

## **Adaptieve versus traditionele thermische behaaglijkheid: (energiebehoefte) consequenties<sup>1</sup>**

**J.L.M. Hensen<sup>2</sup> en L. Centnerova<sup>3</sup>**

### *Samenvatting*

De oorspronkelijke bedoeling van dit artikel was het kwantificeren van eventuele consequenties voor de energiebehoefte die het gevolg zouden kunnen zijn van binnenklimaatnormering gebaseerd op adaptieve (7) versus traditionele thermische behaaglijkheid benadering. Deze studie is beperkt tot kantooromstandigheden in een gematigd klimaat zoals in Nederland of in Tsjechië. Dit artikel geeft eerst een kort overzicht van traditionele en adaptieve thermische behaaglijkheid benadering. Daarna volgt een korte beschrijving van de onderzoeksmethode: computermodellering en -simulaties. Het gebouwmodel, de binnenklimaatregeling en de simulatieresultaten worden uitgebreider beschreven.

Het toepassingsgebied van de voorgestelde adaptieve thermische behaaglijkheidnorm is recentelijk zeer sterk gereduceerd (13, 14). Hierdoor zijn de oorspronkelijke energiebehoefte voorspellingen feitelijk niet meer relevant. Deze kunnen echter nog wel worden geïnterpreteerd als indicaties voor over de tijd geïntegreerde overschrijding van gewenste binnentemperaturen indien het kantoor niet van mechanische koeling voorzien zou zijn.

De belangrijkste conclusie van de studie is dat voor landen met een gematigd klimaat zoals Nederland en Tsjechië er geen reden is om haast te maken met het aannemen van de voorgestelde adaptieve thermische behaaglijkheid norm in de huidige vorm. Adaptieve thermische behaaglijkheid is wel relevant voor landen met een warmer klimaat.

### *Vooraf*

Het onderzoek voor dit artikel was oorspronkelijk gebaseerd op het voorstel in 1998 door De Dear en Brager (7) om in nieuwe (internationale) normen voortaan rekening te houden met adaptieve thermische behaaglijkheid. Ook een recentelijk in TVVL Magazine verschenen artikel door Van der Linden et al. (15) is gebaseerd op dit voorstel uit 1998. Ondertussen hebben Brager en De Dear (13) echter nieuwe analyses gepubliceerd en is er ook meer duidelijkheid over hoe adaptieve thermische behaaglijkheid (waarschijnlijk) uiteindelijk zal worden opgenomen in de nieuwe versie van ANSI / ASHRAE Standard 55-2002 (14).

---

<sup>1</sup> Vertaalde en aangepaste versie van: Hensen J.L.M. en L. Centnerova 2001. "Energy simulation of traditional vs. adaptive thermal comfort for two moderate climate regions", in Proc. Int. Conf. "Moving thermal comfort standards into the 21<sup>st</sup> century" held in Windsor, Oxford Brookes University.

<sup>2</sup> Knowledge Centre Building & Systems TNO – TU/e, Eindhoven

<sup>3</sup> Czech Technical University te Praag, Tsjechië

Enkele van onze oorspronkelijke conclusies zijn niet meer relevant omdat met overeenkomstige opmerkingen (door anderen) al rekening is gehouden door bovenvermelde normeringcommissie. Omdat de discussie nu in Nederland leeft, hebben we niettemin besloten om gedeelten van het oorspronkelijke materiaal toch te vermelden met toevoegingen van relevante informatie uit (13 en 14).

## **Inleiding**

Thermische behaaglijkheid kan omschreven worden als een geestestoestand die tevredenheid met de thermische omgeving uitdrukt (1). De belangrijkste criteria voor thermische behaaglijkheid van het menselijk lichaam als geheel kunnen worden onderscheiden in de omgevingsparameters luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtvochtigheid, luchtsnelheid en in de persoonlijke parameters kleding- en activiteitsniveau. Bovendien zijn er andere omgevingsparameters die lokaal thermisch onbehagen kunnen veroorzaken zoals tocht, een te groot verticaal temperatuurverschil tussen hoofd en enkels of een te grote stralingsasymmetrie.

### ***Traditionele versus adaptieve thermische behaaglijkheid***

Huidige behaaglijkheidnormen zoals ISO / EN 7730 (1) en ANSI / ASHRAE 55-92 (2) zijn gebaseerd op een min of meer statisch model van menselijke thermische behaaglijkheid. De fysiologische en psychologische respons op de thermische omgeving is in principe hetzelfde door het jaar heen. Het enige dat verandert is de kleding en dit resulteert in verschillende gewenste temperaturen in winter en zomer.

Hoewel ISO/ EN 7730 (1) en, naar alle waarschijnlijkheid, de komende herziene versie van ANSI / ASHRAE 55 (4) zijn gebaseerd op het generieke Fanger model (3), wordt in de normen voor dagelijks gebruik onderscheid gemaakt tussen twee behaaglijkheidscategorieën: winter (stookseizoen) en zomer (koelseizoen) met parameters zoals aangegeven in Tabel 1 en Tabel 2.

Ervaring leert dat het algehele warmtegevoel de belangrijkste factor voor thermische behaaglijkheid is. “Zorg eerst dat de warmte in orde is en maak je dan pas zorgen over eventuele andere oorzaken voor onbehaaglijkheid. Waarschijnlijk zijn die er dan niet meer”, aldus, vrij vertaald, McIntyre (5). De optimale operationele temperatuur voor behaaglijkheid is een functie van metabolisme en warmteweerstand van de kleding. Het is mogelijk om het activiteitsniveau van mensen in een bepaalde situatie te voorspellen en van daaruit het metabolisme. Het is echter heel moeilijk om te voorspellen wat mensen zullen dragen. Mensen passen hun kleding normaal gesproken aan naargelang het weer (met name de buitentemperatuur), d.w.z. mensen kiezen kleding eerder op basis van het buiten- dan op basis van het binnenklimaat. In de praktijk zijn vrouwen beter in staat de (warmteweerstand van de) kleding aan te passen aan de buitentemperatuur dan mannen (4). Bovendien zijn individuele personen niet alleen verschillend in hun kledingkeuze maar ook qua reacties op warmte/koude en in hun thermisch aanpassingsvermogen.

Volgens de adaptieve thermische behaaglijkheid hypothese van De Dear en Brager (6, 7, 13, 14) veranderen contextgebonden factoren en het thermische verleden de thermische verwachting en voorkeur van de gebouwgebruikers. Een van de voorspelde consequenties hiervan is dat mensen in warme klimaatzones hogere binnentemperaturen prefereren dan

mensen die in koude klimaatzones wonen. Dit is in tegenstelling tot de statische uitgangspunten waarvan wordt uitgegaan in de huidige ASHRAE norm (2).

