

# ONTWERPRICHTLIJNEN TER VOORKOMING VAN KOUDEVAL

## BEOORDELING VAN THERMISCH COMFORT NABIJ GLASGEVELS



ir. S. (Suzan) Timmers,  
TU/e, Bouwkunde, Unit  
Building Physics and  
Systems



ir. L. (Lisje) Schellen,  
TU/e, Bouwkunde, Unit  
Building Physics and  
Systems



dr.ir. M.G.L.C. (Marcel)  
Loomans, TU/e, Bouwkun-  
de, Unit Building Physics  
and Systems



prof.ir. E.S.M. (Elphi)  
Nelissen, TU/e, Bouwkun-  
de, Unit Building Physics  
and Systems



prof.dr.ir. J.L.M. (Jan)  
Hensen, TU/e, Bouwkun-  
de, Unit Building Physics  
and Systems



dr. W.D. (Wouter) van  
Marken-Lichtenbelt,  
Universiteit Maastricht,  
MUMC+, Humane  
Biologie

Grote glasvlakken zijn een populair ontwerpmiddel van architecten. Dit kan echter tot tocht- en koudestralingsrisico's leiden bij lage buitentemperaturen. Een ontwerpvoistregel is beschikbaar waarmee de maximale glashoogte bepaald kan worden waarbij (nog) geen koudeval optreedt. De veronderstelling bestaat dat deze vuistregel conservatief is en dat als gevolg hiervan materiaal en energie onnodig ingezet worden. Met behulp van proefpersonen en CFD simulaties is onderzoek verricht. Uit de resultaten blijkt dat de vuistregel inderdaad conservatief is, maar voor de onderzochte situaties wel voldoet met betrekking tot thermisch comfort. Een verhoogde vloertemperatuur kan de luchtstroming versterken, waardoor dit niet per definitie een oplossing ter voorkoming van koudeval is. In de huidige vuistregel wordt de vloertemperatuur niet meegenomen. In de praktijk is echter wel behoefte aan een onderbouwde ontwerprichtlijn ter voorkoming van koudeval.

### INLEIDING

Bij koudeval wordt de luchtlaag grenzend aan een koud oppervlak (bijvoorbeeld een raam) afgekoeld. Aangezien de dichtheid van koude lucht groter is dan van warme lucht, zal deze lucht ten gevolge van zwaartekracht omlaag stromen [1]. Wanneer de koude luchtstroom niet gecompenseerd wordt door een warme luchtstroom in tegengestelde richting kan deze voor discomfort zorgen in het leefgebied, zie figuur 1.

### Vuistregel ter voorkoming van koudeval

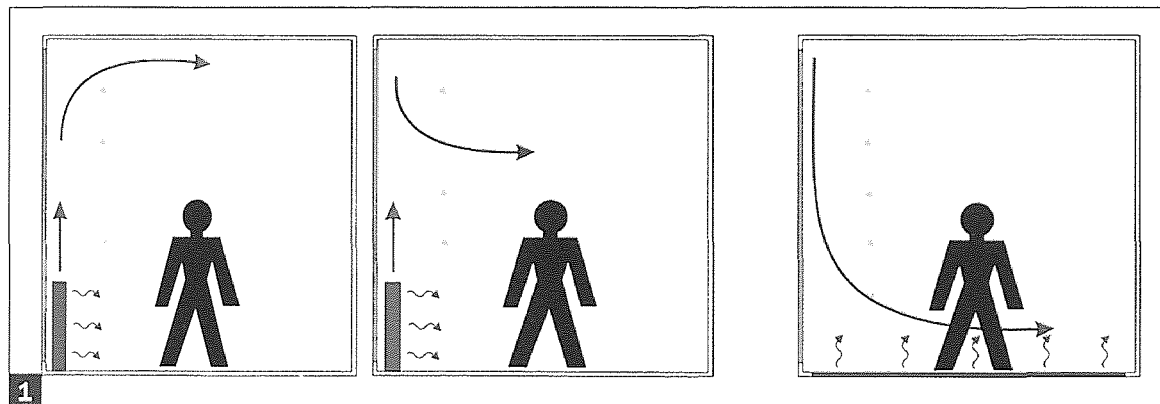
In 1995 heeft Olesen een ontwerpvoistregel opgesteld om (thermisch comfort) problemen nabij koude verticale vlakken te voorkomen. In deze vuistregel is een maximaal toegestane luchtsnelheid van 0,18 m/s in het leefgebied aangehouden. De vuistregel [2] luidt als volgt:

