

Koelbehoefteberekening kleine ruimten

Kennisbank Bouwfysica

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

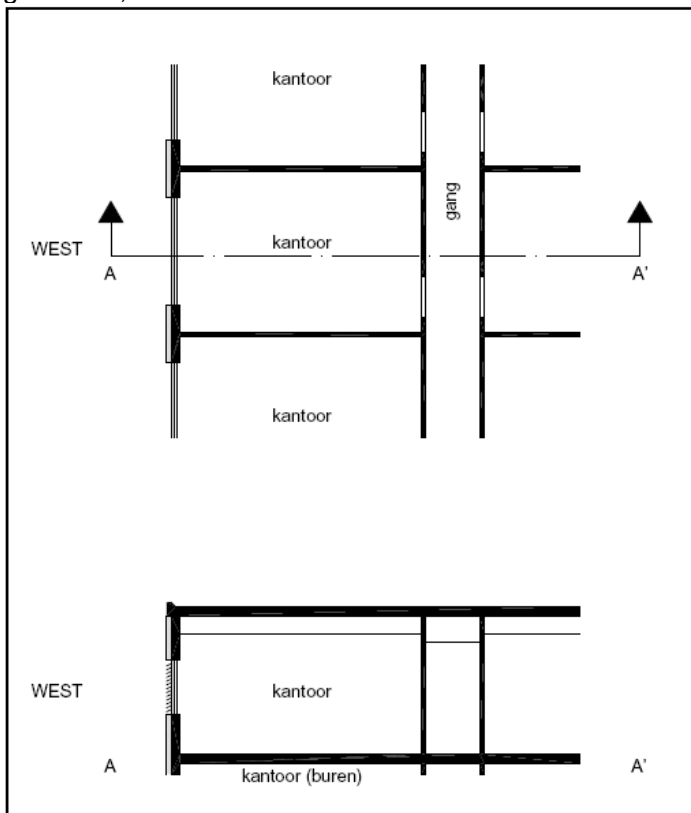
1 Inleiding

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

2 Voorbeelden

2.1 Voorbeeld 1: koelbehoefte kantoorvertrek

Voor dit voorbeeld wordt een tussenvertrek op de bovenste laag van een kantoorgebouw genomen,



figuur 1 voorbeeld 1, kantoorvertrek

Het betreft een gebouw met vrij veel massa ($SWM=80 \text{ kg/m}^2$). De borstwering heeft een massa van 300 kg/m^2 . Het dak bestaat uit beton met verlaagd plafond. De oriëntatie van het vertrek is West. Verdere gegevens zijn:

netto hoogte	: 2,7 m
gevel breedte	: 3,6 m
vertrekdiepte	: 5,4 m
glasoppervlakte	: $2,9 \text{ m}^2$ (30% van inw. geveloppervlakte)

glassoort	: dubbel glas
zonwering	: buitenzonwering (jaloezieën)
bezetting	: 2 personen, 100% aanwezig
verlichting	: TL-verlichting met luchtafvoer
apparatuur	: 1 PC/persoon
ontwerp-binnentemperatuur	: 25 °C
ontwerp-buitentemperatuur	: 28 °C
infiltratie	: 0,3-voud

Omdat de oriëntatie West is, treedt de maximale belasting op om ongeveer 16 uur zonnetijd (zie tabel). Om de invloed van het type zonwering en grotere ramen na te gaan worden de berekeningen herhaald voor binnenzonwering en glaspercentages van 60 en 90%. De koelbehoefte bij 30 % glas en ZTA = 0,15 is:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{z,gl} &= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} = 1 \cdot 2,9 \cdot 0,15 \cdot 340 &= 148 \text{ W} \\
 \Phi_{tr,gl} &= U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) = 3,0 \cdot 2,9 \cdot (28 - 25) &= 26 \\
 \Phi_{z,w, borstw} &= a \cdot A_{wi} \cdot q_w = 0,7 \cdot (2,7 \cdot 3,6 - 2,9) \cdot 1,9 &= 11 \\
 \Phi_{z,w, dak} &= 0,7 \cdot 3,6 \cdot 5,4 \cdot (-3,9) &= -53 \\
 \Phi_{inf} &= 0,3 \cdot 3,6 \cdot 2,7 \cdot 5,4 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (28-25) / 3600 &= 16 \\
 \Phi_p &= 2 \cdot 80 &= 160 \\
 \Phi_l &= 5 \cdot 3,6 \cdot 5,4 &= 97 \\
 \Phi_a &= 2 \cdot 100 &= 200 \\
 \Phi_k &= \mathbf{605 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

