

Thermisch comfort: huidige en toekomstige normen

In het voorgaande artikel werd de geschiedenis van onderzoek naar thermisch comfort beschreven en het klimaatkamermodel van Fanger behandeld, dat tot de bekende PMV-PPD-index leidde. Vervolgens zijn de veldonderzoeken van Brager en deDear en van Nicol en Humpreys beschreven. In dit vervolgartikel worden de normen en richtlijnen behandeld die op genoemde onderzoeken zijn gebaseerd. Ook wordt onderzocht hoe normen en richtlijnen voor thermisch comfort er in de toekomst uit zouden kunnen zien, waarbij een lager energiegebruik en verbeterd comfort de uitgangspunten zijn.

Ing. S.R. (Stanley) Kurvers, TU Delft, Faculteit Bouwkunde, Apogeum Binnenmilieu Consult; drs. J.L. (Joe) Leijten, TU Delft, Faculteit Bouwkunde

De nationale en internationale normen zijn aanvankelijk allemaal gebaseerd op het PMV/PPD-model. De belangrijkste normen zijn:

- NEN-EN-ISO 7730: 2005 'Klimaatomstandigheden – Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV- en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid' (Europese norm);
- NEN-EN 15251: 2007 'Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van

gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek' (Europese norm);

- Ashrae standard 55: 2010 'Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy' (Verenigde Staten).
- ISO74, 2004: "Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen" (Nederlandse richtlijn).

Als voorbeeld worden in tabel 1 enkele grenswaarden, gebaseerd op het PMV-model, uit

NEN-EN-ISO 7730 gegeven. In de tabel wordt onderscheid gemaakt tussen drie binnenklimaatklassen. Er wordt aangenomen dat klasse A tot meer comfort leidt dan klasse B en C, terwijl klasse B weer beter is dan klasse C. Uit onderzoek in een groot aantal gebouwen bleek dat de temperatuuracceptatie van de bewoners tussen 78 en 87% lag, ongeacht welke klimaatklasse het volgens de metingen betrof [1]. Op basis van het PMV-model zijn naast normen ook diverse richtlijnen ontwikkeld. Eind jaren zeventig is in Nederland door de

Activiteit	Ruimtetype	Klasse	Operatieve temperatuur (°C)	
			Zomer (0,5 clo)	Winter (1,0 clo)
Voornamelijk zittend (1,2 met)	Kantoor, vergaderruimte, restaurant, klaslokaal	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
Voornamelijk staand (1,6 met)	Winkel	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0

-Tabel 1- Enkele ontwerptemperaturen voor zomer en winter voor twee verschillende activiteitsniveaus (NEN-EN-ISO 7730)

Rijksgebouwendienst een methode ontwikkeld waarbij de mate van overschrijding van de grens $PMV = 0,5$ wordt gewogen. Grotere overschrijdingen van de grens $PMV = 0,5$ worden strenger beoordeeld dan kleinere overschrijdingen. Bij $PMV = 0,5$ ($PPD = 10\%$) werd de weegfactor 1 en op basis van computersimulaties bleek dat in een gebouw met middelzware thermische massa de PMV bij een 100-urige overschrijding van de grenswaarde ($PMV = 0,5$), gemiddeld circa 0,7 bedraagt. Hierbij is de PPD 15% en de weegfactor dus 1,5, wat weer 150 weeguren geeft. Dit werd de Gewogen Temperatuur Overschrijdingsmethode (GTO) genoemd [2].

ADAPTIEF THERMISCH COMFORT

De resultaten van de in het vorige artikel beschreven veldonderzoeken hebben geleid tot aanpassingen van normen en tot nieuwe richtlijnen. In de Amerikaanse Ashrae Standard 55 [3] is het adaptieve model (figuur 1) een 'optionele methode', naast de PMV - PPD -methode, die alleen kan worden toegepast onder de volgende omstandigheden:

- natuurlijk geventileerde gebouwen waar de thermische condities hoofdzakelijk worden geregeld door de gebruikers door het openen en sluiten van de ramen. De ramen moeten gemakkelijk bereikbaar en bedienbaar zijn;
- ruimten hebben soms verwarming, maar de methode is niet van toepassing als de verwarming functioneert;
- ruimten kunnen geen mechanische koeling hebben (zoals gekoelde lucht, stralingskoeling);
- ruimten kunnen van mechanische ventilatie voorzien zijn, maar dan zonder mechanische koeling. Echter, het openen en sluiten van de ramen is de voornaamste methode voor het regelen van de thermische condities.

Ook de Europese NEN ISO 15251[4] heeft de mogelijkheid om te ontwerpen op basis van de adaptieve benadering. Deze norm geeft aan dat onder bepaalde voorwaarden de adaptieve temperatuurbreedte (zie figuur 2) kan worden aangehouden. De voorwaarden zijn:

- er is voorzien in te openen ramen;
- er is niet voorzien in een systeem voor actieve, mechanische koeling;
- gebouwgebruikers mogen naar eigen inzicht hun kledingisolatie aanpassen (geen 'dresscode').

