

Koelbehoefteberekening grote ruimten

Kennisbank Bouwfysica

Auteurs: dr.ir. Peter van den Engel, Martine Verhoeven, ir. Leo de Ruijsscher, ir. John van der Vliet

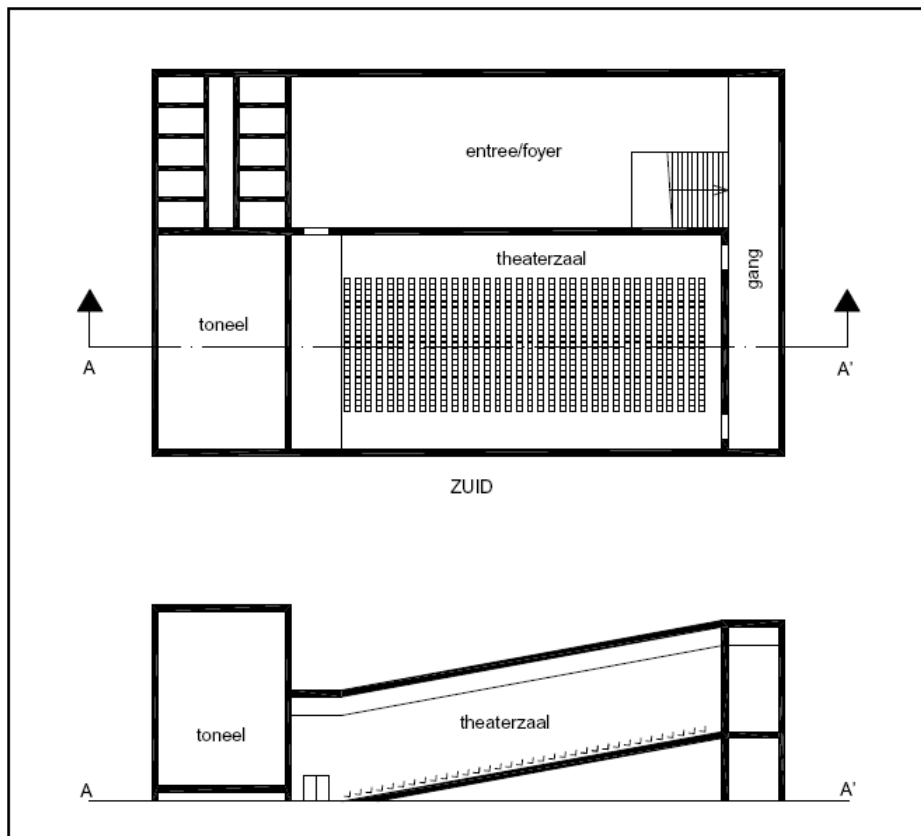
1 Inleiding

Aan de hand van de in een andere module besproken rekenmethode worden enkele voorbeelden weergegeven van de berekening van de koelbehoefte van grote ruimten.

2 Voorbeelden

2.1 Voorbeeld 1, koelbehoefte theaterzaal

Dit voorbeeld betreft een middelzwaar gebouwde theaterzaal zonder ramen, zie figuur 1.



figuur 1 theaterzaal

De SWM is 70 kg/m^2 . Eén lange wand is een buitenwand met zuid-oriëntatie en een massa van 200 kg/m^2 . De andere lange wand grenst aan de entree/foyer. Een korte wand grenst aan een brede gang, de andere aan het toneelgebouw. Verondersteld wordt dat de temperatuur in de foyer, de gang en het toneelgebouw gelijk zijn aan de temperatuur in de zaal. Het dak, de wanden en de vloer zijn van beton. De belendende bebouwing is ongeveer even hoog als de zaal en werpt daardoor geen schaduw op het dak. De verlichting is in een verlaagd plafond

aangebracht. Het Programma van Eisen geeft aan dat de zaal overdag langere tijd gebruikt moet kunnen worden. Het toneelgebouw heeft zijn eigen klimaatinstallatie.