De specifieke koelbehoefte is:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 605 / (3,6 \times 5,4) = \mathbf{31 \text{ W/m}^2}$$

2.2 Stelsysteemkeuze bij mechanische koeling

Uit tabel 1 blijkt dat voor deze specifieke koelbehoefte een VAV-systeem een geschikte keuze is, omdat dit systeem ten minste een even groot specifiek koelvermogen kan leveren.

tabel 1 specifiek koelvermogen in W/m^2 vloeroppervlakte van verschillende systemen en combinaties van systemen bij verschillende ruimtehoogten

systeem	ventilatievoud	ruimtehoogte in meter						
		h^{-1}	2,4	2,7	3,0	3,5	4,0	5,0
		$\Delta\theta = 6\text{ }^\circ\text{C}$	8 $^\circ\text{C}$	10 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$
A VAV of CAV ¹⁾	3	15²⁾	20	30	40	50	60	70
„	4	20	30	40	55	65	80	95
„	5	25	35	50	70	80	100	120
„	6	30	45	60	85	95	120	145
B kwelventilatie ³⁾	8	-	30	35	⁴⁾	⁴⁾	⁴⁾	⁴⁾
C inductie / fan-coil	10	50	75	100	140	160	200	240
D plafondkoeling ⁵⁾	-	60	60	60	60	60	60	60
E vloerkoeling ⁵⁾	-	20	20	20	20	20	20	20
F zuivere verdringing ⁶⁾	250	800	900	1000	1150	1350	1500	2000
A + D	2	70	75	80	90	90	100	110
„	3	75	80	90	100	110	120	130
„	4	80	90	100	115	125	140	155
„	6	85	100	100	140	155	180	205
B + D	8	-	80	85	⁴⁾	⁴⁾	⁴⁾	⁴⁾
C + D	10	90	100	100	140	160	200	240

- ¹⁾ Voor “volledig lucht”-systemen (A) tot 6-voudige ventilatie. Bij hogere ventilatievouden zijn deze systemen economisch niet verantwoord.
- ²⁾ Bij de cursief gedrukte waarden is met natuurlijke koeling te volstaan.
- ³⁾ $\Delta\theta$ max. 4 $^\circ\text{C}$, bij hogere ruimten - afhankelijk van de ruimtefunctie - eventueel meer.
- ⁴⁾ Hiervan is onvoldoende bekend.
- ⁵⁾ Deze systemen toepassen in combinatie met een systeem waarmee geventileerd wordt.
- ⁶⁾ Toepassing alleen in bijzondere ruimten.

Uit deze tabel is verder af te leiden dat voor een ruimtehoogte van 2,7 m met een VAV-systeem een ventilatievoud van ruim 4 nodig is. Deze uitkomst is als volgt te verifiëren.

Wordt de ruimte gekoeld met lucht van 17 $^\circ\text{C}$ ($\Delta\theta = 8\text{ }^\circ\text{C}$, zie tabel 2), dan moet met dit systeem een hoeveelheid lucht worden toegevoerd van:

tabel 2 maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht

hoogte van de ruimte m	$\Delta\theta$ °C
2,4	6
2,7	8
3,0	10
3,5	12
4,0	15

$$q_v = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 605 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 8) = 0,063 \text{ m}^3/\text{s} = 227 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dit komt overeen met een ventilatievoud van:

$$n = q_v / V = 227 / (3,6 \times 5,4 \times 2,7) = 4,3 \text{ h}^{-1}$$

Dit is goed. De praktijk laat zien dat bij luchtkoeling het ventilatievoud bij voorkeur niet beneden de 2 moet liggen om een slechte luchtverdeling - met te grote temperatuurverschillen in de "leef-zone" - te voorkomen. Meer dan 10-voud geeft kans op tocht.

Een onnodig hoog ventilatievoud is aan de andere kant om energetische redenen ook niet wenselijk. Met een ventilatievoud van 2 wordt voor een kantoor al voldaan aan het Bouwbesluit (eis: $1,3 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 = 4,7 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$).