**Tabel 1.** Aanbevolen operatieve temperatuur voor (voorspeld) acceptabel warmtegevoel bij 90% van de bewoners tijdens lichte, voornamelijk zittende activiteit met de andere omgevingparameters binnen de grenzen volgens ISO / EN 7730 (1)

Seizoen	Warmte- weerstand kleding (clo)	Activiteit- niveau (met)	Optimale operatieve temperatuur (°C)	Operatieve temperatuur grenzen (°C)
Winter	1.0	1.2	22	20 - 24
Zomer	0.5	1.2	24.5	23 - 26

**Tabel 2.** Optimale en acceptabele operatieve temperatuur voor mensen tijdens licht, voornamelijk zittend werk, 50 % relatieve luchtvochtigheid en gemiddelde luchtsnelheid  $\leq 0.15 \text{ m.s}^{-1}$  volgens ANSI / ASHRAE 55-1992 (2)

Seizoen	Kenmerkende kleding	Warmte- weerstand kleding (clo)	Activiteit- niveau (met)	Optimale operatieve temperatuur (°C)	Operatieve temperatuur grenzen (°C)
Winter	Lange broek, overhemd met lange mouwen en trui	0.9	1.2	22	20 – 23.5
Zomer	Korte broek, overhemd met korte mouwen	0.5	1.2	24.5	23 – 26
	Minimaal gekleed	0.05	1.0	27	26 – 29

De Dear en Brager publiceerden in (7) een concept voorstel voor een thermische behaaglijksheidsnorm die – in tegenstelling tot (1) en (2) – rekening zou houden met de adaptieve thermische behaaglijkheid. Er werd onderscheid gemaakt tussen twee typen gebouwen: 1) gebouwen met centrale (d.w.z. centraal gestuurde) binnenklimaatregeling (verwarming, ventilatie en air-conditioning) en 2) gebouwen met natuurlijke ventilatie. De reden voor dit onderscheid is kennelijk dat mensen verschillende verwachtingspatronen hebben in deze twee bouwtypen. Als mensen hun thermische omgeving zelf kunnen regelen (bijvoorbeeld in staat zijn een raam te openen) dan zijn ze eerder thermisch tevreden dan

wanneer ze de indruk hebben dat er niets te regelen valt. Bovendien is het mogelijk dat is de zomer de luchtsnelheden hogere zijn in natuurlijk geventileerde gebouwen. Het resultaat is kennelijk dat in gebouwen zonder centrale binnenklimaatregeling de gebruikers over een jaar gezien een groter bereik in operationele temperatuur zullen accepteren.

Het bovenvermelde concept voorstel was het oorspronkelijke uitgangspunt voor het huidige onderzoek.

##### in kader plaatsen #####

#### Terminologie:

Adaptief model: een lineair regressiemodel dat een verband legt tussen gewenste binnentemperatuur (of acceptabel temperatuurgebied) en externe meteorologische of klimatologische parameters; bijvoorbeeld het resultaat van ASHRAE onderzoeksproject RP-884 zoals gepubliceerd in (7).

Statisch model: een model dat een verband legt tussen ‘predicted mean vote’ (PMV) of ‘predicted percentage of dissatisfied’ (PPD) en omgevings- en persoonlijke parameters; bijvoorbeeld (1).

Thermisch neutrale situatie ( $T_n$ ): de waarde van de binnenklimaatindex (gewoonlijk operationele temperatuur) corresponderend met een gemiddeld neutrale score in termen van warmtegevoel door een steekproef van gebouwgebruikers (dit hoeft niet per definitie samen te vallen met de ‘geprefereerde temperatuur’ bij gebouwen met centrale klimaatregeling).

Warmtegevoel (thermal sensation): een bewust gevoel in het algemeen gekwatificeerd in termen van – koud, koel, lichtelijk koel, neutraal, lichtelijk warm, warm en heet; het vereist een subjectieve beoordeling. Iemands ideale thermische behaaglijkheid hoeft niet per definitie overeen te stemmen met een neutraal warmtegevoel.

Effectieve buitentemperatuur ( $ET^*$ ): volgens (6, 7, 13) zijn, bij de adaptieve thermische behaaglijkheid benadering, de optimale temperaturen afhankelijk van  $ET^*$  buiten. Het concept  $ET^*$  is destijds ontwikkeld met behulp van het ‘twee-knopen mensmodel’ (8). Het is gedefinieerd als de drogeboltemperatuur ( $DBT$ ) van een uniforme omgeving met een relatieve luchtvochtigheid van 50%, die netto dezelfde warmte-uitwisseling, door straling, convectie en verdamping, zou kennen als de omgeving in kwestie. In principe zou straling in rekening gebracht kunnen worden door operationele temperatuur in plaats van de  $DBT$  te gebruiken (9, 10). Bij afwezigheid van straling, vallen de  $ET^*$  lijnen samen met de  $DBT$  waarden bij 50% relatieve luchtvochtigheid; zie Figuur 1.

$$ET^* = t_o + w.i_m LR(p_a - 0.5 p_{ET^*,s}) \quad [1]$$

waarin:

$t_o$  = operationele temperatuur

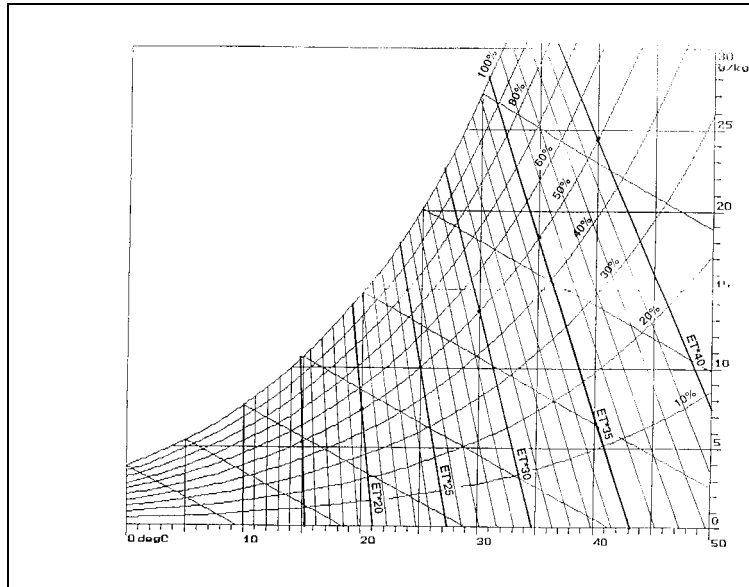
$w$  = huidvochtigheid (skin wettedness)

$i_m$  = vochtdoorlatingsindex (moisture permeability index)

$LR$  = Lewis verhouding (bij normale binnenomstandigheden ongeveer  $16.5^\circ\text{C}/\text{kPa}$ )

