

Globale Koelbehoefteberekening

Kennisbank Bouwfysica

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

1 Berekeningsmethoden

De warmte- en koelbehoefte van ruimten kan met “dynamische” of “stationaire” methoden worden berekend.

Bij dynamische methoden wordt met behulp van wiskundige beschrijvingen van de eigenschappen van een ruimte - een fysisch model - nagegaan hoe die ruimte reageert op in de tijd variërende omstandigheden.

Bij stationaire berekeningen wordt verondersteld dat de omstandigheden constant zijn. De dynamische effecten worden in rekening gebracht door tabellen te gebruiken waarin die effecten zijn verwerkt. Tot nu toe zijn alleen stationaire methoden in NEN-normen vastgelegd.

Bij het architectonische ontwerpproces gaat het bij de klimaatregeling vooral om inzicht in de orde van grootte. Belangrijke vragen zijn:

“Welke afmetingen krijgen de installaties?” en “Hoeveel ruimte is nodig voor inbouw van centrale installaties, distributie-installaties en eindapparaten?”

De benodigde inbouwruimte wordt primair bepaald door het toe te passen klimaatregelsysteem en dat systeem is weer afhankelijk van het verwarmings- en koelvermogen dat nodig is om de ruimten in het gebouw op de gewenste temperatuur te kunnen houden.

De gebouwentwerper beperkt zich met de systeemkeuze meestal tot het detailniveau van een Voorlopig Ontwerp, waarbij globale berekeningen volstaan.

De in NEN-normen beschreven stationaire methoden, zoals die door installatieontwerpers worden toegepast, zijn daarvoor te gedetailleerd. Wel vormden ze de basis voor de ontwikkeling van meer op het architectonische ontwerpdoel afgestemde globale berekeningen.

Met dynamische berekeningen kan de invloed van het warmteaccumulerend vermogen van ruimten beter worden nagegaan dan met stationaire methoden. Dat geldt ook voor de invloed van de sterk wisselende meteorologische omstandigheden, omdat bij dynamische berekeningen gebruik wordt gemaakt van reële waarden voor zonnestraling, wind en temperatuur. Omdat diverse differentiaalvergelijkingen tegelijkertijd moeten worden opgelost - wat slechts numeriek kan - is voor dynamische berekeningen een computer nodig. Een goed voorbeeld van een voor dit doel bruikbaar computerprogramma is VA114 van de Vereniging tot Automatisch Berekenen van Installaties in gebouwen (VABI).

Bij het door TNO ontwikkelde VA114-programma moeten de geometrische en fysische eigenschappen van de ruimte, het verwarmings- en koelvermogen van de installatie, de gebruikstijden van de ruimte en de interne belasting door personen, verlichting en apparatuur als gegeven worden ingevoerd. Het programma berekent voor elk uur van een op te geven meteorologisch jaar de binnentemperatuur en het energiegebruik. Een overzicht wordt gegeven van het aantal uren dat de binnentemperatuur in dat jaar een op te geven waarde over- of onderschrijft. Een berekening met het programma wordt om die reden ook wel “temperatuuroverschrijdingsberekening” of kortweg TO-berekening genoemd.

Door "trial and error" kan met het programma een koelvermogen worden gevonden waarvoor geldt dat in jaar x een binnentemperatuur y niet meer dan z uren wordt overschreden.

In de beginperiode, toen deze methode in Nederland populair werd, nam men twee temperatuurgrenzen y_1 en y_2 die respectievelijk niet meer dan z_1 en z_2 uur mochten worden overschreden.

Later werd voorgesteld om één temperatuurgrens y te nemen en elk uur dat de berekende temperatuur deze grens overschrijdt te vermenigvuldigen met een waarde die afhankelijk is van de mate waarin y wordt overschreden. Dit werd de "Gewogen Temperatuur Overschrijding" of GTO-berekening genoemd. Recent is bedacht dat de waarde y afhankelijk is te stellen van de effectieve temperatuur van de buitenlucht in de periode voorafgaand aan het te berekenen tijdstip en van de aanwezigheid van te openen ramen. Dit is de ATG of "Adaptieve Temperatuur Grenswaarde". Koelvermogens die met TO-, GTO- en ATG-berekeningen zijn bepaald wijken onderling af van de vermogens die uit stationaire berekeningen volgen. De verschillen zijn te verklaren uit het gebruik van verschillende overschrijdingscriteria en verschillende meteorologische gegevens.