$$U_{\text{glas}} \cdot h \leq 4,7 \quad (1)$$

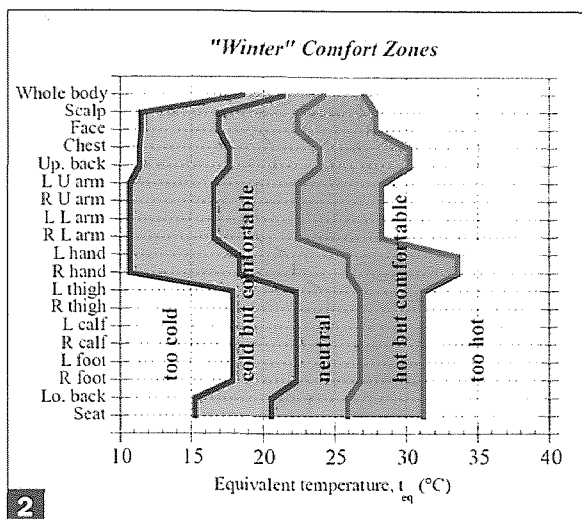
De vuistregel relateert de thermische weerstand van het glas ( $U_{\text{glas}}$  [W/m<sup>2</sup>K]) aan een maximale hoogte van het glas ( $h$  [m]) en is nog steeds in gebruik.

### Uitgevoerde experimentele en numerieke koudevalstudies

Bestaande koudevalstudies komen tot de algemene conclusie dat met een raamhoogte tot 2,5 m in combinatie met geïsoleerd glas geen problemen met betrekking tot koudeval ontstaan, zelfs wanneer een persoon slechts op één meter van het raam zit [1] [3] [4]. Daarnaast blijkt dat de luchtstroming significant beïnvloed wordt door meubilering, actieve klimaatsystemen, interne warmtelasten en obstakels bij het raamvlak (zoals vensterbanken). Deze ontwerponderdelen kunnen ook gebruikt worden als oplossing ter voorkoming van koudeval. Passieve oplossingen verdienen daarbij de voorkeur ten opzichte van actieve oplossingen vanwege extra energiegebruik.



Verskil tussen radiatorverwarming (links) en vloerverwarming (rechts)



2 Comfortzone diagram van Nilsson [8]

Echter, de onderzoeken die in het verleden verricht zijn kennen ook een aantal tekortkomingen. Allereerst is voornamelijk gericht op tochtklachten terwijl stralingsasymmetrie ook een probleem kan vormen. Bovendien is de 'Draught Rate' of een maximaal toegestane luchtsnelheid gebruikt om conclusies te trekken. De resultaten hiervan zijn niet direct gevalideerd met proefpersonenonderzoek. Verder hebben de glasvlakken die beoordeeld worden een beperkte hoogte van maximaal drie meter. De verwachting is dat hogere glasvlakken, die in de praktijk ook voorkomen, tot problemen met betrekking tot koudeval leiden.

**Probleem- en doelstelling**

In de praktijk bestaat de veronderstelling dat (te) vaak radiatoren of convectoren onder het raam geplaatst worden uit angst voor koudeval [5]. Energie en materialen kunnen bespaard worden wanneer bijvoorbeeld geen verwarming noodzakelijk is, of wanneer lage temperatuur verwarmingssystemen voldoende zijn om eventuele koudeval te compenseren. Tot op heden wordt gebruik gemaakt van de ervaring van de adviseur of van de bestaande vuistregel die geverifieerd dient te worden [2]. De doelstelling van het hier beschreven onderzoek is om de vuistregel te toetsen voor meer extreme situaties met inachtneming van zowel tocht als straling. Een koudevalsituatie resulteert namelijk in een niet-uniforme gecombineerde omgeving waarin het thermisch comfort lastig voorspeld kan worden [6]. Met de resultaten dienen in de toekomst onderbouwde ontwerprichtlijnen samengesteld te worden om koudeval te voorkomen, toepasbaar bij zowel nieuwbouw als bij renovatie.

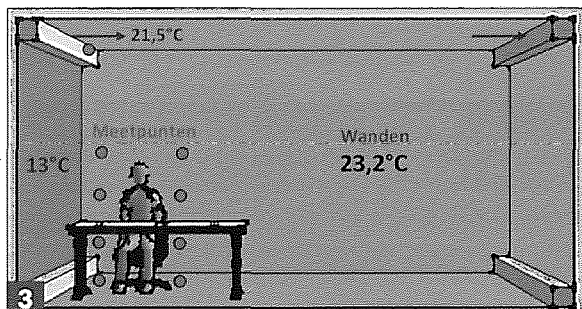
**METHODE**

Om te bepalen of de huidige vuistregel voldoet is onderzoek met proefpersonen verricht en is een variantenstudie met de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek uitgevoerd. Daarnaast is onderzocht of de huidige methoden om thermisch comfort te voorspellen gebruikt kunnen worden onder niet-uniforme omgevingscondities, zoals bij koudeval optreedt. De eerste onderzochte methode is de methode zoals omschreven in ISO 7730. Hierin wordt het PMV model gebruikt voor het beoordelen van algeheel thermisch comfort en wordt het lokaal thermisch comfort (tocht, warme vloer, stralingsasymmetrie en verticaal temperatuurverschil) getoetst met behulp van aanvullende richtlijnen [7]. Ook het comfortzone diagram van Nilsson is onderzocht [8]. In figuur 2 is hiervan een voorbeeld weergegeven.

