verblijven en in de felle zon zitten. Om dat vol te kunnen houden trekken ze bijna alle kleding uit en moeten ze regelmatig in koel water om niet over verhit te raken. Anderen gaan in de winter hoog de bergen in en verblijven in dusdanige omstandigheden met zeer lage temperaturen en hoge windsnelheden dat onderkoeling gemakkelijk kan optreden. Veel culturen hebben tradities waarbij ze zeer hete en/of vochtige omstandigheden afwisselen met ijs koude dompelbaden. Voorbeelden zijn sauna, hamman, inipi, mushi-furo. Naast sociaal-culturele en spirituele redenen geloven vele beoefenaars dat de extreme temperaturen gezond zijn. De warmte zorgt voor een toename van de hartslag om warmte uit het lichaam te kunnen afvoeren.

Aan de andere kant weten we dat de huidige fysisch (fysiologische) thermische behaaglijkheidsmodellen het comfort in werkelijke omstandigheden niet kunnen verklaren en dat gebouwgebruikers vaak klagen over de temperatuur, de luchtkwaliteit en gezondheidssymptomen ervaren en toeschrijven aan het verblijf in gebouwen. Waarom zou het comfort en de gezondheid wel gediend zijn met het creëren van thermisch stabiele omstandigheden in gebouwen. Waarschijnlijk worden de huidige criteria voor thermisch comfort door ontwerpers en ingenieurs zo gemakkelijk geaccepteerd omdat ze gebaseerd zijn op fysische uitgangspunten. Fysica wordt door velen gezien als de meest pure vorm van wetenschap. Het berekenen van thermische behaaglijkheid met behulp van een formule is veel acceptabeler dan rekening houden met medische, sociale en psychologische invloeden, zelfs als de formule twijfelachtige resultaten geeft.

**N. Baker, M. Standeven, Thermal comfort for free-running buildings, Energy and Buildings, 23 (1996), 175-182.**

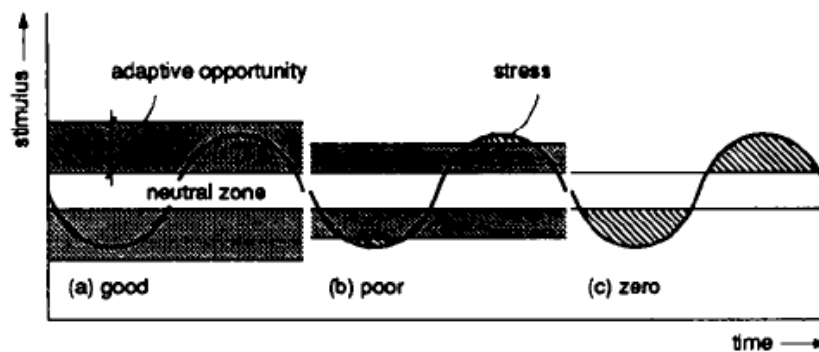
In dit artikel worden enkele thermisch comfort surveys samengevat, waarbij de nadruk is gelegd op adaptieve acties die mensen aanwenden om zich behaaglijk te voelen. Enkele constatering zijn dat mensen binnen een dag nauwelijks hun kleding variëren om zich thermisch behaaglijk te voelen, maar 75% van de onderzochte populatie geeft aan dat het weer en het binnenklimaat 's-ochtends bepalend is bij de keuze van de kleding. Daarnaast werd veelvuldig gebruik gemaakt van te openen ramen, deuren, ventilatoren en zonwering om zich thermisch behaaglijker te voelen. Bij toenemende

warmte werden er ook meer koude dranken gebruikt. Een blikje koude drank koelt het lichaam met circa 12W, wat leidt tot een verlaging van het metabolisme met 10% (PMV verandert van 0,59 naar 0,44). Daarnaast gaan mensen langzamer bewegen, wat leidt tot een verlaging van het metabolisme met 10%. In een PMV-berekening worden deze “adaptieve fouten” niet meegewogen. Wanneer er in een PMV-berekening echter wel rekening wordt gehouden de invloed van maatregelen die bewoners nemen, zoals het bedienen van ramen, zonwering, verhogen van de luchtsnelheid, het aanpassen van kleding, langzamer bewegen dan is zien we dat zogenoemde “adaptieve stapjes” de comfortgrens aanzienlijk kan verhogen (zie onderstaande afbeelding).



Figuur 6: Grafische weergave van het gebruik van adaptieve mogelijkheden.

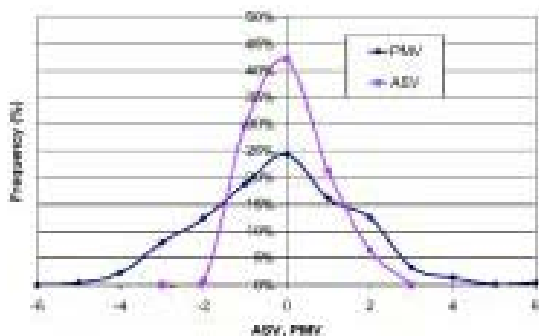
In figuur 7 wordt aangegeven fluctuaties van de temperatuur door een individu kunnen worden opgevangen door de neutrale zone te vergroten door “adaptieve mogelijkheden” te gebruiken. Wanneer de adaptieve mogelijkheden er niet zijn zal dit tot stress of ontevredenheid leiden.



Figuur 7: Het comfortgebied wordt uitgebreid boven de neutrale zone door adaptieve mogelijkheden.

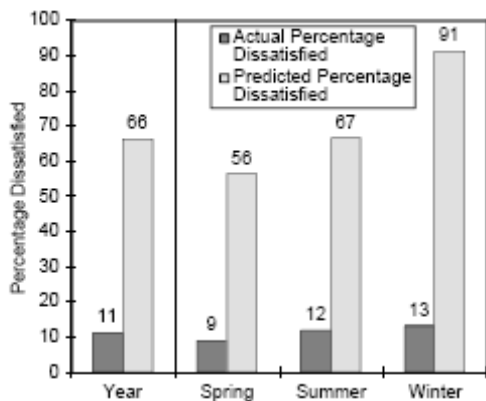
**M. Nikolopoulou, “Outdoor comfort”, in Environmental Diversity in Architecture, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.**

In dit artikel wordt het adaptatiegedrag van 1431 mensen onderzocht in het buitenklimaat en overgangsgebieden tussen binnen en buiten, met behulp van metingen en gedragsonderzoek. Het thermisch comfort van gebieden rondom gebouwen, beïnvloedt het gebruik dat mensen van die gebieden maken. Buitengebieden worden, thermisch gezien, niet vaak bij het (steden)bouwkundig ontwerp betrokken, terwijl ze een belangrijke rol vervullen bij de menselijke behoefte naar ontspanning, recreatie en communicatie. Conventionele thermische behaaglijkheidsmodellen gaan uit van een steady state situatie en het handhaven van de menselijke warmtebalans, waardoor de thermische waardering alleen afhangt van het activiteitsniveau en de kledingisolatie en daarmee een smalle temperatuurbandbreedte heeft. Toch worden parken, terrassen, pleinen en tuinen intensief gebruikt bij temperaturen buiten de bandbreedte van het conventionele thermisch comfort model. Uit onderzoek van de auteur blijkt dat de intensiteit van het gebruik van dergelijke buitenruimtes afhangt van de mogelijkheden die de ruimtes bieden tot adaptatie van de gebruikers. Wanneer het werkelijke thermisch comfort (ACV) wordt vergeleken met de berekende PMV dan blijkt het werkelijke comfort veel groter te zijn dan het theoretisch berekende (zie figuur 8).



*Figuur 8: Percentage frequentieverdeling van de voorspelde gemiddelde waardering percentage (PMV) en de werkelijke gemiddelde sensatie (ASV) .*

Uitgedrukt in percentage ontevreden is het werkelijke percentage ontevreden veel kleiner dan het voorspelde percentage (zie figuur 9).



Figuur 9: Vergelijking tussen het werkelijke percentage ontevreden (ASV) en het voorspelde percentage ontevreden (PMV).

Centrale rol in bovenstaande verschillen is adaptatie. Nikolopoulou onderscheidt verschillende soorten adaptatie:

- *Fysische adaptatie*. Dit zijn veranderingen die iemand aanbrengt in de omgeving om tegemoet te komen aan zijn of haar behoeften. Hierin maakt ze verder onderscheid in:
  - *Reactieve adaptatie*. Dit zijn persoonlijke veranderingen zoals het aanpassen van kleding en houding en het drinken van koude dranken ( $\pm 15\%$  verandering in metabolisme). Een andere vorm is het op een andere plaats gaan zitten. Dit is buiten een heel effectieve adaptatie, binnen is dit meestal niet mogelijk door het overwegende monotone binnenklimaat.
  - *Interactieve adaptatie*. Dit zijn aanpassingen aan de omgeving zoals het openen van ramen of bijvoorbeeld een parasol of uitvalzonwering.
- *Fysiologische adaptatie* of fysiologische acclimatisatie treedt alleen op in extreme klimaatomstandigheden.
- *Psychologische adaptatie*. Een fysische stimulus leidt niet bij iedereen tot dezelfde perceptie, maar is afhankelijk van de informatie die iemand op een bepaald moment heeft. Psychologische adaptatie beïnvloedt daarom de menselijke thermische gewaarwording op verschillende manieren:
  - *Natuurlijkheid* is een begrip dat aangeeft in welke mate een omgeving vrij is van kunstmatigheid.
  - *Verwachtingen*. Dit geeft aan hoe een omgeving zou moeten zijn in tegenstelling tot hoe het werkelijk is.
  - *Ervaringen*. Kortdurende ervaringen die in het geheugen zitten op een dagelijkse basis en langdurige ervaringen die in de menselijke “programmatuur” zitten.
  - *Blootstellingsduur*. Een kortdurende blootstelling aan een extreme temperatuur wordt als minder ernstig opgevat dan een langdurige blootstelling.
  - *Ervaren beïnvloeding*. Naarmate mensen meer invloed hebben op de omgeving worden grotere variaties en een groter temperatuurgebied geaccepteerd. Dit geldt

ook voor mensen de keuze hebben zelf hun tijd in te delen of naar een andere (werk)plek te gaan.

- *Omgevingsstimulatie*. Er worden steeds meer indicaties gevonden dat mensen een variabel klimaat boven een stabiel klimaat prefereren. Menselijke zintuigen zijn ontwikkeld om veranderingen waar te nemen in kleur, geur, licht, geluid en temperatuur. Opmerkelijk was dat de onderzochte mensen die in de zon zaten in de meerderheid in de uren daarvoor binnen hebben gezeten, terwijl mensen die in de schaduw zaten, daarvoor buiten zijn geweest. Volgens de auteur komt dit omdat de mensen hun zintuigen wilden stimuleren en warmte willen opslaan voordat zij weer in het monotone binnenklimaat moeten verblijven. De mensen die al langer buiten verbleven hadden deze behoefte minder. Dit zou ook een aanwijzing kunnen zijn dat warmteopslag, dat geen deel uitmaakt van het PMV-model, een belangrijke parameter kan zijn bij thermisch comfort.

Adaptatie wordt in dit artikel voorgesteld als een continuüm. Aan het ene einde van het continuüm zijn klimaatkamers en aan het andere einde de buitenomgeving. Daar tussen in zitten, na de klimaatkamer, centraal geregelde airconditioned ruimtes en vervolgens free running gebouwen. Op iedere plaats op dit continuüm vind men een andere frequentieverdeling van het werkelijke thermisch comfort en de PMV, afhankelijk van de adaptieve mogelijkheden.

De resultaten van dit onderzoek zouden voor het ontwerpen van ruimtes betekenen dat er meer mogelijkheden worden geboden voor psychologische adaptatie door bijvoorbeeld meer natuurlijkheid in het ontwerp, meer ruimtelijk, thermische variabiliteit, meer beïnvloedingsmogelijkheden.

**E. Shove, “Social, architectural and environmental convergence”, in *Environmental Diversity in Architecture*, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.**

Volgens de auteur verschillen mensen (thermo-) fysiologisch gezien, binnen en tussen verschillende sociale omgevingen en omdat gebouwen worden ontworpen om verschillende mensen te huisvesten is de uitdaging om met deze variatie om te gaan bij het ontwerpen van gebouwen. De paradox is dat dit er juist toe heeft geleid het thermisch binnenklimaat in grote delen van de wereld hetzelfde is geworden en niet tegemoet komt aan de menselijke verschillen. Plaatselijke- en seizoensinvloeden worden gladgestreken door het globale vertrouwen in gestandaardiseerde materialen, technologieën, ontwerprichtlijnen en binnenklimaatpecificaties. De ervaring van binnencondities en de daarmee samenhangende interpretatie van het begrip comfort convergeren nu mechanisch gerealiseerde, niet duurzame, energie-intensieve vormen van binnenklimaat de norm zijn geworden.

De auteur bespreekt drie contrasterende benaderingen van thermisch comfort. Ten eerste de benadering dat comfort altijd hetzelfde betekent en dat de mens een passieve ontvanger van stimuli is en dat de variabele, de relatie tussen lichaam en omgeving, gecontroleerd moet worden door de thermische omgeving. De tweede benadering ziet thermisch comfort juist als een actief proces in het streven naar thermische variatie. Sommigen gaan verder en spreken over “thermisch genot”. Hiermee wordt bedoeld het

lekker opwarmen in de zon of bij een kunstmatige warmtebron wanneer je het koud hebt. Het streven moet thermische variatie zijn in plaats van stabiele temperaturen. Tenslotte is er de thermische omgeving als sociaal bindmiddel, zoals het rondom de open haard of kampvuur vertoeven, het op een terras zitten of wandelen na een hete dag.

De airconditioningindustrie heeft zich volgens de auteur veel moeite getroost om een manier te vinden om te gaan met menselijke verschillen en het thermisch comfort te kwantificeren, op zo'n manier dat dit alleen kan worden gerealiseerd met mechanische methoden. Natuurlijk variërende condities voldeden niet meer aan de kwantitatieve criteria.