Verdere gegevens:

netto hoogte	8,0 m
zaalbreedte	20,0 m
zaaldiepte	40,0 m
bezetting	maximaal 600 personen
verlichting	halogeenspots 30 W/m ² , 20% v.d. tijd in gebruik
apparatuur	geen
ontwerp-binnentemperatuur	25 °C
ontwerp-buitentemperatuur	28 °C
infiltratie	nihil
maximale gebruiksduur	4 uur

Hoewel een lange buitenwand op het zuiden ligt, zal de maximale koelbehoefte op een ander tijdstip vallen dan het tijdstip dat de tabel vermeldt (13 uur zonnetijd). Omdat in die gevel geen ramen zitten overheerst de interne belasting waardoor het tijdstip van de maximale koelbehoefte niet te bepalen is. De maximale koelbehoefte is:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{z,w} \text{ (wand)} &= A_{wi} \cdot q_w = 0,7 \cdot 40 \cdot 8 \cdot 4,0 = & 627 \text{ W} \\
 \Phi_{z,w} \text{ (dak)} &= 0,7 \cdot 40 \cdot 20 \cdot (-3,9) = & -2184 \\
 \Phi_p &= 600 \cdot 80 = & 48000 \\
 \Phi_l &= 0,2 \cdot 30 \cdot 20 \cdot 40 = & 4800 \\
 \Phi_k &= & \mathbf{51243 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

En de specifieke koelbehoefte:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 51243 / (20 \times 40) = \mathbf{64 \text{ W/m}^2}$$

2.2 Systeemkeuze

Uit tabel 9 blijkt dat een CAV-systeem een verantwoorde keuze is. Echter bij theaterzalen past men meestal een vorm van verdringingsventilatie toe waarbij de lucht laag, via de fauteuilpoten of via roosters onder de fauteuils, wordt toegevoerd. De toevoertemperatuur mag in dat geval niet meer dan 4 °C onder de zaaltemperatuur liggen. De temperatuur mag boven hoofdhoogte toenemen tot boven de gewenste temperatuur, tenzij de zaal een balkon heeft. In dit voorbeeld is er geen balkon. Bij de berekening van de luchthoeveelheid mag daarom worden uitgegaan van een temperatuurverhoging van 4 °C in de leefzone en 4 °C in de ruimte daarboven, totaal dus 8 °C (dit is een aanname!). De toe te voeren luchthoeveelheid wordt daardoor:

$$q_v = \Phi_k \cdot 3600 / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 51243 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 8) = 5,3 \text{ m}^3/\text{s} = 19216 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dit komt overeen met een ventilatievoud van:

$$n = q_v / V = 19216 / (40 \cdot 20 \cdot 8) = 3,0 \text{ h}^{-1}$$

2.3 Invloed warmteaccumulatie op systeemkeuze

In de berekening is de warmteaccumulatie van wanden en vloer buiten beschouwing gelaten. Dit zou anders moeten. Omdat het dak en een lange wand aan de buitenlucht grenzen kan

worden aangenomen dat de massa hiervan niet meedoet in de accumulatie. De accumulerende oppervlakte is daardoor:

$$A_w = 40 \cdot 20 + (40 + 20 + 20) \cdot 8 = 1440 \text{ m}^2$$

Wordt aangenomen dat de oppervlaktemperatuur van de vloer en de wanden gedurende de gebruikperiode gemiddeld 1°C lager ligt dan de luchttemperatuur in de zaal, dan is de warmte-belasting als gevolg van warmteaccumulatie:

$$\Phi_{\text{acc}} = \alpha \cdot A_w (\theta_{\text{opp}} - \theta_i) = 5,5 \cdot 1440 \cdot (-1) = -7920 \text{ W}$$

Bij een gebruiksduur van maximaal 4 uur ($dt = 14400 \text{ s}$) en een temperatuurverhoging van de massa van 1°C ($\theta_1 - \theta_2 = -1^\circ\text{C}$) is de maximaal mogelijke warmteaccumulatie:

$$\Phi_{\text{acc, max}} = \text{SWM} \cdot A_w \cdot c (\theta_1 - \theta_2) / dt = 70 (2 \cdot 40 \cdot 20 + (40 + 20 + 20) \cdot 8) \cdot 840 \cdot (-1) / 14400 = -9147 \text{ W}$$