Natuurlijke ventilatie

Zou de ruimte op natuurlijke wijze worden gekoeld, dan is de benodigde ventilatie en de oppervlakte van de raamopeningen te berekenen door uit te gaan van een temperatuurverhoging van 3 °C. Hieruit volgt een luchthoeveelheid van:

$$q_{v,nv} = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 605 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 3) = 0,17 \text{ m}^3/\text{s}$$

Het daarbij behorende ventilatievoud is:

$$n_{nv} = q_{v,nv} \cdot 3600 / V = 0,17 \cdot 3600 / (3,6 \times 5,4 \times 2,7) = 11,6 \text{ h}^{-1}$$

Dit is voor verblijfsruimten te hoog en kan tot tochtklachten leiden. Zou toch worden besloten om deze ruimte natuurlijk te koelen dan zou, volgens de eerste benadering en uitgaande van raamopeningen op de zelfde hoogte in de gevel die zowel voor toevoer als afvoer dienen en uitgaande van een lichtsnelheid van 0,4 m/s, daarvoor een totale oppervlakte aan raamopeningen nodig zijn van:

$$A_{\text{tot}} = 1,4 \cdot 2 \cdot q_v / v = 1,4 \cdot 2 \cdot 0,17 / 0,4 = 1,2 \text{ m}^2$$

Een iets nauwkeuriger benadering is mogelijk met:

$$A_{o,\text{tot}} = y \cdot \Phi_k / (130 \cdot \Delta\theta^{1,5} \cdot h^{0,5}) = 2,4 \cdot 605 / (130 \cdot 3^{1,5} \cdot 2,7^{0,5}) = 1,3 \text{ m}^2$$

Invloed glaspercentage en type zonwering op koelbehoefte

Bij andere glaspercentages en binnenzonwering vinden we koelbehoefte en ventilatievouden zoals in het volgende overzicht. Hieruit blijkt dat hoge glaspercentages in combinatie met binnenzonwering dramatische gevolgen heeft voor de koelbehoefte en daarmee voor de systeemkeuze, zeker als je bedenkt dat een ventilatievoud van meer dan 10 tot tochtklachten kan leiden.

glaspercentage --->	<i>buitenzonwering</i>			<i>binnenzonwering</i>		
	ZTA = 0,15			ZTA = 0,5		
	30	60	90	30	60	90
$\Phi_{z,gl}$	148	296	444	899	1798	2697 W
$\Phi_{tr,gl}$	26	52	78	26	52	78
$\Phi_{z,w}$ (borstw)	11	7	2	11	7	2
$\Phi_{z,w}$ (dak)	-53	-53	-53	-53	-53	-53
Φ_{inf}	16	16	16	16	16	16
Φ_p	160	160	160	160	160	160
Φ_l	97	97	97	97	97	97
Φ_a	200	200	200	200	200	200

Φ_k	605	775	944	1356	2255	3197 W
$\Phi_{k,sp}$	31	40	49	70	116	164 W/m ²

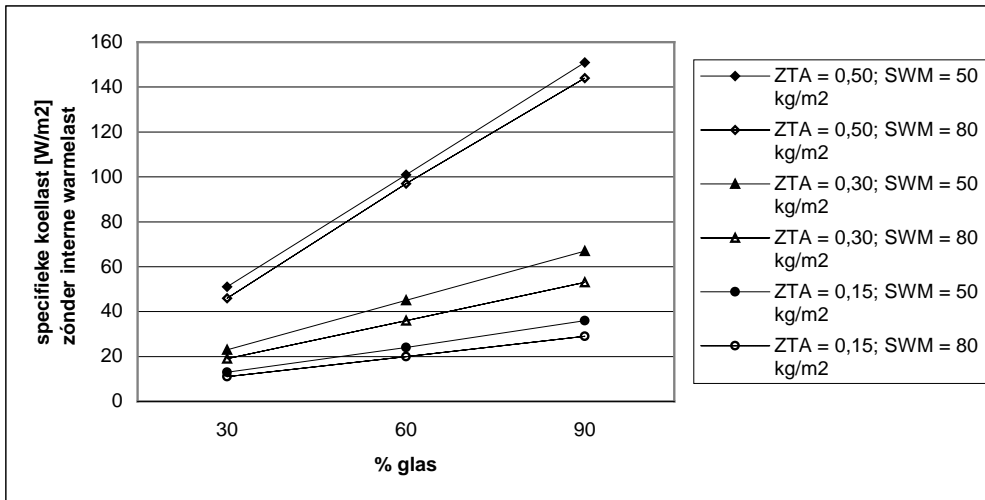
$n_{koeling}$ ($\Delta\theta=8\text{ }^\circ\text{C}$)	4,3	5,5	6,7	9,7	16,1	22,9 h ⁻¹
n_{nv} ($\Delta\theta=3\text{ }^\circ\text{C}$)	11,5	14,7	17,9	25,9	42,9	60,9 h ⁻¹