Op de horizontale as staat een gewogen gemiddelde buitentemperatuur over de voorgaande vijf dagen, waarbij gisteren zwaarder weegt dan eergisteren, etc.,

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

t_{od-1} = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur gisteren;

t_{od-2} = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur eergisteren;

t_{od-3} = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur eereergisteren;

t_{od-4} = etc.,

of vereenvoudigd:

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

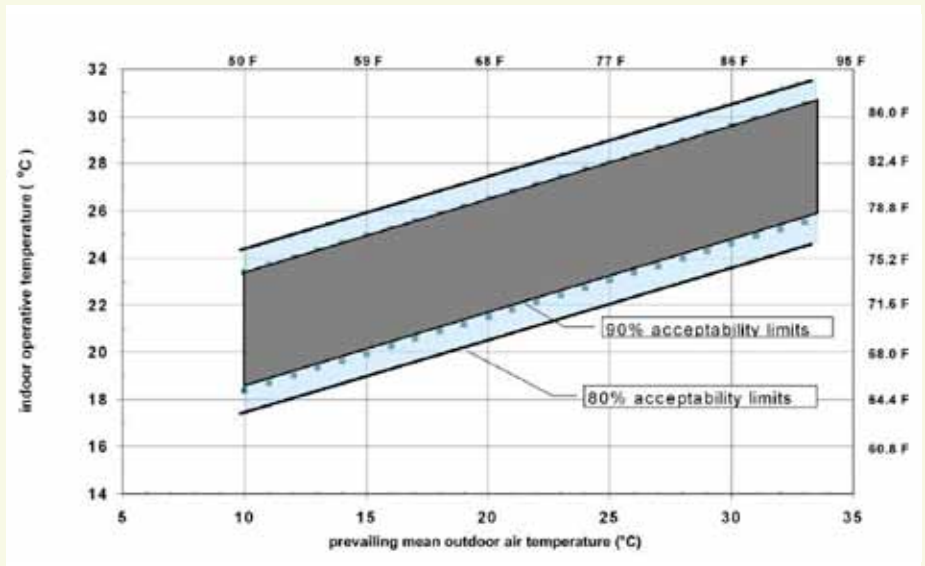
$t_{n,rm}$ = de 'running mean outdoor temperature' op dag n , en $t_{n-1,rm}$ is 'running mean outdoor temperature' van de dag ervoor;

t_{od-1} = gemiddelde van de maximum en

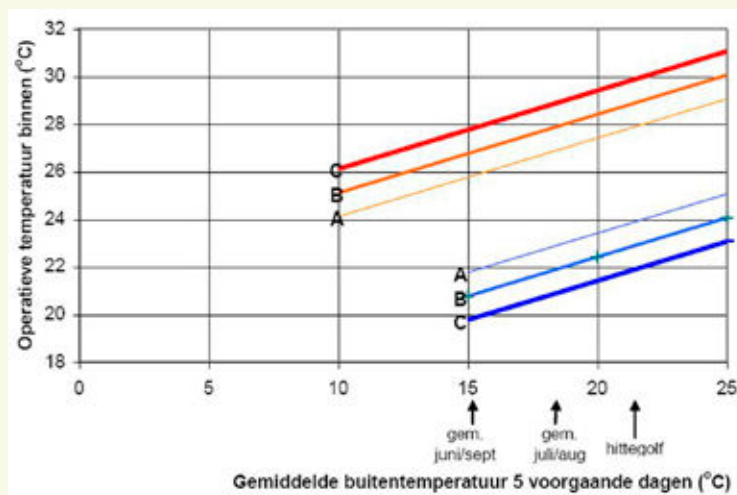
minimum buitentemperatuur gisteren.

In Nederland is de Adaptieve Temperatuur-grenswaarden (ATG)-richtlijn ontwikkeld op basis van de Ashrae RP884 database [6]. Hierbij zijn comfortgebieden vastgesteld voor een binnenklimaat zonder mechanische koeling (type Alpha genaamd, zie figuur 4) en voor een binnenklimaat met mechanische koeling (type Beta). Voor de buitentemperatuur neemt de ATG een met de EN-15251 en Ashrae-55 vergelijkbare, maar verschillende, lopend gemiddelde:

$$T_{e,ref} = (1 \cdot T_{vandaag} + 0,8 \cdot T_{gisteren} + 0,4 \cdot T_{eergisteren} + 0,2 \cdot T_{eereergisteren}) / 2,4$$



-Figuur 1- De adaptieve Ashrae comfort norm in natuurlijk geventileerde ruimten als functie van de heersende buitentemperatuur [3]



-Figuur 2- Maximum en minimum temperatuur in gebouwen met een hoge mate van gebruikersinvloed (geen dresscode, te openen ramen, geen actieve koeling) voor de zomerperiode zoals vastgelegd in [4]

DUURZAAM THERMISCH COMFORT

In het kader van het Facet-onderzoek, een door Agentschap.nl gefinancierd onderzoek, is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de huidige stand van kennis op het gebied van binnenmilieu en thermisch comfort. Het hoofddoel van het Facet-project is om gebouwschilconcepten te ontwikkelen met variabele, thermische en lichtdoorlatende eigenschappen, die zich daardoor kunnen aanpassen aan veranderende binnen- en buitencondities en voor verschillende gebruiksfuncties (kantoren, scholen en woningen) toepasbaar zijn. Met de concepten wordt beoogd een verbetering van de visuele en thermische kwaliteit in een ruimte te verkrijgen en tevens een substantiële reductie van het energiegebruik voor verwarmen, koelen, luchtverversing en verlichting te realiseren. Enkele conclusies betreffende het thermisch comfortonderzoek zijn:

