

Onderzoek naar op PMV gebaseerde temperatuurgrenswaarden

Adaptief thermisch comfort in basisschool leslokalen

Kan de PMV-methode gebruikt worden om temperatuurgrenswaarden te bepalen voor niet-kantoorgebouwen en specifiek voor leerlingen in een basisschool klaslokaal? En kan met deze methode dan het thermisch comfort preciezer worden voorspeld? Dit door te kijken of de parameters van thermisch comfort gedurende het jaar veranderen, bijvoorbeeld onder invloed van het buitenklimaat. Welke andere mogelijk kortere termijn invloeden zijn bovendien op te merken. Bij onderzoek hiernaar was er extra aandacht voor de gemiddelde kledingweerstand van kinderen in leslokalen. Het onderzoek is verricht in drie verschillende scholen in Eindhoven, waarbij in iedere school in één klaslokaal de meting heeft plaatsgevonden.

Ir. S. (Sander) ter Mors, prof.dr.ir. J.L.M. (Jan) Hensen, dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans, Technische Universiteit Eindhoven; ir. Atze C. Boerstra, BBA Binnenmilieu en Technische Universiteit Eindhoven

Mensen in ontwikkelde landen verblijven ongeveer 80% van de tijd binnen. Het binnenklimaat heeft hierdoor een grote invloed op de gezondheid en kwaliteit van het leven. Thermisch comfort is een indicator voor een groot aantal eigenschappen van het binnenklimaat. Voor leslokalen geldt dat het binnenklimaat niet alleen invloed heeft op comfort en gezondheid, maar ook op de leerprestaties [1]. Er zijn verschillende manieren om het thermisch comfort te voorspellen. Dit kan met de PMV-methode, die uitgaat van de samenhang tussen warmtebalans, thermische sensatie en thermisch comfort, zoals door Fanger onder laboratoriumomstandigheden vastgesteld [2]. De voorspelling kan ook bepaald worden met methoden die zich baseren op metingen in veldsituaties, zoals bij de Adaptieve Temperatuur Grenswaarden gedefinieerd in ISSO 74 [3] of Ashrae standard 55 [4]. Hierbij

wordt de tijdgewogen buitentemperatuur als onafhankelijke variabele gebruikt. De berekening van de PMV gebeurt op basis van fysiologische kenmerken van het menselijk lichaam en de thermische balans met de omgeving. Op een persoonlijk niveau zijn dit de kledingweerstand en fysieke activiteit. De omgeving is in deze zin bepaald door de luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtvochtigheid en luchtsnelheid. De berekening geeft de gemiddelde thermische sensatie voor een grote groep mensen; fysiologische variatie en psychologische effecten worden hierin niet meegenomen. Voor volledig geklimatiseerde gebouwen kan met deze methode de comfortabele conditie accuraat voorspeld worden, maar in 'free-running' gebouwen wordt de thermische sensatie (tabel 1) in de winter onderschat en in de zomer overschat. Psychologische adaptatie

is een verklaring voor deze afwijking. Dit effect wordt beschreven door onder andere de Dear et.al. [5] en Humphreys en Nicol [6]. ISSO 74 is een Nederlandse richtlijn voor thermisch comfort, waarin tevens adaptieve temperatuurgrenswaarden gegeven worden. ISSO 89 [7] is specifiek bedoeld voor scholen en geeft onder andere ook richtlijnen voor

+3	Heet
+2	Warm
+1	Beetje warm
0	Neutraal
-1	Beetje koel
-2	Koel
-3	Koud

-Tabel 1- Ashrae 7-punts thermische sensatieschaal (Ashrae 2004)