Een veel gestelde ontwerp vraag is: "Welke vorm, thermische eigenschappen en gebruik moet een gebouw krijgen om met natuurlijke koeling te kunnen volstaan?"

Beantwoording van deze vraag is met TO-berekeningen en varianten daarop mogelijk. Ook is met deze berekeningen na te gaan welk effect vorm, thermische eigenschappen en gebruik hebben op de energieconsumptie van het gebouw.

Evident is dat natuurlijke koeling eerder mogelijk is en het energiegebruik beperkter wordt naarmate een milder meteorologisch jaar en hogere waarden voor y en z worden genomen. Helaas bestaat er anno 2007 nog geen consensus over deze waarden en het te gebruiken meteorologisch jaar om te kunnen spreken van een gebouw met een "redelijk comfort". Sommige ontwerpers koppelen - voor het voldoen aan een bepaalde gebouwprestatie - hoge y - en z -waarden aan het meteorologisch gemiddelde jaar 1964-1965. Voorspelbaar is dat gebouwen die niet meer dan deze prestatie kunnen leveren tijdens warmere jaren, zoals tijdens de zomers van 1994 of 1995, een groot deel van de tijd onbehaaglijk warm en door velen onaanvaardbaar gevonden zullen worden. Een bijkomend nadeel is dat niet kan worden gecontroleerd of een gebouw de berekende prestatie ook werkelijk levert. Zo is het bijna ondoenlijk om een jaar lang te meten en vervolgens onmogelijk om uit de meetgegevens af te leiden of in jaar x aan de criteria y en z wordt voldaan omdat ieder jaar, meteorologisch gezien, uniek is. De jaren verschillen niet alleen in het aantal uren dat luchttemperatuur, zonnestraling, windsnelheid en luchtvochtigheid bepaalde waarden hebben, ook het verloop van die waarden verschilt terwijl juist dat verloop een grote invloed heeft. Zo laat een periode van 4 dagen met een bepaalde hoge buitentemperatuur meer uren overschrijding en een hogere maximale binnentemperatuur zien dan twee perioden van 2 dagen met dezelfde buitentemperatuur.

Dynamische berekeningen zijn vooral geschikt om na te gaan welke invloed bouwkundige en installatietechnische ontwerpkeuzes hebben op het binnenklimaat en het energiegebruik. NEN 5067 biedt die mogelijkheden niet. Wel kan met deze norm op gestandaardiseerde wijze de koelbehoefte worden berekend die ontstaat na 5 warme dagen met 75% van de maximaal mogelijke intensiteit van de zonnestraling. Tijdens de ontwikkeling van de norm was er consensus over het redelijk comfortabele binnenklimaat dat ontstaat als een klimaatinstallatie aan deze prestatie beantwoordt. Betrekkelijk eenvoudig is te controleren of deze prestatie ook

werkelijk wordt geleverd, namelijk door na te gaan of de vertrektemperatuur na 5 warme dagen aan de gestelde temperatuur-eis voldoet.

Het maken van dynamische berekeningen met programma's zoals VA-114 vraagt de kennis van een ervaren installatieontwerper en de routine van een regelmatige gebruiker van het programma. Daarom is dit programma niet direct geschikt voor gebruik door architecten en andere bouwkundige ontwerpers. Onderzocht is hoe VA114 inzetbaar is te maken zodat architecten hun ontwerp zelf *globaal* kunnen optimaliseren wat betreft comfort en energiegebruik. Voor dat doel worden interfaces ontwikkeld waarmee de voor het architectonisch ontwerp relevante parameters kunnen worden beïnvloed; het programma Orca is een voorbeeld van een dergelijke interface.