Een manier om verdere kennis over thermisch comfort te vergaren is meer onderzoek te doen naar variatie van het binnenklimaat en adaptatiemogelijkheden en dit proberen te kwantificeren. Het gaat hierbij dat om het vaststellen van de sociale en psychologische grenzen van comfort. Maar er zijn ook meer relativerende manieren om het onderwerp te conceptualiseren. In veldonderzoeken is gevonden dat mensen comfortabel zijn bij temperaturen van 31°C, maar ook bij 6°C. Verschillen die niet verklaard kunnen worden op basis van bijvoorbeeld kledingverschillen. In Zuid Europa wordt een seizoensverschil in comforttemperaturen gevonden van 5°C, terwijl in Noord Europa het verschil een halve graad is. Volgens de auteur zijn er sociale verschillen die tot verschillen in comforttemperatuur leiden. In plaats van te proberen om aan reeds bestaande behoeften te voldoen, kunnen omgevingen de behoeften juist creëren, "construeren van convergentie" genoemd.

Het ontwerp van bepaalde objecten wijst de gebruiker hoe de objecten gebruikt moeten worden, het geeft de gebruiker een 'script'. Zo laat bijvoorbeeld het ontwerp van een glazak alleen toe dat er glazen flessen en potten in worden gegooid, maar geen vensterglas. Geven gebouwen het goede 'script' aan de gebruikers als het gaat om (thermisch) comfort? Als de setpoint van de temperatuur in een gebouw bijvoorbeeld 22°C is, zullen de gebruikers zich hierop kleden en mentaal op instellen, zodat de meerderheid zich comfortabel zal voelen bij die temperatuur. Als alle gebouwen op deze manier geregeld worden in een bepaalde gemeenschap in een bepaalde periode in de geschiedenis, zal het de norm worden en andere temperaturen als niet comfortabel worden aangemerkt. Maar een andere generatie op een andere plaats kan minder kleding willen dragen en dus warmere omgevingen prefereren.

De vraag wordt gesteld of de huidige definitie en interpretatie van comfort gehandhaafd moet blijven. Deze lijkt vooral te zijn ontwikkeld om een wereldwijde markt voor airconditioning te creëren. Met de klimaatverandering in gedachten en de nieuwe inzichten betreffende adaptatie is een nieuwe benadering van het begrip comfort op zijn plaats.

**Chappells, H. and E. Shove, 2003. "An annotated bibliography of comfort research", Lancaster University, Department of Sociology.**

Het doel van de auteurs was om een inventarisatie te maken van hoofdthema's en vraagstukken in de discussie rond thermische behaaglijkheid en duurzaam bouwen.

Daarbij is niet alleen gebruik gemaakt van bronnen vanuit de klimaattechniek, maar ook vanuit niet-technische wetenschappen zoals sociologie, geografie, epidemiologie, antropologie, geschiedenis, fysiologie, architectuur en stedenbouwkunde.

De belangrijkste conclusies uit deze artikelen zijn:

- Adaptatie is een fundamentele menselijke behoefte en het bieden van adaptieve mogelijkheden geeft een ruimer comfortgebied dan het gebied dat met “neutraal” wordt aangeduid.
- Wanneer mensen de omgeving kunnen beïnvloeden hangt hun thermisch comfort beperkt samen met de (voorspelde) binnentemperaturen.
- Beleving van thermisch comfort wordt ook bepaald door adaptatie, materialen, psychologie, etc. Wat men ‘normaal’ vindt, verandert met de tijd.
- De beleving van thermisch comfort en verwachting in huizen wordt mede bepaald door welvaart, sociale en culturele ontwikkelingen.
- Mensen in slecht te verwarmen huizen hebben een grotere kans om te overlijden aan hart- en vaatziekten.
- Er is een ernstige misaanpassing tussen de bedieningsmogelijkheden van airconditioning en de behoeften van gebruikers.
- Bejaarden hebben een nauwer thermisch comfortgebied.
- Tegenwoordig vallen er meer doden bij een hittegolf dan vroeger.
- Tijdens de hittegolf in de Verenigde Staten in 1995 vielen er meer doden dan tijdens eerdere hittegolven, omdat mensen nu minder vaak verkoeling zochten in parken, zwemgelegenheden en andere natuurlijke afkoelingsmogelijkheden, maar binnen bleven en (onterecht) vertrouwden op de airconditioning. De grote pieken in energievraag leidden tot stroomuitval en zeer hoge binnentemperaturen.
- In de Verenigde Staten is airconditioning door het alledaagse gebruik van oplossing voor comfortproblemen tot onderdeel van het probleem geworden.

**Humphreys, M.A., Nicol, J.F., 2001, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. Moving Thermal Comfort Standards into the 21<sup>st</sup> Century, 5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> april 2001, Windsor, UK.**

Dit artikel beschrijft onderzoek waarin de auteurs aantonen dat de validiteit van het PMV-model ligt in het gebied tussen -0,5 en +0,5. Dat is een veel smaller gebied dan in de EN ISO 7730 wordt aangegeven. Geconcludeerd wordt dat de ISO 7730 in de huidige vorm niet kan worden gebruikt om thermische omstandigheden in gebouwen te specificeren.

De ASHRAE-database (de Dear, 1998), waarin 20.000 individuele comfortstemmen en corresponderende metingen van de fysische variabelen, is voor dit onderzoek gebruikt. Vervolgens zijn alleen die gegevens waarin de ASHRAE-stemmen tussen -2 en +2 liggen, geheranalyseerd. Zo bleven er 16.762 bruikbare observaties over.

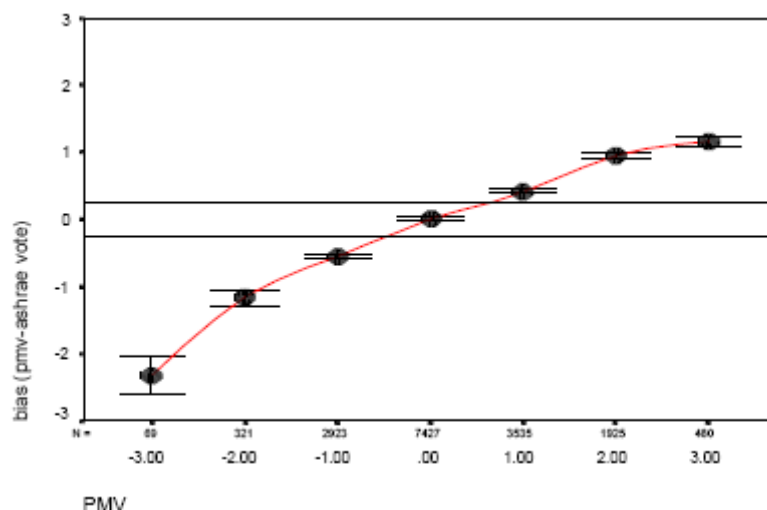
De PMV voorspelt niet precies het comfort van een individu, maar van een grote groep mensen die in dezelfde thermische omgeving verkeren, dezelfde kleding dragen en hetzelfde metabolisme hebben. Die situatie zal echter nooit optreden. Daarom werd de berekende PMV, per waarneming, afgetrokken van de overeenkomstige werkelijke



comfortstem. Hierdoor ontstonden er 16.762 bruikbare individuele discrepanties. De verdeling van een willekeurige subgroep van deze discrepanties zou een gemiddelde waarde moeten hebben van circa 0. Zijn standaarddeviatie zou het gezamenlijke resultaat moeten zijn van de individuele verschillen tussen mensen en van de fouten bij de bepaling van de PMV. De grootte van de discrepantie tussen de werkelijke stem en de berekende PMV is een maat voor de nauwkeurigheid van de PMV-voorspelling. Deze gemiddelde discrepantie is de voorspelde afwijking en de nauwkeurigheid van de afwijking wordt voorgesteld door de standaarddeviatie van de gemiddelde discrepantie. In theorie zijn er diverse factoren die bijdragen aan de discrepanties. Het kan gelegen zijn in aselechte verschillen tussen mensen die deel uit maken van een groep. De metingen en bepalingen van kleding en metabolisme kunnen random fouten bevatten, maar er zullen ook systematische fouten in instrumenten en tabellen en methoden hebben. De PMV is een benadering van het comfort, een gemoedstoestand, van een groep gebaseerd op een zeer complex fysisch, fysiologisch en psychologisch menselijk systeem. Het kan niet anders dan dat er menselijke processen, gedragingen en reacties niet in het model zijn opgenomen. Verder werkt het PMV-model als een statisch warmtebalansmodel, terwijl de warmtebalans in werkelijkheid steeds veranderd. Alle systematische fouten zijn onderdeel van de PMV-vergelijking en worden “vergelijkingsfout” genoemd.

De PMV-vergelijking maakt seizoensadaptatie niet mogelijk, behalve de invloed op de kledingsisolatie. Er is echter aangetoond dat de seizoensvariatie van de buitentemperatuur de perceptie van warmte bij mensen beïnvloedt.

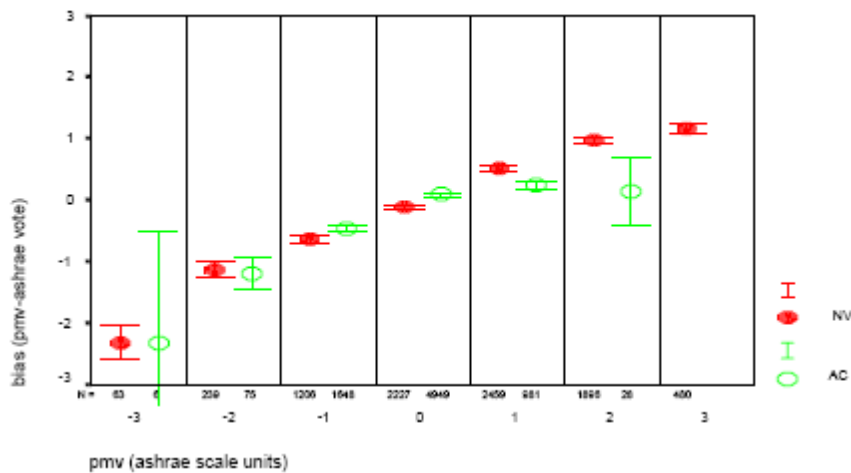
Wanneer het gecombineerde effect van de afwijkingen wordt onderzocht, ze kunnen random zijn en elkaar compenseren, dan blijkt er rond “neutraal” geen afwijking, maar de PMV overschat de warmte in warme omgevingen en onderschat de koude in koude omgevingen. (zie figuur 22).



Figuur 22: Afwijking van PMV vergeleken met waarderingen in ASHRAE database.

De afwijking is veel groter dan de vereiste  $\pm 0,25$  schaaleenheden, behalve in het beperkte gebied van  $\pm 0,5$ .

Figuur 23 laat de afwijking afzonderlijk zien voor airconditioned en natuurlijk geventileerde gebouwen. In koele omgevingen zijn de afwijkingen gelijk. Daarom mag niet worden geconcludeerd dat de PMV geen afwijkingen heeft bij airconditioned gebouwen. De PMV is intrinsiek niet correcter voor airconditioned gebouwen, maar de grotere nauwkeurigheid van de PMV in het voorspellen van de gemiddelde waarderingen van mensen in airconditioned gebouwen is toe te schrijven aan de lagere temperaturen die in die gebouwen voorkomen en aan de nauwere bandbreedte van thermische omgevingen in dergelijke gebouwen.



Figuur 23: Afwijking van PMV vergeleken met waarderingen in ASHRAE database, voor airconditioned en natuurlijk geventileerde gebouwen afzonderlijk.

De EN ISO 7730 geeft een geldigheidsgebied van  $\pm 2$  schaaleenheden. Uit de analyses blijkt echter dat de PMV slechts voor een zeer beperkt gebied geldig is.

#### *De validiteit van de PMV voor het voorspellen van de gemiddelde waarderingen van groepen*

Eerst is de data gegroepeerd naar de *plaats* waar het van afkomstig was (plaats, land, jaargetijde, type gebouw). De analyse liet zien dat bij 33 van de 41 groepen de PMV een afwijking vertoonde. Van 31 files was de discrepantie groter dan  $\pm 0,25$  schaaleenheden, 13 files hadden een discrepantie van meer dan  $\pm 0,5$  schaaleenheden en bij 5 files was de discrepantie meer dan  $\pm 1$  schaaleenheid.

Vervolgens is de procedure herhaald met de data gegroepeerd naar het *gebouw* waar de data van afkomstig waren, omdat er contextuele factoren, specifiek voor een gebouw, zouden kunnen zijn, die de comfortstemmen kunnen beïnvloeden. De analyses zijn uitgevoerd voor airconditioned gebouwen, natuurlijk geventileerde gebouwen en voor hybride gebouwen. Van de 41 natuurlijk geventileerde gebouwen hadden er 35 een afwijking van meer dan  $\pm 0,25$  schaaleenheden en 8 hadden een afwijking van meer dan  $\pm 1$  schaaleenheid. Van de drie hybride gebouwen had er 1 een afwijking van meer dan  $\pm 0,25$  schaaleenheden en 1 had een afwijking van meer dan  $\pm 1$  schaaleenheid. Van de 101 airconditioned gebouwen hadden er 63 een afwijking van meer dan  $\pm 0,25$  schaaleenheden. Dus voor de meerderheid van de gebouwen, zowel natuurlijk

geventileerd, als airconditioned, gaf de PMV een misleidende waarde voor het comfort van de groep.

**Arens, E., Huizenga, C., Zhang, H., 2001, “*Thermal Comfort Modelling for the 21<sup>th</sup> Century: breaking out of the Climate Chamber*”, Moving Thermal Comfort Standards into the 21<sup>st</sup> Century, Conference 5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> april 2001, Windsor, UK**

De auteurs beschrijven het tot stand komen van normen voor thermisch comfort. De ASHRAE Standard 55 en ISO 7730 zijn gebaseerd op onderzoek in klimaatkamers met uniforme testomstandigheden. De normen bevelen verder aan dat in de gebouwen ook uniforme omstandigheden heersen door grenzen te stellen aan verticale temperatuurgradiënt, stralingsveldasymmetrie, luchtsnelheden en temperatuurfluctuaties. Deze restricties komen niet voort uit de thermofysiologische modellen, maar zijn het resultaat van een zeer beperkt aantal onderzoeken in klimaatkamers. Uit veldonderzoek in echte gebouwen blijkt echter dat er niet-uniforme omstandigheden zijn waarvoor de normen onnodig beperkend zijn en ontwerpers dwingen energieverbruikende mechanische oplossingen toe te passen.