- mensen wennen aan de gemiddelde thermische omstandigheden, waaraan ze zijn blootgesteld;
- comforttemperaturen zijn variabel en niet vast;
- er is niet een bepaalde temperatuur waarbij iedereen zich comfortabel voelt;
- mensen kunnen zich thermisch comfortabel voelen bij temperaturen tussen 17°C en 35°C, afhankelijk van het klimaat en sociale en culturele gebruiken;
- thermisch comfort is een evenwichtssituatie die afhankelijk is van fysische, fysiologische, onbewuste en bewuste gedragsmatige handelingen en sociaal/culturele omstandigheden. Bij veranderde omstandigheden ontstaat een nieuw evenwicht, bijvoorbeeld bij een andere temperatuur;
- mensen zijn geen passieve ontvangers van de thermische omgeving, maar interacteren voortdurend met de omgeving. Wanneer er discomfort optreedt, zullen mensen acties (willen) ondernemen om het comfort te herstellen;
- er zijn verschillende vormen van adaptatie die met elkaar samenhangen en elkaar beïnvloeden:

Beïnvloeding omgeving

Het gaat hierbij om merkbare beïnvloeding van de omgeving door de persoon en niet alleen het idee dat mensen hebben dat ze iets kunnen beïnvloeden. De omgeving kan worden beïnvloed door ramen en deuren te openen en te sluiten om de temperatuur te veranderen, de luchtsnelheid te verhogen en de luchtkwaliteit te verbeteren. Met ventilatoren kan de luchtsnelheid worden verhoogd, waardoor de huid wordt afgekoeld. Met zonwering kan de directe warmtestraling verminderd worden waardoor de

(stralings)temperatuur wordt verlaagd.

Gedragsmatige adaptatie

Mensen passen hun gedrag aan om hun perceptie van warmte beter in overeenstemming te brengen met hun behoeften, door bijvoorbeeld kleding uit en aan te doen en de inspanning aan te passen (rustiger aan doen als het warm is).

Psychologische adaptatie

Hieronder verstaan we een combinatie van niet fysische en niet fysiologische factoren die bij de mens bijdragen aan het streven naar thermisch comfort. Met name *ervaringen* met het binnenklimaat over korte en lange termijn sturen de *verwachtingen* die mensen hebben van het binnenklimaat en beïnvloeden weer de gedragsmatige adaptatie;

- door onvoldoende adaptieve mogelijkheden ontstaat discomfort;
- geleidelijke temperatuurveranderingen binnen de bandbreedte leiden niet tot discomfort, maar abrupte temperatuurveranderingen wel;
- het aanpassen van kleding om het thermisch comfort te beïnvloeden heeft mogelijkheden en beperkingen. Binnen een dag is de kledingadaptatie beperkt tot wat iemand op die dag draagt, maar is groter over meerdere dagen gezien. Kledingaanpassing is niet alleen afhankelijk van thermische omstandigheden, maar wordt ook beïnvloed door sociale factoren, zoals mode en dresscode. Een dresscode kan daarom aanzienlijke

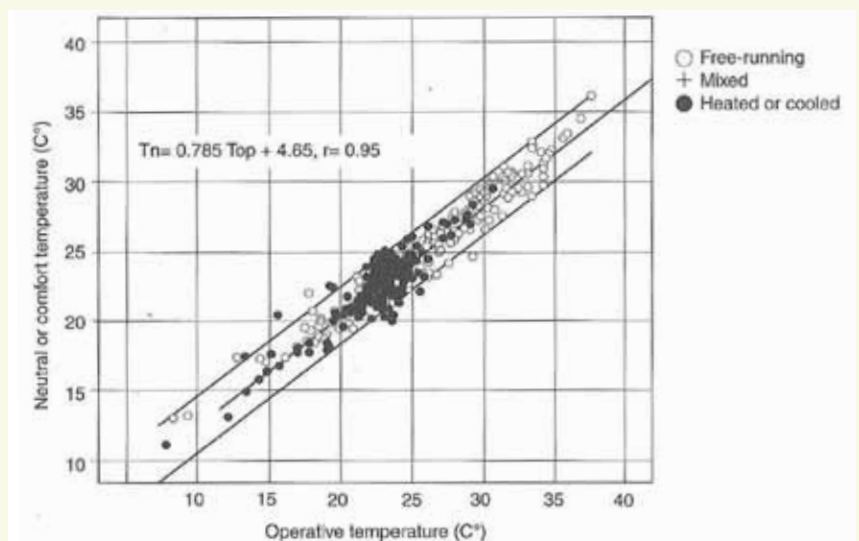
invloed op het energiegebruik hebben.