$p_a$  = partiele dampdruk van de omgeving

$p_{ET^*,s}$  = verzadigde dampdruk bij  $ET^*$



**Figuur 1.** Psychrometrisch diagram met  $ET^*$  lijnen (9)

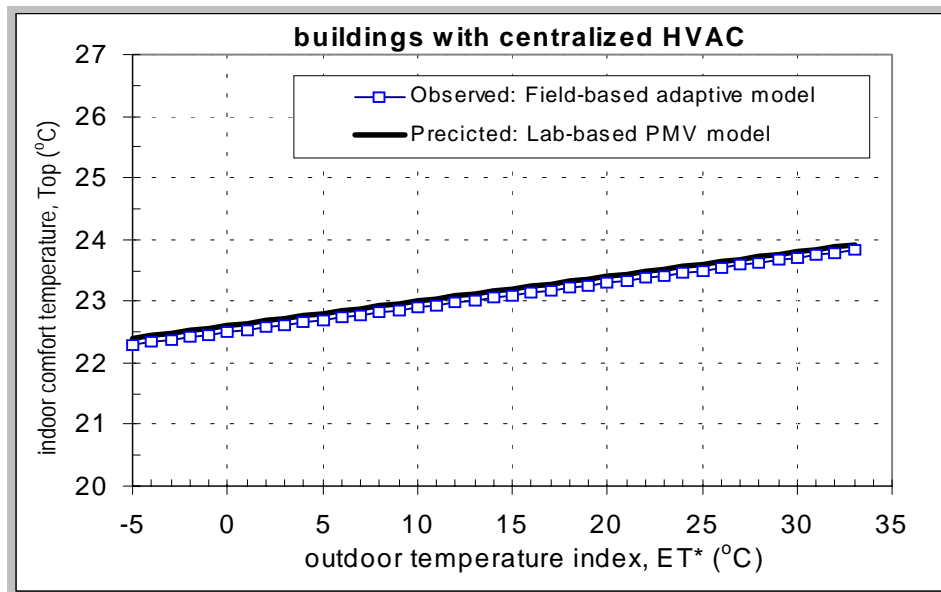
Bij adaptieve thermische behaaglijkheid wordt de optimale binnentemperatuur voor gebouwen met centrale binnenklimaatregeling berekend met vergelijking [2].

$$T_n = 22.6 + 0.04ET^* \quad \text{waarbij } -5 < ET^* < 3^\circ\text{C} \quad [2]$$

Het 90% acceptatie-interval (d.w.z. 90% van de bewoners vinden dit nog behaaglijk) ligt tussen  $T_n - 1.2^\circ\text{C}$  en  $T_n + 1.2^\circ\text{C}$

Figuur 2 toont vergelijking [2] samen met de behaaglijkheidstemperatuur volgens de huidige – op de “statische” PMV gebaseerde – norm. De resultaten van het adaptieve model zijn gebaseerd op metingen in een groot aantal gebouwen verdeeld over verschillende klimaatzones. De behaaglijkheidstemperatuur volgens het statische model is voor elk gebouw bepaald door het invoeren in het PMV model van, voor dat gebouw, de gemiddelde

luchtsnelheid, de relatieve luchtvochtigheid, kleding en het activiteitsniveau, en dit vervolgens te herhalen voor verschillende operationele temperaturen totdat  $PMV=0$ .



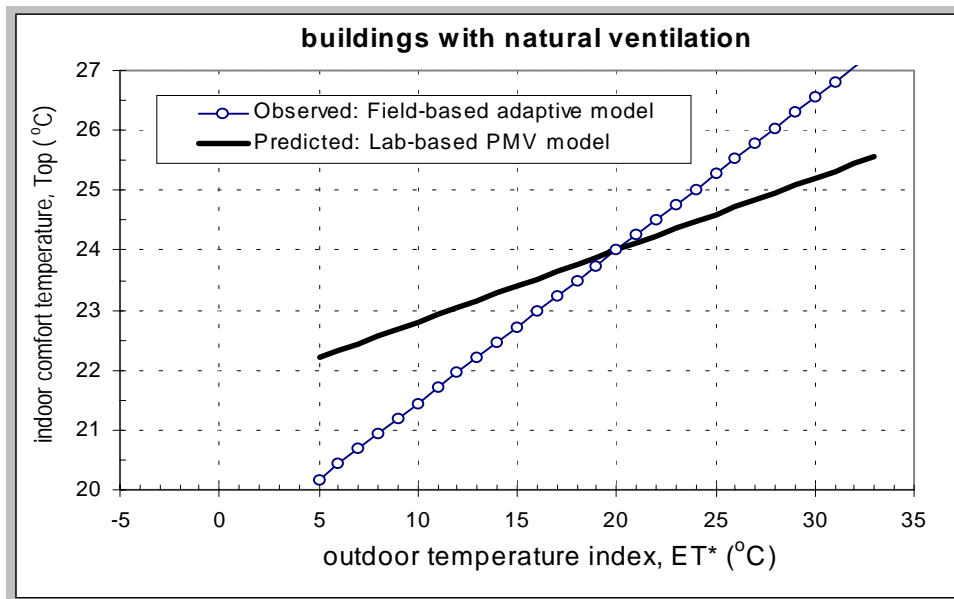
**Figuur 2.** Gewenste temperatuur voor gebouwen met centrale klimaatregeling volgens de op veldmetingen gebaseerde adaptieve thermische behaaglijkheid en afgeleid met de op laboratoriumproeven gebaseerde “statische” PMV methode. (13)

Bij adaptieve thermische behaaglijkheid wordt de optimale temperatuur voor gebouwen met natuurlijke ventilatie berekend met vergelijking [3].

$$T_n = 18.9 + 0.255ET^* \quad [3]$$

Het 90% acceptatie-interval ligt tussen  $T_n - 2.5^\circ\text{C}$  en  $T_n + 2.5^\circ\text{C}$

Figuur 3 toont vergelijking [3] samen met de behaaglijkheidstemperatuur volgens de huidige – op de “statische” PMV gebaseerde - norm. Deze adaptieve resultaten zijn wederom gebaseerd op experimentele resultaten in een groot aantal gebouwen in een reeks van klimaatzones. De behaaglijkheidstemperatuur volgens het statische model is voor elk gebouw afzonderlijk afgeleid zoals hiervoor al beschreven voor Figuur 2.