De consequenties van het toepassen van uniforme thermische omgevingen zijn:

- **Energiekosten.** Om aan de klimaatnormen te voldoen, dus een uniform binnenklimaat te realiseren, afhankelijk van de zonbelasting, de interne warmtelast, het variërende buitenklimaat is al snel een mechanische klimaatregeling nodig. Bij nauwe grenzen voor de thermische uniformiteit in tijd en ruimte zal de bijdrage van de luchtbehandelinginstallatie intensiever worden en neemt het energieverbruik dus toe.
- **Ontevredenheid gebruikers.** Hoewel een uniform binnenmilieu het doel is van de meeste gebouw/installatieontwerpen stellen uniforme omgevingen zelden alle gebruikers van gebouwen tevreden. Variatie in kleding, activiteit en persoonlijke verschillen geven een breed gebied van individuele comforteisen die minimaal 20% van de populatie buitensluiten bij iedere temperatuur binnen de comfortzone. De ASHRAE- en ISO-normen schrijven inderdaad een 80% tevredenheidsniveau voor. Bij andere diensten en producten wordt dat echter als een armzalig kwaliteitsniveau gezien.
- **Beperkingen op architectonische oplossingen.** Bepaalde ontwerpbenaderingen kunnen tot een lager energieverbruik en grotere gebruikerstevredenheid leiden, maar zijn moeilijk te realiseren met de huidige normen.

Mogelijkheden van niet-uniforme asymmetrische omgevingen zijn:

- **Minder uniforme benaderingen.** Binnentemperaturen kunnen fluctueren met de tijd, of er kunnen overgangsruimtes worden ontworpen waar het warmer of kouder is dan in andere ruimten omdat mensen daar andere behoeften hebben. Gebouwen die wat betreft temperatuur meefluctueren met het buitenklimaat hebben minder gezondheidsklachten dan hun geconditioneerde tegenhangers hoewel er minder goed aan de normen wordt voldaan. Daarnaast blijkt dat plaatselijk beïnvloedbare mechanisch geconditioneerde omgevingen (Personal Environmental Modules) zeer

gunstig worden beoordeeld door de gebruikers. Het tevredenheidsniveau ligt hierbij hoger dan de 80%-norm van ASHRAE en ISO.

- Ruimtelijke asymmetrische omgevingen. Plaatselijke omgevingsbeïnvloeding, stralingsverwarming/koeling, verdringingsventilatie en diverse vormen van convectieve koeling leiden allemaal tot een asymmetrische omgevingscondities die de gebruikers omgeven. Deze systemen creëren omgevingsgradiënten met als doel het creëren van comfortabele omgevingen. In een omgeving zoals een auto zijn deze gradiënten zeer stijl. Convectieve koeling van ventilatieroosters en geventileerde stoelen worden gebruikt om de warmte via de ramen en warmtestraling van de auto-oppervlakken te compenseren. In gebouwen bestaan deze gradiënten ook, zij het in mildere vorm, hoewel deze volgens de comfortnormen niet wenselijk zouden zijn. In gebouwen kunnen deze asymmetrische systemen met succes worden toegepast, zoals dwarsventilatie, plafondventilatoren, “Task Ambient Conditioning”, “Personal Environment Module”, “Climadesk”, met plaatselijk beïnvloedbare ventilatoren, “air jets” en stralingsbronnen.
- In tijd variërende omgevingen. Een variërend binnenmilieu kan worden toegepast om energie te besparen en gebruikerstevredenheid te vergroten.

Nieuwe rekenmodellen om thermische behaaglijkheid te voorspellen zijn dus noodzakelijk waarbij er aandacht moet zijn voor onder andere:

- In het adaptieve model van de Dear zijn psychologische effecten zoals het verwachte comfortniveau verwerkt. Een nieuw behaaglijkheidsmodel zou deze grotere tolerantie moeten kunnen dupliceren.
- Er zouden grenzen voor acceptabele huidtemperaturen voor verschillende lichaamsdelen bepaald moeten worden voor verschillende lichaamskerntemperaturen.
- Interacties tussen verschillende lichaamsdelen moet worden overwogen. Een warm lichaam bijvoorbeeld compenseert een koud gezicht, maar koude voeten compenseren op een andere wijze.

In een nieuw behaaglijkheidsmodel zijn uitsluitend luchttemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur, luchtsnelheid en vochtigheid onvoldoende om de omgeving te beschrijven. Gedetailleerde ruimtemodellen zijn nodig om oppervlaktetemperaturen te bepalen om de stralingsuitwisseling te berekenen, luchtsnelheden en luchttemperaturen om convectieve warmteafgifte te berekenen. Recent zijn er warmteuitwisselingscoëfficiënten ontwikkeld voor straling en convectie voor 16 verschillende lichaamsdelen. Het nieuwe Berkeley Comfortmodel is gebaseerd op het werk van Stolwijk in de jaren 60 en 70 en uitgebreid met onder andere:

- Uitbreiding van het aantal lichaamssegmenten van 6 tot oneindig
- Verbeterd bloedstromingsmodel, inclusief warmte-uitwisseling door terugstroming in de ledematen,
- Aanvulling met een kledinglaag voor zowel warmte als vochtweerstand.
- Toevoeging van warmte-uitwisseling door geleiding van oppervlakken in contact met het lichaam.
- Verbeterde warmteoverdrachtscoëfficiënten.

## 4.2. Thermisch comfort in kantoren

**G. Brager, G. Paliaga, R. de Dear. “Operable windows, Personal Control and Occupant Comfort”. ASHRAE Transactions 4695, RP-1161, 2004.**

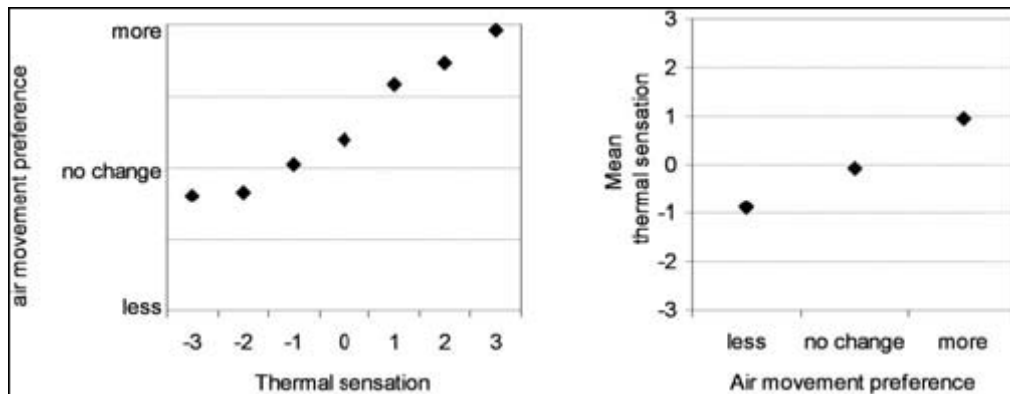
Een veldonderzoek in een natuurlijk geventileerd kantoor in het gematigde klimaat van Berkeley in de VS naar het thermisch comfort en gebruik van te openen ramen. Het onderzoek bestond uit uitgebreide fysische metingen en webgebaseerd vragenlijstonderzoek. Een van de achtergronden van dit onderzoek is de kennis uit de omgevingspsychologie dat de menselijke reacties op zintuiglijke stimuli veranderen wanneer mensen zelf invloed op de betreffende stimulus hebben. Met andere woorden, in zomerse omstandigheden accepteren en prefereren mensen zelfs hogere temperaturen als:

1. ze weten waarom het warmer is
2. ze hun warmtegevoel (voorspelbaar) kunnen beïnvloeden

Als mensen door betere beïnvloedingsmogelijkheden comfortabel zijn in een grotere bandbreedte dan bij de conventionele comfortcriteria, dan heeft dit gevolgen voor gebouwontwerp, thermisch comfort en energiegebruik.

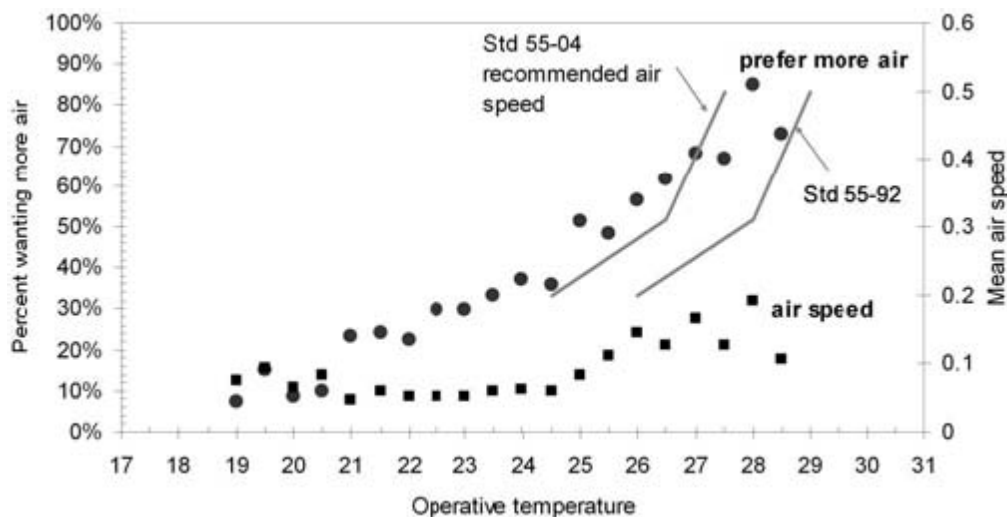
Door het gebouwontwerp en ruimte lay-out konden 2 groepen worden onderscheiden: een groep met beïnvloedingsmogelijkheden door middel van het bedienen van ramen en een groep zonder deze mogelijkheden. Enkele resultaten van dit onderzoek zijn:

- De neutrale temperatuur voor de gehele onderzochte groep in zomer en winter was gemiddeld 23.0°C.
- De thermische sensatie van de groep correleerde het beste met de operationele temperatuur:  $R^2=0,9$  in de zomer en 0,69 in de winter. De correlatie met de PMV was minder ( $R^2=0,82$  in de zomer en 0,60 in de winter).
- Naarmate de mensen aangeven het warmer te vinden wordt de behoefte aan hogere luchtsnelheden groter (zie Figuur 2). De hogere luchtsnelheden worden gebruikt om thermisch comfort te beïnvloeden.



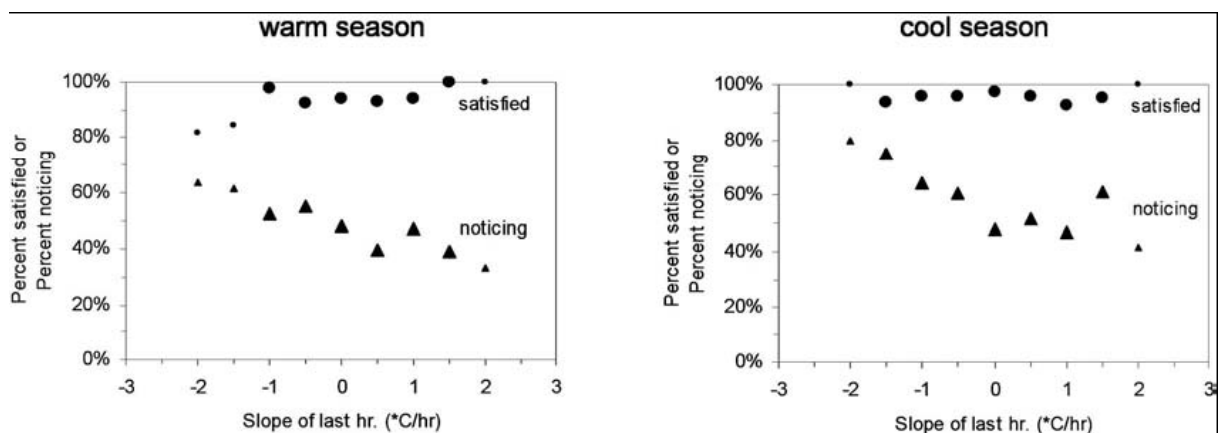
*Figuur 2: Relatie tussen gemiddelde voorkeur voor luchtbeweging en thermische sensatie.*

- Bij temperaturen boven circa 24,5°C zijn de gemeten gemiddelde luchtsnelheden hoger, maar een meerderheid van de mensen wil nog hogere luchtsnelheden (figuur 3).



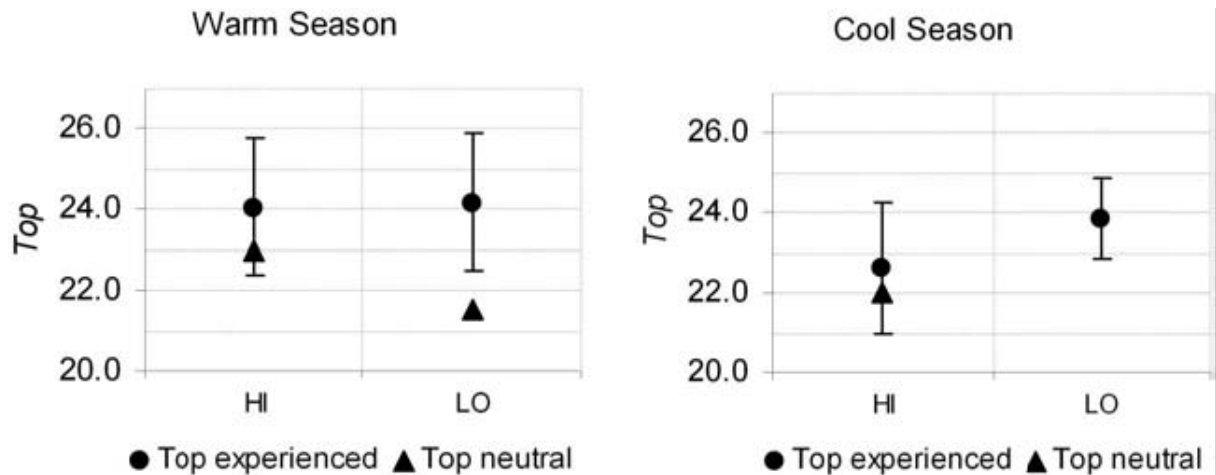
Figuur 3: Gemiddelde luchtsnelheden en percentage mensen die meer luchtbeweging willen als functie van de operationele temperatuur. De aanbevolen verhoogde luchtsnelheden voor zomercondities in ASHRAE Standards 55-1992 en 55-2004 zijn ter vergelijking aangegeven.