Invloed op systeemkeuze

Uit het voorgaande overzicht en de tabel blijkt dat een VAV-systeem een verantwoorde keuze is, mits buitenzonwering wordt toegepast en het glaspercentage niet meer is dan ca. 60%. Bij toepassing van 90% glas is een inductie- of een ventilatorconvactor-systeem nodig. Ook voldoet de combinatie VAV + koelplafond. Verder blijkt uit tabel 1 dat bij 30% glas met binnenzonwering ten minste een inductie- of een ventilatorconvactor-systeem nodig is. Bij meer dan 30% glas en binnenzonwering is er geen systeem dat voor een comfortabel binnenklimaat kan zorgen.

Invloed glaspercentage, type zonwering, interne belasting en specifiek werkzame massa

De interne warmtebelasting is in dit voorbeeld totaal 23,5 W/m². Voor een kantoorgebouw dat de opdrachtgever zelf gaat gebruiken, kan dit een reële waarde zijn. Bij een kantoorgebouw voor "de markt" met onbekende bezetting of bedoeld voor flexibel gebruik wordt meestal met een interne belasting van 40 W/m² gerekend. Voor het kantoorvertrek uit het voorbeeld zijn meer berekeningen gemaakt met verschillende interne belastingen, glaspercentages, typen zonwering en specifiek werkende massa's. De resultaten - uitgedrukt in specifieke koelbehoefte - staan in de volgende tabel en zijn in figuur 2 grafisch weergegeven.

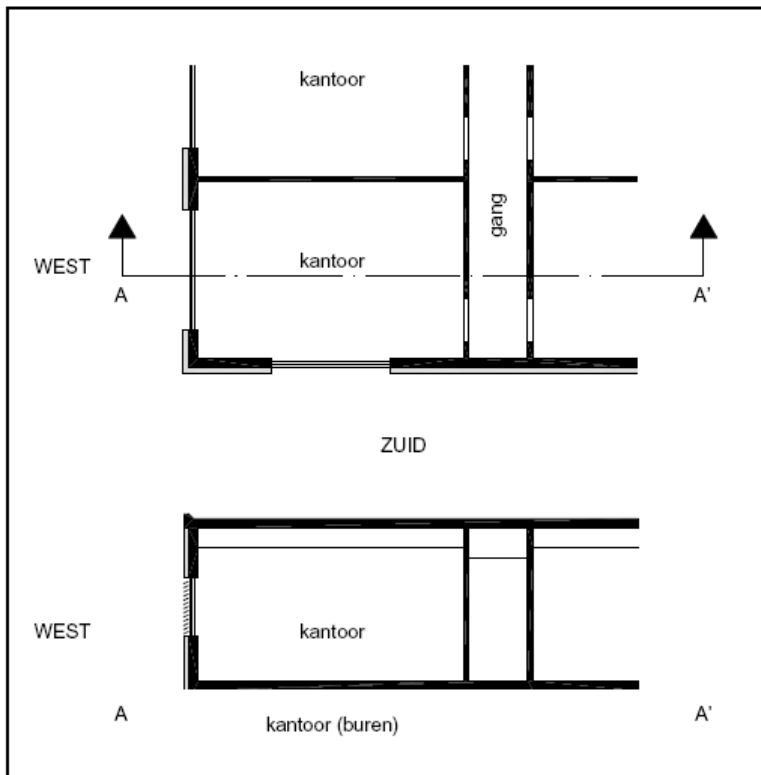


figuur 2 invloed zonwering, glaspercentage en gebouwmassa op koellast

interne belasting W/m ²	SWM kg/m ²	glas% -->	buitenzonwering ZTA = 0,15			zonwerend glas ZTA = 0,3			binnenzonwering ZTA = 0,5		
			30	60	90	30	60	90	30	60	90
0	50		13	24	36	23	45	67	51	101	151 W/m ²
	80		11	20	29	19	36	53	46	97	144
20	50		33	44	56	43	65	87	71	121	171
	80		31	40	49	39	56	73	66	117	164
35	50		48	57	71	58	80	102	86	136	186
	80		46	55	64	54	71	88	81	132	179
50	50		63	74	86	73	95	117	101	151	201
	80		61	70	79	69	86	103	96	147	194