FYSIOLOGISCH

Het menselijk lichaam leert zich in veranderende omgevingen beter aanpassen dan in omgevingen met minder variatie [12, 16]. Illustratief voor het adaptatievermogen van mensen is figuur 3, waaruit blijkt dat de comforttemperatuur die in gebouwen is gemeten sterk correleert met de gemiddelde operationele temperatuur in die gebouwen tijdens de onderzoeken. Mensen brengen hun comforttemperatuur in overeenstemming met de meest voorkomende temperaturen door verwachtingen en kleding aan te passen en het openen van ramen de temperatuur en de luchtsnelheid te beïnvloeden. Dit gebeurt in zowel free-running als in geconditioneerde gebouwen, maar de bandbreedte in de free-running gebouwen is groter [5].

GEbruIK COMFORTRICHTLIJNEN

In de praktijk worden de resultaten van temperatuuroverschrijdingsberekeningen nog vaak getoetst aan vaste temperatuurgrenzen (TO-methode, PMV/PPD-grenzen, GTO-methode) maar, in toenemende mate ook, aan variabele temperatuurgrenzen (ATG-methode, NEN-EN 15251, Ashrae-55). Door het groeiende inzicht in de perceptie van thermisch comfort in de praktijk en het steeds betrouwbaarder worden van de adaptieve modellen door de groeiende hoeveelheid data



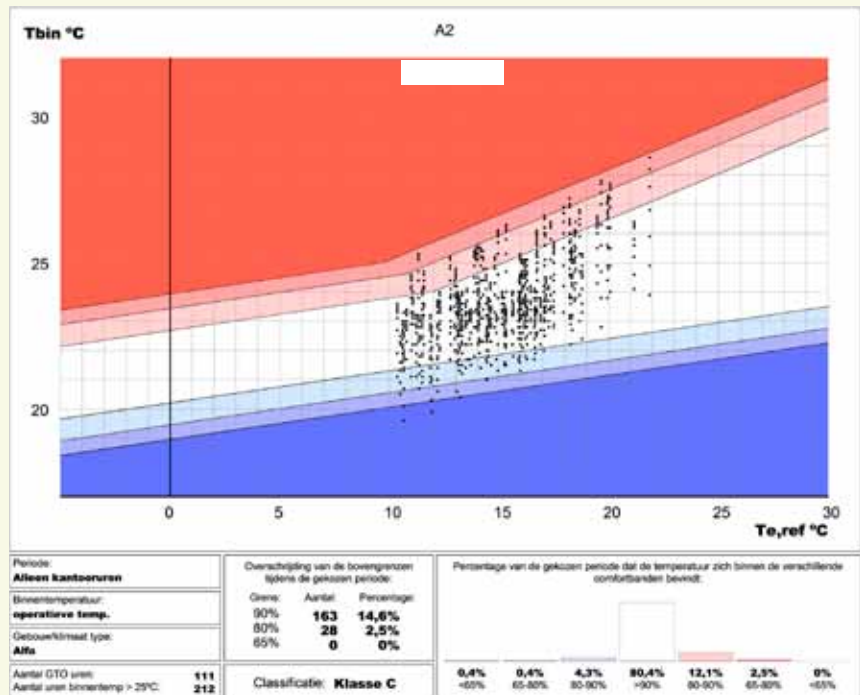
-Figuur 3- De relatie tussen comforttemperaturen en operationele temperaturen voor een groot aantal veldonderzoeken. Elk punt is het resultaat van een onderzoek en bestaat uit minimaal 20 tot enkele honderden temperatuurmetingen en comfortpercepties. Een punt is dus niet de spreiding rond een gemiddelde. De middelste lijn is de gemiddelde neutrale temperatuur voor alle gemiddelde comforttemperaturen per gebouw en 95% van de resultaten ligt binnen de buitenste lijnen [5].

en geavanceerdere analyses verandert ook de visie op het interpreteren van temperatuurs-overschrijdingen.

Op dit moment is er geen voorgeschreven, algemeen geaccepteerde of gestandaardiseerde methode voor het beoordelen van temperatuuroverschrijdingen of het kwantificeren van 'oververhitting'. In de huidige normen worden wel verschillende benaderingen genoemd om temperatuuroverschrijdingen te beoordelen, bijvoorbeeld [4, 7]:

- een percentage van de werktijd mag de operatieve temperatuur of de PMV buiten de aangegeven waarde liggen;
- een bepaalde toegestane hoeveelheid graduren (de tijd dat de operatieve temperatuur buiten de aangegeven waarde ligt, gewogen door een maat voor mate van overschrijding);
- de totale tijd dat de temperatuur buiten de grenswaarde ligt, gewogen door een functie van de PPD (de GTO-methode is hiervan een voorbeeld). Hierbij wordt in de normen aanbevolen om gedurende 3% tot 5% van de tijd een overschrijding van de grenswaarde toe te staan.