- Het binnenklimaat bleek dynamisch van karakter en de invloed van het weer bleek groter dan de invloed van de interne warmtelast. Temperatuurstijgingen werden niet opgemerkt tot 1,5° C/uur, hetgeen een bewijs is dat het binnenklimaat niet stabiel behoeft te zijn (figuur 4).



Figuur 4: Percentage mensen dat temperatuursveranderingen opmerkt en het percentage dat thermisch comfortabel stemt als functie van de grootte en richting van de temperatuurstijging.

- Uit figuur 5 blijkt dat in het warme seizoen mensen met veel en met weinig beïnvloedingsmogelijkheden in ongeveer dezelfde temperatuur van circa 24°C verblijven, maar dat mensen met veel beïnvloedingsmogelijkheden hun neutrale temperatuur hebben aangepast aan de ervaren temperatuur. In het koele seizoen ervaren de twee groepen verschillende temperaturen, maar de groep met beïnvloedingsmogelijkheden heeft de neutrale temperatuur aangepast tot heel dicht bij de heersende temperatuur.



*Figuur 5: Ervaren temperatuur vergeleken met de neutrale temperatuur bij mensen met veel (HI) en weinig (LO) beïnvloedingsmogelijkheden (“Top, experienced” is de gemiddelde operationele temperatuur van het voorafgaande uur).*

- Wanneer de afzonderlijke comfortparameters voor de “HI” en “LO” groepen worden vergeleken dan blijken deze zo klein dat er geen invloed op de menselijke warmtebalans kan worden vastgesteld. De verschillen in neutrale temperaturen van de 2 groepen is dus een maat voor de discrepantie tussen twee groepen die dezelfde thermische omstandigheden ervaren, maar verschillende mate van beïnvloeding over de omgeving hebben.

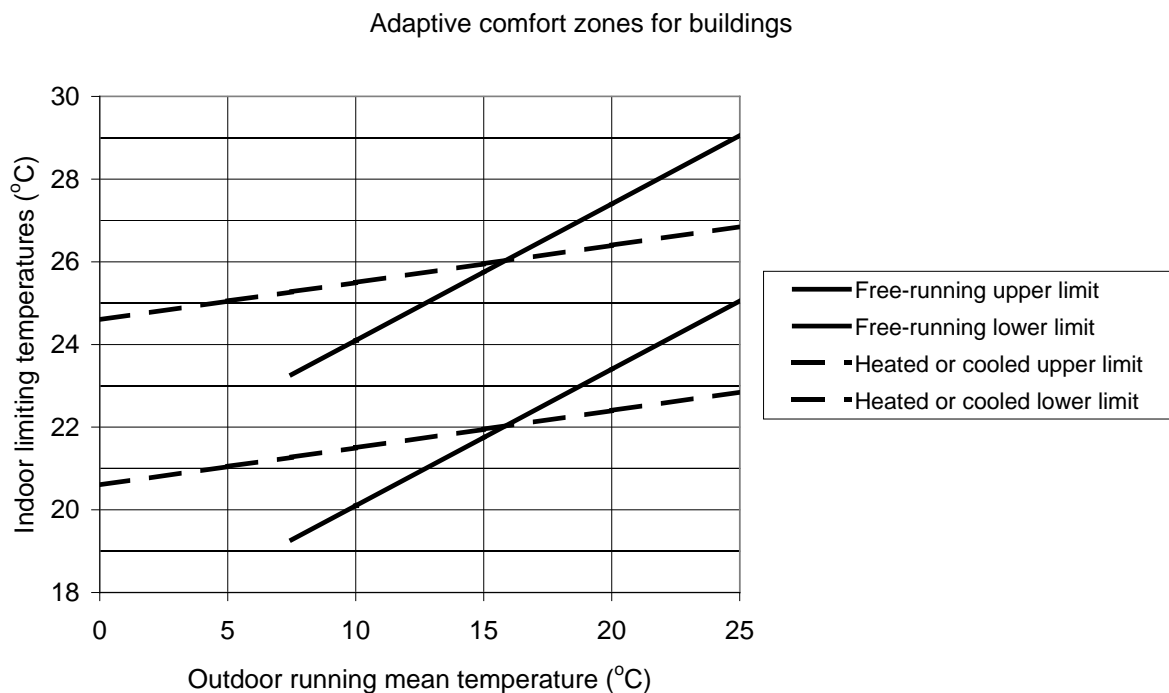
**Nicol, F., Humphreys, M., Adaptive comfort in Europe: results from the SCATs survey with special reference to free running buildings, Windsor 2006.**

In dit artikel wordt de adaptieve benadering van thermisch comfort besproken en worden de resultaten van Europees veldonderzoek behandeld. Op basis van deze resultaten worden nieuwe grenswaarden voor het thermisch binnenklimaat voorgesteld.

De auteurs betogen dat veldonderzoeken wellicht de “strengheid” van laboratoriumonderzoek missen, maar wel een directere relevantie tot werkelijke leefomstandigheden hebben. De adaptieve methode vereist geen kennis van kledingisolatie en metabolisme om het thermisch comfort te bepalen, maar gaat ervan uit dat mensen niet passief een thermische omgeving ondergaan. Zij nemen maatregelen om zichzelf comfortabel te voelen, zoals het aanpassen van kleding, metabolisme en het aanpassen van de omgeving. Mensen adapteren en wennen aan thermische omgevingen. Deze “gewoonte-” of comforttemperaturen hebben geen vaste waarden, maar veranderen langzaam door veranderingen in buiten- en binnentemperaturen onder invloed van klimaat en sociale gewoonten. Snel optredende afwijkingen van de huidige comforttemperaturen zullen tot discomfort en klachten leiden, terwijl vergelijkbare verschillen die geleidelijk over dagen en weken optreden nauwelijks opvallen en worden gecompenseerd door gedragsmatige en psychologische adaptatie.

Het onderzoek vond plaats in tussen 1998 en 2001 in 25 gebouwen in 5 Europese landen. Er werd onderscheid gemaakt tussen “free-running” en “verwarmde en gekoelde” gebouwen. In dit artikel werden alleen de free-running gebouwen verder geanalyseerd. Bij gekoelde gebouwen (zomer) en verwarmde gebouwen (winter) is het binnenklimaat in grote mate ontkoppeld van het buitenklimaat. In free running gebouwen is er een duidelijk verband tussen het binnen- en buitenklimaat buiten het verwarmingsseizoen. Dit is een andere indeling dan Brager en de Dear aanhielden in het RP884 onderzoek.

In figuur 11 worden de comfortzones aangegeven voor free-running verwarmde/gekoelde gebouwen uitgaande van de bandbreedte  $\pm 2^\circ\text{C}$  voor minimaal 80% tevredenheid.



Figuur 11: 80% comfort zones ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) voor “free-running” (getrokken lijnen) en verwarmde en gekoelde gebouwen (streepjes lijn).

Voor niet gekoelde of verwarmde gebouwen, zoals een woning of passief kantoorgebouw wordt de bovengrens nader bekeken. De vergelijking voor de bovengrens is:

$$t_{\text{comf}} = 0.33t_{\text{rm}} + 20.8$$

Deze lijn dient als bovengrens waarbij 80% van een populatie de temperatuur behaaglijk vindt.

In ons gematigd klimaat is de  $t_{\text{rm}}$  zelden hoger dan  $20^\circ\text{C}$ . Bij deze temperatuur is de maximale binnentemperatuur  $27,4^\circ\text{C}$ . Maar een langzame toename van deze temperatuur van 1K over een etmaal zal nauwelijks opvallen, terwijl een toename van 2K klachten kan geven. Op een normale zomerdag is de  $t_{\text{rm}}$  bijvoorbeeld  $15^\circ\text{C}$ , dit geeft



een maximale binnentemperatuur van 25,8°C die niet verder dan 1K mag worden overschreden.

In vroeger onderzoek werd de gemiddelde maandtemperatuur als uitgangspunt genomen voor de buitentemperatuur, maar belangrijke variaties vinden over veel kortere intervallen plaats. De adaptieve theorie geeft aan dat mensen reageren op basis van hun thermische ervaringen, waarbij de meest recentere ervaringen belangrijker zijn dan latere ervaringen. Daarom wordt de respons van mensen gekarakteriseerd door het lopende gemiddelde van de gemiddelde buitentemperaturen in het verleden, gewogen volgens de tijd.

$$t_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \{t_{od-1} + \alpha \cdot t_{od-2} + \alpha^2 t_{od-3} \dots\}$$

Daarbij is  $t_{od-1}$  de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de voorgaande dag en  $t_{od-2}$  is de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de dag daarvoor, etc.  $\alpha$  is een constante tussen 0 en 1 en legt de snelheid vast waarmee het lopende gemiddelde rangeert op de buitentemperatuur. Omdat een oneindige serie niet praktisch is stellen de auteurs onderstaande vergelijking voor:

$${}_n t_{rm} = (1 - \alpha) \cdot t_{od-1} + \alpha \cdot {}_{n-1} t_{rm}$$

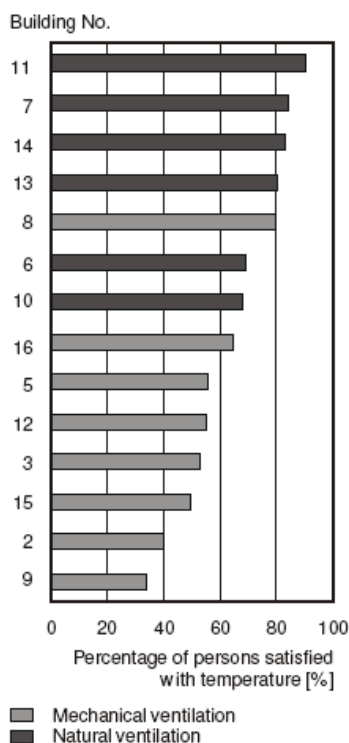
Daarbij is  ${}_n t_{rm}$  het lopende gemiddelde van dag n en  ${}_{n-1} t_{rm}$  van de dag daarvoor. Wanneer het lopend gemiddelde van een bepaalde dag is berekend, dan kan het direct voor de volgende dag worden berekend, etc.

### **R.T. Hellwig, S. Brasche, W. Bischof. Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning. Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006.**

Veldonderzoek in 14 Duitse kantoorgebouwen, waarvan 6 met natuurlijke ventilatie en 8 met mechanische ventilatie. In de gebouwen werden metingen van het thermisch comfort uitgevoerd en bouwfysische in installatietechnische eigenschappen van het gebouw vastgelegd. Een interview werd afgenomen bij een deel van de werknemers. Daarbij werd gevraagd naar tevredenheid met de thermische omgeving, maar ook naar de mate waarin de werknemers de werkomgeving konden beïnvloeden.

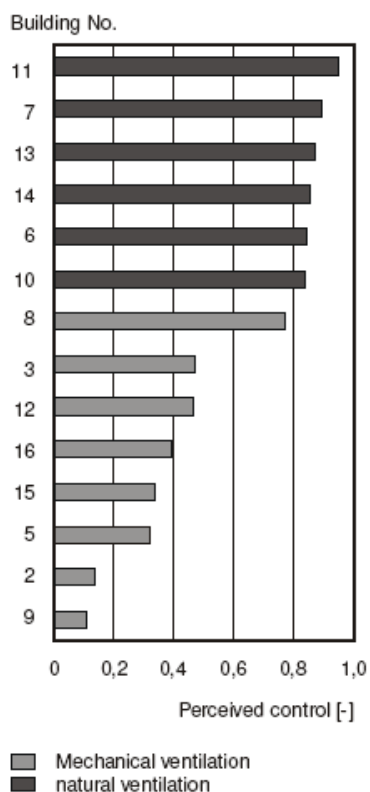
Bij de analyse van de data bleek er een opvallend verschil te zijn tussen de natuurlijk geventileerde gebouwen en de mechanisch geventileerde. In de natuurlijk geventileerde gebouwen zijn de werknemers tevredener over de temperatuur dan in de mechanisch geventileerde gebouwen (figuur12).

De werknemers werd ook gevraagd naar de mate waarin zij zelf de temperatuur en de luchtstroom in hun werkruimte konden beïnvloeden. Deze vragen werden samengevoegd tot één maat voor “ervaren beïnvloedingsmogelijkheden”, die 0 was indien men temperatuur en luchtstroom beide geheel niet kon beïnvloeden en 1 indien men beide geheel kon beïnvloeden.



*Figuur 12: Percentage personen dat tevreden is met de binnentemperatuur voor ieder gebouw (n=4400)*

Eén mechanisch geventileerd gebouw, nummer 8, kan zich wat betreft tevredenheid met de temperatuur en ervaren beïnvloedingsmogelijkheden meten met de natuurlijk geventileerde gebouwen. Dit gebouw wijkt af van de meeste andere mechanisch geventileerde gebouwen: het heeft te openen ramen, verwarming d.m.v. radiatoren en geen koeling.