**Figuur 3.** Gewenste temperatuur voor gebouwen met natuurlijke ventilatie volgens de op veldmetingen gebaseerde adaptieve thermische behaaglijkheid en afgeleid met de op laboratoriumproeven gebaseerde “statische” PMV methode. (13)

##### einde kader #####

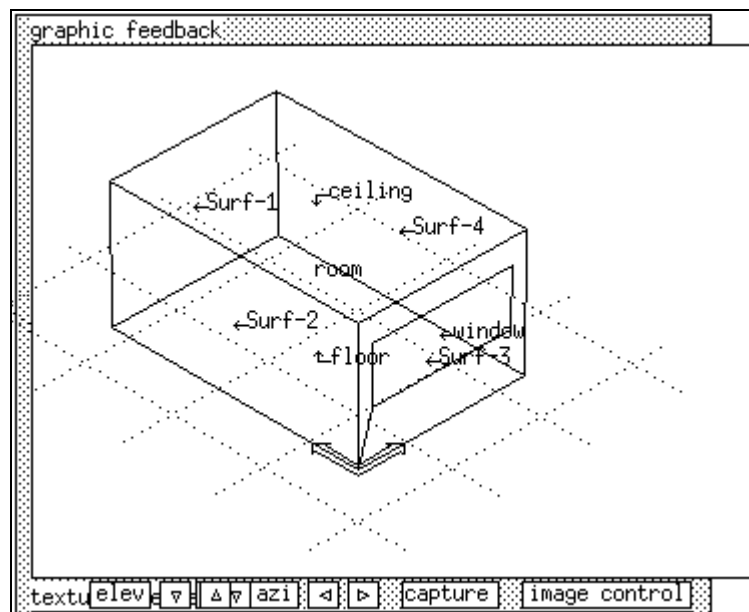
### Computermodellering en simulatie

Het doel van ons onderzoek was het voorspellen van de consequenties voor energiebehoefte door analyse van de energiebehoefte voor verwarming en koeling van ‘een standaard kantoorvertrek’ tengevolge van beide thermische behaaglijkheidsconcepten. De meest krachtige techniek voor analyse en ontwerp van complexe systemen (zoals gebouwen en bijbehorende installaties) is momenteel computermodellering en simulatie. In het voorliggend onderzoek is ESP-r (Environmental Systems Performance - research) (12) gebruikt; een dynamisch energie simulatie systeem dat in staat is om energie en massastromen (bijvoorbeeld lucht en water) te modelleren in gebouwen met bijbehorende klimaatregelininstallaties.

#### *Gebouwmodel*

De simulaties zijn uitgevoerd voor een “standaard kantoorvertrek” (11); een karakteristiek cellenkantoor voor twee gebruikers zoals schematisch aangegeven in Figuur 4. De afmetingen bedragen 3.5 x 5.4 x 2.7 m<sup>3</sup> (vloeroppervlak 19.4 m<sup>2</sup>, volume 52.5 m<sup>3</sup>). Het raam is op het westen georiënteerd; andere oriëntaties zijn ook beschouwd. De gevel heeft een U-waarde van 0.39 W/m<sup>2</sup>K, het raam heeft een U-waarde van 2.75 W/m<sup>2</sup>K en een transmissiefactor van 0.76. De activiteiten in het kantoor zijn voornamelijk zittend. De interne warmtebronnen bestaan uit 2 personen (totaal 140 W voelbaar plus 140 W latent) en diverse apparatuur (300 W). Het kantoor wordt gebruikt op weekdays van 08:00 tot 18:00 uur. De toevoer van verse

lucht door middel van natuurlijke of mechanische ventilatie<sup>4</sup> komt tijdens kantooruren overeen met een ventilatievoud van 1.2 /h; d.w.z. 30 m<sup>3</sup>/h/persoon (8.3 l/s/persoon). Buiten kantooruren is het ventilatievoud 0.2 /h.



**Figuur 4.** Model van het gesimuleerde 'standaard' kantoorvertrek

Voor wat betreft de klimaatregeling zijn vier strategieën beschouwd zoals aangegeven in Tabel 3. Voor het buitenklimaat is gekeken naar de situatie in Nederland (over het jaar gemiddelde buitenluchttemperatuur van 10°C) en in Tsjechië (jaar gemiddelde buitenluchttemperatuur 8.8°C).

### ***Gewenste binnentemperaturen***

De gewenste (of ontwerp) binnentemperatuur bereiken zijn gebaseerd op de thermische behaaglijkheidsbenaderingen zoals hierboven aangegeven. De numerieke waarden van de middelwaarden zijn samengevat in Tabel 3. De gewenste temperaturen voor het 90% acceptatie-interval zijn grafisch weergegeven in Figuur 5 voor Nederland en in Figuur 6 voor Tsjechië. Uit deze figuren is meteen duidelijk dat er relatief grote verschillen bestaan tussen de verschillende benaderingen.

Gedurende het stookseizoen zullen de minimale binnentemperaturen ongeveer 1.5°C hoger worden dan met de huidige normen indien de adaptieve behaaglijkheidsbenadering aangenomen zou worden voor gebouwen met centrale klimaatregeling. Gedurende het stookseizoen zullen de minimale binnentemperaturen ongeveer 2°C lager worden dan met de huidige normen indien de adaptieve behaaglijkheidsbenadering aangenomen zou worden voor gebouwen met natuurlijke ventilatie.

---

<sup>4</sup> In werkelijkheid zal de toevoer van verse lucht niet constant zijn in natuurlijk geventileerde gebouwen. Echter, omdat we de nadruk wilden leggen op het effect van de verschillende regelstrategieën zijn variabele infiltratie- en ventilatiehoeveelheden door natuurlijke ventilatie buiten beschouwing gelaten.



In het midden van het koelseizoen zal de maximale binnentemperatuur ongeveer 1.5°C lager worden dan met de huidige normen indien de adaptieve behaaglijkheidsbenadering aangenomen zou worden aangenomen voor gebouwen met centrale klimaatregeling. De maximale binnentemperatuur zal ongeveer 0.5°C lager worden dan met de huidige normen indien de adaptieve behaaglijkheidsbenadering aangenomen zou worden voor gebouwen met natuurlijke ventilatie.

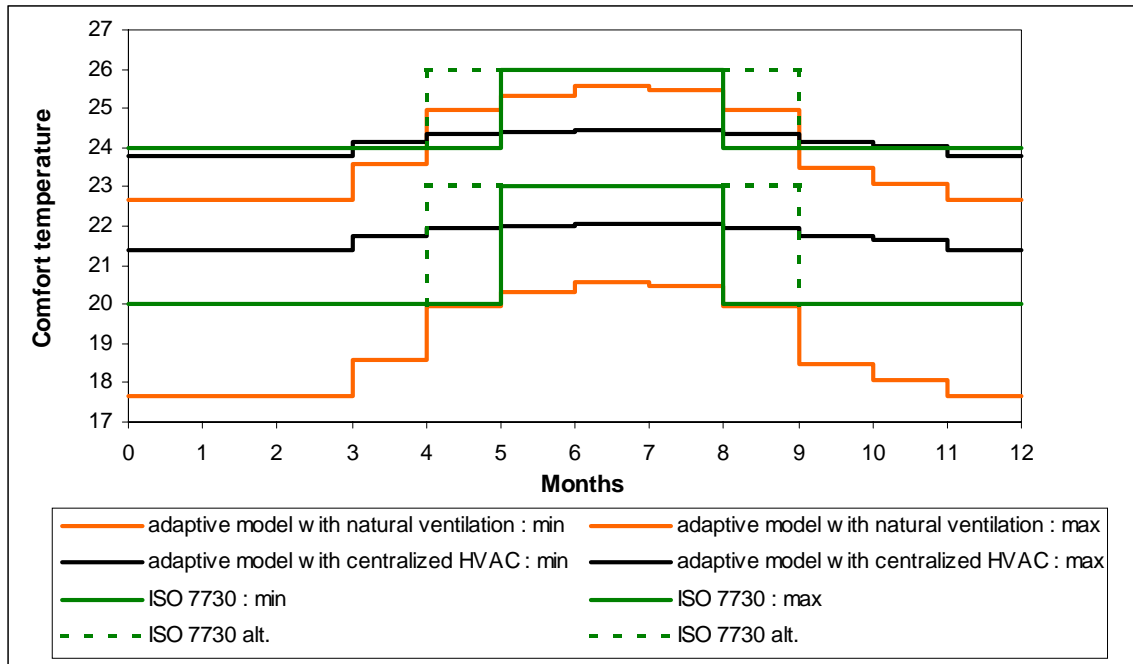
Zoals te zien in Figuur 5 en Figuur 6 kan de omgekeerde situatie zich voordoen gedurende de tussenseizoenen; d.w.z. dat de maximale binnentemperaturen kunnen hoger uitvallen dan volgens de huidige normen. Een en ander hangt ervan af of mei en september worden gerekend tot het stook- of koelseizoen.