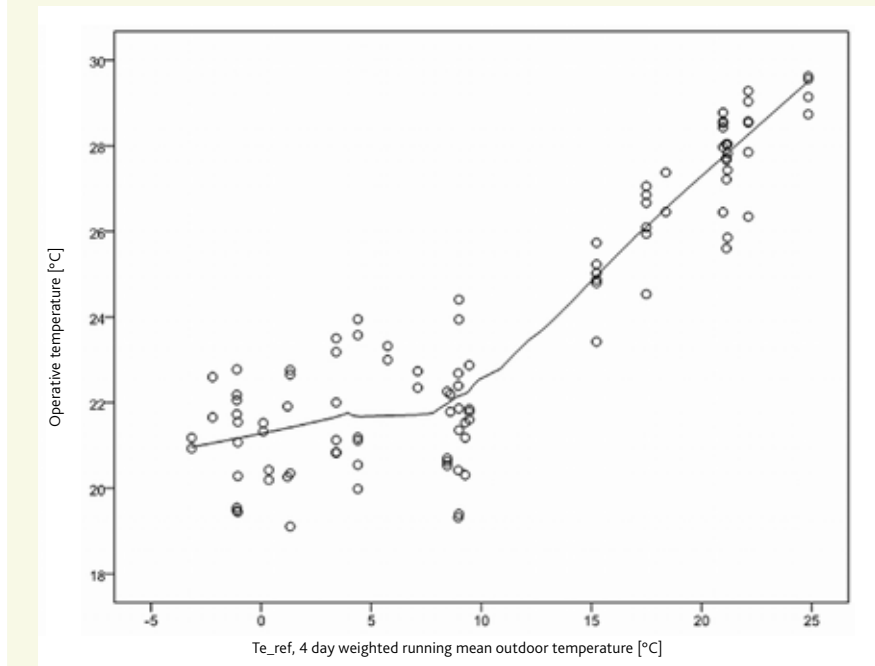
het thermisch comfort. Deze richtlijnen zijn gebaseerd op ISSO 74, maar vereenvoudigd ten aanzien van de weging van de buitentemperatuur.

Het gebruik van temperatuurgrenswaarden als functie van het buitenklimaat is een zeer snel te begrijpen methode om thermisch comforteisen weer te geven. Eerder onderzoek door van der Linden et al [8] heeft aangetoond dat de PMV-methode met correcte input vergelijkbare comfortcondities voorspelt als de ATG uit ISSO 74 voor een gematigd klimaat zoals dat van Nederland. Het voordeel van de PMV-methode is dat de input volledig op de werkelijke situatie aangepast kan worden, waardoor de voorspelde comfortcondities in detail voor de specifieke situatie bepaald kunnen worden.

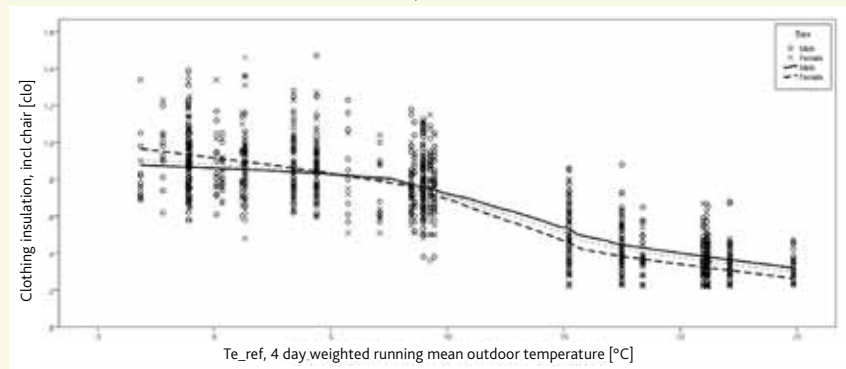
Het doel van het in dit artikel behandelde onderzoek is om te kijken of de PMV-methode gebruikt kan worden om temperatuurgrenswaarden te bepalen, vergelijkbaar qua opzet met de ATG, maar dan voor niet-kantoorgebouwen en specifiek voor leerlingen in een basischool klaslokaal. Op basis hiervan kan gekeken worden of met de PMV-methode verbeterde precisie in de thermisch comfortvoorspellingen bereikt kan worden. Hierbij wordt gekeken of de parameters van thermisch comfort gedurende het jaar veranderen, bijvoorbeeld onder invloed van het buitenklimaat. Ook wordt onderzocht welke andere mogelijk kortere termijninvloeden op te merken zijn. Extra aandacht is uitgegaan naar de gemiddelde kledingweerstand van kinderen in leslokalen. Voor een uitgebreidere uitwerking van dit afstudeeronderzoek, methode en resultaten zie ter Mors et al [9].

