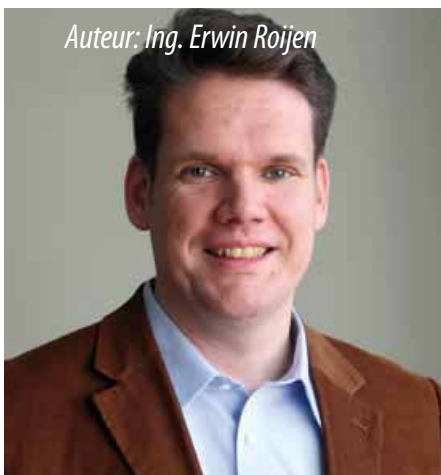


Nieuw onderzoek naar natuurlijke laag temperatuur verwarming

Conventionele ventilatieroosters leveren in de praktijk soms tochtklachten op, in het bijzonder in de combinatie met moderne verwarmingssystemen. Vooral verwarmingsinstallaties met laag temperatuur verwarming, zoals vloerverwarming, zijn niet meer met ieder ventilatiesysteem te combineren. Dit resulteert in terughoudendheid bij ontwerpende partijen om ofwel de duurzame verwarmingstechniek of die bepaalde ventilatietechniek toe te passen. Dat is een gemiste kans voor duurzame ontwikkeling. Om ervoor te zorgen dat de combinatie van beide systemen mogelijk blijft, onderzoekt Cauberg-Huygen met geavanceerde meetapparatuur de toepassing hiervan. In het kader van het 'EOS DEMO Clusterproject innovatieve ventilatiesystemen' keken wij hoe die twee te verenigen zijn. De conclusie luidt: zelfregelende ventilatieroosters zijn een goede oplossing om tochtklachten te voorkomen.



Auteur: Ing. Erwin Roijen

Uit praktijksituaties blijkt dat de combinatie van decentrale, onverwarmde luchttoevoer in combinatie met een vloerverwarmingssysteem comfortklachten bij de bewoners kan opleveren. Tochtverschijnselen bij traditionele luchttoevoer via roosters in de gevel zijn bij radiatorenverwarming een min of meer geaccepteerd verschijnsel. Deze vaak oudere woningen beschikken over een ruim warmteaanbod, waardoor de radiatoren met convectieve luchtstroom en warmtestraling de tocht die ontstaat tot op zekere hoogte compenseert. Bij goed geïsoleerde woningen met lage warmtevraag en lage systeemtemperaturen treedt echter onvoldoende menging van de binnenstromende koude lucht met de verwarming op. In het bijzonder bij een harde wind op de

gevel stroomt door standaard gevelroosters veel lucht naar binnen, wat bij afwezigheid van compenserende maatregelen tochtklachten kan opleveren.

Hoe groot het discomfort is, is ondanks de ruime ervaringen met natuurlijke luchttoevoer en vloerverwarming nog niet fundamenteel onderzocht en gekwantificeerd. In het kader van het onderzoeksprogramma EOS DEMO Clusterproject innovatieve ventilatiesystemen onderzochten we daarom het thermisch comfort bij decentrale luchttoevoer. Daartoe is in het bouwfysisch laboratorium van Cauberg-Huygen in Zwolle een proefopstelling gemaakt om dit onder gecontroleerde omstandigheden nader te onderzoeken. In breder perspectief wilden we laten zien dat men duurzame laag temperatuur verwarmingssystemen ook comforttechnisch goed kan combineren met geavanceerde (natuurlijke) ventilatiesystemen.

ZELFREGELENDE GEVELROOSTERS

Een mechanisch zelfregelende luchttoevoer heeft als doel om voor een constante lucht volumestroom te zorgen, ongeacht de grootte en de richting van de windsnelheid (winddruk op de gevel). Als het windstil is, staat het zelfregelende gevelrooster (ZR-rooster) in volledig geopende stand en wordt het nominale debiet geleverd wat