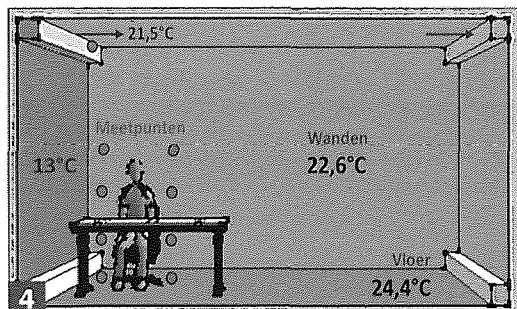
**Proefpersonenonderzoek**

Tijdens het proefpersonenonderzoek zijn tien jonge (leeftijd:  $23,5 \pm 1,7$  jaar) en gezonde (BMI:  $22,6 \pm 1,7$  kg/m<sup>2</sup>) mannen gedurende vier uur blootgesteld aan twee koudevalsituaties in de klimaatkamer van de TU/e. Voor meer informatie over de klimaatkamer wordt verwezen naar [9]. De twee ontworpen cases zijn te zien in figuur 3 en figuur 4. De operationele temperatuur is in beide cases ontworpen op 21,5°C bij de proefpersoon om een vergelijking op comfortgebied mogelijk te maken. Beide cases beschikken over een koude wand met een hoogte van 2,3 m. Deze heeft een in de metingen gerealiseerde temperatuur van  $13,7 \pm 0,4$ °C (case I) en  $13,7 \pm 0,6$ °C (case II) om koudeval te creëren. In case I hebben de overige vlakken een gerealiseerde temperatuur van  $23,2 \pm 0,1$ °C. Case II heeft, naast een koude wand, een warme vloer ( $24,3 \pm 0,1$ °C). Gegeven de specificaties van de klimaatkamer hebben de overige wanden zich ingesteld op een temperatuur van  $22,7 \pm 0,1$ °C. De gerealiseerde operationele temperatuur is  $21,6 \pm 0,1$ °C (case I) en  $21,8 \pm 0,2$ °C (case II). Beide cases hebben volgens de vuistregel een koudevalrisico.

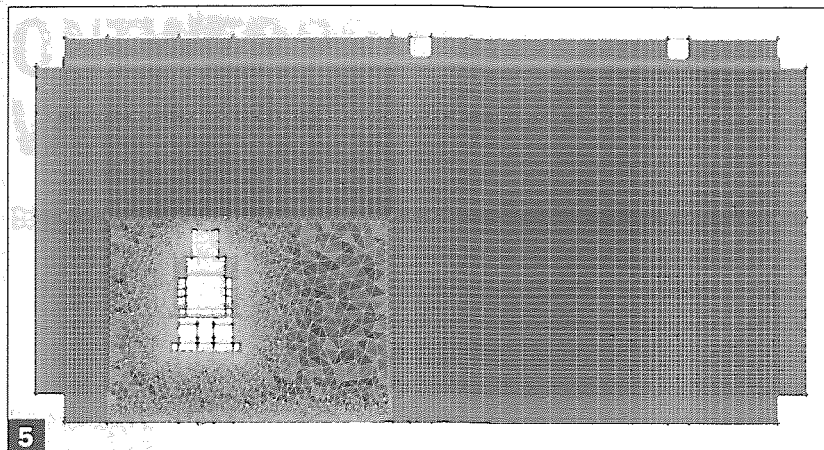
Omdat het niet gewenst is dat het ventilatiesysteem effect heeft op de koudeval wordt de lucht met een relatief lage luchtsnelheid (1,2 m/s) en een relatief hoge luchttemperatuur (gerealiseerd: 21,9°C respectievelijk 21,6°C) hoog in de ruimte ingeblazen. De proefpersoon is één meter van het koude vlak geplaatst omdat dit de grens van het leefgebied is. In beide cases en voor alle proefpersonen is het metabolisme (1,2 met) en de kledingsisolatie (1,0 clo) constant gehouden. Met behulp van vragenlijsten zijn het algeheel en lokaal thermisch comfort en sensatie beoor-