2 Koelbehoefte (koellast)

2.1 NEN 5067 en ISSO-8

Voor berekening van de koelbehoefte van ruimten - door installatieontwerpers meestal aangeduid met "koellast" - zijn verschillende methoden met verschillende nauwkeurigheden beschikbaar. De Nederlandse norm op dit gebied is NEN 5067 [1]. Deze berekening werd door installatieontwerpers evenwel te ingewikkeld gevonden waarna een vereenvoudigde versie verscheen ISSO-8 [2]. Ook deze is voor het beginstadium van het ontwerpproces nog te gedetailleerd en is daarom verder vereenvoudigd in de hier gepresenteerde berekening.

3 Globale koelbehoefteberekening

3.1 Algemeen

Hoe een globale koelbehoefte berekening kan worden opgezet wordt stapsgewijs toegelicht. In de bijlagen zijn de vergelijkingen met de daarbij gebruikte tabellen samengevat (Bijlage 4.1) en is ook een handzaam invulformulier aanwezig (Bijlage 4.2).

De "globale koelbehoefte" wordt hier gedefinieerd als de koelbehoefte van een ruimte berekend op het tijdstip met de hoogste warmtebelasting. Dit tijdstip verschilt per oriëntatie, zie tabel 1.

Tabel 1 convectieve warmte t.g.v. zonnestraling (q_{conv})

oriëntatie	tijdstip ¹⁾ maximum	zonwering	"lichte" bouw	"zware" bouw
			SWM=50 kg/m ² W/m ²	SWM=80 kg/m ² W/m ²
Noord	13	binnen	140	130
		buiten/geen	110	100
N-O	8	binnen	490	460
		buiten/geen	330	240
Oost	9	binnen	680	650
		buiten/geen	470	350
Z-O	10	binnen	650	610
		buiten/geen	450	340
Zuid	13	binnen	560	530
		buiten/geen	400	310
Z-W	16	binnen	650	620
		buiten/geen	460	360
West	16 ²⁾	binnen	650	620
		buiten/geen	440	340
N-W	16 ²⁾	binnen	350	340
		buiten/geen	240	200
Horizontaal	13	binnen	800	760
		buiten/geen	590	480

¹⁾ zonnetijd

²⁾ werkelijke tijdstip is later en heeft geen betekenis omdat dit buiten de dagelijkse gebruikperiode van de ruimte valt

Met behulp van tabel 2 kan worden nagegaan wat de convectieve warmte t.g.v. zonnestraling op andere tijdstippen dan tijdens het maximum is:

tabel 2 convectieve warmte (q_{conv}) op verschillende tijdstippen, als deel van het maximum (f_d)

oriëntatie	tijdstip (zonnetijd)				
	8	9	10	13	16
Noord	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9
N-O	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5
Oost	0,9	1,0	0,9	0,6	0,5
Z-O	0,7	0,9	1,0	0,8	0,6
Zuid	0,3	0,5	0,7	1,0	0,8
Z-W	0,3	0,3	0,4	0,7	1,0
West	0,3	0,3	0,4	0,5	1,0
N-W	0,4	0,4	0,5	0,6	1,0
Hor.	0,5	0,6	0,8	1,0	0,9

3.2 Koelbehoefte totaal

De koelbehoefte (Φ_k) wordt volgens ISSO-8 bepaald door:

$$\Phi_k = \Phi_i + \Phi_e \quad (W) \quad (1)$$

waarin:

Φ_i = interne warmtebelasting in W

Φ_e = externe warmtebelasting in W

3.3 Interne warmtebelasting

De interne warmtebelasting is:

$$\Phi_i = \Phi_p + \Phi_l + \Phi_a \quad (W) \quad (2)$$

waarin:

Φ_p = warmtebelasting door personen in W

Φ_l = warmtebelasting door verlichting in W

Φ_a = warmtebelasting door apparatuur in W

De warmtebelasting door personen bedraagt:

$$\Phi_p = p \cdot q_p \quad (W) \quad (3)$$

waarin:

p = aantal personen in de ruimte

q_p = warmteafgifte per persoon in W, zie tabel 3

tabel 3 warmteafgifte van personen

activiteit	W/persoon *)
rustig zitten	80
zittend kantoorwerk	100
staand kantoorwerk	110
laboratoriumwerk	110
zittend licht montagewerk	115
staand licht montagewerk	150
kuieren (0,5 m/s)	110
wandelen (0,8 m/s)	120
lopen (1,2 m/s)	150
gymnastiek	160
tennis	240
squash/basketbal	300