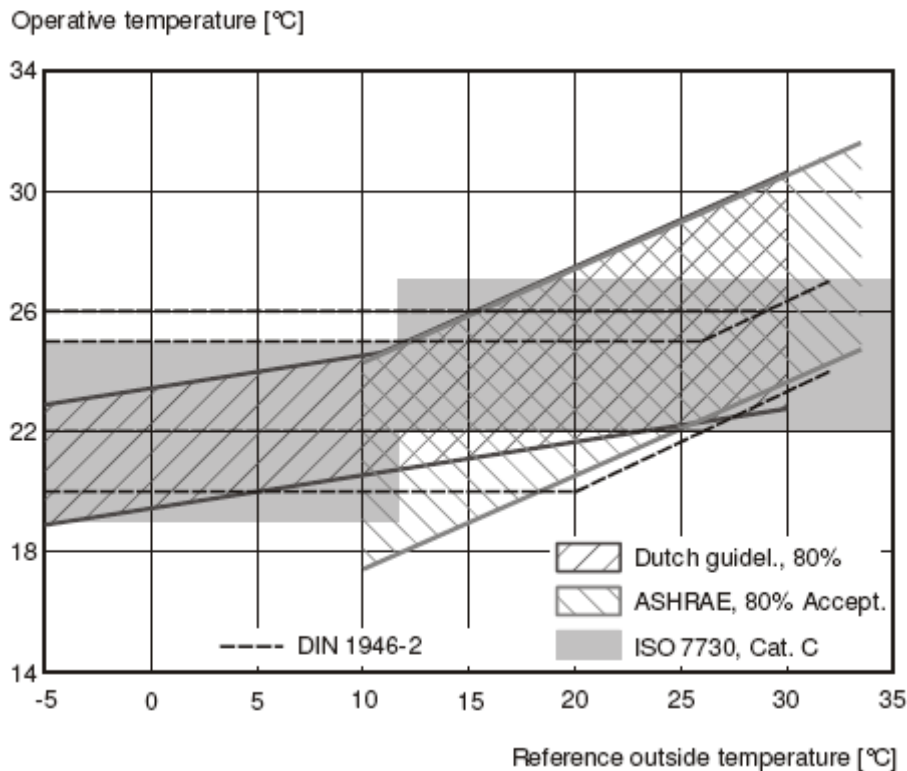
Figuur 13 laat zien dat de ervaren beïnvloedingsmogelijkheden in de natuurlijk geventileerde gebouwen veel groter zijn dan in de mechanisch geventileerde gebouwen. Het onderhoud van het ventilatiesysteem was zeer goed. Twee gebouwen, 2 en 9, scoren zeer laag op ervaren beïnvloedingsmogelijkheden en staan ook onderaan als het om tevredenheid met de temperatuur gaat. Dit zijn gebouwen met een gesloten gevel, zij hebben beide een all air-systeem, bij gebouw 9 aangevuld met inductie-units aan de gevel. Verder blijkt uit de beschrijving van gebouw 9 dat het om grote werkruimtes met een grote diepte gaat.

*Figuur 13: Gemiddelde waarde van de ervaren beïnvloedingsmogelijkheden voor elk van de onderzochte gebouwen. Natuurlijk geventileerd, gemiddelde: 0.87, Mechanisch geventileerd, gemiddelde 0.32. (n=4492).*

Op basis van ca. 1500 interviews en gelijktijdig uitgevoerde metingen werd nagegaan hoe goed de comforttemperatuur voorspeld wordt door de volgende vier benaderingen:

- ISO 7730 met  $PMV = 0$
- het model van Mayer, dat inhoudt dat het minimum aantal ontevredenen bij  $PMV = +0,4$  ligt, en dat dit minimum hoger ligt dan bij ISO 7730.
- het adaptieve model in ASHRAE 55
- het adaptieve model in ISSO 74

Het belangrijkste verschillen tussen ASHRAE 55 en ISSO 74 is dat de ondergrens van ISSO 74 de flauwere lijn van Bètagebouwen volgt (zie figuur 14) en dat daardoor de ondergrens in ISSO74 beneden een gemiddelde buitentemperatuur van circa  $18^{\circ}\text{C}$  strenger is dan van de ASHRAE 55 grenswaarden. Hierdoor vallen lagere binnentemperaturen onder zomerse omstandigheden buiten het toelaatbare gebied. Dit komt met name voor bij gebouwen met nachtkoeling.

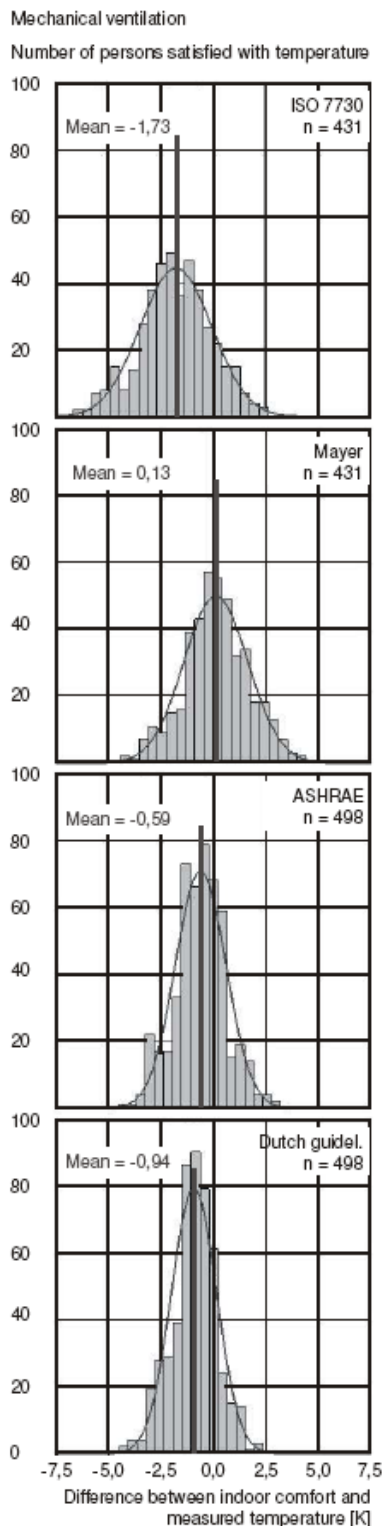


*Figuur 14: Vergelijking van de verschillende binnentemperatuurgrenzen afhankelijk van de referentie buitentemperatuur.*

Figuur 15 laat voor de mechanisch geventileerde gebouwen een vergelijking zien van de door de vier benaderingen voorspelde comforttemperatuur met de gemeten temperaturen die door de werknemers “comfortabel” genoemd werden. Hoe minder de “Mean” van 0 afwijkt, des te beter is de voorspelling. Het model van Mayer geeft voor mechanisch geventileerde gebouwen de beste voorspelling met een “Mean” van 0,13.

Voor de andere drie modellen wijken de gemeten waarden statistisch significant af van de voorspelde waarde.

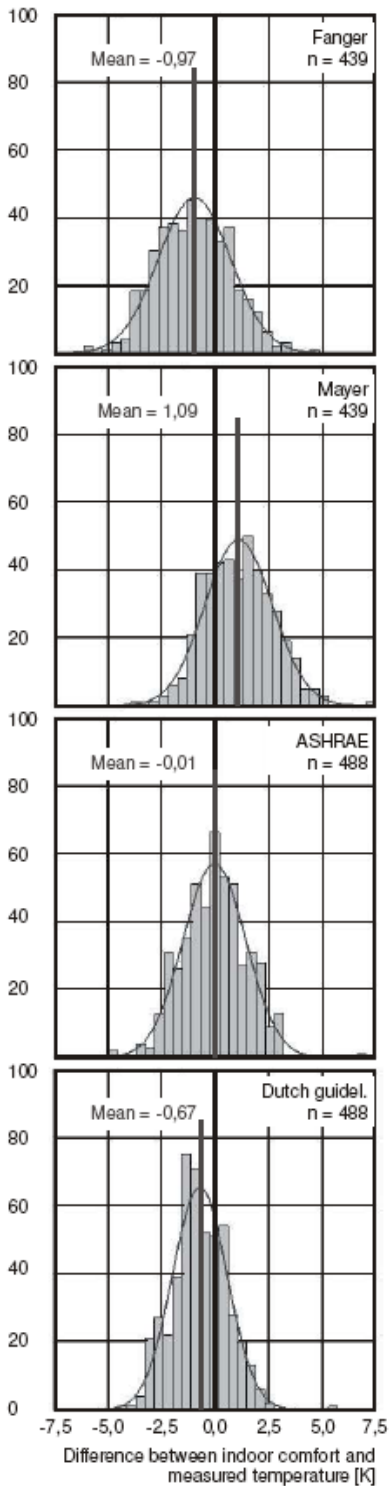
Figuur 16 laat voor de *natuurlijk* geventileerde gebouwen een vergelijking zien van de door de vier benaderingen voorspelde comforttemperatuur met de gemeten temperaturen die door de werknemers “comfortabel” genoemd werden. Het adaptieve model in ASHRAE 55 geeft voor natuurlijk geventileerde gebouwen de beste voorspelling met een “Mean” van 0,01. Voor de andere drie modellen wijken de gemeten waarden statistisch significant af van de voorspelde waarde.



*Figuur 15: Vergelijking van de voorspelde comforttemperatuur met gemeten temperaturen voor mechanisch geventileerde werkruimten die als comfortabel werden geclassificeerd door de gebruikers. De voorspelde comforttemperaturen werden bepaald volgens Fanger (ISO 7730), Mayer 1998, ASHRAE 55 en ISSO 74.*

Natural ventilation

Number of persons satisfied with temperature



*Figuur 16: Vergelijking van de voorspelde comforttemperatuur met gemeten temperaturen voor natuurlijk geventileerde werkruimten die als comfortabel werden geclassificeerd door de gebruikers. De voorspelde comforttemperaturen werden bepaald volgens Fanger (ISO 7730), Mayer 1998, ASHRAE 55 en ISSO 74.*

**Wagner, A., Moosmann, C., Gropp, T., Gossauer, E. “Thermal comfort under summer climate conditions – Results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany”, Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006.**

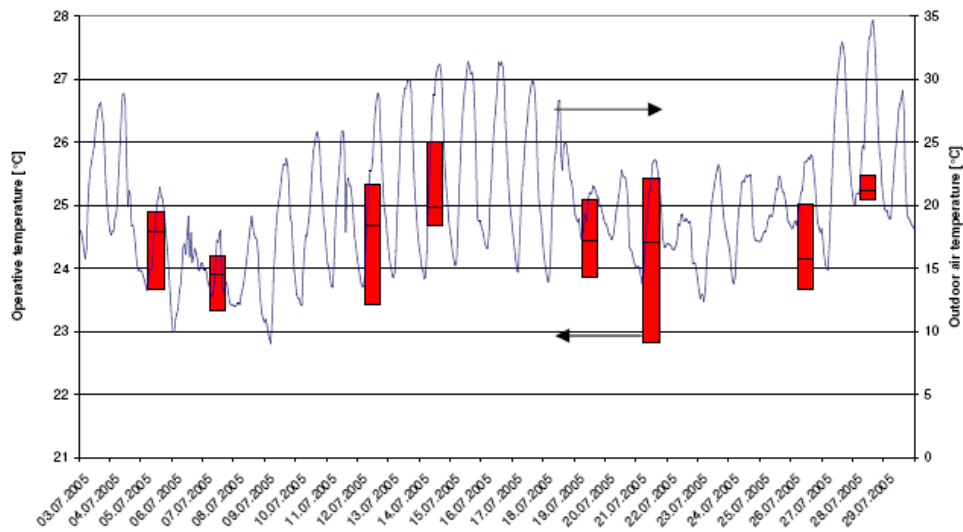
Een ander veldonderzoek richt zich op de samenhang tussen gemeten operatieve temperatuur en de tevredenheid met de temperatuur in een natuurlijk geventileerd kantoorgebouw in de zomer. Het gebouw bestaat uit een oudbouw zonder passieve koeling en zonder nachtventilatie en verlaagde, niet thermisch open, plafonds en een nieuwbouw, speciaal ontworpen voor laag energieverbruik, met passieve koeling, nachtventilatie en niet verlaagde betonnen plafonds. In de loop van een maand worden meerdere malen gelijktijdig oordelen gevraagd en metingen gedaan. De beoordeling van de temperatuur werd gevraagd op een schaal met de volgende categorieën:

- Heel warm
- Enigszins warm
- Precies goed
- Enigszins Koud
- Heel koud

De tevredenheid met de temperatuur werd gevraagd met de schaal:

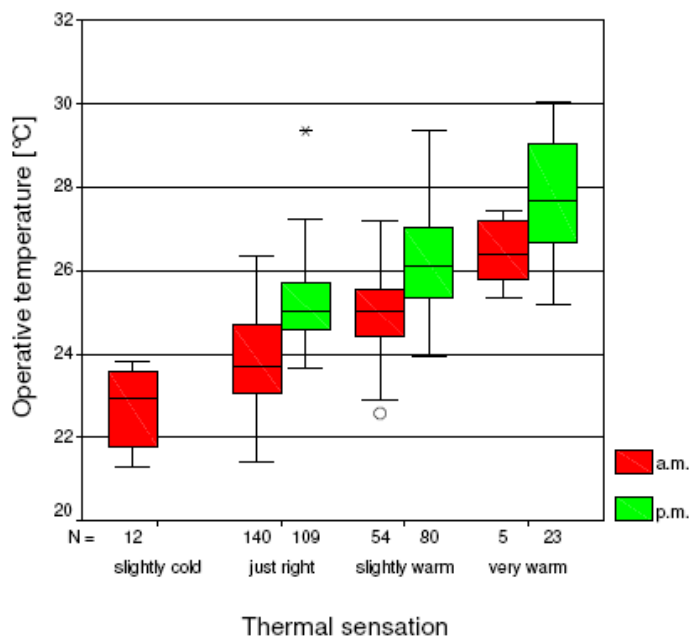
- Heel onbevredigend
- Enigszins onbevredigend
- Neutraal
- Redelijk bevredigend
- Heel bevredigend

Het temperatuurgebied dat als “precies goed” wordt beoordeeld hangt samen met de buitentemperatuur, zie figuur 17. Dit wijst erop dat een adaptief thermisch model de oordelen van de werknemers beter voorspelt dan het PMV-model. Bij toetsing blijkt dat ook zo te zijn: er is een significante samenhang tussen de beoordelingen van de temperatuur en de voorspellingen van ISSO 74 en vooral het adaptieve model in ASHRAE 55.



Figuur 17: Buitentemperatuur gedurende het onderzoek en de operationele binnentemperaturen die “precies goed” werden beoordeeld; de lijnen in de rechthoeken zijn de mediaanwaarden en de rode rechthoeken geven de gemiddelde 50% van de waarden.

Naast de mogelijkheid om in een natuurlijk geventileerd gebouw het comfort te beïnvloeden door de luchtstroom via de te openen ramen, speelt bij adaptief comfort in de zomer ook de verwachting en acceptatie van hogere binnen temperaturen een rol indien de temperatuur in de afgelopen periode hoger is en ook verwachting en acceptatie van hogere binnentemperaturen indien het gebouw niet mechanisch wordt gekoeld. Uit dit onderzoek blijkt dat het effect van verwachting zich ook *binnen* afzonderlijke dagen voordoet. Figuur 18 geeft een vergelijking van samenhang tussen de oordelen over de temperatuur en de operationele temperatuur in de ochtend en dezelfde vergelijking in de middag. In de middag worden dezelfde temperaturen als minder warm beoordeeld dan in de ochtend.