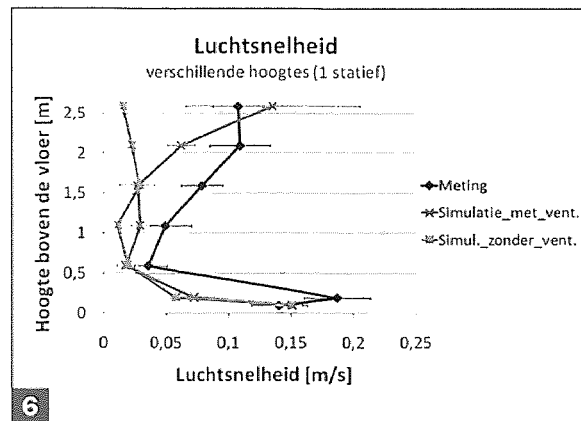
3 Case I



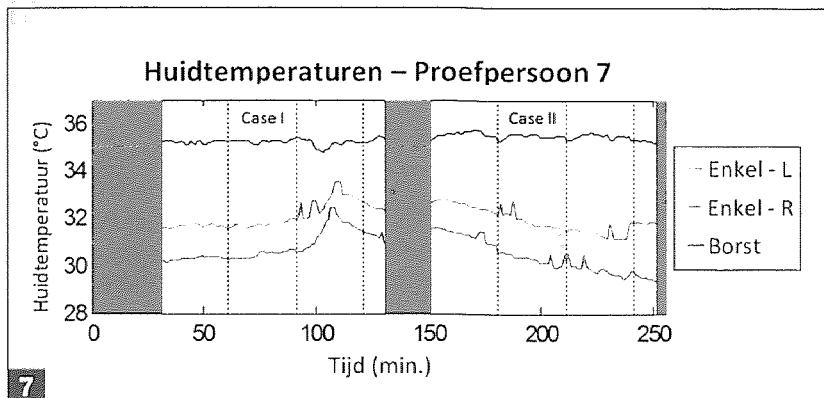
4 Case II



Verticale doorsnede van het gehanteerde CFD model voor de vergelijking



Een vergelijking tussen meting en simulaties (variant met en zonder ventilatie)



Gemeten huidtemperaturen van de enkel (links en rechts) en de borst tijdens case I en case II (grijze balk = pauze)

deeld. De luchttemperatuur, luchtvochtigheid en luchtsnelheid zijn gemeten op verschillende hoogtes (ISO 7726) 0,2 m links en rechts van de proefpersoon, zie figuren 3 en 4. De oppervlaktetemperaturen zijn op elk vlak gemeten op een grid van negen punten en aan de hand hiervan is de gemiddelde stralingstemperatuur berekend ter plaatse van de proefpersoon. Naast fysische parameters zijn ook fysiologische parameters gemeten; de kerntemperatuur en de huidtemperaturen op 24 posities (ISO 9886).

**Validatie thermisch comfortmodellen**

Het PMV model en de lokaal thermisch comfortmodellen (ISO 7730) zijn gevalideerd met behulp van de vragenlijstresultaten uit het proefpersonenonderzoek. Het comfortzone diagram van Nilsson is ingevuld met behulp van de uitvoer van ThermoSEM (2007). ThermoSEM simuleert het menselijke lichaam en warmtetransportmechanismen in het lichaam en naar de omgeving. Dit simulatiepro-

gramma is nog steeds in ontwikkeling. De huidtemperaturen uit ThermoSEM zijn vergeleken met de gemeten huidtemperaturen.

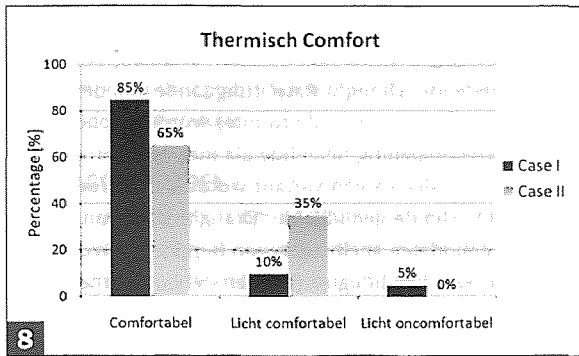
**CFD variantenstudie**

Een belangrijke beperking binnen het proefpersonenonderzoek was dat voornamelijk de hoogte van het koude vlak niet kon worden aangepast. Derhalve zijn CFD simulaties (in de vorm van een variantenstudie) uitgevoerd om de vuistregel te verifiëren. Negen varianten zijn samengesteld om het effect van grote glasvlakken en van vloerverwarming op koudeval te onderzoeken, zie tabel 1. De parameters in deze varianten zijn raamhoogte (2,7 m; 5,4 m; 8,1 m), vloertemperatuur (21°C en 26°C) en oppervlaktetemperatuur van het glas (13°C; 16°C; 19°C). Hierbij is het CFD model van de klimaatkamer als uitgangspunt genomen en verhoogd voor de verschillende raamhoogtes. In deze studie is gebruikt gemaakt van Fluent [10].