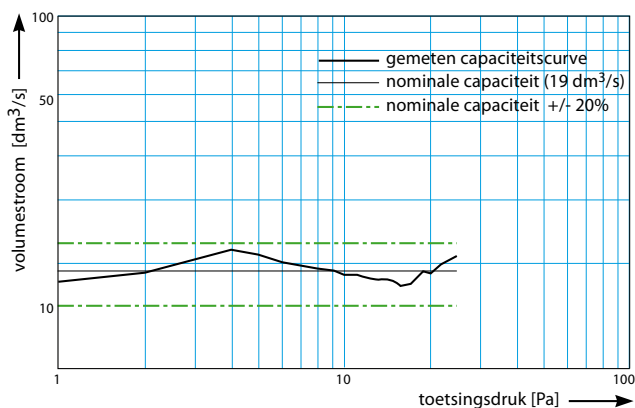
door de ventilator wordt afgezogen. Als de winddruk op de gevel toeneemt, dan sluit een klepje in het rooster op mechanische wijze, wat de toename van de binnentredende lucht volumestroom beperkt. Dit reduceert de ongewenste, grote ('s winters koude) luchthoeveelheden. Ook een elektronisch geregelde luchttoevoer kan de benodigde lucht volumestroom naar binnen laten stromen. Met behulp van een servosturing in het rooster en een regeling op de ventilator kan men dan de mate van luchttoevoer en -afvoer naar behoefte regelen. De installatie kan regelen op:

- Tijd: afhankelijk van een op te geven tijds patroon (lees: bezetting) wordt gedurende bepaalde tijdsintervallen geventileerd.
- Aanwezigheid: afhankelijk van de gedetecteerde bezetting wordt gedurende bepaalde tijdsintervallen geventileerd.
- CO₂: afhankelijk van de CO₂-concentratie als maat voor de luchtkwaliteit wordt geventileerd.

Via een flowmeting in het rooster wordt een servogestuurde klep in een zodanige stand gezet zodat precies de gevraagde ventilatiehoeveelheid wordt toegevoerd. Met deze techniek kunnen we daadwerkelijk een horizontale roosterkarakteristiek realiseren. Ook hiermee reduceren we ongewenst grote ('s winters koude) luchthoeveelheden. Figuur 1 toont de

Luchttoevoer met

druk-volumestroomkarakteristiek van een zelfregelend gevelrooster (Alusta Bingo 21).



Figuur 1: Druk-volumestroomkarakteristiek van een ZR-rooster (passief regelend)



Figuur 2: Een voorbeeld van een ZR-rooster (actief regelend)

De eerste zelfregelende roosters kwamen circa tien jaar geleden op de markt, in eerste instantie vanuit het oogpunt van energiebesparing. ZR-roosters zorgen voor aanzienlijk kleinere ventilatiewarmteverliezen. Dit is gunstig voor de energieprestatie van een gebouw.

Het comfortonderzoek bij Cauberg-Huygen is verricht met (zelfregelende) gevelroosters van fabrikant Alusta, type Bingo.

LTV EN COMFORT

Het verwarmingsconcept in het onderzoek bestaat uit een vloerverwarmingssysteem als hoofdverwarming. Het vloerverwarmingssysteem is een laag temperatuur verwarmingsstelsel (LTV), waarbij de aanvoertemperatuur maximaal 45 °C mag bedragen (bij zeer lage buitenluchtemperatures) en de oppervlaktetemperatuur van de vloer vanwege behaaglijkheidscriteria niet hoger dan 29 °C mag zijn.

In woningen met vloerverwarming als hoofdverwarming is de convectieve luchtstroom permanent afwezig. Wel

biedt vloerverwarming een aanmerkelijke stralingscompensatie voor de koudere

gevelvlakken. Door toevoer van buitenlucht via de gevel, het beperkt verwarmingsvermogen per vierkante meter vloeroppervlak en een matige menging in de ruimte en indicerende werking van de toevoerlucht is de kans op een onbehaaglijk binnenklimaat (lokaal dis-comfort) dan ook aanwezig.

Comfortproblemen die kunnen optreden bij (onver-warmde) luchttoevoer via de gevel in combinatie met vloerverwarming als hoofdverwarming kunnen zijn:

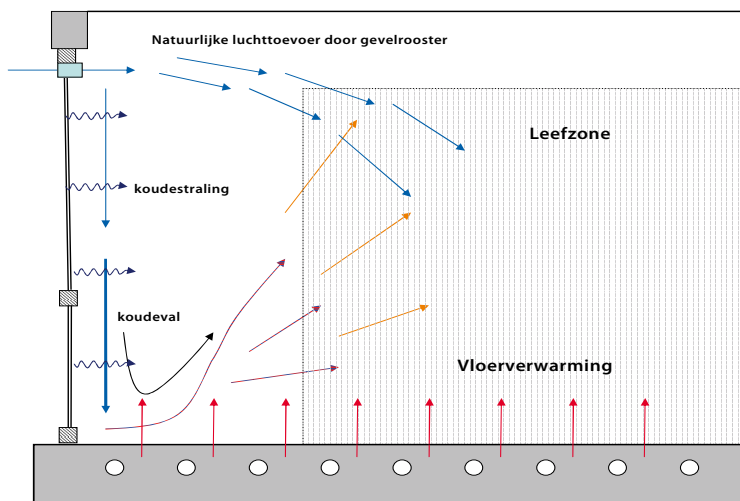
- Tocht, veroorzaakt door luchtstromingen door het rooster bij hoge toevoerhoeveelheden. In conventionele configuraties met een HT-radiator onder het betreffende raam wordt deze koude buitenlucht gemengd met de convectieluchtstroom van de radiator en daarmee verwarmd.
- Koudeval, veroorzaakt door stroming (convectie) van relatief koude lucht langs glasoppervlakken in de gevel, in het bijzonder bij lage toevoersnelheden.
- Koudestraling, veroorzaakt door relatief koude glasoppervlakken in de gevel (straling).

Deze drie aspecten, die in figuur 3 schematisch zijn weergegeven voor een gevelrooster, zijn door iemand in de leefzone vaak niet goed te onderscheiden en kunnen gelijktijdig optreden. Het is dan lastig om aan te geven wat de hoofdoorzaak is van comfortklachten. Foutieve conclusies over de rol van het verwarming- en ventilatiesysteem liggen al snel voor de hand.

Koudeval en koudestraling zullen vooral optreden bij gevels met veel glas; natuurlijke luchttoevoer via gevels met een hoog glaspercentage is daarom extra kritisch. De luchtdoorlatendheid van de gevel en gevelelementen is eveneens van belang. Het comfort c.q. discomfort wordt getoetst aan de hand van de behaaglijkheidstheorie van Fanger. Dit model geeft een beoordeling over de comfortbeleving van personen door middel dimensieloze parameters zoals de PMV en PPD.

ONDERZOEK IN DE KLIMAATKAMER

De beoordeling van het thermisch comfort bij verschillende typen natuurlijke luchttoevoer vond plaats door middel van een proefopstelling in de klimaatkamer van Cauberg-Huygen in Zwolle. Daar hebben we een gevel met binnen- en buitenklimaat gesimuleerd.



Figuur 3: Dwarsdoorsnede van de gevel met een schematische weergave van de comfortaspecten.

NEN1087:2001 geeft in hoofdstuk 7 een bepalingmethode voor het thermisch comfort. Hieruit volgt onder meer:

- de variatie van de toevoerlucht mag niet meer dan 10% van de nominale waarde bedragen;
- de temperatuur van de toevoerlucht moet (20 ± 2) K lager zijn dan de gemiddelde ruimteluchttoevoer;
- een driedimensionaal raster volgens figuur 12 van NEN1087:2001.

De buitenlucht wordt nagebootst door koeling van de ruimte aan de andere zijde van de gevel van de klimaatkamer tot 0°C . Dit simuleert een wintersituatie waarbij koude lucht via de roosters in de verwarmde ruimte wordt geblazen. Dit gebeurt bij een overdruk van 10 Pa (± 5 m/s) en 25 Pa ($\pm 7,5$ m/s). De winddruk van 25 Pa is gekozen om binnen het normale functionele bereik (1..25 Pa) van ZR-roosters te blijven. De temperatuur en luchtsnelheid worden gemeten door middel van EnoTemp ClimateCubes. Deze meten in zowel de x-, y- als z-richting. Bijzonder is dat we de temperatuur en luchtsnelheid meten met behulp van geluid. De ClimateCubes zenden korte geluidspulsen heen en weer tussen de sensoren. Aan de hand van de ontvangst van het geluid in de sensoren kunnen we de temperatuur en luchtsnelheid nauwkeurig en contactloos bepalen.

De ClimateCubes zijn op een verrijdbare en in hoogte verstelbare meetboom bevestigd. Op de vloer is een raster van 3×16 meetposities uitgezet. Per meetpunt meten we op 12 verschillende hoogtes. In totaal zijn er per configuratie dus 576 metingen in een 3D-raster met een maaswijdte van 20 tot 25 cm gedaan. Met behulp van bijbehorende software maken wij het gemeten resultaat grafisch duidelijk via 2D- en 3D-figuren. Hierin is zowel de temperatuur, de luchtsnelheid als ook de luchtstroming af te leiden.