Figuur 18: Thermische sensatiestemmen in relatie tot de operatieve temperatuur. De rode rechthoeken geven de gemiddelde 50% van de waarden in de ochtenden, en de groene rechthoeken tonen de stemmen in de middag. (N=425)

Concreet betekent dit dat het temperatuurgebied rond de 25°C dat in de ochtend nog “enigszins warm” wordt genoemd (in de figuur de 3<sup>e</sup> rode band van links) in de middag als “precies goed” wordt beoordeeld (de 1<sup>e</sup> groene band van links). Het temperatuurgebied rond ongeveer tussen de 26 en 27°C dat in de ochtend nog “heel warm” wordt genoemd (de 4<sup>e</sup> rode band van links) wordt in de middag als “enigszins warm” beoordeeld (de 2<sup>e</sup> groene band van links). Dit lijkt erop te wijzen dat ook binnen de dag adaptatie een rol speelt, in elk geval in een natuurlijk geventileerd gebouw. Het feit dat in een natuurlijk geventileerd gebouw over het algemeen de temperatuur ’s middags hoger is, leidt tot verwachting en daardoor ook tot acceptatie van hogere temperatuur. Dit heeft belangrijke implicaties. Op de eerste plaats geeft het extra steun aan het belang van verwachting binnen adaptieve modellen. Op de tweede plaats biedt het wellicht bij verdere uitwerking hiervan in de toekomst de mogelijkheid om binnen een adaptief model de temperatuur in de ochtend en de middag apart te beoordelen. Mogelijk kunnen hiermee de mogelijkheden worden vergroot om zonder koeling een comfortabel thermisch klimaat te scheppen.

**Boerstra, A.C., Van der Linden, A.C., Raue, A.K., Kurvers, S.R. 2001, “Vooronderzoek Thermische behaaglijkheid in woningen – voorstel voorkomen oververhitting in woningen in de zomersituatie”. Novem BV, Utrecht, projectnummer 149.208.3420. 30 november 2001.**

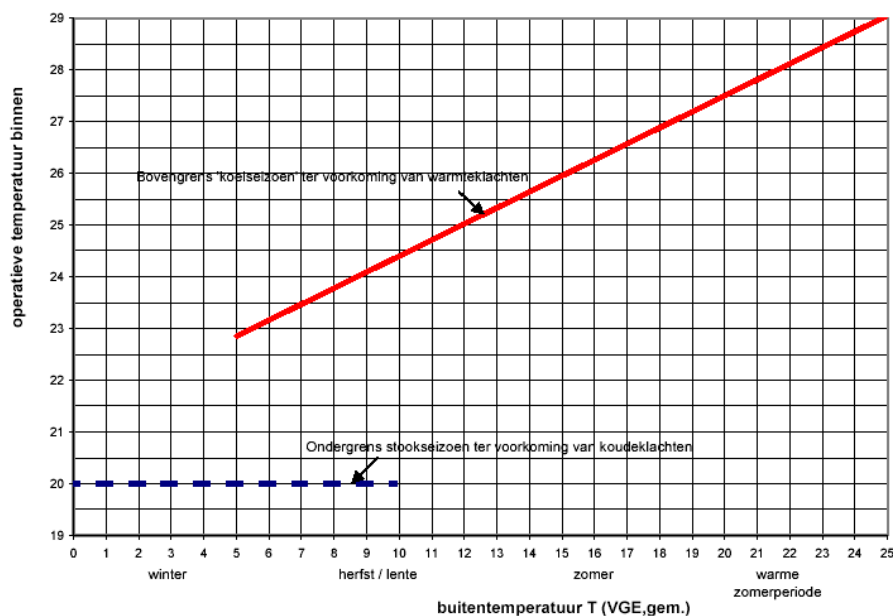
Deze publicatie is een voorstudie voor het vaststellen van thermische behaaglijkheidsgrenzen in woningen in de zomer.



De voorgestelde richtlijn is als volgt:

- Grenswaarde  $T_{op} = 17,8 + 3,5 + 0,31 * T_{VGE,gem}$
- $T_{VGE,gem}$  = gemiddelde buitentemperatuur (gemiddeld van het dagmaximum en dagminimum) op de betreffende dag, de dag er voor en de dag daarvoor (Vandaag, Gisteren, Eergisteren = VGE).
- De bouwprestatie is als volgt geclassificeerd:
  - ‘goed’ binnenklimaat als de bovengrens 0% van de tijd overschreden wordt
  - ‘voldoende’ als de bovengrens 0-10% van de tijd overschreden wordt
  - ‘niet voldoende’ als de bovengrens gedurende het koelseizoen meer dan 10% van de tijd overschreden wordt.

Er wordt voorgesteld deze eis zowel te laten gelden voor de woning als geheel (gemiddelde temperatuur) als voor de afzonderlijke kamers. Daarbij wordt opgemerkt dat dit vooral voor slaapkamers een probleem kan zijn omdat de literatuur aanleiding geeft om daar strengere eisen te stellen.

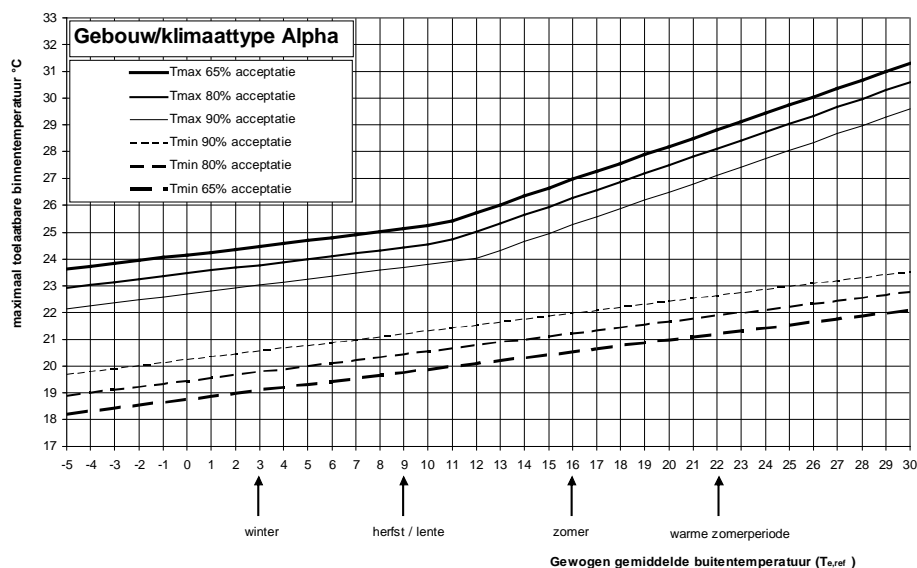


Figuur 20: Concept-richtlijn Novem 2001.

### **Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen, publicatie 74, ISSO, Rotterdam, maart 2004.**

Om de richtlijnen voor het thermisch binnenklimaat te verbeteren op het gebied van communiceerbaarheid en validiteit zijn onder begeleiding van ISSO nieuwe richtlijnen ontwikkeld waarbij rekening wordt gehouden met effecten van adaptatie. De richtlijnen zijn gebaseerd op grotendeels de zelfde literatuurbronnen als het bovenstaande onderzoek. Het resultaat van dit onderzoek is vastgelegd in ISSO-publicatie 74. De kern van de nieuwe richtlijn is dat er onderscheid wordt gemaakt tussen twee binnenklimaatstypes: Alpha en Bèta. Een Alphaklimaat is een binnenklimaat dat niet wordt gekoeld en in zekere mate meevarieert met het buitenklimaat, waarbij de aanwezige adaptatiemogelijkheden hebben, zoals te openen ramen. Een Bètaklimaat

echter is een binnenklimaat dat door middel van koeling wordt geregeld en waarbij de gebruikers weinig adaptatiemogelijkheden hebben. In figuur 21 worden de temperatuurgrenzen weergegeven voor de Alphaklimaten. Hierbij worden drie binnenklimaatklassen aangegeven waarbinnen 90%, 80% of 65% van de aanwezigen het thermisch binnenklimaat acceptabel vindt. Op de verticale as is de operationele binnentemperatuur weergegeven en op de horizontale as de buitentemperatuurindex  $T_{e,ref}$ . Deze  $T_{e,ref}$  is een gewogen gemiddelde van de maximale en minimale buitenluchttemperatuur van de beschouwde dag en 3 voorafgaande dagen. De 80% bovengrens is boven een  $T_{e,ref}$  van circa  $10^{\circ}\text{C}$  hetzelfde als de bovengrens van figuur 20.



*Figuur 21: Gebouw/klimaatype Alpha. Maximaal toelaatbare operationele binnentemperatuur voor een bepaalde acceptatie, afhankelijk van de buitentemperatuur  $T_{e,ref}$*

**Beek van, M., Adaptieve Temperatuurgrenswaarden - Praktijkonderzoek naar de nieuwe Nederlandse richtlijn voor de beoordeling van het thermische binnenklimaat in kantoorgebouwen, Afstudeerrapport TU Delft, augustus 2006**

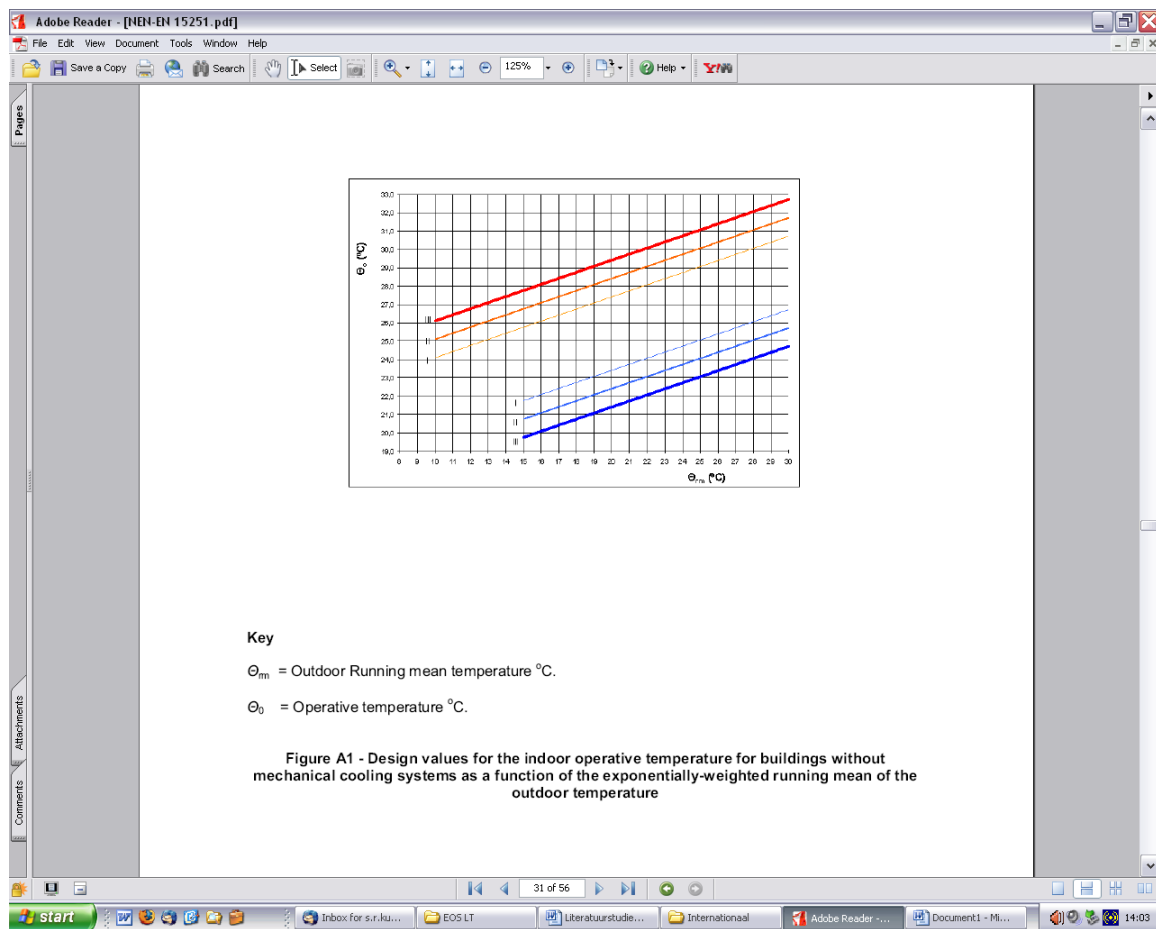
Afstudeeronderzoek op de Technische Universiteit Delft i.s.m. de Rijksgebouwendienst is een veldonderzoek uitgevoerd in 4 kantoorgebouwen om meer inzicht te verkrijgen in de ATG-methode. Voor de Rgd is dit van belang bij het formuleren en monitoren van de Prestatie- en Outputspecificaties bij het afsluiten van prestatiecontracten. In dit onderzoek zijn uitgebreide fysische metingen uitgevoerd en zijn de responsen en gedragingen van de gebruikers via internetenquêtes systematisch geregistreerd en zijn de ATG- en GTO-methode uitvoering met elkaar vergeleken.

Gebleken is dat de ATG-methode beter aansluit bij de comfortbeleving van de onderzochte personen dan de GTO-methode. Verder blijkt dat het gebruik van voorzieningen die op het binnenklimaat van invloed zijn vaak anders worden gebruikt dan wordt aangenomen bij simulaties. Ook is duidelijk geworden dat ISSO 74 nader moet worden onderzocht op de vragen in welke mate de ATG-bovengrenzen mogen of

moeten worden overschreden en de wijze waarop de klimaattypen Alpha en Bèta worden bepaald.

**NEN-EN 15251, Binnenmilieugerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energiestatistiek van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, NEN 2007.**

In deze norm wordt op basis van Europees onderzoek (Nicol, 2006) adaptieve temperatuurgrenzen aangegeven voor gebouwen *zonder* mechanische koeling. Woningen vallen nadrukkelijk ook onder deze norm. De grenzen liggen dicht bij de waarden die in het onderzoek van de ASHRAE zijn gevonden (Brager, 1998).



$$t_{rm} = (1 - 0,8) \cdot \{t_{od-1} + 0,8 \cdot t_{od-2} + 0,8^2 t_{od-3} \dots\} \quad (1)$$

- $t_{od-1}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren
- $t_{od-2}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum eergisteren
- $t_{od-3}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum eereergisteren
- $t_{od-4}$  = etc.

of:

$${}_n t_{rm} = (0,2) \cdot t_{od-1} + 0,8 \cdot {}_{n-1} t_{rm} \quad (2)$$

${}_n t_{rm}$  = de 'running mean outdoor temperature' op dag n, en  ${}_{n-1} t_{rm}$  is rmot van de dag ervoor.