In ISSO-32 wordt in hoofdstuk 6 ingegaan op de mogelijkheden om temperatuuroverschrijdingsberekeningen te beoordelen [8], waarbij zowel beoordeling met de TO-, GTO-, ATG- als de NEN-EN 15251-methode wordt besproken. Het toetsen van overschrijdingen aan een vaste temperatuur of een waarde voor het percentage ontevreden kent echter problemen. De adaptieve modellen laten zien dat het thermisch comfort van mensen varieert met een lopend gemiddelde van de buitentemperatuur en niet met een vaste temperatuur. De mate of ernst van de overschrijdingen wordt niet meegewogen bij een temperatuuroverschrijdingsmethode. Bij de GTO-methode gebeurt dit wel door een weging aan te brengen op basis van de PMV/PPD-relatie. Het is echter gebleken dat de PPD geen betrouwbare indicator voor discomfot in de praktijk is, met name voor natuurlijk geklimatiseerde of 'mixed-mode' gebouwen, die in Nederland veel voorkomen. Het tellen van het aantal uren dat een bepaalde grenswaarde wordt overschreden is zeer gevoelig gebleken voor verschillen in berekeningsmethoden [7]. Systematische fouten in methoden, software en invoerparameters kunnen de vorm van de uiteinden van de temperatuurverdeling beïnvloeden, dat een kritisch deel is voor de verdeling van het thermisch comfort. Maar ook voor het toetsen van temperatuuroverschrijdingsberekeningen aan adaptieve comfortgebieden bestaan nog geen richtlijnen. In de praktijk leidt dit tot problemen [9]. In figuur 4 is een voorbeeld



-Figuur 4- Voorbeeld van een uitvoervisualisatie van VA114. De uren dat een bepaalde grens wordt overschreden worden opgeteld en dit bepaalt de klimaatklasse

gegeven van een uitvoervisualisatie van het simulatieprogramma VA114 van VABI. De methode wordt meestal zo geïnterpreteerd dat zodra berekende temperaturen buiten een bandbreedte vallen, bijvoorbeeld de 90% acceptatie of klasse A, het klimaat als klasse B wordt gekenmerkt, als niet ook het 80% acceptatiegebied (klasse B) wordt overschreden. In dit voorbeeld voldoet het simulatiere-sultaat niet aan Klasse C. In ISSO-32 wordt in paragraaf 6.4 hierover het volgende opge-merkt: "(nagenoeg) alle binnentemperaturen moeten binnen de temperatuurbanden van de betreffende klasse vallen."

Deze interpretaties leiden tot een te strenge weging. De bandbreedte voor comfortabele temperaturen geeft aan dat bijvoorbeeld minimaal 80% van de bewoners de thermische omgeving acceptabel vindt. De bandbreedte van het comfortgebied wordt aangegeven door middel van lijnen die in de praktijk als scherpe grenzen worden geïnterpreteerd. Maar het zijn geen scherpe grenzen. De bandbreedtes zijn ontwikkeld op basis van de veldonderzoeken, waarbij de verdeling van de gemiddelde comforttemperatuur per gebouw bij een bepaalde buitentemperatuur is bepaald. Door deze verdeling is een regressielijn getrokken (de gemiddelde neutrale temperatuur) en is het percentage acceptatie aangegeven als functie van de afwijking van de gemiddelde neutrale temperatuur. Het ligt in de natuur van verdelingen dat ze geleidelijk verlopen en dus niet nauwkeurig of scherp zijn (figuur 5, volgende pagina).

Een stukje onder of boven de 'grenslijn' heeft dus weinig effect op de mate van comfort.

Als tijdens het ontwerp temperatuursimulaties worden uitgevoerd zullen verschillen en onnauwkeurigheden in bijvoorbeeld bouwfy-sische en installatietechnische invoerparame-ters, verschillen in weerbestanden, verschillen in simulatiesoftware en bijvoorbeeld verschil-len in aanwezigheidsuren leiden tot berekende temperaturen die net binnen of net buiten de 'grens' liggen. De norm suggereert dat er binnen de bandbreedte geen oververhitting zal worden ervaren en erbuiten wel. Maar in wer-kelijkheid kunnen er klachten zowel binnen als buiten het comfortgebied zijn. De berekende temperaturen hebben een verdeling met een bepaalde waarschijnlijkheid, dus is een genu-anceerde beoordeling op zijn plaats. Daarom kan het simulatiere-sultaat van het voorbeeld in figuur 4 wellicht worden gekwalificeerd als 'klasse B' (80% acceptatie). Er is duidelijk behoefte aan een nieuwe, wetenschappelijk gefundeerde benadering voor het bepalen van de 'overschrijdings' uren.

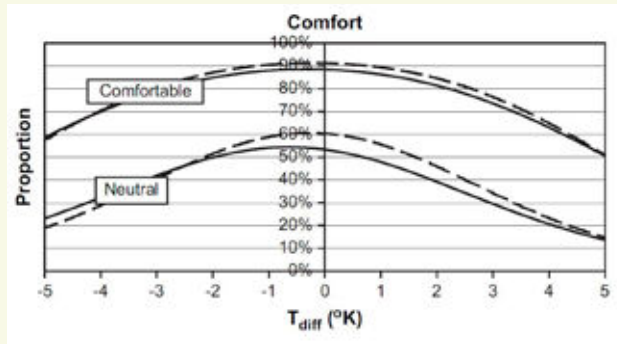
Figuur 6 op de volgende pagina laat zien dat verschillende adaptieve richtlijnen, verschillende percentages overschrijdingen kunnen geven. De oorzaak hiervoor is onder andere dat de NEN EN15251 een iets andere comfortvergelijking gebruikt dan ISSO-74 en Ashrae-55 (in dit artikel wordt over NPR CR1752 gesproken i.p.v. ISSO 74). Zoals eerder aangegeven gebruikt de NEN EN15251 de Europese SCATs-database en zijn de andere twee gebaseerd op de RP-882-database die uit verschillende continenten afkomstig is. De op de SCATs-database gebaseerde norm heeft de neiging om iets meer hogere temperaturen toe te staan dan die gebaseerd op de RP-884 data-