Thermisch Comfort

Het thermisch comfort wordt vooral bepaald door de luchttemperatuur en luchtsnelheid. Volgens het Bouwbesluit mag de luchtsnelheid in de leefzone van een verblijfsgebied, veroorzaakt door de toevoer van lucht, niet groter zijn dan 0,2 m/s. Onder de beproevingscondities volgens NEN1087:2001 mag de gemeten

luchtsnelheid niet hoger zijn dan 0,2 m/s zijn in de leefzone. Dat is het gedeelte van de ruimte vanaf 1,0 m uit de gevel en tot 1,8 meter boven de vloer. In ten hoogste 10% van de meetpunten mag de luchtsnelheid tussen de 0,20 en 0,24 m/s. Overschrijding van 0,24 m/s is niet toegestaan. Voor kantoren bedraagt de maximale luchtsnelheid 0,15 m/s in de leefzone op 0,5 m uit de gevel of DraughtRate $< 15\%$. Voor de laatste beoordeling zullen we ook de turbulentie-intensiteit moeten meten.

De meetwaarden worden verwerkt tot zogenaamde PMV- en PPD-waarden. PMV staat voor Predicted Mean Vote en geeft aan wat de gemiddelde beleving van het thermisch comfort is. 0 is de neutrale situatie waarin (statistisch gezien) het minst aantal mensen klaagt. Omdat mensen het thermisch comfort verschillend ervaren, zullen ook dan klachten voorkomen. De PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) geeft aan wat het percentage is van klagers. Er wordt gestreefd naar een PMV die tussen -0,5 en +0,5 ligt. De PPD is dan kleiner dan 10%.

+3	heet	-1	lichtelijk koel
+2	warm	-2	koel
+1	lichtelijk warm	-3	koud
0	neutraal		

Tabel 1 De 7-puntsschaal voor PMV

De behaaglijkheid wordt naar Fanger conform NEN-EN-ISO 7730:2005 bepaald. Daarbij spelen de volgende parameters een rol:

M	Metabolisme	W/m ²
W	De uitwendige arbeid (= 0 voor de meeste activiteiten)	W/m ²
I _{cl}	De thermische weerstand van de kleding	² .K/W
F _{cl}	De kledingoppervlaktefactor, de verhouding tussen het buitenoppervlak van de geklede mens en het huidoppervlak	(-)
T _a	De luchttemperatuur	gr.C
T _r	De gemiddelde stralingstemperatuur	gr.C
var	De relatieve luchtsnelheid (relatief t.o.v. het menselijk lichaam)	m/s
Pa	De partiële waterdampdruk	Pa
H _c	De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie	W/(m ² .K)
t _{cl}	De oppervlaktetemperatuur van de kleding	gr.C

Opmerking: 1 metabolische eenheid = 1 met = 58,2 W/m²; 1 clothing eenheid = 1 clo = 0,155 m².(gr.C/W)

Om tochtverschijnselen in beeld te brengen, kunnen we ook uitgaan van de Draught Rate (DR) volgens NEN-EN-ISO 7730. Dit is een factor die aangeeft in hoeverre men 'tochtverschijnselen' ervaart. De DR is het percentage ontevreden als gevolg van tochtverschijnselen en wordt als volgt berekend:

$$DR = (34 - t_a) \cdot ((v - 0,05)^{0,62}) \cdot (0,37 \cdot v \cdot T_u + 3,14)$$

DR	De tochtbeoordeling (= het % ontevreden door tocht)	W/m ²
T _a	De plaatselijke luchttemperatuur	gr.C
V	De plaatselijke gemiddelde luchtsnelheid	m/s
T _u	De plaatselijke turbulentie-intensiteit	%