METHODE

Het onderzoek is verricht in drie verschillende scholen in Eindhoven, waarbij in iedere school in één klaslokaal de meting heeft plaatsgevonden. Om de PMV te bepalen voor de kinderen in deze lokalen zijn de fysieke parameters die de thermische sensatie beïnvloeden gemeten. Hiernaast is met behulp van vragenlijsten tweemaal per dag de gedragen kleding (clo) en het activiteitsniveau (met) bepaald. Dit is in drie sessies gedaan – in de winter, lente en zomer van 2010 – en omvat in totaal resultaten voor 24 dagen per school. Met de vragenlijsten is ook de werkelijke thermische sensatie bepaald. Voor de buitencondities zijn meetgegevens van het KNMI gebruikt. De drie scholen zijn gebouwd in 2002, 1994 en 1964, en de gekozen leslokalen van groep 6 en 7 lagen alle op de bovenste verdieping van de gebouwen. De lokalen hadden alle drie te openen ramen en centraal geregeld verwarming door middel van lokaal na te regelen



-Figuur 1- Operatieve binnentemperatuur en $\theta_{e,ref}$



-Figuur 2- Individuele kledingweerstand van de leerlingen bij $\theta_{e,ref}$

radiatoren. De nieuwste school had natuurlijke luchttoevoer en mechanische luchtafvoer. Het gehanteerde debiet was echter onvoldoende, waardoor de te openen ramen voor het grootste deel van de ventilatie zorgden. Voor de tweede school gold dit ook, behalve in de zomer toen de mechanische afvoer maximaal was gezet en ramen door de docente gesloten werden gehouden. In het lokaal was een koelunit aanwezig, maar het effect hiervan tijdens de warme zomerdagen werd op basis van de gemeten condities als minimaal beoordeeld. In de derde school was enkel sprake van natuurlijk ventilatie met behulp van te openen ramen.

RESULTATEN

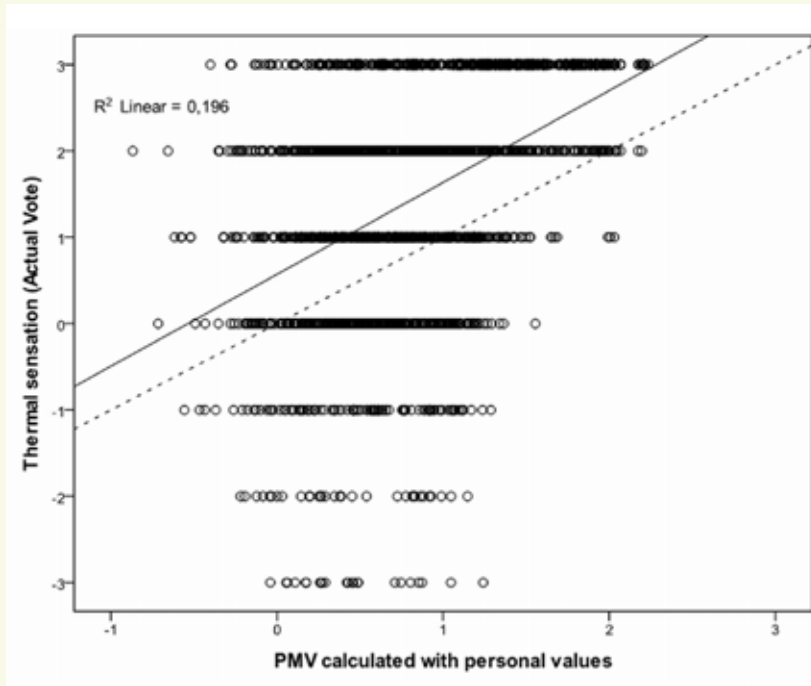
Figuur 1 geeft de gemiddelde operatieve binnentemperatuur per gemeten dagdeel tegen de tijdgewogen buitentemperatuur $\theta_{e,ref}$. De