2.3 Voorbeeld 2: koelbehoefte hoekvertrek

Voor dit voorbeeld wordt het kantoorvertrek uit voorbeeld 1 genomen, met als verschil dat de zuidzijde een gevel is met een raam dat net zo groot is als het raam in de westgevel, zie figuur 3.



figuur 3 voorbeeld 2, hoekvertrek

Als berekeningstijdstip wordt daarom 16 uur zonnentijd genomen. De belasting via de zuidgevel is op dat moment

$$\Phi_{z,gl} = z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} \cdot f_d = 1 \cdot 2,9 \cdot 0,15 \cdot 310 \cdot 0,8 = 108 \text{ W}$$

$$\Phi_{tr,gl} = U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) = 3,0 \cdot 2,9 \cdot (28 - 25) = 26$$

$$\Phi_{z,w} = a \cdot A_{wi} \cdot q_w = 0,7 \cdot (2,7 \cdot 5,4 - 2,9) \cdot 1,6 = \underline{13} = 145 \text{ W}$$

De totale koelbehoefte van de ruimte wordt daardoor:

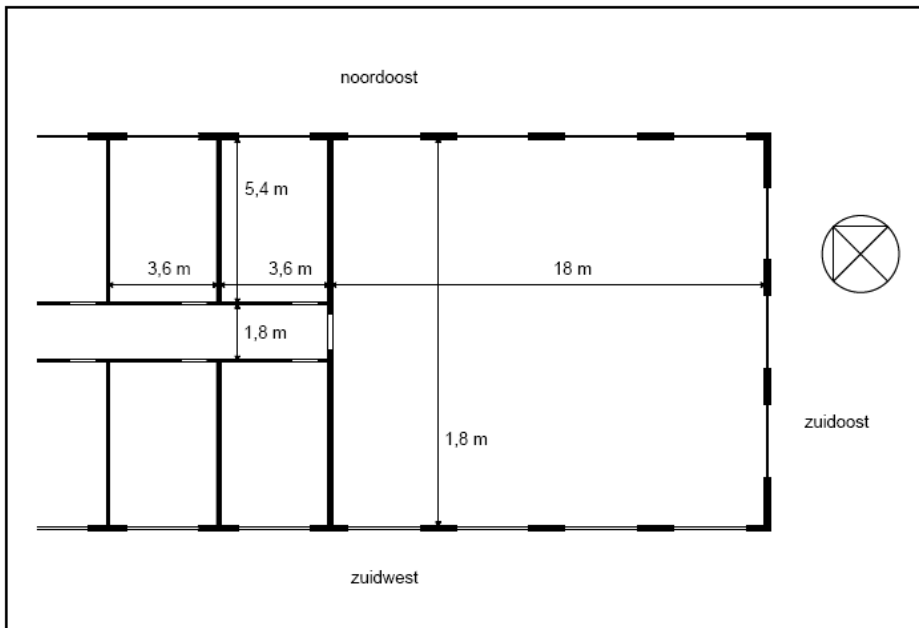
$$\Phi_k = 605 + 145 = \mathbf{750 \text{ W}}$$

En de specifieke koelbehoefte:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 750 / (3,6 \times 5,4) = \mathbf{39 \text{ W/m}^2}$$

2.4 Voorbeeld 3, Koelbehoefte kantoortuin met ramen op 3 oriëntaties

Dit voorbeeld betreft een ruimte op de bovenste laag van een kantoorgebouw, zie figuur 4.



figuur 4 voorbeeld 3, kantoorruimte

De ruimte heeft, mede door de vele ramen, een geringe Specifiek Werkende Massa (SWM=50 kg/m²). Het gesloten gedeelte van de buitenmuur heeft een massa van 200 kg/m². Het dak is van beton met daaronder een verlaagd plafond. De geveloriëntaties zijn NO, ZO en ZW. Aan de NW-zijde grenst de kantoorruimte aan een verkeersruimte. Verdere gegevens zijn:

netto hoogte	2,7 m
lengte NO-gevel	18,0 m
„ ZO-gevel	12,6 m
„ ZW-gevel	18,0 m
glasoppervlakte NO	9,0 m ²
„ ZO	12,0 m ²
„ ZW	18,0 m ²
beglazing	speciaal zonwerend glas ZTA=0,37 U=1,8 W/(m ² K)
bezetting	18 personen
verlichting	“TL”-verlichting (luchtafvoer via armaturen)
apparatuur	18 PC's en 3 printers
ontwerp-binnentemperatuur	25 °C
ontwerp-buitentemperatuur	28 °C
infiltratie	0,3-voud