Tabel 2 bevat een numeriek overzicht van de onderzoeksresultaten. De resultaten zijn gebaseerd op het volledige 3D-meetraster, dus inclusief de meetpunten buiten de leefzone aan de gevel die in feite buiten het beoordelingscriterium van het Bouwbesluit vallen. Tabel 3 toont de resultaten voor de meetpunten die in de leefzone liggen. De figuren 5, 6 en 7 geven het stromingspatroon grafisch weer. Vervolgens zijn deze stromingspatronen vertaald naar de Draught-waarde en die zijn grafisch weergegeven in de figuren 8, 9 en 10. Uit de getoonde figuren en de tabel kunnen we concluderen dat bij een standaard gevelrooster door het gecreëerde drukverschil een dusdanige luchtstroom ontstaat met hoge luchtsnelheden in de ruimte, waardoor lokaal discomfort ontstaat met in het bijzonder een hoge kans op tochtklachten. Bij een passief (mechanisch) zelfregulend gevelrooster blijft de gemiddelde luchtsnelheid ook bij een hoog drukverschil beperkt tot gemiddeld 0,10 m/s. Bij het drukverschil van 10 Pa is er sprake van een vrijwel thermisch neutraal klimaat (PMV ≈ 0). De kans op tochtklachten blijft ook bij het hoge luchtdrukverschil beperkt tot minder dan 20%. Bij een actief (elektronisch) zelfregulend gevelrooster blijft de gemiddelde luchtsnelheid ook bij een hoog drukverschil

Comfortcriteria	Type gevelrooster	Standaard	Passief / mechanisch zelfregelend		Actief / elektronisch zelfregelend	
			10 Pa	25 Pa	10 Pa	25 Pa
	Winddruk op gevel	10 Pa	10 Pa	25 Pa	10 Pa	25 Pa
Luchtsnelheid	Gemiddeld	0,24 m/s	0,08 m/s	0,10 m/s	0,05 m/s	0,06 m/s
	Maximaal	1,77 m/s	0,56 m/s	0,69 m/s	0,38 m/s	0,31 m/s
Luchttemperatuur	Minimaal	8,8°C	17,5°C	15,2°C	19,9°C	22,1°C
	Gemiddeld	16,7°C	21,2°C	21,3°C	22,1°C	23,9°C
	Maximaal	19,4°C	22,9°C	23,2°C	23,2°C	25,3°C
PMV	Minimaal	-5,5	-1,0	-2,0	-1,3	-1,0
	Gemiddeld	-1,3	-0,1	-1,0	0,1	0,4
	Maximaal	-0,6	0,7	0,3	0,4	0,7
Draught-waarde	Gemiddeld	45 %	13 %	17 %	6 %	6 %
	Maximaal	100 %	87 %	100 %	82 %	76 %

Tabel 2: numerieke samenvatting thermisch comfort – volledig raster

Comfortcriteria	Type gevelrooster	Standaard	Passief / mechanisch zelfregelend		Actief / elektronisch zelfregelend	
			10 Pa	25 Pa	10 Pa	25 Pa
	Winddruk op gevel	10 Pa	10 Pa	25 Pa	10 Pa	25 Pa
Luchtsnelheid	Minder dan 0,20 m/s	32 %	76 %	81 %	87 %	88 %
	0,20 tot 0,24 m/s	12 %	7 %	2 %	6 %	5 %
	Meer dan 0,24 m/s	56 %	17 %	17 %	7 %	7 %
PMV	Minimaal	-3,4	-1,0	-1,3	-1,3	-0,5
	Gemiddeld	-1,5	-0,1	-0,2	0,0	0,3
	Maximaal	-0,7	0,7	0,3	0,4	0,7
Draught-waarde	Gemiddeld	62 %	11 %	13 %	7 %	8 %
	Maximaal	100 %	64 %	75 %	82 %	76 %

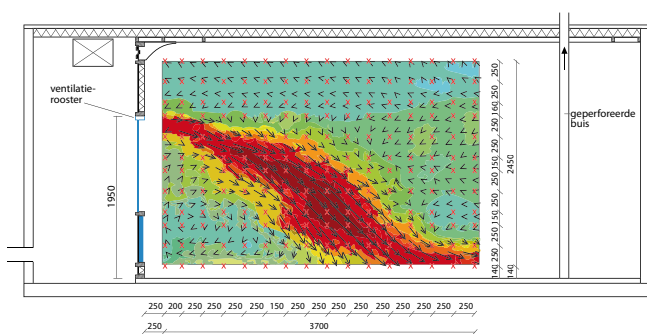
Tabel 3: numerieke samenvatting thermisch comfort – leefzone

beperkt tot gemiddeld 0,06 m/s, wat zeer laag is. Bij het drukverschil van 10 Pa is er sprake van een vrijwel thermisch neutraal klimaat (PMV ≈ 0). De kans op tochtklachten blijft ook bij het hoge luchtdrukverschil beperkt tot minder dan 10%. Bij het zelfregelende gevelrooster is er een beperkte verstoring van de binnentemperatuur, terwijl bij een standaard ventilatierooster er dusdanig veel koude lucht binnenstroomt dat de ruimte merkbaar afkoelt. Bij alle roostertypen ontstaan bij de uitstroomopening luchtsnelheden van meer dan 0,2 m/s, maar deze bevinden zich veelal buiten de leefzone.