Deze waarde ligt hoger dan de berekende Φ_{acc} , zodat mag worden verondersteld dat de berekende Φ_{acc} reëel is. De koelbehoefte wordt dan:

$$\Phi_k = 51243 - 7920 = 43403 \text{ W}$$

En de toe te voeren luchthoeveelheid:

$$q_v = \Phi_k \cdot 3600 / (\rho \cdot c \cdot \Delta t) = 43403 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 8) = 4,5 \text{ m}^3/\text{s} = 16276 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dit komt overeen met een ventilatievoud van:

$$n = q_v / V = 16276 / (40 \cdot 20 \cdot 8) = 2,5 \text{ h}^{-1}$$

Voor luchtverversing is ten minste nodig:

$$600 \cdot 30 = 18000 \text{ m}^3/\text{h}$$

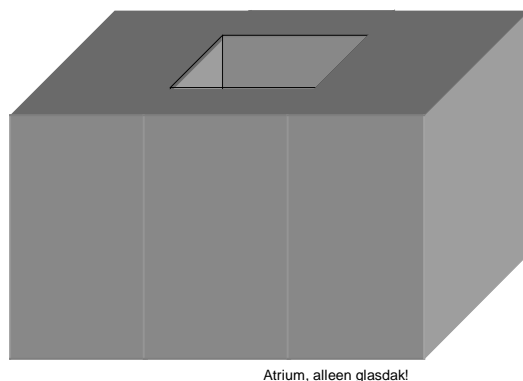
Dit komt neer op:

$$n = 18000 / (40 \cdot 20 \cdot 8) = 2,8 \text{ h}^{-1}$$

De luchthoeveelheid die nodig is om de zaal te koelen is onvoldoende om de lucht te verversen, zodat de luchtverversing in dit geval maatgevend is. Het in rekening brengen van de warmteaccumulatie heeft geen invloed op de systeemkeuze, immers dat systeem ligt op grond van ervaringen min of meer vast. Wel blijkt, gezien het voorgaande, dat minder gekoelde lucht hoeft te worden toegevoerd.

2.4 Voorbeeld 2, koelbehoefte atrium

Het atrium vormt de verkeersruimte/wachtruimte van een raadhuis, zie figuur 2.



Atrium, alleen glasdak

figuur 2 atrium

De transparantie van het atriumdak is 90%. Verdere gegevens:

lengte x breedte x hoogte	20 x 10 x 20 m
dak	enkel glas ($U=6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), geen zonwering ($ZTA=0,85$), massa verwaarloosbaar
binnengevel	lichte wanden, wanddikte 0,08 m, $\rho = 1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ (gemiddeld)
vloer	beton, vloerdikte 0,25 m, $\rho = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$
bezetting	40 personen (80 W/persoon)
verlichting	10 W/m^2
apparatuur	geen
ontwerp-binnentemperatuur	25 °C
ontwerp-buitentemperatuur	28 °C
infiltratie	0,2-voud

De specifiek werkzame massa van het atrium is:

$$\text{SWM} = \Sigma A \cdot d \cdot \rho / \Sigma A = (2 \cdot 20 \cdot 10 + 2 \cdot 20 \cdot 20) \cdot 0,04 \cdot 1200 + 20 \cdot 10 \cdot 0,06 \cdot 2000 / (2 \cdot 20 \cdot 20 + 4 \cdot 20 \cdot 10) = 51 \text{ kg}/\text{m}^2$$

De ruimte valt daardoor in de categorie "lichte bouw".

Door het horizontale glasoppervlak treedt de maximale belasting op om ongeveer 13 uur zonnetijd (zie tabel). De koelbehoefte van het atrium is dan:

$\Phi_{z,gl}$	$= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv}$	$= 1 \cdot 200 \cdot 0,85 \cdot 590 =$	100340 W
$\Phi_{tr,gl}$	$= U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i)$	$= 6,0 \cdot 200 \cdot (28 - 25) =$	3600
Φ_{inf}	$= n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta\theta / 3600$	$= 0,2 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (28 - 25) / 3600 =$	800
Φ_p	$= 40 \cdot 80$	$=$	3200
Φ_i	$= 10 \cdot 20 \cdot 10$	$=$	<u>2000</u>
		$\Phi_k =$	109940 W

En de specifieke koelbehoefte:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 109940 / (20 \times 10) = \mathbf{550 \text{ W}/\text{m}^2}$$