Omdat er ramen op verschillende oriëntaties zitten moet de koelbehoefte voor meerdere tijdstippen worden berekend. De "constante" delen van de koelbehoefte zijn bij elkaar genomen:

$$\begin{aligned} \Phi_{tr,gl,gevel} &= U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) = 1,8 \cdot (9+12+18) \cdot (28-25) &= 211 \\ \Phi_{z,w,gevel\ NO} &= a \cdot A_{wi} \cdot q_w &= 0,7 \cdot (18,0 \cdot 2,7 - 9) \cdot (-1,1) = \\ & & -30 \\ \Phi_{z,w,gevel\ ZO} &= & 0,7 \cdot (12,6 \cdot 2,7 - 12) \cdot 1,6 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{z,w, \text{gevel ZW}} &= 0,7 \cdot (18,0 \cdot 2,7 - 18) \cdot 6,8 = 146 \\
 \Phi_{z,w, \text{dak}} &= 0,7 \cdot 18,0 \cdot 12,6 \cdot (-3,9) = -619 \\
 \Phi_{\text{inf}} &= 0,3 \cdot 18 \cdot 12,6 \cdot 2,7 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (28-25) / 3600 = 184 \\
 \Phi_p &= 18 \cdot 80 = 1440 \\
 \Phi_l &= 5 \cdot 18 \cdot 12,6 = 1134 \\
 \Phi_a &= (18 \cdot 100 + 3 \cdot 100) = 2100 \\
 \Phi_{k, \text{vast}} &= 4591 \text{ W}
 \end{aligned}$$

De variabele delen van de koelbehoefte zijn:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{z,gl, \text{NO}} &= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{\text{conv}} \cdot f_d = 1 \cdot 9 \cdot 0,37 \cdot 330 \cdot f_d = 1099 \cdot f_d \\
 \Phi_{z,gl, \text{ZO}} &= 1 \cdot 12 \cdot 0,37 \cdot 450 \cdot f_d = 1998 \cdot f_d \\
 \Phi_{z,gl, \text{ZW}} &= 1 \cdot 18 \cdot 0,37 \cdot 450 \cdot f_d = 2997 \cdot f_d
 \end{aligned}$$

Met de f_d -waarden uit de tabel leidt dit voor verschillende tijdstippen tot het volgende overzicht:

		8 uur	9 uur	10 uur	13 uur	16 uur
$\Phi_{z,gl, \text{NO}}$	$= 1099 \cdot f_d =$	1099	989	879	659	549
$\Phi_{z,gl, \text{ZO}}$	$= 1998 \cdot f_d =$	1399	1798	1998	1598	1199
$\Phi_{z,gl, \text{ZW}}$	$= 2997 \cdot f_d =$	899	899	1199	2098	2997

$\Phi_{k, \text{variabel}}$		3397	3686	4076	4355	4745
$\Phi_{k, \text{constant}}$			4591	4591	4591	4591

$\Phi_{k, \text{totaal}}$		7988	8277	8667	8946	9336 W

De maximale koelbehoefte is 9336 W. De maximale specifieke koelbehoefte wordt daardoor:
 $\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 9336 / (18 \times 12,6) = 41 \text{ W/m}^2$

2.5 Systeemkeuze

Uit tabel 1 blijkt dat een VAV-systeem een geschikte keuze is en dat voor een ruimtehoogte van 2,7 m een ventilatievoud van bijna 6 nodig is. Deze uitkomst is als volgt te verifiëren. Bij koeling met lucht van 17 °C ($\Delta\theta = 8 \text{ °C}$, zie tabel 2) moet met dit systeem een hoeveelheid lucht worden toegevoerd van:

$$q_v = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 9336 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 8) = 0,97 \text{ m}^3/\text{s} = 3500 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dit komt neer op een ventilatievoud van:

$$n = q_v / V = 3500 / (18 \times 12,6 \times 2,7) = 5,7 \text{ h}^{-1}$$

De praktijk laat zien dat bij luchtkoeling het ventilatievoud meer dan 2 moet zijn om een slechte luchtverdeling en grote temperatuurverschillen in de "leefzone" te voorkomen. Meer dan 10-voud geeft kans op tocht. De berekende 5,7-voud voldoet dus.