operatieve temperatuur is het gemiddelde van de lucht- en gemiddelde stralingstemperatuur. $\theta_{e,ref}$ is een gewogen gemiddelde van de buitentemperatuur over een periode van 4 dagen. Te zien is dat gedurende de winter en lente de binnentemperatuur gemiddeld redelijk constant is, maar dat wanneer de buitentemperatuur verder stijgt de binnentemperatuur dit ook doet, ongeveer 0,5°C per 1°C stijging in $\theta_{e,ref}$. De zomermeting heeft plaatsgevonden tijdens enkele van de warmste dagen van het jaar. De trendlijn in de figuur is een Locally weighted scatterplot smoothing (Loess) curve (Epanechnikov kernel, 50% fit).

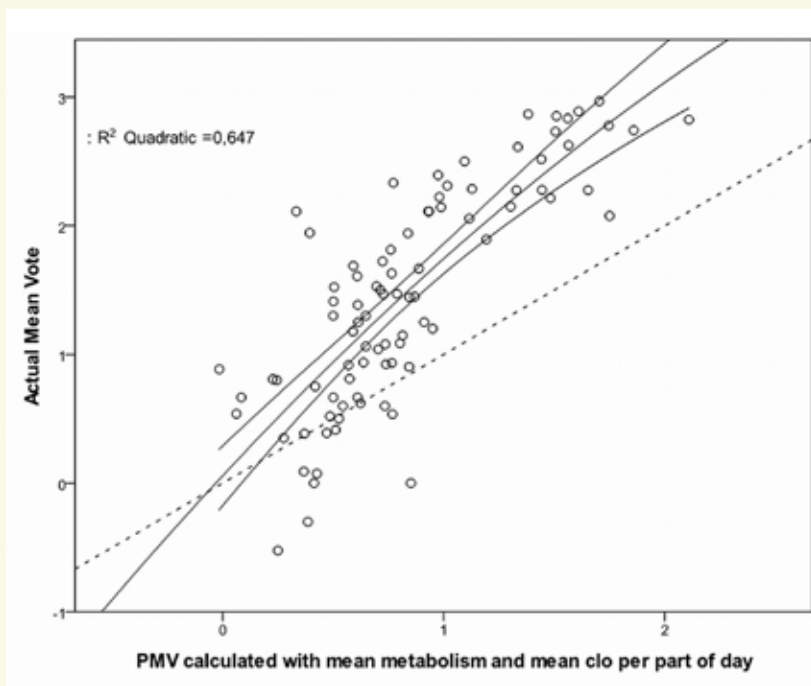
De individuele kledingweerstand als functie van de tijdgewogen buitentemperatuur is gegeven in figuur 2. De trendlijnen hierin zijn wederom Loess-curven, voor de jongens, meisjes en alle leerlingen samen. Zoals te

$\theta_{e,ref}$ [°C] range	Lineaire functie
$-3^{\circ}\text{C} < \theta_{e,ref} < 8^{\circ}\text{C};$	$\text{clo_gem} = 0,9 - 0,1 * (\theta_{e,ref} - -3) / 11$
$8^{\circ}\text{C} < \theta_{e,ref} < 16^{\circ}\text{C};$	$\text{clo_gem} = 0,8 - 0,34 * (\theta_{e,ref} - 8) / 8$
$16^{\circ}\text{C} < \theta_{e,ref} < 25^{\circ}\text{C};$	$\text{clo_gem} = 0,46 - 0,16 * (\theta_{e,ref} - 16) / 9$