**Tabel 3.** Middelwaarden van gewenste binnentemperaturen per maand op basis van:

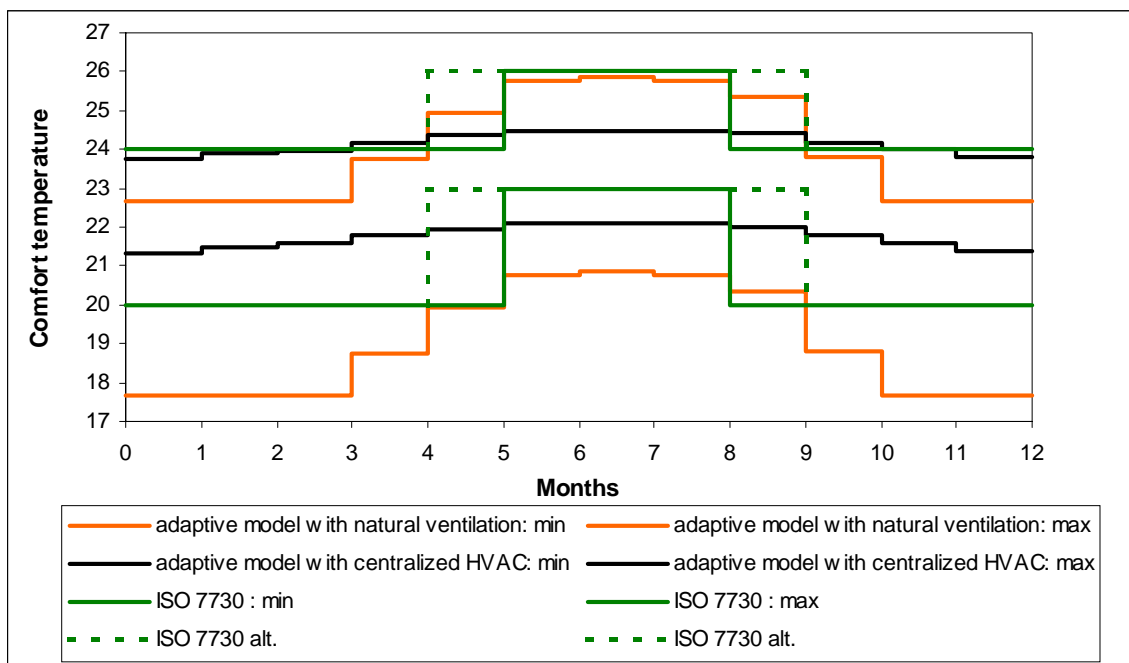
- T<sub>i</sub>[1] “Statisch” behaaglijkheidsmodel zoals aangegeven in Tabel 1 en Tabel 2
- T<sub>i</sub>[2] Adaptieve thermische behaaglijkheid voor gebouwen met natuurlijke ventilatie volgens vergelijking [3] en Figuur 3
- T<sub>i</sub>[3] Adaptieve thermische behaaglijkheid voor gebouwen met centrale klimaatregeling volgens vergelijking [2] en Figuur 2
- T<sub>o</sub> Maandelijks gemiddelde ET\* buiten of maandelijks gemiddelde drogebol-temperatuur buiten, die overigens voor Nederland en Tsjechië vrijwel gelijk zijn (zie onder “ET\* buiten en zonstraling”)

Maand	ISO	Nederland			Tsjechië		
	T <sub>i</sub> [1]	T <sub>o</sub>	T <sub>i</sub> [2]	T <sub>i</sub> [3]	T <sub>o</sub>	T <sub>i</sub> [2]	T <sub>i</sub> [3]
1	22.0	0.7	20.2	22.6	-1.5	20.2	22.5
2	22.0	3.4	20.2	22.7	2.5	20.2	22.7
3	22.0	2.8	20.2	22.7	4.3	20.2	22.8
4	22.0	8.5	21.1	22.9	9.3	21.3	23.0
5	22.0	13.9	22.4	23.2	13.9	22.4	23.2
6	24.5	15.3	22.8	23.2	17.1	23.3	23.3
7	24.5	16.4	23.1	23.3	17.5	23.4	23.3
8	24.5	16.0	23.0	23.2	17.1	23.3	23.3

9	22.0	14.0	22.5	23.2	15.4	22.8	23.2
10	22.0	8.1	21.0	22.9	9.5	21.3	23.0
11	22.0	6.6	20.6	22.9	4.5	20.2	22.8
12	22.0	2.2	20.2	22.7	-0.2	20.2	22.6



**Figuur 5.** Gewenste binnentemperaturen (90% acceptatie interval) volgens de uitgangspunten in Tabel 3 voor Nederland



**Figuur 6.** Gewenste binnentemperaturen (90% acceptatie interval) volgens de uitgangspunten in Tabel 3 voor Tsjechië

## Resultaten & discussie

Zoals samengevat in Tabel 4, leveren de simulaties resultaten op in termen van energiebehoefte voor verwarming en koeling van een karakteristiek kantoormoduul. De resultaten kunnen echter ook worden geïnterpreteerd als maat voor (over de tijd geïntegreerde) over- of onderschrijding van de gewenste binnentemperaturen, als er geen verwarmings- of koelsysteem aanwezig zou zijn.

Gezien de gewenste binnentemperaturen gedurende het stookseizoen zoals aangegeven in Figuur 5 en Figuur 6, is het niet verwonderlijk dat de energiebehoefte voor verwarming lager zal uitvallen als uitgegaan zou worden van adaptieve behaaglijkheid in gebouwen met natuurlijke ventilatie. Vanwege de hogere gewenste temperaturen, is het ook niet verwonderlijk dat de energiebehoefte voor verwarming hoger zou uitvallen indien de adaptieve behaaglijkheid zou worden aangenomen voor gebouwen met centrale binnenklimaatregeling.