2.5 Systeemkeuze bij mechanische koeling

Uit tabel 9 blijkt dat voor ruimten van 4 m en hoger alleen "zuivere verdringing" aan deze specifieke koellast kan voldoen. De voetnoot vermeldt echter dat dit systeem alleen wordt toegepast bij bijzondere ruimten, zoals voor de fabricage van micro-elektronische componenten. Voor een atrium met de aangegeven functie is het geen reële optie. Wel voorstelbaar is een systeem waarbij gekoelde lucht met een hoge snelheid via nozzles wordt ingeblazen. Wordt hierbij een temperatuurverschil van 10 °C genomen dan is de toe te voeren luchthoeveelheid:

$$q_{v, \Delta\theta=10^\circ\text{C}} = 109940 / (1200 \cdot 10) = 9,2 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (32982 m}^3/\text{h)}$$

En het ventilatievoud:

$$n_{\Delta\theta=10^\circ\text{C}} = 32982 / (20 \cdot 10 \cdot 20) = 8,2 \text{ h}^{-1}$$

Voor een ruimte voor langdurig verblijf - waarvoor als vuistregel $2 < n < 10$ geldt - is dit goed, voor een verkeersruimte/wachruimte is het meer dan goed.

Vindt de koeling volledig met lucht plaats, dan moeten de toe- en afvoerkanaal een diameter hebben van **1250 mm**, of een rechthoekige doorsnede van **800/1600 mm** (zie tabel 1 en 2).

tabel 1 luchtkanalen, afmetingen, debiet en koelvermogen

lucht- koelvermogen verplaatsing (debiet)	kanaalkanaal	diameter		te ventileren vloeroppervlakte											
		hoofd- kanaal	aansluit- ventilatievoud	bij h = 2,7 m				bij h = 3,0 m				bij $\Delta\theta$ van			
				3	4	5	6	3	4	5	6	8°C	10°C		
12°C m ³ /s m ³ /h kW	mm	mm	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	kW	kW	
0,05	170	100	125	21	16	14	11	19	14	11	9	0,45	0,56		
															0,68
0,07	260	125	160	33	25	20	16	29	22	18	15	0,70	0,88		
															1,06
0,12	430	160	200	54	40	32	27	48	36	29	24	1,15	1,44		
															1,73
0,19	680	200	250	84	63	50	42	75	57	45	38	1,8	2,3	2,7	
0,29	1060	250	315	130	100	80	65	118	88	71	59	2,8	3,5	4,2	
0,55	1960	315	400	240	180	145	120	217	163	130	109	5,3	6,6	7,9	
0,88	3200	400	500	400	300	230	200	350	260	210	180	7,7	9,6	12	
1,37	4900	500	630	600	460	370	300	550	410	330	270	13	17	20	
2,65	9500	630	1000	1150	880	700	590	1060	800	640	530	25	32	38	
5,00	18000	800	1250	2200	1670	1300	1100	2000	1500	1200	1000	48	60	72	
7,90	28000	1000	1600	3500	2600	2100	1750	3100	2400	1900	1600	75	94	113	
12,30	44000	1250	2000	5400	4100	3300	2700	4900	3700	2900	2500	118	147	177	
23,10	83000	1600	2500	10200	7700	6200	5100	9200	6900	5500	4600	222	278	333	

tabel 2 rechthoekige luchtkanalen met gelijke hydraulisch equivalente diameter

rond kanaal	rechthoekig kanaal			
mm	hoogte x breedte in mm			
100	70 x 170 *)			
125	80 x 170 *)			
160	150 x 150	125 x 175	100 x 200	
200	200 x 200	150 x 250	125 x 300	100 x 400
250	250 x 250	200 x 300	175 x 350	150 x 400 125 x 500
315	300 x 300	250 x 350	200 x 400	175 x 500 150 x 600
400	400 x 400	250 x 500	200 x 800	
500	500 x 500	350 x 700	300 x 800	250 x 1000
630	600 x 600	500 x 700	400 x 800	350 x 1000 300 x 1200
800	800 x 800	500 x 1000	400 x 1600	
1000	1000 x 1000	700 x 1400	500 x 2000	
1250	1200 x 1200	800 x 1600	600 x 2400	
1600	1600 x 1600	1200 x 2400	800 x 3200	

*) bedoeld voor opname in vloeren (o.a. woningen), anders rond kanaal gebruiken

Gezien het grote ventilatievoud kan het gunstiger zijn om een "lucht/water"-systeem toe te passen zoals ventilatorconvectoren. Of dat hier ook zo is, is niet direct te zeggen omdat zo'n systeem-keuze tot gevolg heeft dat een aantal zeer grote apparaten in het atrium komen. Echter ook voor een "volledig lucht"-systeem is veel installatieruimte nodig. De opstelling van de luchtbehandelingskast vraagt een ruimte met een oppervlakte **90 m²** en een hoogte van **4,0 m** (zie tabel 3).