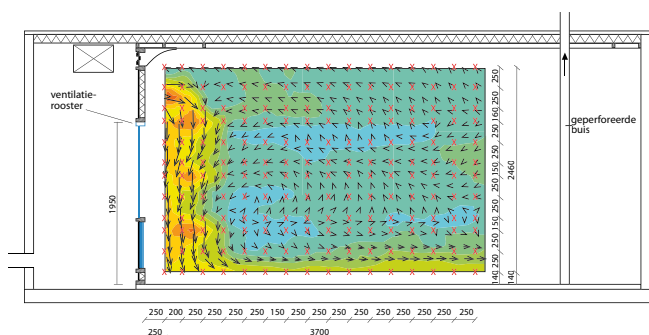
In het kader van het Bouwbesluit is de luchtsnelheid in de leefzone van belang. Dan bereikt het elektronisch zelfregelende rooster de beste resultaten en is het aantal meetpunten met een hoge luchtsnelheid duidelijk lager dan bij het ongeregelde rooster. De hoge luchtsnelheden treden voornamelijk plaats op kleine hoogte boven de vloer, waarschijnlijk ten gevolge van koudeval langs de gevel.

CONCLUSIES

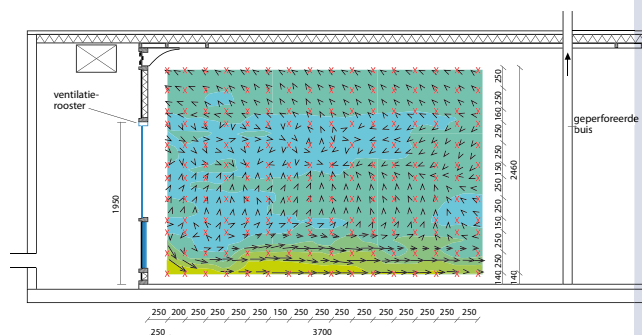
Met de innovatieve meetapparatuur en de speciaal ingerichte klimaatkamer van Cauberg-Huygen is het mogelijk om de luchtstromen en het thermisch comfort in een ruimte gedetailleerd vast te stellen. De verkregen data geven inzicht in de invloed van decentrale toevoorzieningen op het thermisch comfort. In overeenstemming met de praktijkervaring laat het klimaatkameronderzoek bij een standaard gevelrooster een aanmerkelijke kans op tochtklachten zien. Dit komt vooral door de grote lucht volumestroom bij een hogere winddruk op de gevel.



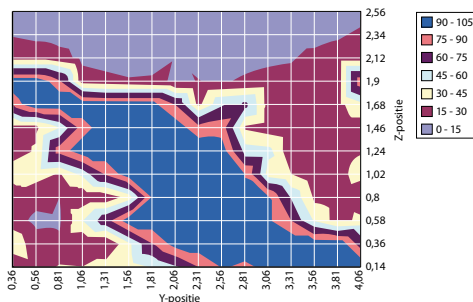
Figuur 5: Stromingspatroon ongeregeld rooster, drukverschil 10 Pa



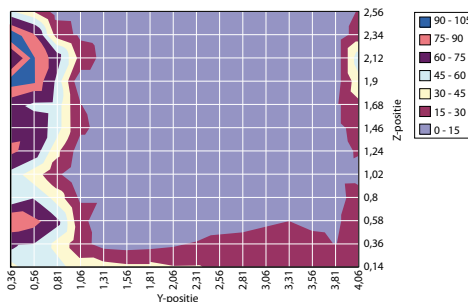
Figuur 6: Stromingspatroon passieve regeling, drukverschil 25 Pa



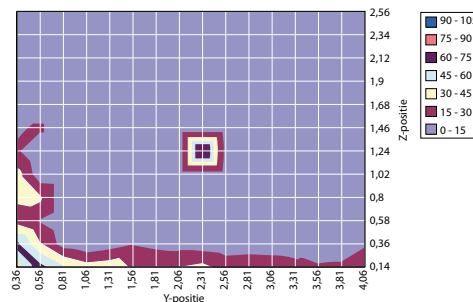
Figuur 7: Stromingspatroon actieve regeling, drukverschil 25 Pa