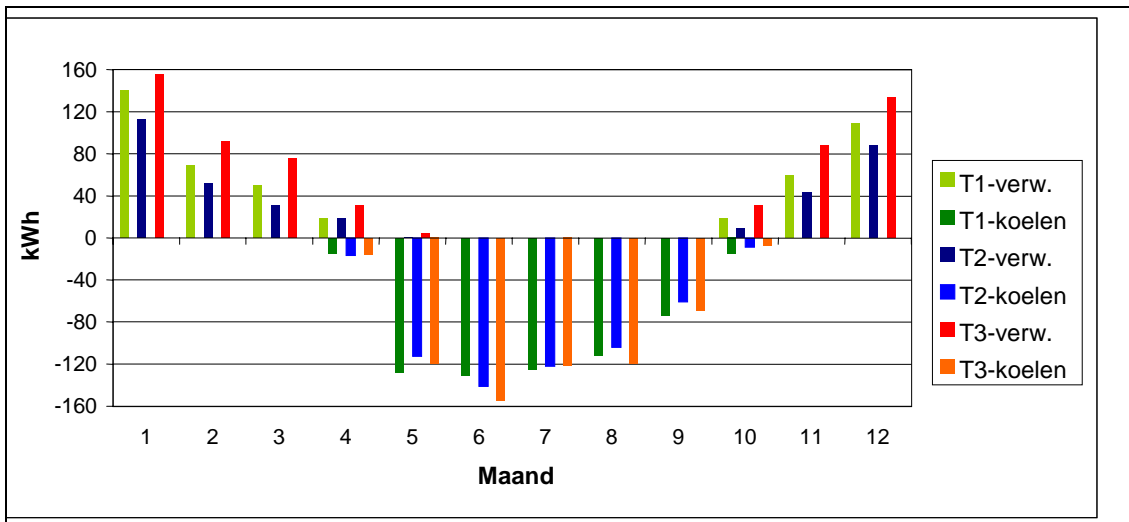
Omdat de gewenste temperaturen bij adaptieve behaaglijkheid (d.w.z.  $T_n[2]$  en  $T_n[3]$  in Tabel 4) lager zouden zijn gedurende de zomer (Figuur 5 en Figuur 6), zou men een grotere energiebehoefte voor koeling verwachten. De reden waarom dit toch niet zo is kan worden gezien in Figuur 7, waarin de maandelijkse energiebehoefte staat van het kantoormoduul indien het op het westen georiënteerd in Nederland zou zijn. Het is duidelijk dat er een aanzienlijke hoeveelheid koeling nodig is in mei en september; d.w.z. maanden waarin – in onze aanname – de temperatuur volgens de huidige normen gelijk zou zijn aan die voor het stookseizoen (zie Figuur 5).

**Tabel 4.** Jaarlijkse absolute en relatieve energiebehoefte voor verwarming en koeling van het kantoomodul bij verschillende oriëntaties (O) en voor de 3 binnenklimaatregelingen (T<sub>i</sub>) van Tabel 3.

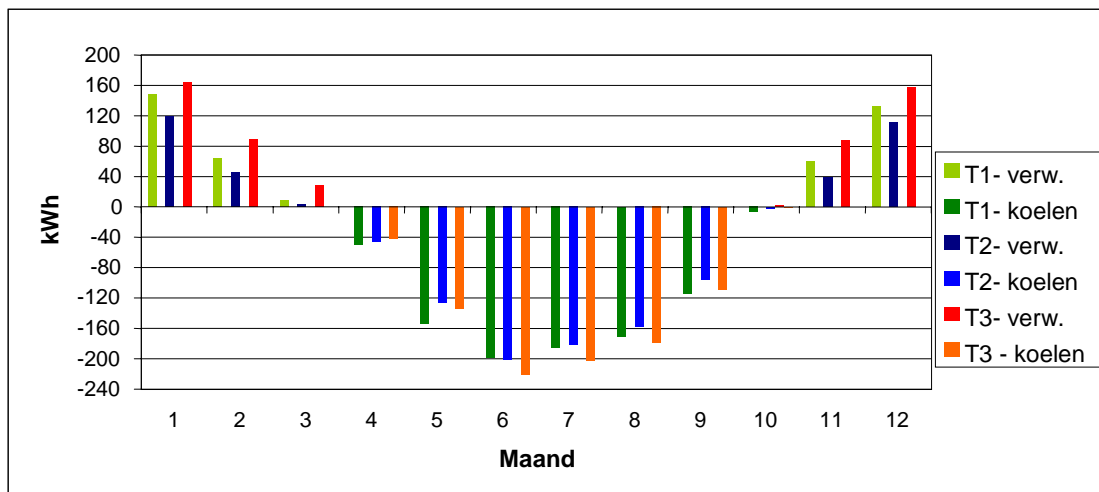
O	T <sub>i</sub>	Nederland				Tsjechië			
		Verwarmen (kWh)	Koelen (kWh)	Totaal (kWh)	Totaal (%)	Verwarmen (kWh)	Koelen (kWh)	Totaal (kWh)	Totaal (%)
N	1	585.8	133.7	719.5	100	541.4	232.0	773.4	100
	2	467.5	124.5	592.0	82	421.5	192.3	613.9	79
	3	761.2	163.6	924.8	129	704.2	260.1	964.3	125
O	1	546.8	309.3	856.1	100	449.5	512.4	962.0	100
	2	429.7	279.9	709.7	83	341.9	455.9	797.8	83
	3	709.3	341.2	1050.5	123	581.6	527.4	1109.0	115
Z	1	389.3	429.6	818.9	100	365.0	606.8	971.9	100
	2	429.8	286.7	716.5	87	270.4	540.5	811.0	83
	3	533.7	452.2	985.9	120	477.9	609.0	1086.8	112
W	1	463.8	599.5	1063.3	100	414.5	882.0	1295.5	100
	2	354.6	565.0	919.6	87	321.1	813.1	1134.2	88
	3	611.1	606.6	1217.7	115	530.3	887.6	1417.9	109

Als mei en september zouden worden beschouwd als zomermaanden volgens de huidige normen (d.w.z. T<sub>n</sub>[1]), dan zou de energiebehoefte voor koelen aanzienlijk als de huidige behaaglijkheidsnormen zouden worden toegepast. Met andere woorden; de energiebehoefte voor koelen zou hoger worden bij de adaptieve behaaglijkheidsbenadering.

Figuur 8 toont vergelijkbare resultaten maar nu voor Tsjechië. Aangezien het klimaat in Tsjechië redelijk vergelijkbaar is met Nederland, geldt de bovenstaande conclusie ook daar.



**Figuur 7.** Maandelijke energiebehoefte voor verwarmen en koelen van het kantoor bij west oriëntatie in Nederland.



**Figuur 8.** Maandelijke energiebehoefte voor verwarmen en koelen van het kantoor bij west oriëntatie in Tsjechië.

### Vragen en discussiepunten

Tijdens het hierboven samengevatte onderzoek zijn enkele vragen en discussiepunten naar voren gekomen waarop hieronder kort wordt ingegaan.