-Tabel 2- Lineaire functies voor gemiddelde kledingweerstand van kinderen in een klaslokaal



-Figuur 3- Individuele thermische sensaties



-Figuur 4- Gemiddelde thermische sensaties

verwachten neemt de gemiddelde kledingweerstand af bij hoger wordende buitentemperatuur. In de figuur is tevens te zien dat in de zomer de spreiding kleiner is. De daling van de kledingweerstand is niet constant. De gemiddelde kledingweerstand van de

negen- tot elfjarige kinderen in dit onderzoek kan beschreven worden met drie lineaire functies van $\theta_{e,ref}$ (tabel 2). De gemiddelde kledingweerstand verandert het sterkst gedurende het tussenseizoen. Het verschil tussen de jongens en meisjes is beperkt; het grootste verschil is

0,1 clo en dit is bij de de koudste periode van dit onderzoek, met $\theta_{e,ref} -3^{\circ}\text{C}$. Het gemiddelde daalt van 0,9 clo bij $\theta_{e,ref} -3^{\circ}\text{C}$ naar 0,8 clo bij 8°C , 0,46 clo bij 16°C en 0,3 bij 25°C . Het klimaat in Nederland blijft vrijwel altijd binnen deze range van $\theta_{e,ref}$

Figuur 3 toont de individuele, zelf aangegeven thermische sensatie (Actual Vote) tegen de PMV berekend op individueel niveau (activiteit=[met]*1,7/1,14, ter correctie van het kleinere lichaamsoppervlak van kinderen; kledingweerstand afgeleid uit de antwoorden op de vragenlijst) en de gemiddelde binnenklimaatgegevens voor dat dagdeel. In figuur 4 staat de Actual Mean Vote, de gemiddelde zelf aangegeven thermische sensatie, uitgezet tegen de PMV berekend met gemiddelde waarden voor zowel de persoonlijke als de binnenklimaatvariabelen. Op de gestippelde lijnen in figuur 3 en figuur 4 zijn werkelijke en berekende (gemiddelde) thermische sensatie gelijk; idealiter zouden alle waarden op deze lijn moeten liggen. Het blijkt echter dat de berekende PMV de gemiddelde thermische sensatie onderschat.

DISCUSSIE

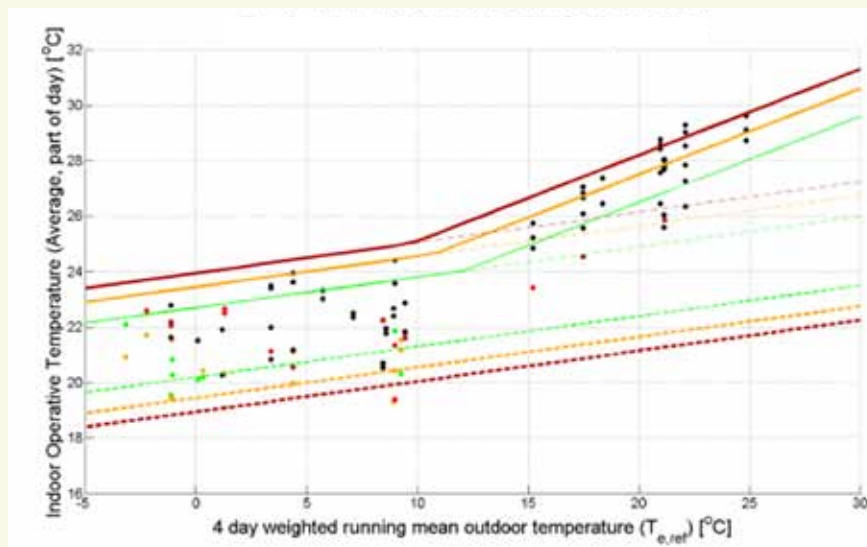
Uit de resultaten van deze kleine testgroep (n=79) kan geconcludeerd worden dat de PMV-methode de thermische sensatie voor kinderen onderschat, terwijl de meeste vorige onderzoeken naar afwijkingen in PMV-voorspellingen een overschatting van de thermische sensatie vonden. Deze waren echter niet op deze specifieke situatie, kinderen in een klaslokaal, gericht. De afwijking is het grootst gedurende de zomer, met een onderschatting van 0,5 tot 1,5 op de thermische sensatie schaal bij een $\theta_{e,ref}$ van 15 tot 25°C . De correctie op het metabolisme – zoals in dit onderzoek in de PMV opgenomen met een factor 1,7/1,14 – resulteert in een gemiddelde van 109 W/m^2 , wat hoger is dan voor volwassenen met zittende activiteit (70 W/m^2). De PMV is echter nog steeds lager dan de werkelijke thermische sensatie. Dit toont aan dat de PMV-methode zonder grote wijzigingen niet resulteert in betrouwbare voorspellingen voor de thermische sensatie van kinderen in een klaslokaal. Er zijn verschillende onderzoeken geweest naar metabolisme bij kinderen, zie o.a. [10] [11], dit zou echter nog verder en in combinatie met de thermische sensatie onderzocht moeten worden.