*) geldend voor lichte kleding (0,6 clo)

De warmtebelasting door verlichting is volgens ISSO-8:

$$\Phi_l = l_1 \cdot l_2 \cdot N_l \quad (\text{W}) \quad (4)$$

waarin:

l_1 = reductiefactor in verband met afzuiging via armaturen

l_2 = vereffeningsfactor in verband met de accumulatie van verlichtingswarmte

N_l = geïnstalleerd verlichtingsvermogen inclusief voorschakelapparatuur in W

Deze warmtebelasting is, uitgaande van gemiddelde waarden voor l_1 en l_2 , te vereenvoudigen tot:

$$\Phi_l = q_l \cdot A_{vl} \quad (\text{W}) \quad (5)$$

waarin:

q_l = convectieve warmteafgifte verlichting per m² vloeroppervlakte, zie tabel 4

A_{vl} = vloeroppervlakte van de ruimte in m²

tabel 4 convectieve warmteafgifte van verlichting

soort verlichting	W/m ² vloeroppervlakte
werkplekverlichting (TL/PL)	2,5
algemene verlichting 400 à 500 lux	
luchtafvoer via armaturen	5
armaturen zonder luchtafvoer	10
halogeenspots 200 lux	20

De warmtebelasting door apparatuur is volgens ISSO-8:

$$\Phi_a = N \cdot a_1 \cdot a_2 \quad (\text{W}) \quad (6)$$

waarin:

N = nominaal aansluitvermogen in W

a₁ = benuttingsgraad

a₂ = gelijktijdigheidsfactor

Worden voor a₁ en a₂ gemiddelde waarden ingevuld en wordt het aansluitvermogen betrokken op de vloeroppervlakte van de ruimte dan ontstaat de vereenvoudigde vergelijking:

$$\Phi_a = q_a \cdot A_{vl} \quad (\text{W}) \quad (7)$$

waarin:

q_a = convectieve warmteafgifte apparatuur in W/m² vloeroppervlakte, zie tabel 5

A_{vl} = vloeroppervlakte van de ruimte in m²

tabel 5 convectieve warmte-afgifte van kantoorapparatuur

apparatuur	W	W/m ² vloeroppervlakte
1 PC/persoon	100	10
1 printer/persoon	100	10
meer apparatuur/persoon	200 - 300	20 - 30

Vaak kan in het beginstadium van het ontwerp nog geen interne warmtebelasting worden aangegeven omdat personele bezetting, type verlichting en gebruikte apparatuur nog niet bekend zijn of omdat de opdrachtgever een flexibel gebouw wil. Voor kantoorgebouwen zijn dan de volgende belastingklassen te gebruiken:

"laag" : 20 W/m² vloeroppervlakte

"gemiddeld" : 35 W/m² „

"hoog" : 50 W/m² „

"markt" (verhuur) : 40 W/m² „

3.4 Externe warmtebelasting

De externe warmtebelasting (Φ_e) wordt bepaald door:

$$\Phi_e = \Phi_{z,gl} + \Phi_{tr,gl} + \Phi_{z,w} + \Phi_{inf} \quad (W) \quad (8)$$

waarin:

$\Phi_{z,gl}$ = warmtebelasting door zoninstraling via de beglazing van gevel en dak

$\Phi_{tr,gl}$ = warmtebelasting door transmissie via het glas

$\Phi_{z,w}$ = warmtebelasting door zonbelasting van gesloten buitenwanden en het dak