#### *Effectieve buitentemperatuur (ET\*) en zonnestraling*

Zoals boven aangegeven is de effectieve temperatuur een imaginaire temperatuur van een uniforme ruimte bij een relatieve luchtvochtigheid van 50%, die dezelfde netto warmteuitwisseling door straling, convectie en verdamping zou produceren als de feitelijke

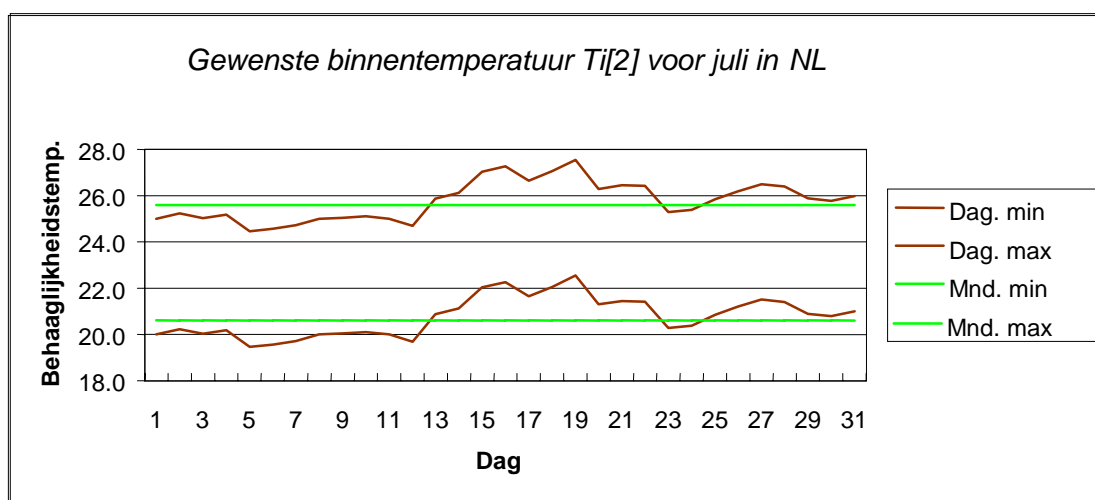
omgeving. Echter, wanneer de effectieve buitentemperatuur ( $ET^*$ ) wordt berekend dan wordt normaal gesproken geen rekening gehouden met zonnestraling; zie bijvoorbeeld ASHRAE RP-884 (7). (Wij hebben overigens dezelfde benadering gevolgd in ons onderzoek.)

Volgens Brager en De Dear (14) is binnen het ASHRAE Standard 55 comité overeengekomen dat  $ET^*$  een index is die met name door onderzoekers wordt gebruikt, en dat de adaptieve behaaglijkheidsbenadering in praktijk eerder zou worden toegepast als deze zou worden gebaseerd op een meer gebruikelijke, eenvoudiger, meteorologische index.. Daarom is het adaptieve behaaglijkheidsmodel geherformuleerd in termen van gemiddelde maandelijkse buitenluchttemperatuur. Dit laatste is simpel gedefinieerd als het rekenkundig gemiddelde per maand van het gemiddelde dagelijkse minimum en het gemiddelde dagelijkse maximum van de drogebol-temperatuur van de buitenlucht. Dit soort gegevens is vertrouwder en eenvoudig beschikbaar in de praktijk.

De impliciete rechtvaardiging schijnt te zijn dat ofwel de externe drogebol-temperatuur dominant voor wat betreft het kledinggedrag en/of thermische adaptatie van mensen, of dat het kruiselings verband tussen drogebol-temperatuur en hoeveelheid zonnestraling zo sterk is dat het feitelijk niet meer nodig is om afzonderlijk met zonnestraling rekening te houden. Volgens ons is dit echter een punt van discussie dat vooralsnog niet gekwantificeerd kan worden.

### ***Gemiddelde $T_o$ gebaseerd op dagelijkse of maandelijkse gemiddelde waarden***

In de voorliggende studie zijn de gewenste binnentemperaturen voor adaptieve behaaglijkheid vastgesteld per maand; d.w.z. gebaseerd op de maandelijks gemiddelde  $T_o$ . Dit is conform het huidige concept van de norm; zie (14). Echter, volgens een eerder concept van dezelfde norm (7) zou de gemiddelde  $T_o$  ook per dag mogen worden bepaald. Dit is een belangrijk verschil, met name voor landen zoals Nederland (zie Figuur 9) en Tsjechië. Het is duidelijk dat indien de gemiddelde  $T_o$  per dag zou mogen worden, de binnentemperaturen aanzienlijk hoger zouden mogen zijn tijdens de warmere dagen, met name voor gebouwen met natuurlijke ventilatie.



**Figuur 9.** Illustratie van gewenste binnentemperaturen gebaseerd op dagelijkse of maandelijkse gemiddelde buitentemperaturen uitgaande van adaptieve thermische behaaglijkheid in natuurlijk geventileerde gebouwen in juli in Nederland.

De onderliggende vraag is natuurlijk of de tijdconstante van de menselijke thermische adaptatie in de orde van een dag of in de orde van een maand is. Het lijkt redelijker om het eerste te veronderstellen. Gevolg is dat het redelijker lijkt om in principe uit te gaan van gemiddelde  $T_o$  per dag en om (wellicht) gemiddelde  $T_o$  per maand alleen toe te staan in die gevallen waarbij de weergegevens niet per dag beschikbaar zijn. Dit lijkt een punt van discussie te zijn dat nog opgelost dient te worden.

### *Definitie van gebouwcategorieën*

Tenslotte is er de niet onbelangrijke vraag hoe de twee gebouwcategorieën moeten worden gedefinieerd. De geldigheidsdefinities in de oorspronkelijk voorgestelde norm (7) stellen (vrij vertaald) het volgende.

- *Norm voor gebouwen met centrale binnenklimaatregeling:* de norm geldt uitsluitend voor binnencondities door klimaatregelsystemen waarop de bewoners geen invloed kunnen uitoefenen. De gebruikers van zulke gebouwen worden verondersteld de ramen niet te kunnen openen of sluiten.
- *Norm voor natuurlijk geventileerde gebouwen:* de norm geldt uitsluitend voor binnencondities zonder centraal geregeld klimaatsystemen. Deze gebouwen worden verondersteld door de bewoners te openen ramen te hebben. De gebouwen mogen wel verwarming hebben, maar wordt dan regelbaar door de gebruikers, individueel dan wel in kleine groepen.

Veel gebouwen in gematigde klimaten hebben zogenaamde mixed mode koeling. Soms betekent dit dat in de koelbehoefte op een bepaald moment wordt voorzien door mechanische koeling of door natuurlijke ventilatie. In andere gevallen kunnen beide systemen tegelijkertijd werken. Meestal bestaan deze systemen uit centrale en decentrale componenten en regelingen. Vermoedelijk zouden deze systemen in de tweede categorie vallen omdat de gebruikers een bepaalde vorm van controle hebben, hoewel dit niet meteen duidelijk is uit de bovenstaande geldigheidsdefinities.