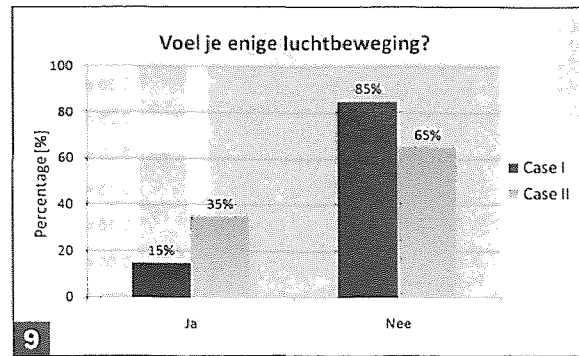
Gebruik van de CFD techniek voor een dergelijke studie vraagt bij aanvang om een beoordeling van de realiteitswaarde van de verkregen simulatieresultaten. Het type stroming dat aan de orde is (vrije convectie, gedwongen convectie, lage snelheden, etc.) is een minder eenvoudig op te lossen type stromingsprobleem in CFD. Daarom zijn temperatuur- en luchtsnelheidsmetingen uitgevoerd in de klimaatkamer om de gesimuleerde resultaten te beoordelen. De gehanteerde condities waren hierbij gelijk aan die van de proefpersonenmetingen, inclusief een thermische mannequin die de proefpersoon representeert. Een voorbeeld van het hierbij gehanteerde CFD grid en een vergelijking tussen meting en simulatie zijn weergegeven in figuur 5 en figuur 6.

Tabel 1: Varianten ten behoeve van variantenstudie

oppervlaktetemperatuur glas [°C]		13°C			16°C	19°C
raamhoogte [m]		2,7 m	5,4 m	8,1 m	5,4 m	5,4 m
verwarming	geen vloerverwarming (21°C)	X	X	X	X	X
	vloerverwarming (26°C)	X	X		X	
	lokale vloerverwarming (30°C)		X			



8 Frequentieanalyse thermisch comfort



9 Frequentieanalyse luchtsnelheid

Figuur 6 laat zien dat de CFD simulatie van case II de trend van het snelheidsprofiel in de ruimte volgt. In de simulatie van deze specifieke situatie was het echter niet mogelijk om de gewenste convergentiecriteria (uitgaande van een niet-stationaire berekening) te realiseren. Een tijdsafhankelijkheid in het stromingsprofiel bleef zichtbaar. Studies naar het toegepaste turbulentiemodel (RNG-ke / SST- $\omega$ ), gridgrootte, tijdstap, iteraties per tijdstap en configuratie zonder persoon, gaven hierop geen duidelijk antwoord. Uiteindelijk bleek de gemodelleerde ventilatie een belangrijke parameter in de tijdsafhankelijke variatie van de berekende temperaturen en luchtsnelheden. Afwezigheid van ventilatie leidde in dit geval ook tot een verbeterde convergentie. De condities nabij de persoon (tot ongeveer 1,5 m hoog) worden hierdoor niet beïnvloed (zie figuur 6).

Met de focus op koudeval en de condities nabij de vloer is voor de variantenstudie een leeg 3D model ( $6,1 \cdot 10^5$  cellen) ontwikkeld. De simulatieresultaten van een model met mens en een leeg model zijn overeenkomstig voor het interessegebied. Het RNG-ke model is gebruikt ten behoeve van de modellering van turbulentie. Ventilatie is hierin afwezig en de wanden worden een temperatuur opgelegd. Het stromingsprobleem is tijdsafhankelijk opgelost.

**RESULTATEN**

Alvorens de bestaande vuistregel te verifiëren en een start te maken met ontwerprichtlijnen ter voorkoming van koudeval worden eerst de resultaten van de proefpersoonmetingen besproken. Tevens worden de validatie van de thermisch comfortmodellen en de resultaten van de variantenstudie getoond.

*Proefpersonenonderzoek*

Nabij de vloer zijn verhoogde luchtsnelheden en verlaagde luchttemperaturen gemeten, wat aangeeft dat alle proefpersonen blootgesteld zijn aan koudeval. Tijdens Case II nam de verticale temperatuurgradiënt af door de verhoogde vloertemperatuur.

In figuur 7 zijn van een proefpersoon de gemeten huidtemperaturen van de linker enkel, rechter enkel en borst weergegeven. De huidtemperaturen aan de rechterkant van het lichaam (het dichtst bij de koude wand) zijn in alle gevallen lager dan aan de linkerkant. Ook fluctueren de huidtemperaturen van extremiteiten zoals handen en voeten meer om het warmteverlies met de omgeving te

reguleren. De huidtemperaturen dicht bij de kern zijn hoger en constanter.

Uit de vragenlijst blijkt dat in een standaard kantoor ( $3,6 \times 5,4 \times 2,7 \text{ m}^3$ ) met één koude wand van  $13^\circ\text{C}$  geen klachten ontstaan door koudeval. De vragenlijstresultaten zijn onder andere geanalyseerd met een frequentieanalyse, figuur 8 en figuur 9. Zowel case I als case II worden als comfortabel beoordeeld, terwijl in case II meer luchtsnelheid wordt waargenomen. De (verhoogde) luchtsnelheid wordt echter meestal gevoeld nabij het hoofd terwijl deze gemeten is rond de voeten.