Figuur 8: Draught-waarde standaard rooster, winddruk 10 Pa



Figuur 9: Draught-waarde mechanisch zelfregelend rooster, winddruk 25 Pa



Figuur 10: Draught-waarde elektronisch zelfregelend rooster, winddruk 25 Pa

De onderzochte, zelfregelende roosters van Alusta weten de lucht volumestroom dusdanig te beperken dat het comfort voldoende tot goed is, ook bij afwezigheid van radiatorenverwarming. In algemene zin kunnen we stellen dat zelfregelende gevelroosters vanuit het oogpunt van comfort een duidelijk voordeel bieden. Het verschil tussen mechanische en elektronische gevelroosters is vooral kort bij de gevel (buiten de leefzone) merkbaar. Daarom zal het verschil in mechanische en elektronische gevelroosters vooral in de energiebesparing tot uitdrukking komen. ISSO-publicatie 92 geeft algemene richtlijnen voor de toepassing van gevelroosters in woningen.

Het onderzoek toont aan dat zelfregelende gevelroosters ook bij een winddruk van 25 Pa op de gevel een goed comfort bieden. In de praktijk kunnen hogere winddrukken optreden, vooral bij hoogbouw en in de kuststreek. De vraag is of een zelfregelend gevelrooster ook dan de luchttoevoerstromen voldoende weet te beheersen en in hoeverre overige lucht lekkages in de gevel een rol gaan spelen. Met de innovatieve, akoestische meetset konden we zelfs kleine lucht lekken in de regelunit van de zelfregelende gevelroosters registreren. Daaruit bleek dat de gevelroosters bij een hoge winddruk op de gevel zover sluiten dat de buitenlucht via minieme openingen in de gevelelementen naar binnen stroomt.

MOGELIJKHEDEN VOOR DE TOEKOMST

Met de uitkomsten van dit onderzoek zijn verbeteringen op product- en projectniveau mogelijk. Producenten van ventilatie- en verwarmingssystemen, maar ook projectontwikkelaars en ontwerpers kunnen bij twijfel vòòr de daadwerkelijke

projectrealisatie het comfortniveau van een bepaalde combinatie van gevelbouw, verwarming- en ventilatiesysteem laten bepalen en desgewenst kiezen voor een alternatief. Dit geeft vooraf meer zekerheid en voorkomt verrassingen achteraf. Hoofdzakelijk is dat de druk-volumestroomkarakteristiek van een ZR-rooster daadwerkelijk vlak verloopt. Voor zelfregelende gevelroosters geldt nu als eis een vlakke druk-volumestroomkarakteristiek tot 25 Pa drukverschil, terwijl het thermisch comfort bij drukverschillen daarboven ook gegarandeerd moet zijn. Volgens de fabrikant bieden elektronisch zelfregelende roosters bij hoge winddrukken (100 Pa) het voordeel dat deze actief geheel kunnen sluiten; via infiltratie in de gevel zal dan voldoende luchttoevoer overblijven. Kwaliteitsborging en eventueel certificering van de zelfregelende eigenschappen zijn daarom van wezenlijk belang voor klachtenvrije toepassing van gevelroosters in kritische situaties. Het onderzoek richtte zich op een standaard gevel met een borstwering; nader onderzoek bij volledig glazen gevels kan bij alle vormen van decentrale luchttoevoer nieuw inzicht geven in de invloed van koudestraling en koudeval op het comfortniveau. Ook de lichtdoorlatendheid van een gevel kan hierin een nog nader te bepalen rol spelen. Natuurlijke luchttoevoer moeten we daarom altijd bezien in relatie tot de gevelkwaliteit en het afgiftesysteem voor verwarming.

De onderzochte ventilatieroosters van Alusta kennen in de ZR-uitvoering een andere instroomopening dan standaard, te weten omhoog gericht ten opzichte van de standaard horizontaal gerichte luchtstroom. De invloed hiervan op de luchtstromen door verbeterde inductie en menging is nog

niet nader onderzocht, maar lijkt belangrijk bij het voorkomen van tochtklachten. De verkregen meetdata zijn tenslotte wellicht geschikt als invoer voor computersimulaties (CFD-berekeningen) om deze te valideren en waar nodig te verbeteren.

Over de auteur

Ing. E. Roijen is senior projectleider bij Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs BV te Maastricht en is gespecialiseerd in duurzame energie- en comfortsystemen.