tabel 3 globale afmetingen luchtbehandelingsruimten

debiet zone/cluster m ³ /h	alleen	luchtoevoer en -afvoer plus			hoogte m ¹
	luchtafvoer m ²	FV m ²	FVK m ²	FVKB*) m ²	
10.000	20	30	50-60	60-70	2,5
25.000	25	35-40	65-80	85-100	3,2
50.000	35-40	50-60	90-110	120-140	4,0
75.000	40-55	65-80	120-145	155-180	4,5
100.000	50-70	80-100	150-180	190-220	5,0
150.000	70-100	110-140	200-250	260-300	6,0

*) F=filteren V=verwarmen K=koelen B=bevochtigen

2.6 Natuurlijke ventilatie

In de Nederlandse situatie is het gebruikelijker om atria op natuurlijke wijze te koelen. Het klimaat in het atrium wordt als "aanvaardbaar" beschouwd als de temperatuur maximaal 5 °C hoger wordt dan de buitentemperatuur. De benodigde luchthoeveelheid is dan:

$$q_{v, \Delta\theta=5^\circ\text{C}} = 109940 / (1200.5) = 18,3 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (65964 m}^3/\text{h)}$$

En het ventilatievoud:

$$n_{\Delta\theta=5^\circ\text{C}} = 65964 / (20.10.20) = 16,5 \text{ h}^{-1}$$

Voor een ruimte voor langdurig verblijf zou dit ventilatievoud onaanvaardbaar hoog zijn. Voor een verkeersruimte/wachtruimte is het acceptabel, mits voorzieningen zijn getroffen om te voorkomen dat mensen op de tocht komen te zitten.

De luchtsnelheid in ventilatieopeningen ligt meestal tussen 0,5 en 1,5 m/s. Als vuistregel wordt vaak 1,0 m/s genomen. Toevoer- en afvoeropeningen kunnen worden gecombineerd tot één opening in het dakvlak. Deze opening moet dan - uitgaande van een luchtsnelheid van 1 m/s - bij benadering een totale oppervlakte hebben van ten minste:

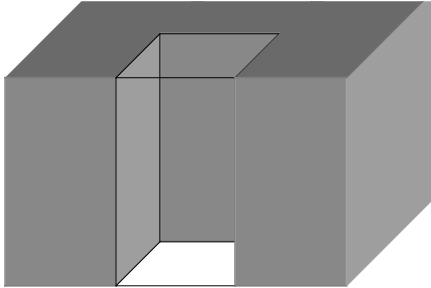
$$A_{\text{tot}} = 1,2 \cdot 2 \cdot q_v / v = 2,4 \cdot 18,3 / 1 = 43,9 \text{ m}^2$$

Een betere benadering is mogelijk met behulp van het in paragraaf 2.2.5. afgeleide model waarbij voor de situeringsfactor y de waarde 2,2 kan worden genomen (vergelijking 20):

$$A_{o,\text{tot}} = y \cdot \Phi_k / (130 \cdot \Delta\theta^{1,5} \cdot h^{0,5}) = 2,2 \cdot 109940 / (130 \cdot 5^{1,5} \cdot 20^{0,5}) = 37,2 \text{ m}^2$$

2.7 Voorbeeld 3, koelbehoefte serre

De serre in dit voorbeeld vormt de entree van een kantoorgebouw met daarin een afgeschermd informatiebalie en een zitje voor wachtende bezoekers, zie figuur 3.