$t_{od-1}$  = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren

Achtergronden en onderbouwingen van deze norm worden gegeven in [Olesen, 2007].

### 4.3. Thermisch comfort in woningen

**J. van Hoof, J.L.M. Hensen. "Thermal comfort and older adults", Gerontech Journal, March 2006, vol.4, no.4.**

Dit artikel is een overzicht van onderzoek betreffende thermisch comfort bij ouderen en een discussie over mogelijkheden voor het bevorderen van thermisch comfort bij ouderen. In de geïndustrialiseerde wereld zal in 2025 naar schatting 360 miljoen mensen 60 jaar of ouder zijn. Het merendeel wil onafhankelijk blijven wonen en de huidige levensstijl handhaven. De auteurs vonden de volgende (soms tegenstrijdige) informatie. Uit het artikel wordt niet altijd duidelijk of het laboratorium of veldonderzoek betreft.

- Inter-individuele verschillen in thermische sensatie zijn groter dan 1 schaaleenheid op de ASHRAE-schaal bij dezelfde omgevingscondities en individuele dag tot dag verschillen zijn ook circa 1 schaaleenheid. Daarom is het niet reëel om te veronderstellen dat iedereen comfortabel zal zijn in een centraal geregelde omgeving, ook als aan de huidige criteria wordt voldaan.
- De PMV is in niet geconditioneerde ruimtes niet in staat om het thermisch comfort aan de warme kant accuraat te voorspellen.
- Sommige onderzoeken vinden geen verschil in de perceptie van de thermische omgeving tussen ouderen en jongeren.
- Ouderen hebben een verminderde spierkracht, een lager metabolisme, een lager zweetvermogen, een beperkter intern warmtetransport en een verminderde cardiovasculaire stabiliteit.
- Ouderen prefereren een 2°C warmere omgeving dan jongeren en het comfortgebied van 20-24°C was niet warm genoeg voor ouderen.
- Oudere vrouwen hebben het warmer dan jongere vrouwen in de zelfde omgeving.
- Ouderen hebben dezelfde comforttemperatuur als jongeren, maar de kledingisolatie was lager.
- Ouderen die de temperatuur zelf kunnen beïnvloeden hebben dezelfde comforttemperatuur als jongeren.

Samenvattend stellen de auteurs dat ouderen de thermische omgeving anders ervaren dan jongeren als gevolg van fysiologische, gedragsmatige en psychologische verschillen en dat eenduidige eisen voor temperaturen voor ouderen niet mogelijk zijn.

Bij gebrek aan beter stellen de auteurs voor het PMV-PPD-model aan te passen. Voor toekomstige woningen wordt voorgesteld passieve, architectonische oplossingen te kiezen voor het beheersen van het binnenklimaat, aangevuld met technologische systemen in de vorm van automatisch sluiten van ramen, individuele temperatuurprofielen per kamer en airconditioning voor extreme weersomstandigheden.

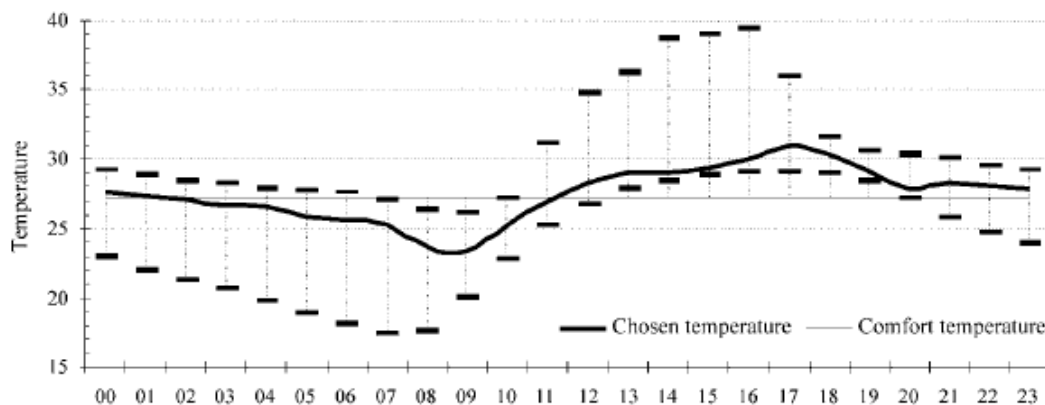
**Humphreys, M.A., 2005, “Do people want to feel ‘neutral’? – The complex behavior of the ASHRAE scale”.**

Acht mensen, in 6 bouwkundig zeer uiteenlopende huizen op klimatologisch verschillende plaatsen in het Groot-Brittannië, werd gevraagd het binnenklimaat te *beoordelen* op de ASHRAE-schaal gedurende een week in de zomer en een week in de winter. Bovendien werd hen steeds gevraagd welke thermische sensatie op de ASHRAE-schaal ze zouden *prefereren*. Met dataloggers werd ondertussen de temperatuur in hun huizen gemeten. Dit leverde 350 datapunten. Belangrijkste conclusies zijn:

- Men prefereerde vaak een andere thermische omgeving dan *neutraal*.
- Sommigen hadden een warmere voorkeur dan anderen.
- De geprefereerde sensatie hing niet af van de kamertemperatuur.
- De geprefereerde sensatie veranderde sterk met de thermische sensatie.
- De ASHRAE-schaal wordt niet eenduidig geïnterpreteerd. Bijvoorbeeld, “warm” heeft op verschillende momenten voor verschillende mensen een andere betekenis; het geeft soms comfort aan en soms juist discomfort. De ASHRAE-schaal is dus complex en niet eenduidig, waardoor het interpreteren moeilijk is.
- Men kreeg het goed voor elkaar de thermische omgeving aan te laten sluiten bij de geprefereerde sensatie.

**A. Merghany, “Exploring thermal comfort and spatial diversity”, in Environmental Diversity in Architecture, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.**

In landen met een heet en droog klimaat is het zich verplaatsen tussen verschillende ruimten in en rond een woning een van de meest gebruikte vormen van gedragsmatige adaptatie, mogelijk gemaakt door de grote variëteit in ruimtes in dergelijke, meestal traditionele gebouwen. Veel bewoners verplaatsen zich binnen deze gebouwen in zowel een dagelijks als in een seizoenspatroon, om zo voordelen te halen uit de verschillende microklimaten die in die gebouwen voorkomen. Dit onderzoek had tot doel de gevolgen te onderzoeken van adaptieve strategieën op de thermische tevredenheid, op de ruimtelijke indeling en energiegebruik van woningen. Hoewel dit onderzoek plaats vond in Khartoem, zijn de bevindingen tot op zekere hoogte bruikbaar en geven informatie over adaptatiemogelijkheden. Zo blijkt dat het aantal uren dat een PPD van 20% wordt overschreden in een zomersituatie teruggebracht wordt van 530 naar 115 uur, wanneer de bewoners zich vrij in een gebouw kunnen bewegen.



*Figuur 10 – De uurlijkse temperatuurgebieden die in het gebouw aanwezig waren en de temperatuur van de plaats die door de bewoner werd gekozen. Deze data laat zien dat de gebruiker, gegeven de mogelijkheden, probeert te adapteren aan hoge of lage temperaturen door te kiezen voor passende comfort omstandigheden.*

De gegevens laten zien dat de bewoners (bewust of onbewust) zich zoveel mogelijk in en rond het huis verplaatsen om het discomfort zo klein mogelijk te maken. De PPD daalde van 66-67% naar circa 0%. De onderzochte huizen hadden meerdere verblijfruimten, zowel binnen als besloten buitenruimten. Voorbeelden zijn een dakterras, een woonkamer met veranda op het westen, een woonkamer in een souterrain, een binnenplaats, veranda of dakterras om te slapen. Het zich verplaatsen binnen de woningen werd beperkt door praktische overwegingen, zoals werken, televisie kijken en socialiseren.

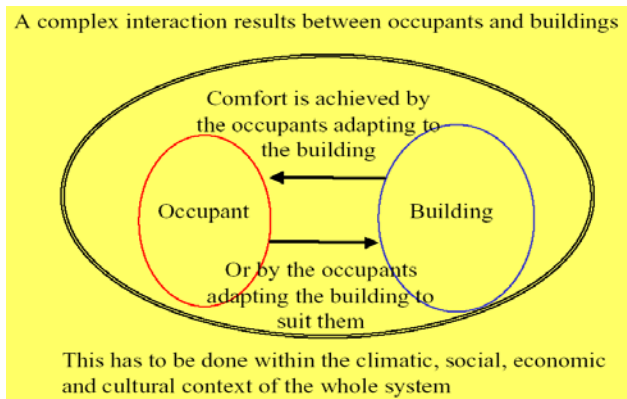
**Mayens, J., Janssens, A., Thermisch zomercomfort in natuurlijk geventileerde woningen, Bouwfysica, vol. 15, 2002, No4.**

Uit deze studie blijkt dat slaapvertrekken gevoeliger zijn voor thermisch discomfort dan woonvertrekken. Aan de hand van een literatuurstudie en computersimulaties zijn de verschillen tussen woon- en slaapkamers nader onderzocht. Het blijkt dat enerzijds de comforttemperatuur tijdens slaap waarschijnlijk lager ligt, onder andere door een daling van de lichaamstemperatuur en conflicten tussen thermoregulatie- en slaapmechanismen. Anderzijds komen er in slaapkamers meer temperatuuroverschrijdingen voor dan in woonkamers.

**Nicol, F. “Fitting buildings to people: comfort and health”, presentation at interdisciplinary meeting on heat waves, housing and health, 7<sup>th</sup> may 2004.**

In deze presentatie wordt de relatie tussen hittegolven, woningen en gezondheid besproken. Traditioneel onderzoekt de epidemiologie o.a. de relatie tussen (binnen)klimaat en gezondheid, terwijl de architectuur en bouwfysica naar de relatie

tussen mens en klimaat via het gebouw bekijkt. In feite is het een veel complexer 3-wegs verband, waarbij ook energie een belangrijke rol speelt. Thermisch comfort wordt bereikt door de bewoners die zichzelf aan het gebouw aanpassen en door het gebouw aan hun wensen aan te passen. Door voldoende aanpassingsmogelijkheden te creëren kan een ruim comfortgebied worden bewerkstelligd.



Figuur 19: Interactie tussen woongebouw en gebruikers .

**Arets, M.J.P., 2002, “Vooronderzoek Thermische behaaglijkheid bij woningen in de zomersituatie – Binnentemperatuur berekeningen”. TU Delft in opdracht van Novem.**

In dit onderzoek zijn simulatieberekeningen uitgevoerd op basis van een computermodel van een woning. De warmtebalans werd in de simulaties beïnvloed door de gebruikelijke (vaste en veranderlijke) warmtelasten. De simulaties zijn voor de zomerperiode uitgevoerd met alle mogelijke combinaties van de volgende variabelen:

- Type woning: tuinkamerwoning of twee-onder-één-kap-woning (Novem-referentiewoningen);
- Specifiek Werkzame Massa: 15 of 50 of 115 W/m<sup>2</sup>;
- Bewonersgedrag (vaste en variabele warmtelasten, openen en sluiten van ramen en deuren, zonwering open/dicht en in/uitschakelen van de verwarming) in drie verschillende profielen: laag (tweeverdieners), middel (jong gezin), en hoog (ouderen).

De resultaten van de simulaties zijn getoetst aan 4 grenswaarden: 25°C, 28°C, Alpha ATG 80% en Alpha ATG 90%. Enkele resultaten zijn:

- Bij alle berekeningen werden deze temperatuurgrenzen overschreden. Er waren minder, en minder grote, overschrijdingen van de adaptieve grenswaarden dan van de vaste temperatuurgrens van 25°C, maar meer dan van de grenswaarde van 28°C.
- Zontoetreding en bouwmassa hadden meer invloed op de resultaten dan gebruikswijze van de woning.
- De tuinkamerwoning was iets minder warm dan de twee-onder-één-kap-woning als gevolg van het kleinere glasoppervlak.

**M.S. Ubbelohde, G.M. Loisos, R. McBride, “Comfort Reports”, Attachment A-4, Davis Energy Group for The California Energy Commission, includes reports “Advanced Comfort Criteria on Adapted Comfort” and “Human Comfort Field Studies”. “Alternatives to Compressor Cooling Phase V: Integrated Ventilation Cooling”, februari 2004.**

Dit is een langjarig project met als doel het energiegebruik en de piekbelastingen te reduceren als gevolg van compressor airconditioningsystemen in woonhuizen door het ontwerpen van een huis waarin de bewoners zich zo thermisch comfortabel voelen dat ze niet, of in hete gebieden minder behoefte hebben aan compressie-koeltechnieken. Dit is het ACC-huis (Alternatives to Compressor Cooling). Naast het ontwikkelen en testen van een geïntegreerd verwarmings/ventilatie-koelings en airconditioningssysteem bestond het project uit een veldonderzoek in 50 woonhuizen, onderzoek naar comfortdefinities, een evaluatie van ontwerpprincipes en een voorstel van een geavanceerd comfort criterium voor woonhuizen.

Uit het veldonderzoek bleek dat de ideale ochtendtemperatuur circa 21°C was en de geprefereerde maximumtemperatuur 25,8°C. De dragelijke minimumtemperatuur was 18°C, met een range van 10-25°C en de dragelijke maximumtemperatuur was 28°C, met een range van 25-36°C. Mannen prefereerden een koelere omgeving dan hun vrouwen.

Nachtkoeling door het openen van ramen werd weinig gebruikt en dan bij voorkeur op de bovenverdieping. Veiligheid en verkeerslawaaai waren de voornaamste redenen voor het niet openen van ramen in de nacht.