Ten aanzien van het onderzoek kunnen wel nog enkele aandachtspunten genoemd worden. Zo is het niet duidelijk of het vertalen van de thermische sensatie naar een 7-punts schaal (tabel 1) door kinderen op gelijke wijze gebeurt als door volwassenen. Het is mogelijk dat kinderen minder genuanceerd oordelen, en

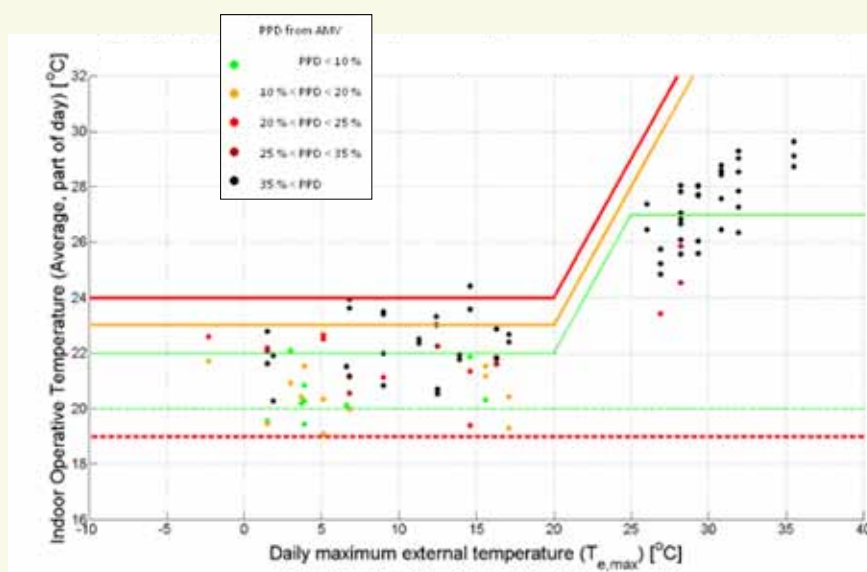
zodoende vaker voor de extremen of neutraal (-3, 0 of +3) kiezen. Daarnaast waren de gemeten luchtsnelheden zeer laag; deze lagen gemiddeld rond 0,05 m/s in de winter – wat rond het minimum detectieniveau ligt – en steeg lineair tot 0,08 m/s in de zomer, zelfs met geopende ramen. Het is niet duidelijk of dit komt door de locatie van de meetsensor in de lokalen, doordat ook buiten de luchtsnelheden laag waren en of deze lage luchtsnelheden normaal zijn voor alle scholen in Nederland. Hogere luchtsnelheden, een parameter in de bepaling van de PMV, kunnen de gemiddelde thermische sensatie verlagen. Tot slot was de relatieve luchtvochtigheid relatief laag, met waarden tussen de 20% en 50% gedurende het hele jaar. Echter, deze waarden liggen grotendeels binnen algemene comfortlimieten. De gemiddelde kledingweerstand in de winter die bepaald werd, ligt rond de 0,9 clo, wat vergelijkbaar is met waarden uit andere onderzoeken. Tijdens de warme zomerdagen droegen de leerlingen veelal korte broek, slippers en een t-shirt, resulterend in een kledingweerstand van 0,25-0,30 clo. In kantoren is dit meestal niet geaccepteerd en zal de kledingweerstand iets hoger liggen.