Figuur 3 Serre

De transparantie van het serredak is 90%. De serregevel is geheel transparant ("structural glazing"). Verdere gegevens:

lengte x breedte x hoogte	20 x 10 x 20 m
oriëntatie gevel	ZO
gevel en dak	enkel glas ($U=6,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), geen zonwering ($ZTA=0,85$) massa verwaarloosbaar
binnengevel	50% glas, massa verwaarloosbaar 50% steenachtig materiaal, wanddikte 0,12 m, $\rho = 1200 \text{ kg}/\text{m}^3$
vloer	beton, vloerdikte 0,25 m, $\rho = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$
bezetting	40 personen (80 W/persoon)
verlichting	10 W/m^2
apparatuur	geen
ontwerp-buitentemperatuur	28 °C
ontwerp-binnentemperatuur	25 °C bij mechanische koeling $t_e +5 \text{ °C}$ bij natuurlijke koeling met buitenlucht
infiltratie	0,3-voud

In eerste instantie wordt uitgegaan van enkel glas zonder zonwering ($ZTA = 0,85$). De berekening wordt herhaald voor isolerend/zonwerend glas ($ZTA = 0,38$). Om te weten welke tabelwaarden bij de berekening moeten worden gebruikt moet eerst de specifiek werkzame massa bekend zijn:

$$SWM = \Sigma A \cdot d \cdot \rho / \Sigma A = (2 \cdot 0,5 \cdot 20 + 0,5 \cdot 20 \cdot 20 + 20 \cdot 10) \cdot 0,06 \cdot 2000 / (2 \cdot 20 \cdot 20 + 4 \cdot 20 \cdot 10) = 45 \text{ kg}/\text{m}^2$$

De ruimte valt daardoor in de categorie "lichte bouw". Omdat de serre een ZO-oriëntatie heeft mag worden aangenomen dat de maximale belasting om 10 uur zonnetijd optreedt (zie tabel).

De koelbehoefte is op dat moment:

$$\begin{aligned} \Phi_{z,gl,gevel} &= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} \cdot f_d = && 1.400 \cdot 0,85 \cdot 450 \cdot 1 = && 153000 \text{ W} \\ \Phi_{z,gl,dak} &= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} \cdot f_d = && 1.200 \cdot 0,85 \cdot 590 \cdot 0,8 = && 80240 \\ \Phi_{tr,gl} &= U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) = 6,0 \cdot (400 + 200) \cdot (28 - 25) = && 10800 \\ \Phi_{inf} &= n \cdot V \cdot p \cdot c \cdot \Delta\theta / 3600 = 0,3 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (28 - 25) / 3600 = && 1200 \\ \Phi_p &= 40 \cdot 80 = && 3200 \end{aligned}$$

$$\Phi_1 = 10 \cdot 20 \cdot 10 =$$

$$\Phi_k = \frac{2000}{250440 \text{ W}}$$

En de specifieke koelbehoefte:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 250440 / (20 \times 10) = 1252 \text{ W/m}^2$$

Dit zijn voor mechanische koeling onwaarschijnlijk hoge waarden! In de Nederlandse situatie is het ook niet gebruikelijk om serres op deze manier te koelen. Zou mechanische koeling worden toegepast dan zou dit tot het volgende leiden.

2.8 Stysteemkeuze bij mechanische koeling

Uit tabel 9 blijkt dat bij een specifieke koelbehoefte van 1252 W/m^2 en een hoogte van 4 m en hoger alleen "zuivere verdringing" in aanmerking komt en de gekoelde lucht in dat geval met een geringe snelheid via een geheel geperforeerd vlak (plafond, vloer of wand) moet worden toegevoerd en de gebruikte lucht via het tegenoverliggende vlak (ook geperforeerd) weer moet worden afgevoerd. Dit is voor een serre geen reële optie, temeer omdat de serregevel het beoogde stromingspatroon ernstig zou verstoren. Voorstelbaar is dat gekoelde lucht met een hoge snelheid, bij voorbeeld via nozzles, wordt toegevoerd. Wordt een temperatuurverschil van 10°C gekozen dan is de toe te voeren luchthoeveelheid:

$$q_{v, \Delta\theta=12^\circ\text{C}} = 250440 / (1200 \cdot 10) = 20,9 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (75132 m}^3/\text{h)}$$

En het ventilatievoud:

$$n_{\Delta\theta=12^\circ\text{C}} = 75132 / (20 \cdot 10 \cdot 20) = 18,8 \text{ h}^{-1}$$

Voor een ruimte voor langdurig verblijf - waarvoor als vuistregel $2 < n < 10$ geldt - zou dit ventilatievoud veel te hoog zijn, voor een verkeersruimte/wachtruimte is het acceptabel.