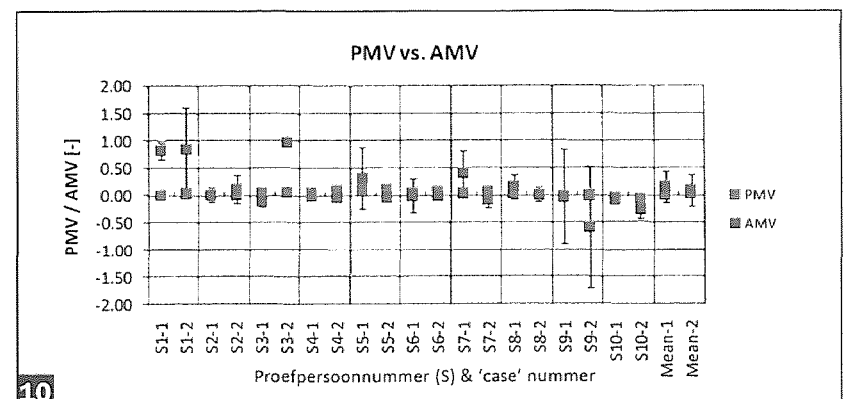
*Validatie thermisch comfortmodellen*

De 'Predicted Mean Vote' (PMV model) komt goed overeen met de 'Actual Mean Vote' (AMV) van de proefpersonen, zie figuur 10. Daarnaast is ook het percentage ontevreden berekend voor de lokale comfortparameters uit ISO 7730. Dit percentage is laag ( $< 6\%$ ) voor beide cases en alle parameters. Dit komt overeen met de geringe klachten van de proefpersonen.

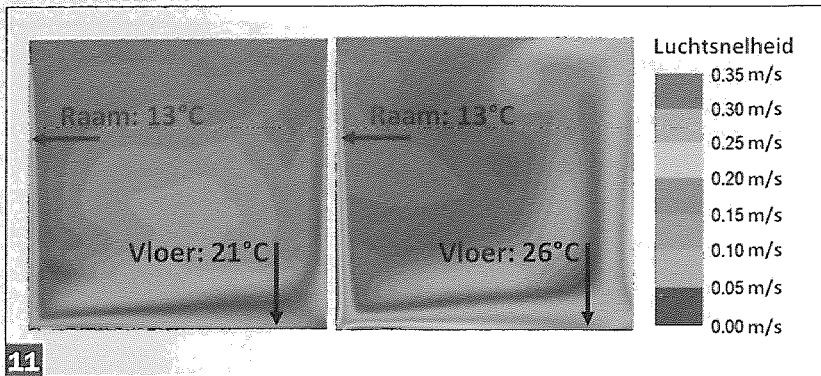
Verder zijn de gesimuleerde huidtemperaturen uit ThermoSEM vergeleken met de gemeten temperaturen. Het kwadratisch gemiddelde voor bijvoorbeeld het verschil tussen de gemeten en de gesimuleerde gemiddelde huidtemperatuur gedurende case I is  $0,54^\circ\text{C}$  en voor case II is dit  $0,71^\circ\text{C}$ . Het is binnen dit onderzoek echter niet mogelijk geweest het comfortzone diagram van Nilsson te valideren met de verkregen proefpersonenresultaten.

*CFD variantenstudie*

Zoals verwacht wordt de koudeval versterkt door een lagere oppervlaktetemperatuur van het glas en een hoger



10 Vergelijking PMV - AMV



11 Vergelijking luchtsnelheid bij varianten zonder en met vloerverwarming

raam. De vloertemperatuur heeft echter het grootste effect op de koudevalstroming. De luchtsnelheden nabij de vloer van 26°C verdubbelen ten opzichte van een vloer van 21°C. Dit is ook weergegeven in figuur 11. De temperatuurgradiënt wordt kleiner bij een warme vloer, wat duidt op een beter gemengde ruimtelucht.

## DISCUSSIE

*Proefpersonenmetingen:* Het doel van de klimaatkamermetingen was om het gecombineerde effect van koudeval en straling te onderzoeken. Dit om de meer theoretisch afgeleide vuistregel te toetsen. De proefpersonen zijn hierbij blootgesteld aan een koudevalsituatie die binnen de huidige bouwcontext als extreem kan worden gezien (oppervlaktetemperatuur glas: 13°C). Hoewel de condities resulteerden in een gecombineerde niet-uniforme situatie wordt deze situatie niet als oncomfortabel beschouwd. Daarnaast was het met de verkregen dataset niet mogelijk om verbanden aan te geven tussen de thermische sensatie van het hele lichaam en verschillende lichaamsdelen. Dit betekent echter niet dat zulke relaties niet bestaan.