Φ_{inf} = warmtebelasting door infiltratie

De warmtebelasting door zoninstraling via de beglazing is volgens ISSO-8:

$$\Phi_{z,gl} = z \cdot A_{gl} \cdot ZTA [q_{z,gl}(0) + \{q_{z,gl}(100) - q_{z,gl}(0)\} \cdot SWM / 100] \quad (W) \quad (9)$$

waarin:

z = zonweringsfactor luifel

A_{gl} = glasoppervlakte in m^2

ZTA = zontoetredingsfactor zonwering/beglazing

$q_{z,gl}(100)$ = koellast door zonbelasting via ramen bij $ZTA = 1$ en $SWM = 100 \text{ kg/m}^2$

$q_{z,gl}(0)$ = koellast door zonbelasting via ramen bij $ZTA = 1$ en $SWM = 0 \text{ kg/m}^2$

Wordt $[q_{z,gl}(0) + \{q_{z,gl}(100) - q_{z,gl}(0)\} \cdot SWM / 100]$ vervangen door q_{conv} , dan ontstaat:

$$\Phi_{z,gl} = z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} \quad (W) \quad (10)$$

waarin:

z = zonweringsfactor luifel, zie tabel 6

A_{gl} = glasoppervlakte in m^2

ZTA = zontoetredingsfactor beglazing/zonwering, zie tabel 7

q_{conv} = convectieve warmte door zonnestraling via glas in W/m^2 , zie tabel 1

NB. De "convectieve warmte door zonnestraling" (q_{conv}) is de zonnewarmte die via ramen in de ruimte komt en - na door de zon te zijn beschenen - door binnenzonwering, vloeren, wanden en meubilair convectief wordt afgegeven. De warmteafgifte is positief zolang wanden en vloeren warmer zijn dan de lucht in de ruimte. Afkoeling duurt vele uren en soms dagen. Daardoor verandert q_{conv} en is deze maximaal op het in tabel 1 aangegeven tijdstip. Het verloop gedurende dag is uit tabel 2 af te leiden.

tabel 6 zonweringsfactor (Z) van luifels ¹⁾

b =====	 ---	oriëntatie a/b ---->	-----								
			0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	
		-									
	a	Zuid	0,05	0,10	0,22	0,35	0,40	0,65	0,75	0,82	
	---	Z-O en Z-W ²⁾	0,17	0,28	0,45	0,60	0,70	0,85	0,90	0,92	

- 1) Tabelwaarden gelden voor een luifel direct boven het raam. Zit de luifel hoger dan moet de verhouding a/b worden gecorrigeerd.
- 2) Bij noordelijker oriëntaties hebben luifels weinig of geen effect omdat de zon op die oriëntaties onder de luifel doorschijnt (Z = 1).

tabel 7 eigenschappen van zonwering en beglazing

beglazing	zonwering	LTA	ZTA	U W/(m ² .K)
		-	-	
enkel glas	blank	0,9	0,85	6,0
	binnen zonwering		0,55	5,5
	buitenzonwering		0,17	5,0
dubbel glas	blank	0,8	0,7	3,2
	binnen zonwering		0,5	3,0
	buitenzonwering		0,15	3,0
	tussen-zonwering			
	- gesloten spouw		0,3	3,0
	- klimaatraam/-gevel ¹⁾		0,2	1,2
	- tweede-huid façade ²⁾		0,2	2,2
isolatieglas	HR	0,81	0,73	1,8
	HR ⁺	0,80	0,70	1,5
	HR ⁺⁺	0,79	0,67	1,2
zonwerend glas	Cool Lite 172	0,66	0,38	1,3
	Cool Lite 165	0,60	0,30	1,2
	Stopray Safir	0,61	0,32	1,2
	Stopray Silver	0,43	0,25	1,3
	Stopray Emeraldalda	0,36	0,20	1,3
	Stopray Goud	0,20	0,13	1,5

1) spouwventilatie met binnenlucht

2) spouwventilatie met buitenlucht

De warmtebelasting door transmissie via het glas is:

$$\Phi_{tr,gl} = U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad (W) \quad (11)$$

waarin:

U = warmtedoorgangscoefficiënt in W/(m².K)

A_{gl} = glasoppervlakte in m²

θ_e = ontwerp-buitemtemperatuur in °C (meestal 28 °C).