base. Dit verklaart gedeeltelijk dat EN15251 per klimaatzone lagere overschrijdingen laat zien dan de andere twee. Verder is de maat voor de buitentemperatuur verschillend. De Ashrae-norm hanteert een gemiddelde buitentemperatuur, de ISSO 74 een 3-daags lopend gemiddelde, terwijl de EN15251 een 7-daags lopend gemiddelde hanteert (in dit onderzoek is de Ashrae-norm uit 2004 gebruikt, de norm uit 2010 gebruikt wel een dagelijks (lopend) gemiddelde buitentemperatuur; zie deel 1 van dit artikel). Hoe zwaarder recente warme dagen worden meegeteld in de maat voor de buitentemperatuur, des te hoger zijn de temperaturen die in een periode met hoge buitentemperatuur worden toegelaten. Dit verklaart waarom ISSO 74 per klimaatzone minder overschrijdingen laat zien dan Ashrae-55 en ook waarom NEN EN 15251 de laagste overschrijdingen laat zien.

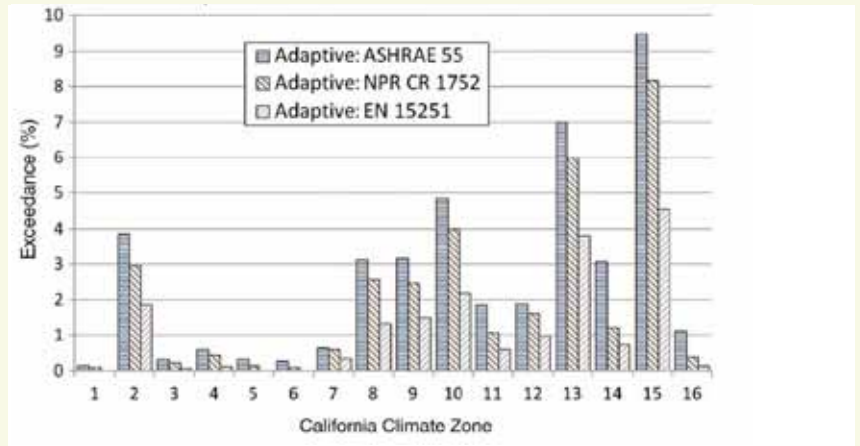
Dit betekent dat de resultaten van temperatuuroverschrijdingsberekeningen met de grootste voorzichtigheid moeten worden geïnterpreteerd en dat tijdens het ontwerp keuzes moeten worden gemaakt die in de praktijk het minst gevoelig zijn voor verschillen die uit de verschillende simulatieberekeningen naar voren komen. Interpretaties dat overschrijdingen van de grenswaarde niet acceptabel zijn en 'hard' door middel van uitsluitend (het verhogen van) de koelcapaciteit weggenomen moeten worden, zijn hier niet op zijn plaats. Maatregelen die hier wel genomen kunnen worden zijn bijvoorbeeld het vergroten de thermische massa, beperken van interne en externe warmtelast, het bevorderen van persoonlijke beïnvloedingsmogelijkheden door goed bruikbare te openen ramen en het ontwerpen van installaties die overschrijdingen 'zacht' verminderen [9].

Voor de toekomst van comfortrichtlijnen en overschrijdings- en energiesimulaties kunnen de volgende benaderingen worden overwogen. [9, 10]:

- de resultaten van simulatieberekeningen moeten op een realistische manier worden weergegeven, bijvoorbeeld door middel van *verdelingen* van het verwachte percentage ontvreden bij een bepaalde buitentemperatuur;
- het gaat hierbij om kwalitatieve implicaties van simulaties en niet om schijnbaar nauwkeurige getallen;
- deze weergave is weliswaar moeilijker te interpreteren, maar geeft realistischer aan wat er werkelijk gaande is tussen de dynamische eigenschappen van het gebouw enerzijds en het dynamische gedrag van gebruikers anderzijds;
- de beperkingen en onzekerheden van simulaties en comfortmodellen moeten worden



-Figuur 5- Percentage mensen dat comfortabel en neutraal aangeeft voor free running (getrokken lijn) en airconditioned (gestippelde lijn) gebouwen, afhankelijk van de afwijking met de gemiddelde neutrale temperatuur [10]



-Figuur 6- Simulatieberekeningen voor een gebouw met topkoeling in de 16 klimaatzones in Californië, waarbij de resultaten worden getoetst aan de adaptieve grenswaarden uit Ashrae-55, NPR CR1752 (ISSO74) en de EN15251. De balken geven het percentage van de tijd dat de grenswaarde de adaptieve richtlijn worden overschreden [9].

onderkend;

- professionals die de modellen met hun beperkingen en onzekerheden doorgronden zijn beter in staat verantwoorde ontwerpkeuzes te maken en dit uit te leggen aan andere professionals en gebruikers.