*Validatie thermisch comfortmodellen:* Voor de onderzochte koudevalsituaties blijkt ISO 7730 met het PMV model het best toepasbare voorspellingsmodel van geheel thermisch comfort. Validatie van de lokale comfortmodellen in ISO 7730 is niet mogelijk geweest omdat voorspelde percentages (< 6%) vergeleken moeten worden met de resultaten van tien proefpersonen. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat het van belang is om de thermofysiologische respons van de mens te kunnen simuleren om tot een individuele comfortvoorspelling te komen. [11] Hierbij zouden ThermoSEM en het comfortzone diagram van Nilsson een rol kunnen spelen.

*CFD simulaties:* De onderzochte situatie was complex. De simulaties met ventilatie resulteerden in een tijdsafhankelijk stromingsprofiel (fluctuerende luchttemperatuur en luchtsnelheid in de tijd). Het is onduidelijk of een dergelijke tijdsafhankelijkheid ook in de gemeten situatie is opgetreden. De uitgevoerde metingen kenden daarvoor een te beperkt tijdsinterval. Onderzoek toont echter aan dat transiënte situaties kunnen optreden bij stationaire randvoorwaarden [12]. De variantenstudie liet ook zien dat een verhoogde vloertemperatuur leidt tot een verhoging van de luchtsnelheid nabij de vloer. De bijdrage van deze maatregel op het beperken van koudeval dient daarom anders ingeschat te worden.

*Vuistregel/Ontwerprichtlijnen:* Met ISO 7730 worden alle CFD varianten als comfortabel aangemerkt, zowel voor geheel als lokaal thermisch comfort. Wanneer de maximaal optredende 'Draught Rate' (uitgaande van de maximale snelheid op 0,1 m in de ruimte) wordt beschouwd is de comfortvoorspelling hetzelfde als met de vuistregel (formule (1)): slechts één variant wordt als comfortabel beoordeeld. Met de gemiddelde 'Draught Rate' rond de voeten (gemiddelde snelheid in een beperkt gebied rond de voeten op 0,1 m hoogte) is alleen de variant met een verhoogde vloertemperatuur oncomfortabel. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de vuistregel conservatief is. Dit betekent dat wanneer een situatie niet is toegestaan volgens de vuistregel, deze situatie nog wel comfortabel kan zijn volgens ISO 7730. Daarnaast wordt het effect van de vloertemperatuur op de koudevalstroming niet meegenomen in de vuistregel.

In het onderzoek is op basis van deze resultaten een start gemaakt met het samenstellen van een ontwerprichtlijn ter voorkoming van koudeval. Belangrijke parameters voor deze richtlijn zijn raamhoogte, binnenluchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur van het glas en vloertemperatuur. Daarnaast is ook een beoordelingsmethode en een comfortlimiet nodig. Met dit laatste wordt een waarde bedoeld die aangeeft of een situatie als comfortabel of oncomfortabel wordt beoordeeld. Een beoordelingsmethode zou bijvoorbeeld de gemiddelde 'Draught Rate' rond de voeten kunnen omvatten, zodat in ieder geval het daadwerkelijke probleemgebied is inbegrepen. De in figuur 12 samengestelde grafiek is geldig voor een binnenluchttemperatuur tussen 20,0°C en 21,0°C. Het verschil tussen de vloer- en raamtemperatuur is uitgezet tegen de beoordelingsmethode. Een lineaire correlatie is gevonden tussen de datapunten van een 5,4 m hoog raam. Voor deze glashoogte is een trendlijn getekend als ontwerprichtlijn. Echter een comfortlimiet voor de koudevalsituatie kan met deze informatie nog niet worden gegeven.

## CONCLUSIE

Koudeval kan gedefinieerd worden als een verlaagde luchttemperatuur en een verhoogde luchtsnelheid dicht bij de vloer, veroorzaakt door natuurlijke convectie van een koud verticaal vlak. In de gemeten situaties (13°C 'raam' van 2,7 m hoog) ontstaan geen comfortklachten als gevolg van koudeval. Wanneer de kans op hinderlijke koudeval gering is zouden materialen en energie bespaard kunnen worden in de gebouwde omgeving. Uit de CFD simulaties blijkt dat een verhoogde vloertemperatuur de koudevalstroming kan verslechteren (door het ontstaan van hogere luchtsnelheden). Dit duidt aan dat ter voorkoming van koudeval radiatoren en convectoren niet zomaar vervangen kunnen worden door vloerverwarming.

Uit de verkregen data blijkt verder dat ISO 7730 (met het PMV model) het beste gebruikt kan worden om de onderzochte koudevalsituaties te beoordelen. Het comfortzone diagram ziet er veelbelovend uit, maar heeft meer onderzoek nodig voordat het toegepast kan worden in de gebouwde omgeving. Daarnaast lijkt de huidige vuistregel conservatief te zijn. Om nieuwe ontwerprichtlijnen ter



voorkoming van koudeval op te stellen is meer onderzoek nodig. Uit dit onderzoek komt naar voren dat belangrijke parameters voor een richtlijn zijn: raamhoogte, binnenluchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur van het glas en de vloertemperatuur.