Verder is er nog het veel voorkomende geval van een natuurlijk geventileerd gebouw met centraal geregeld verwarmingssysteem. Strikt volgens de bovenstaande definities zou zo'n gebouw in de eerste categorie vallen; maar is dit redelijk?

Of dient de norm zo te worden geïnterpreteerd dat een bepaald gebouw tijdens het stookseizoen in de eerste categorie valt en tijdens het koelseizoen in de tweede, of vice-versa?

Het ASHRAE Standard 55 comité heeft op enkele van deze vragen al antwoord gegeven. Volgens Brager en De Dear (14) zijn de geldigheidsdefinities een van de belangrijkste punten van discussie geweest binnen het comité.

De huidige stand van zaken is dat in de nieuwe Standard 55 met adaptieve behaaglijkheid rekening zal worden gehouden, met dien verstande dat het een optie wordt die alleen mag worden toegepast in de volgende gevallen.

- Ruimten met natuurlijke ventilatie waarbij de thermische omstandigheden in de ruimte primair worden geregeld door de bewoners door het openen en sluiten van ramen. Er wordt speciaal op gewezen dat de ramen makkelijk bereikbaar en regelbaar moeten zijn.

- De ruimte mag een verwarmingssysteem hebben, maar de methode mag niet worden toegepast als het systeem in werking is.
- De ruimte mag niet zijn voorzien van mechanische koeling (zoals bijvoorbeeld mechanisch gekoelde lucht, stralingspanelen of desicant koeling).
- De ruimte mag mechanisch worden geventileerd met niet-geconditioneerde lucht, maar te openen ramen moet het primaire middel zijn om de thermische omstandigheden te regelen.
- De gebruikers van de ruimte moeten vrijwel zittende activiteiten verrichten (1 – 1.3 met), en ze mogen niet worden belemmerd in het aanpassen van hun kleding aan de thermische binnen- en buitenomstandigheden.

## Conclusies

Zoals al gerapporteerd door Brager en De Dear (13, 14) is de oorspronkelijk voorgestelde norm (7) voor adaptieve thermische behaaglijkheid in gebouwen met centrale klimaatregeling niet langer relevant. Als dat wel zo geweest zou zijn, dan zouden de gewenste binnentemperaturen in landen als Nederland en Tsjechië strikter zijn dan volgens de huidige normen en daardoor zou de energiebehoefte groter zijn geworden.

De oorspronkelijk voorgestelde adaptieve behaaglijkheidsnorm (7) voor gebouwen met natuurlijke ventilatie zou voor gematigde streken zoals Nederland en Tsjechië tot aanzienlijk lagere energiebehoefte voor verwarming leiden in vergelijking tot de huidige behaaglijkheidsnorm. Hoe realistisch is het echter om niet te verwarmen boven een operationele temperaturen van  $18^{\circ}\text{C}$  (de ondergrens van het 90 % acceptatie-interval bij buiten  $T_o \leq 5^{\circ}\text{C}$ ? Vermoedelijk hebben dergelijke vragen het ASHRAE Standard 55 comité doen besluiten dat het lage gebied van vergelijking [3] te extreem is. Brager en De Dear (14) schrijven dat dientengevolge in de nieuwe Standard 55 voor adaptieve behaaglijkheid een ondergrens zal gelden van  $T_o = 10^{\circ}\text{C}$ , in plaats van  $T_o = 5^{\circ}\text{C}$  zoals zelfs nog aangegeven in (13). Zoals te zien in Tabel 3, betekent dit voor gematigde klimaten zoals in Nederland en Tsjechië dat de adaptieve thermische behaaglijkheid het grootste gedeelte van het jaar (zeg van oktober tot en met april) niet relevant is.

Op basis van de maandelijks gemiddelde buitentemperaturen in Nederland en Tsjechië, zou de adaptieve benadering voor natuurlijk geventileerde gebouwen tot striktere gewenste temperaturen leiden gedurende het grootste gedeelte van de zomer. Aangezien mechanische koeling hierbij niet langer aan de orde is (14) zal het energiegebruik voor koeling niet toenemen. Het zou echter voor een ontwerper makkelijker zijn om te voldoen aan de huidige normen waardoor de adaptieve benadering een twistpunt zou worden.

Zoals aangegeven in Figuur 9, zou de situatie veranderen (d.w.z. hogere toelaatbare binnentemperaturen in de zomer), indien de adaptieve benadering gebaseerd zou worden op per dag gemiddelde buitentemperaturen. In die situatie zal de adaptieve benadering ook voordelen hebben voor landen met gematigd klimaat zoals Nederland en Tsjechië.



De slotconclusie van ons onderzoek is dat er voor Nederland en Tsjechië er geen redenen lijken te zijn om ook maar enige haast te maken met het aanpassen van onze huidige normen in verband met adaptieve thermische behaaglijkheid.

### *Literatuur*

- (1) ISO 7730 1993. “Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort”, International Standardization Organization.
- (2) ANSI/ASHRAE 55-1992. “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- (3) Fanger, P.O. 1972. “Thermal comfort; analysis and applications in environmental engineering”, McGraw-Hill, New York.
- (4) Olesen, B.W. 2000. “Guidelines For Comfort”, ASHRAE Journal, August, pp. 41-46, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- (5) McIntyre, D.A. 1981. “Design Requirements for a Comfortable Environment”, Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort, pp. 195-220
- (6) Brager, G.S. en R.J. de Dear 1998. “Thermal adaptation in the built environment: A literature review”, Energy and Buildings 27, pp. 83-96
- (7) De Dear, R.J. en G.S. Brager 1998. “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference”, ASHRAE Transactions, vol.104(1), pp. 27-49, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- (8) Gagge, A.P. 1973. “Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation”, in Federation Proceedings, vol. 32, no. 5, pp. 1572-1582, Federation of American Societies for Experimental Biology.
- (9) Auliciems, A., en S.V. Szokolay 1997. “Thermal Comfort”, University of Queensland, Australia
- (10) ASHRAE 1997.”Fundamentals”, ASHRAE Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- (11) Hensen, J.M.L. 1994. “Energy related design decisions deserve simulation approach”, International Conference of Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning, Technische Universiteit Eindhoven.
- (12) ESRU 1998. “ESP-r - A Building Energy Simulation Environment, User Guide”, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow.
- (13) Brager, G.S. en R. de Dear 2000. “A standard for natural ventilation”, ASHRAE Journal, October, pp. 21-28, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA.

(14) Brager, G.S. en R. de Dear 2001. "Climate, comfort & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55", in Proc. Int. Conf. "Moving thermal comfort standards into the 21<sup>st</sup> century" held in Windsor, Oxford Brookes University.

(15) Linden, A.C. van der, M. Kerssemakers, A.C. Boerstra en A.K. Raue 2001. "Thermisch binnenklimaat als gebouwprestatie", TVVL Magazine, vol. 30, nr. 2, pp. 20-25.