Adaptieve temperatuurgrenswaarden

Aangezien de PMV-methode van thermisch comfort bepalen niet toepasbaar is zonder verder onderzoek naar de warmtebalans en comfort voor kinderen, zal gekeken moeten worden naar andere evaluatiemethoden. De metingen van dit onderzoek zijn in figuur 5 en 6 uitgezet tegen de ISSO 74 en ISSO 89 temperatuurgrenswaarden. Hierbij is uit de gemiddelde thermische sensatie (AMV) de PPD berekend volgens de standaard PMV-PPD formule uit [2]. De meeste meetresultaten laten zien dat de binnentemperatuur binnen de limieten van ISSO 74 en 89 liggen. Wat opvalt is dat de bovengrenzen voor categorieën II en III uit ISSO 89 zeer tolerant zijn bij hoge buitentemperaturen. Ondanks dat vrijwel alle metingen binnen de buitenste grenswaarden liggen, was de AMV alleen bij lage externe temperaturen rond neutraal, zoals in figuur 5 en 6 te zien is. Dit kan deels verklaard worden door de lage luchtsnelheden gedurende de metingen. De luchtsnelheid lag onder de 0,10 m/s, terwijl bij de adaptieve temperatuurlimieten uitgegaan wordt van 0,30-0,40 m/s in de zomer. Temperaturen die door ISSO 74 en 89 voorspeld worden als comfortabel zijn in werkelijkheid als warm beoordeeld. Een warme sensatie hoeft niet altijd oncomfortabel te zijn, maar in de zomer zal dit wel snel het geval zijn. De Bèta-bovengrens in ISSO 74 (licht getinte



-Figuur 5- ISSO 74 comfortlimieten (PPD 10%/20%/35%)



-Figuur 6- ISSO 89 comfortlimieten high/average/low expectations (+-legal minimum)

stippellijnen in figuur 5) zijn voor hoge buitentemperaturen minder tolerant. Het gebruik van deze limieten geeft een betere inschatting van werkelijke thermische acceptatie. De leerlingen hebben geen individuele controle over te openen ramen; deze worden door de docent of een beperkt aantal leerlingen gecontroleerd. De vraag is dan ook of de adaptieve grenswaarden in een leslokaal wel toegepast kunnen worden. De werkelijke thermische sensatie wijkt sterk af van wat aan de hand van de temperaturen en adaptieve grenswaarden verwacht zou worden. Net als bij de PMV-voorspellingen wordt de thermische sensatie onderschat en ligt de gewenste temperatuur lager dan voorspeld. De leerlingen vinden het dus warmer dan op basis van de ATG en de PMV verwacht zou worden. Dit betekent dat met zowel de PMV als met adaptieve temperatuurgrenswaarden het thermisch binnenmilieu in basisscholen niet correct beoordeeld wordt. Voldoen aan

eisen gebaseerd op deze methoden leidt niet noodzakelijk tot een geaccepteerde situatie. Het lijkt erop dat de temperaturen enkele graden lager moeten liggen dan in kantoren, maar exacte limieten kunnen op basis van dit onderzoek niet voorgesteld worden.