De rapporteurs komen na uitgebreid onderzoek tot de conclusie dat het conventionele comfortmodel, het PMV-PPD-model, dat in de klimaatkamer is ontwikkeld, ernstige tekortkomingen heeft. Het ontwerpen met dit model verzekert geen optimaal thermisch comfort, terwijl er onnodig veel energie wordt verspild. Thermisch comfort blijkt een zeer grote variatie te hebben, afhankelijk van onder andere populaties, ervaringen in de tijd, sociale context, interactie met technologieën en als functie van hoe onderzoekers vragen stellen over comfort. Volgens de onderzoekers is er niet iets als een “ideale temperatuur”, maar is comfort “situationeel”. Ontwerpers moeten de nadruk verschuiven van een “ideale” naar “acceptabele” condities, met bijzondere aandacht voor verschillende ervaringen door alternatieven zoals verdampingskoeling, beschaduwing, stralingskoeling, etc.

Het Adaptieve Comfort Model (ACM) uit ASHRAE Standard 55 wordt besproken als mogelijk criterium voor het ACC-huis, maar enkele aspecten van de ACM sluiten niet goed aan bij het ACC-huis. Onderzoek waarop het ACM is gebaseerd zijn in kantoren uitgevoerd en kantoren verschillen van woningen. De op klimaatkamer gebaseerde comfortmodellen blijken in kantoren niet goed toepasbaar, maar in woningen zijn ze volslagen ontoereikend. Een huis verschilt op de volgende punten



van een kantoor als het gaat om de beleving van het thermisch comfort en de toepasbaarheid van de ACS:

- In een huis heeft het activiteitsniveau een grotere bandbreedte dan in een kantoor en varieert veel meer in een korte tijd.
- De ACS is niet van toepassing op kinderen, ouderen en minder validen.
- In een huis hebben we met een kleinere steekproef te maken dan in een kantoor, waardoor de thermische voorkeur veel meer kan afwijken van ACS. Bovendien kunnen de leden van een groep in huis sterk van elkaar verschillen en kan een dominant lid van de groep de thermische voorkeur van de anderen sterk beïnvloeden.
- De ACS richt zich meer op een steady state situatie, terwijl de thermische situatie in veel huizen veel dynamischer is.
- De ACS geldt alleen voor natuurlijk geventileerde omstandigheden en niet voor het ACC huis in hete klimaatgebieden, waarin natuurlijke koeling gecombineerd wordt met een back-up airconditioning.
- In woningen zijn de adaptieve mogelijkheden veel groter dan in kantoren door het aanpassen van kleding, activiteit, locatie en het openen van ramen en deuren.

Verder worden de volgende nuanceringen gemaakt betreffende comfortnormen in het algemeen:

- Er zijn afzonderlijke grenswaarden voor luchtsnelheden, stralingstemperaturen en temperatuursfluctuaties, maar het gecombineerde effect op het comfort is niet bekend, terwijl deze parameters wel op een positieve manier kunnen bijdragen aan de thermische performance van innovatieve passieve woningen.
- Comfortmodellen moeten niet worden gezien als “passief”, maar als “actief” en comfort niet als een “sensatie”, maar als een “doel” (achievement).

#### *Adaptatiemogelijkheden in woningen.*

In woningen kunnen de volgende *potentiële adaptatiemogelijkheden* worden benut wanneer de condities de grenzen van de adaptieve temperatuurgrenzen heeft overschreden:

- Luchtsnelheid. Bij hogere temperaturen kunnen hogere luchtsnelheden het lichaam koelen en toch voor comfortabele omstandigheden zorgen. Maar normen, met grenzen die in klimaatkamers zijn ontwikkeld, beperken de luchtsnelheden die toegelaten mogen worden. Weliswaar mogen bij hogere temperaturen hogere luchtsnelheden optreden, maar in beperkte mate. Onderzoek toont echter aan dat een luchtsnelheid van 1,4 m/s als gevolg van een ventilator mensen comfortabel kan maken bij temperaturen tot 30°C.
- Gemiddelde Stralingstemperatuur. Metingen en simulaties laten zien dat door het toepassen van voldoende thermische massa de binnentemperatuur beneden de buitentemperatuur blijft, wanneer de zonnestraling wordt voorkomen en nachtventilatie wordt toegepast.
- Buitencondities als context.

- Acclimatisatie door seizoen en locatie. Bij hogere buitentemperaturen worden hogere binnentemperaturen als comfortabel ervaren. Dit is door talloze studies aangetoond.
- Dagelijkse variaties. Uit onderzoek in Californië blijkt dat koele ochtenden acceptabel zijn als de vorige dag heel warm is geweest en de verwachting is dat de komende dag ook warm zal worden. Wanneer het overdag een paar dagen koeler was, dan is een koele ochtend niet acceptabel. Gebruikers van de nachtventilatie van het ACC-huis ervoeren ochtendtemperaturen van 13°C als een gratis luxe, een plezierige ervaring die verder gaat dan het zich thermisch neutraal voelen.
- Alternatieve koelere locaties. De veldstudies van dit onderzoek liet zien dat de thermostaten hoger ingesteld werden, naarmate er meer alternatieve ruimtes konden worden gebruikt in en rondom het huis. Ook bleek dat de bewoners op warme dagen de warmere ruimtes op de bovenverdieping vermeden, hoewel ze het wel vervelend vonden dat ze deze ruimtes warmer waren dan de benedenverdieping.

#### *Gedragsmatige, sociale en culturele factoren.*

Het is niet goed mogelijk om comfort op een betrouwbare wijze direct te meten. Daarom worden bij wetenschappelijk onderzoek alleen de fysische variabelen die de menselijke warmtebalans beïnvloeden gemeten en wordt de thermische sensatie en voorkeur gevraagd, om dan vervolgens *aan te nemen* welke van deze thermische sensaties geassocieerd zijn met tevredenheid en ontevredenheid. (Dit lijkt op het vragen naar wat de kleur van een ruimte is en dan aan te nemen of die persoon die kleur mooi vindt). De volgende gedragsmatige, sociale en culturele aspecten zijn van invloed op het comfort van individuen en hun adaptatie.

- Individuele verschillen. De PMV/PPD-methode wordt gebruikt om van een gebouw of grote groep een bepaald percentage tevredenen te kunnen aangeven. Wanneer echter de groepsgrootte kleiner wordt, zoals in woningen kan de individuele thermische voorkeur zeer sterk gaan afwijken in de tijd en naar omstandigheden. Uit veldonderzoek in Californische woningen blijkt dat de “ideale lage temperatuur” varieerde van 15 tot 27°C, de “ideale hoge temperatuur” varieerde van 22 tot 32°C en dat de “dragelijke” temperaturen van 10 tot 30°C varieerde. De temperaturen hingen samen met factoren als leeftijd, geslacht, de plaats waar de jeugd is doorgebracht, het feit of er airconditioning op kantoor is, menopauze, etc, etc. Comforttemperaturen zijn dus niet nauwkeurig te voorspellen.
- Beïnvloeding. Er zijn veel aanwijzingen dat het effect van beïnvloeding op de bandbreedte van dragelijke temperaturen veel groter is dan de Adaptieve Comfort Standaard aangeeft. Uit onderzoek blijkt verder dat een grote meerderheid van de mensen voortdurend handmatig de temperatuurinstelling van de thermostaat aanpast en niet de thermostaat de temperatuur laat regelen.

#### *Verwachtingen.*

Er is bewijs dat mensen leren om bepaalde temperaturen te accepteren in de context van het soort gebouw of ruimte (kantoor, theater, kerk, winkelcentrum, huis, binnen, buiten, etc.). Dit is aangeleerd en mensen tolereren grote onderling

verschillende omstandigheden, zolang de temperaturen maar als toepasselijk voor die omstandigheden worden ervaren.

*Comfort Criteria voor het ACC-huis.*

Voor dit project is het volgende thermisch comfort criterium gekozen:

1. Het binnenklimaat dient te voldoen aan de grenzen voor 80% acceptatie zoals vastgelegd in de ACS van ASHRAE Standard 55.
2. Indien niet aan de waarden van de ACS van ASHRAE Standard 55 kan worden voldaan moeten de bewoners de beschikking hebben over *beide* van de volgende opties.
  - A. Adaptieve mogelijkheden. Deze adaptieve mogelijkheden moeten aanwezig zijn naar keuze van de bewoner:
    - verplaatsen naar een locatie met andere thermische omstandigheden
    - veranderen van de luchtsnelheid (raam openen, plafond ventilator gebruiken)
    - setpoint van de nachtventilatie aanpassen
  - B. Mechanische koeling gebruiken.

## Literatuur

1. Kurvers, S.R., Boerstra, A.C., Raue, A.K., Van der Linden, A.C., Notenboom, A.M.J. Thermische behaaglijkheid als bouwprestatie, Literatuuronderzoek naar recente wetenschappelijke ontwikkelingen, ISSO, 2002.
2. Kurvers, S.R., Raue, A.K., Beperkte literatuurstudie t.b.v. desk-study, optimaal thermisch comfortcriterium voor Toolkit Duurzame Woningbouw, SenterNovem, 2006.
3. ASHRAE Standard 55-2005, "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy", 2005.
4. Arens, E., Huizenga, C., Zhang, H., 2001, "Thermal Comfort Modelling for the 21<sup>st</sup> Century: breaking out of the Climate Chamber", Moving Thermal Comfort Standards into the 21<sup>st</sup> Century, Conference 5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> april 2001, Windsor, UK
5. Arets, M.J.P., 2002, "Vooronderzoek Thermische behaaglijkheid bij woningen in de zomersituatie – Binnentemperatuur berekeningen". TU Delft in opdracht van Novem.
6. Baker N., Standeven M., "Thermal comfort for free-running buildings", Energy and Buildings, 23 (1996), 175-182.
7. Baker, N., "Human nature", in Environmental Diversity in Architecture, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.
8. Baker, N., 1991. Comfort and Passive Cooling. AIVC Paper 11159. Building Service Research and Information Association, Verenigd Koninkrijk.
9. Beek van, M., Adaptieve Temperatuurgrenswaarden - Praktijkonderzoek naar de nieuwe Nederlandse richtlijn voor de beoordeling van het thermische binnenklimaat in kantoorgebouwen, Afstudeerrapport TU Delft, augustus 2006
10. Boerstra, A.C., A.C. van der Linden, A. K. Raue, S.R. Kurvers. 2001. "Vooronderzoek Thermische behaaglijkheid in woningen – voorstel voorkomen oververhitting in woningen in de zomersituatie". Novem BV, Utrecht, projectnummer 149.208.3420. 30 november 2001.
11. Brager, G., Paliaga G., De Dear, R.. "Operable windows, Personal Control and Occupant Comfort". ASHRAE Transactions 4695, RP-1161, 2004.
12. Chappells, H. and E. Shove, 2003. "An annotated bibliography of comfort research". Lancaster University, Department of Sociology.
13. Hellwig R.T., Brasche S., Bischof W.. Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning. Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006.
14. Hoof van, J., Hensen, J.L.M. "Thermal comfort and older adults", Gerontech Journal, March 2006, vol.4, no.4.
15. Humphreys, M.A., M. Hancock. 2005? "Do people want to feel 'neutral'? – Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale, Energy and Buildings. 2007.
16. Humphreys, M.A., Nicol, J.F., 2001, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. Moving Thermal Comfort Standards into the 21<sup>st</sup> Century, 5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> april 2001, Windsor, UK.
17. Kurvers, S.R., Leijten, J.L., Linden van der A.C., Boerstra, A.C., Raue, A. K. "Adaptief thermisch comfort: De binnenklimaattypen van ISSO 74 heroverwogen" TvvL Magazine 5-2006.

18. Mayens, J., Janssens, A., “Thermisch zomercomfort in natuurlijk geventileerde woningen”, *Bouwfysica*, vol. 15, 2002, No 4.
19. Merghany A., “Exploring thermal comfort and spatial diversity”, in *Environmental Diversity in Architecture*, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.
20. Nakano, J., Tanabe, S., Behavioural adaptation in semi-outdoor environment, *Proceedings of Healthy Buildings 2003*, vol. 1, pp. 815-821.
21. Nakano. J., Tanabe S., Thermal comfort conditions in semi-outdoor environments for short-term Occupancy, *Proceedings of Healthy Buildings 2003*, vol. 1, pp. 755-760.
22. Nicol, F. “Fitting buildings to people: comfort and health”, presentation at interdisciplinary meeting on heat waves, housing and health, 7<sup>th</sup> may 2004.
23. Nicol, F., Humphreys, M., “Adaptive comfort in Europe: results from the SCATs survey with special reference to free running buildings”, 2006, Windsor, UK.
24. Nicol, J.F., Humphreys, A., 2001, “Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings”, *Conference Moving Thermal Comfort Standards into the 21<sup>st</sup> Century*, 5<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> april 2001, Windsor, UK.
25. Nikolopoulou M., “Outdoor comfort”, in *Environmental Diversity in Architecture*, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.
26. Paciuk, M. “The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace. Coming of age”. *EDRA 21/1990*. Eds: Selby, R.I.; Anthony, K. H.; Choi, J.; Orland, B., pp. 303-312. Oklahoma City, OK, US: Environmental Design Research Association, xviii, pp.372,1990.
27. Shimoda, T., Noguchi, M., Nakano, J., Tanabe, S., Thermal environment and behavioral adaptation in semi-outdoor cafeteria, *Proceedings of Healthy Buildings 2003*, vol. 1, pp. 822-827.
28. Shove E., “Social, architectural and environmental convergence”, in *Environmental Diversity in Architecture*, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.
29. Stoops J.L, “A possible connection between thermal comfort and health”, Paper LBNL 55134, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2004.
30. ISSO 74, Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen, publicatie 74, ISSO, Rotterdam, maart 2004.
31. Wagner, A., Moosmann, C., Gropp, T., Gossauer, E. “Thermal comfort under summer climate conditions – Results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany”, *Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right*, Winsor 2006.
32. “Alternatives to Compressor Cooling Phase V: Integrated Ventilation Cooling”. Uitgevoerd door de Davis Energy Group voor de California Energy Commission, februari 2004.
33. M.S. Ubbelohde, G.M. Loisos, R. McBride, “Comfort Reports”, Attachment A-4, Davis Energy Group for The California Energy Commission, includes reports “Advanced Comfort Criteria on Adapted Comfort” and “Human Comfort Field Studies”. “Alternatives to Compressor Cooling Phase V: Integrated Ventilation Cooling”, februari 2004.
34. NEN-EN 15251, Binnenmilieugerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, NEN 2007.

35. Bjarne W. Olesen, The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings, Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006