Voor de toevoer en afvoer van de berekende luchthoeveelheid zijn luchtkanalen nodig met een diameter van **1600 mm (!)** of met een rechthoekige doorsnede van **800/3200 mm** (zie tabel). Gezien het grote ventilatievoud zou het gunstiger kunnen zijn om een "lucht/water"-systeem toe te passen, zoals met ventilatorconvectoren. Of dat bij dit voorbeeld gunstiger is, is niet direct te zeggen, omdat voor dat systeem een aantal zeer grote en zeer opvallende apparaten in de serre zou moeten worden aangebracht. Om energetische redenen is het niet waarschijnlijk dat een atrium op een dergelijke manier geklimatiseerd wordt en het laat zien hoe noodzakelijk zonwering is.

2.9 Natuurlijke ventilatie

In de Nederlandse situatie is het gebruikelijker maar ook realistischer om zonbelaste serres op natuurlijke wijze te koelen. Het klimaat in de serre wordt in dat geval "aanvaardbaar" gevonden als de ruimtetemperatuur maximaal 5°C hoger wordt dan de buitentemperatuur. De benodigde luchthoeveelheid is dan:

$$q_{v, \Delta\theta=5^\circ\text{C}} = 250440 / (1200 \cdot 5) = 41,7 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (150264 m}^3/\text{h)}$$

En het ventilatievoud:

$$n_{\Delta\theta=5^\circ\text{C}} = 150264 / (20 \cdot 10 \cdot 20) = 37,6 \text{ h}^{-1}$$

Voor een ruimte voor langdurig verblijf zou dit onaanvaardbaar hoog zijn. Voor een verkeersruimte/wachtruimte is het acceptabel, mits voorzieningen zijn getroffen om te voorkomen dat mensen op de tocht komen te zitten.

Voor het effectief natuurlijk ventileren zijn toevoer- en afvoeropeningen nodig. Om de kans op tocht te beperken moeten de toevoeropeningen niet te laag zitten. Bij natuurlijke ventilatie ligt de luchtsnelheid in de openingen meestal tussen 0,5 en 1,5 m/s. Als vuistregel wordt vaak 1,0 m/s genomen. De gezamenlijke oppervlakte van de toevoeropeningen is dan bij benadering:

$$A = q_v / v = 41,7 / 1,0 = 41,7 \text{ m}^2$$

De toevoeropeningen kunnen het best over de breedte van de gevel worden verdeeld. Wordt het één grote opening, dan moet deze ten minste 2,1 m hoog zijn. De toevoeropening zijn afsluitbaar te maken met transparante jaloeziekleppen.

De afvoeropeningen moeten ook een gezamenlijke oppervlakte hebben van ten minste 41,7 m². Gezien de vorm van het dak kan het eventueel één opening zijn, bij voorbeeld 9,2 x 4,6 m.

Een nauwkeuriger berekening van de ventilatieopeningen is mogelijk met het in [3] afgeleide model (zie paragraaf 2.2.5.). Wordt voor de situeringsfactor y een waarde van 2,0 genomen dan volgt hieruit dat een gezamenlijke oppervlakte van:

$$A_{o,tot} = y \cdot \Phi_k / (130 \cdot \Delta\theta^{1,5} \cdot h^{0,5}) = 2 \cdot 250440 / (130 \cdot 5^{1,5} \cdot 20^{0,5}) = 77 \text{ m}^2$$

De toevoer- en afvoeropeningen krijgen daardoor elk een gezamenlijke oppervlakte van 38,5 m.

2.10 Invloed zonwerend glas op systeemkeuze koeling

Worden dak en gevel uitgevoerd in zonwerend glas - bij voorbeeld met ZTA = 0,38 - dan volgt hieruit een beduidend lagere koelbehoefte en andere luchthoeveelheden e.d., zie het volgende overzicht.

	<i>enkel glas</i>	<i>zonwerend glas</i>
ZTA	0,85	0,38
koelbehoefte Φ_k	250440	113012 W
specifieke koelbehoefte $\Phi_{k,sp}$	1252	565 W/m ²
mechanische koeling ($\Delta t=10^\circ\text{C}$)		
luchthoeveelheid q_v	20,9	9,4 m ³ /s
ventilatievoud bij n	18,8	8,5 h ⁻¹
diameter kanaal	1600	1250 mm
natuurlijke koeling ($\Delta t=5^\circ\text{C}$)		
luchthoeveelheid q_v	41,7	18,8 m ³ /s
ventilatievoud n	37,6	17,0 h ⁻¹
oppervlakte openingen	38,5	17,4 m ²