CONCLUSIES

Er is meer onderzoek nodig naar het thermisch comfort van kinderen, aangezien de beoordelingsmethoden van volwassenen niet geschikt lijken. Dit geldt voor zowel PMV als adaptieve temperatuurgrenswaarden. Voor de PMV-methode moet de invloed van metabolisme in de warmtebalans en comfort van kinderen nader onderzocht worden, aangezien de fysiologische basis van de methode voor volwassenen is opgezet en de invloeden van metabolisme, huidtemperatuur, zweten etc. op de thermische sensatie en comfort voor kinderen anders zijn. Naar het metabolisme zelf bij kinderen is ook

nog onderzoek gewenst. De gemiddelde kledingweerstand voor kinderen in een klaslokaal kan aan de hand van $\theta_{e,ref}$ met drie lineaire functies beschreven worden. Deze varieert van 0,9 in de winter tot 0,3 in de zomer. De grootste verandering vindt in de tussenseizoenen plaats. Het verschil tussen jongens en meisjes is beperkt.

Als op basis van de PMV comfortlimieten gemaakt worden, moet ook het effect van de seizoenen (kledingweerstand, fysische parameters) op de thermische sensatie meegenomen worden.

LITERATUURLIJST

1. Boerstra A, van Dijken F. Indoor environment and energy efficiency of schools. *Rehva Journal*; September 2010:19
2. Fanger PO. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970
3. ISSO. ISSO Publicatie 74; Thermische behaaglijkheid - eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen. Rotterdam: Stichting ISSO; 2004
4. Ashrae. ANSI/Ashrae standard 55-2004 thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 2004
5. de Dear, R., Brager, G. and Cooper, D. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. 1997. Final Report Ashrae RP-884
6. Humphreys, M.A. and Nicol, J.F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*. 2002, Vol. 34, pp. 667-84
7. ISSO. ISSO Publicatie 89; Binnenklimaat scholen. Rotterdam: Stichting ISSO; 2008
8. van der Linden, W., Loomans, M. and Hensen, J. Adaptive thermal comfort explained by PMV. Proceedings of the 11th International Conference on indoor air quality and climate, indoor air, 17-22 August, P. Strøm-Tejsten et al., eds., Copenhagen. 2008, p.8 on CD. Paper ID: 573
9. ter Mors, S., Hensen, J., Loomans, M., Boerstra, A. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts. *Building and Environment* 2011; 46: 2454-61
10. Havenith G. Metabolic rate and clothing insulation data of children and adolescents during various school activities. *Ergonomics* 2007;50(10): 1689-701
11. Parsons K.C. Human thermal environments: the effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. 2nd ed. London: Taylor and Francis; 2001



Pompen • Afsluiters • Systemen



Klein van formaat - groot in prestaties.

Met de Ama-Drainer-Box Mini presenteert KSB een nieuwe vuilwateropvoerinstallatie die een klein formaat combineert met opvallende prestaties. Deze nieuwe generatie heeft een modern, driehoekvormig ontwerp en een geringe inbouwhoogte. De compacte installatie is dan ook fraai en hygiënisch onder wastafels weg te werken. Zelfs onaangename luchtjes behoren met de Ama-Drainer-Box Mini tot het verleden: een duurzaam en vochtbestendig actief-koolstoffilter met overloopbeveiliging zorgt ervoor dat het verzamelreservoir voortdurend effectief wordt belucht. En met de krachtige, onderhoudsvrije pomp Ama-Drainer N 301 SE is een betrouwbaar, storingvrij bedrijf gegarandeerd. Een geïntegreerde terugslagklep voorkomt bovendien dat de persleiding na het uitschakelen van de installatie leegloopt. Ama-Drainer-Box Mini: klein van formaat – groot in prestaties.

KSB Nederland B.V. - www.ksb.nl - infonl@ksb.com