■ NIEUWE RICHTING COMFORTRICHTLIJNEN

Thermisch comfort wordt niet in voldoende mate bereikt door de temperaturen binnen een nauwe bandbreedte te regelen en door het binnenklimaat van het buitenklimaat te isoleren, maar wel door de temperatuur mee te laten variëren met een bepaalde maat voor de buitentemperatuur. Bewoners moeten de mogelijkheden hebben om hun neutrale temperatuur zo dicht mogelijk naar de meest voorkomende binnentemperatuur te brengen, door het aanpassen van kleding of door op een andere plaats in het gebouw te gaan zitten, en door de binnentemperaturen zo dicht mogelijk naar hun neutrale temperatuur te brengen, door het regelen van ramen, zonwering, thermostaten en ventilatoren. Zo is het binnenklimaat beter voorspelbaar en anticipeerbaar, en kan een hoger niveau van thermisch comfort worden bereikt.

In de huidige normen, zoals de ISO-15251 en

de Ashrae-55, overheerst het uitgangspunt dat 'normale' gebouwen volledige klimaatbeheersing hebben en dat gebouwen zonder koeling, met passieve klimaatbeheersing, of veel gebruikersinvloed, bijzondere of zelfs minder goede gebouwen zijn. 'Free running' gebouwen worden in de huidige normen beschouwd als een *alternatief* voor mechanische ventilatie met koeling, niet als een *equivalent* [11]. Deze manier van denken kan leiden tot gewinning aan een steeds nauwere temperatuurbandbreedte, of beter gezegd aan het ontwerpen van adaptatie, en daarmee steeds energie-intensievere verwachtingen.

Het is correcter om de redenatie om te keren. Het uitgangspunt zou moeten zijn: een binnenklimaat dat, in bepaalde mate, mee varieert met het buitenklimaat en de gebruikers de mogelijkheden geeft zich aan de omstandigheden aan te passen. Het klimaat moet dan aan de adaptieve temperatuur bandbreedte voldoen. In gebouwen waar de temperaturen binnen een nauwe bandbreedte bewegen door het gebruik van mechanische koeling zijn de gebruikers een gedeelte van hun adaptatievermogen krietgeraakt, niet alleen door een ander gedrag (denk aan de in deel 1 genoemde 'learned helplessness') en verwachtingspatroon, maar ook door minder adequate fysio-

logische reacties. Zo laat recent onderzoek bijvoorbeeld zien dat mensen, die in omgevingen met airconditioning werken, in mindere mate het 'heat stress proteïne' (HSP₇₀) aanmaken, minder snel hun huidtemperatuur aanpassen en minder zweet verdampen, waardoor ze zich warmer voelen bij hogere temperaturen in vergelijking met mensen die in niet-geconditioneerde omgevingen werken [12]. Enigszins gechargeerd gesteld: Het is niet zo dat een geconditioneerde omgeving de meest comfortabele en gezonde omgeving is, en dat een natuurlijk geventileerde omgeving waarbij de binnentemperatuur meeloopt met de buitentemperatuur een soort van extra belasting vormt voor de gebruikers. Het is eerder andersom: een natuurlijk geventileerde omgeving, waarbij gebruikers zelf verantwoordelijkheid kunnen nemen voor hun thermisch comfort, vormt juist een normale, gezonde belasting voor het organisme.

In 'mixed-mode' of hybride gebouwen, dus gebouwen die soms verwarmd of gekoeld zijn en soms 'free running' zijn, zoals veel Nederlandse gebouwen (denk aan topkoeling), worden nu geclassificeerd als 'airconditioned gebouwen' (in NEN-EN-15251 en in ISO-74 in sommige gevallen). Recent onderzoek laat echter zien dat in hybride gebouwen de adaptieve benadering het comfort het best voorspelt. De temperaturen bewegen zich dus een groot deel van het jaar binnen de (ruimere) adaptieve grenswaarden en wanneer de bovengrens wordt bereikt, wordt mechanische koeling ingeschakeld en zodanig geregeld dat de temperaturen binnen de adaptieve grenzen blijven en *niet* geregeld worden volgens de nauwere instellingen van het PMV-model of het type Beta-klimaat uit ISO-74 [13]. Een toekomstige adaptieve richtlijn of norm zou, naast een gebied van comforttemperaturen, afhankelijk van een maat voor de buitentemperatuur, eveneens richtlijnen moeten geven voor aspecten die ook van grote invloed zijn op het realiseren van thermisch comfort voor zo veel mogelijk bewoners. Dit dient uiteraard verder te worden uitgewerkt en ondersteund met meer onderzoek, maar de volgende aspecten kunnen hiervan deel uitmaken [15]:

Gebruikelijke en voorspelbare temperatuur

Bewoners adapteren aan de temperaturen waaraan ze gewoonlijk worden blootgesteld. Dit komt omdat enerzijds de binnentemperaturen zoveel mogelijk door de gebruikers worden beïnvloed en anderzijds doordat de gebruikers hun kleding en gedrag aan de binnentemperaturen kunnen aanpassen. Zo ontstaat een bandbreedte van gebruikelijke temperaturen, die van gebouw tot gebouw of van land tot land een beetje of juist aanzienlijk kunnen verschillen. Dit functioneert goed,

zolang er geen beperkingen bestaan, zoals niet te openen ramen of een niet flexibele dresscode.