**VERVOLGONDERZOEK**

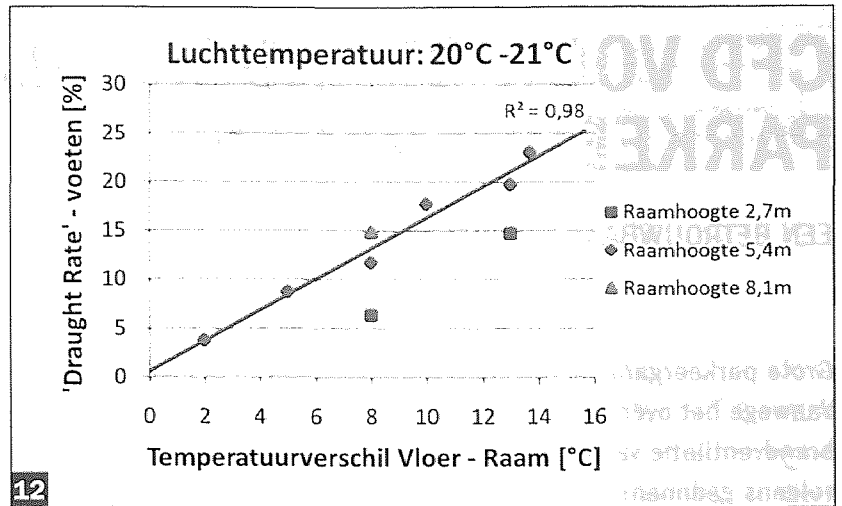
In vervolgonderzoek is het noodzakelijk een comfortlimiet vast te stellen in koudevalsituaties om complete richtlijnen samen te stellen. Ook zijn meer simulatievarianten nodig. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de verschillen tussen klimaatkameronderzoek en praktijkmetingen. Het wordt daarom aanbevolen ook praktijksituaties te onderzoeken.

In de toekomst kunnen ook de CFD simulaties uitgebreid worden. Daartoe dient echter eerst het tijdsafhankelijke effect van de koudevalstroming nader onderzocht te worden. Bovendien kan de aandacht uitgaan naar passieve maatregelen zoals vensterbanken. Daarnaast is het effect van vloerverwarming op de koudevalstroming enkel gebaseerd op CFD resultaten en het wordt aangeraden dit ook in de praktijk (bijvoorbeeld de klimaatkamer) te verifiëren. ■

*Dit artikel is geschreven naar aanleiding van het afstudeeronderzoek van de auteur.*

**BRONNEN**

- ▶ [1] Heiselberg P, Overby H., Bjorn E., 1995, *Energy-efficient measures to avoid downdraft from large glazed façades*, ASHRAE Transactions 1995; 1127-1135
- ▶ [2] Olesen B.W., 1995, *Vereinfachte Methode zur Vorausberechnung des thermischen Raumklimas*, HLH; 46(4): 219-225
- ▶ [3] Rueegg T., Dorer V., Steinemann U., 2001, *Must cold air down draughts be compensated when using highly insulating windows?*, Energy and Buildings; 33: 489-493
- ▶ [4] Manz H., Frank T., 2003, *Analysis of thermal comfort near cold vertical surfaces by means of computational fluid dynamics*, Indoor and Built Environment; 13: 233-242
- ▶ [5] Nelissen E.S.M., Timmers S., 2011, *Verspilling door angst voor koudeval*, TVVL magazine; 07/08: 4-6
- ▶ [6] Olesen B.W., Parsons K.C., 2002, *Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730*, Energy and Buildings; 34: 537-548



12 Start ontwerprichtlijn ter voorkoming van koudeval

- ▶ [7] ISO 7730, 2005, *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, International Standards Organization
- ▶ [8] Nilsson H.O., 2004, *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*, Royal Institute of Technology, Sweden
- ▶ [9] Schellen L., Loomans M., Marken-Lichtenbelt W. van, Frijns A., Wit M. de, 2010, *Assessment of thermal comfort in relation to applied low exergy systems*, proceedings of conference: Windsor, 9-11 April 2010
- ▶ [10] Ansys, 2009, *Fluent - Version 12.1.4*, Ansys Inc. 2009 (Ansys Release Version 12.1)
- ▶ [11] Marken-Lichtenbelt W.D. van, Frijns A.J.H., Ooijen M.J. van, Fiala D., Kester A.M., Steenhoven A.A. van, 2007, *Validation of an individualised model of human thermoregulation for predicting responses to cold air*, Int J Biometeorol; 51: 169-179
- ▶ [12] Rees S.J., McGuirk J.J., Haves P, 2001, *Numerical investigation of transient buoyant flow in a room with displacement ventilation and chilled ceiling system*, International Journal of Heat and Mass Transfer; 44: 3067-3080
- ▶ [13] Timmers S., 2011, *Design guidelines to prevent downdraught*, afstudeerproject [http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Timmers\\_2011.pdf](http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Timmers_2011.pdf)