Veranderende temperaturen en thermische stabiliteit

De temperaturen zijn niet vast, maar bewegen door veranderingen die binnen en buiten optreden. Als de temperaturen een voorspelbaar en natuurlijk verloop hebben maakt dit adaptatie gemakkelijker. Maar te snelle, onvoorspelbare of 'onnatuurlijke' veranderingen (zoals bij niet goed regelende koeling kan gebeuren) leiden tot discomfort en klachten, terwijl geleidelijke veranderingen acceptabel zullen zijn.

Adaptieve mogelijkheden

Gebruikers moeten zoveel mogelijk mogelijkheden hebben om hun omgevingstemperatuur en hun comforttemperatuur met elkaar in overeenstemming te brengen. Hiervoor is het belangrijk dat er te openen ramen, temperatuurinstellingen, zonwering, lichtwering of ventilatoren beschikbaar zijn. Alleen de beschikbaarheid is niet voldoende, de voorzieningen moeten aan eisen voldoen betreffende de instelbaarheid, effectiviteit, gebruikersvriendelijkheid, ergonomie, etc.

Kleding

In een richtlijn of norm zou informatie moeten staan over de invloed van kledinggedrag en dresscodes, omdat niet-flexibele dresscodes het thermisch comfort en het energiegebruik nadelig zullen beïnvloeden. Dresscodes dienen daarom variabel te zijn en rekening te houden met de verschillende seizoenen (denk aan Coolbizz in Japan).

Voor de Nederlandse situatie is veldonderzoek in Nederlandse gebouwen nodig om de modellen te verbeteren, waarbij duidelijkheid wordt verkregen over onder andere de volgende aspecten:

- in welke gebouwen (typen/eigenschappen) is het comfort hoog?
- in welke gebouwen is het werkelijke energiegebruik laag?
- welke comfortbandbreedte is voor de Nederlandse gebouwen valide?
- welke adaptieve mogelijkheden zijn van belang voor comfort en energie?
- hoe moeten de resultaten van temperatuursimulaties en praktijkmetingen worden geïnterpreteerd?

De verwachting is dat dergelijk onderzoek zal aantonen dat een laag energiegebruik en een hoog comfort niet strijdig zijn, maar dat met de juiste modellen, berekeningsmethoden en keuzes een hoog comfort en laag energiegebruik gelijktijdig zijn te realiseren, zoals ook in [15] werd aangetoond.

LITERATUUR

1. Arens, et. al., Are 'class A' temperature requirements realistic or desirable?, Building and Environment, No 45 (2010), pp. 4-10
2. Brouwers, G.F.M., Van der Linden, A.C., Beoordeling van het thermische binnenklimaat, Verwarming en Ventilatie, juli 1989, nr. 7, pp 571-578
3. ANSI Ashrae standard 55-2004 en 2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ashrae, 2004, 2010, ISSN 1041-2336
4. NEN-EN 15251 (2007), 'Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek'
5. Humphreys, M.A., Rijal, H.B., Nicol, J.F., Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors, Proceedings of conference: Adapting to Change: New thinking on Comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 april 2010. London, Network for Comfort and Energy Use in Buildings
6. ISO74, Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen (2004), ISO-publicatie 74, Rotterdam, 2004
7. Nicol, J.F., Hacker, J., Spiers, B., Davies, H., Suggestion for new approach to overheating diagnostics, Building Research and Information 37(4), pp. 348-357, 2009
8. ISO 32, Uitgangspunten temperatuursimulatieberekeningen. ISO-publicatie 32, 2011
9. Borgeson, S., Brager, G., Comfort Standards and variations in exceedance for mixed-mode buildings, Building Research & Information (2011) 39 (2), pp. 118-133
10. Nicol, F., Wilson, M., An overview of the European standard EN 15251, in Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort, Windsor, UK, 9-11 April 2010
11. Nicol, J.F., Wilson, M., A Critique of European Standard EN15251: strength, weaknesses and lessons for future standards, Building Research and Information (2010) 29(a), 183-193
12. Yu, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., Shen, H., Cao, G., Cui, W., A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments, Indoor Air 2012; 22: 110-118
13. Deuble, M., de Dear, R., Mixed Mode Buildings: A Double Standard in Comfort, Indoor Air Proceedings of the 12th Int. Conference on Indoor Air Quality and Climate, Austin, Texas, 2011
14. Humphreys, M.A., Nicol, J.F., Raja, I.A., Field studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach, in Advances in Building Energy Research, Vol. 1, pp 55-88, '07
15. Kurvers, S.R., Leijten, J.L., Raue, A.K., Robuust klimaatontwerp, Energieefficiëntie en gebruikerscomfort verenigd, TVVL Magazine, jaargang 41, December 2012