θ_i = ontwerp-binnentemperatuur in °C

Een deel van de op buitenwanden en daken vallende zonnestraling wordt geabsorbeerd. Een deel van die warmte wordt direct aan de buitenlucht afgestaan, het andere deel stroomt door geleiding via de constructie naar binnen. Deze warmtestroom varieert en kan zelfs negatief zijn. Bij de globale koelbehoefteberekening wordt de warmtestroom berekend voor het moment waarop de externe warmtebelasting het grootst is. De warmtebelasting door transmissie laat zich dan als volgt bepalen:

$$\Phi_{z,w} = a \cdot A_{wi} \cdot q_w \quad (W) \quad (12)$$

waarin:

a = absorptiecoëfficiënt voor zonnestraling

A_{wi} = inwendige oppervlakte van de buitenwand (of het dak) in m²

q_w = warmtestroom via wanden en daken in W/m², zie tabel 8

De absorptiecoëfficiënt a van gepolijste metalen is minimaal 0,05 en van verweerd beton maximaal 0,95. De geabsorbeerde zonnewarmte die door geleiding via wanden en daken tot de ruimte doordringt is ten opzichte van de andere belastingen gering, zodat geen grote fout gemaakt als met een gemiddelde coëfficiënt van 0,7 wordt gerekend. $\Phi_{z,w}$ wordt - om dezelfde reden - ook wel verwaarloosd.

tabel 8 warmtestroom door zonbelasting van wanden en daken (q_w *)

oriëntatie	massa wand of dak		
	<120 kg/m ²	220 kg/m ²	>300 kg/m ²
Noord	1,5	-0,9	-0,8
N-O	1,7	-1,1	0,1
Oost	7,0	1,1	1,3
Z-O	8,2	1,6	1,6
Zuid	11,2	4,0	1,6
Z-W	14,4	6,8	2,4
West	11,3	4,9	1,9
N-W	6,2	2,4	0,5

Horizontaal	met verlaagd plafond	
	met verlaagd plafond	zonder verlaagd plafond
staalplaat	5,9	16,4
beton	-3,9	-0,5
licht beton	-5,0	-1,6
isolerend		
dakbeschot	-3,4	-2,2
licht isolerende		
dakplaat	-3,6	-0,4

De warmtebelasting door infiltratie is:

$$\Phi_{\text{inf}} = q_{\text{inf}} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad (\text{W}) \quad (13)$$

waarin:

- q_{inf} = volumestroom buitenlucht door infiltratie in m^3/s
- ρ = dichtheid van lucht $\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$
- c = soortelijke warmte van lucht $\approx 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- θ_e = ontwerp-buitemtemperatuur in $^{\circ}\text{C}$
- θ_i = ontwerp-binnentemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

Bij een globale koelbehoefteberekening kan worden uitgegaan van 0,2 à 0,3-voudige infiltratie, zodat:

$$q_{\text{inf}} = 0,2 \text{ à } 0,3 \cdot V / 3600 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (14)$$

waarin:

- V = volume van de ruimte in m^3

4 Invloed warmteaccumulatie en vrije koeling

4.1 Invloed gebouwmassa

Bij de koelbehoefteberekening wordt aangenomen dat een deel van de via de ramen toetredende zonnearmte en een deel van de door lampen en apparatuur afgegeven warmte door straling aan de bouwmassa wordt afgegeven en dat de rest convectief door de ruimtelucht wordt opgenomen. Verder wordt aangenomen dat de warmte van personen geheel door de ruimtelucht wordt opgenomen. Bij ruimten met een beperkte bezetting is deze benadering bruikbaar. Wordt de koelbehoefte grotendeels door de warmteafgifte van personen bepaald, zoals bij theaters, dan kan deze benadering tot niet realistische hoge waarden leiden omdat de warmte van personen voor een deel direct (via straling) en indirect (via convectie) door wanden, vloeren en plafond wordt opgenomen. Overdimensionering van de koelinstallatie kan worden voorkomen door de warmtestroom door accumulatie als negatieve warmtebelasting in rekening te brengen.

$$\Phi_{\text{acc}} = \alpha \cdot A_w (\theta_{\text{opp}} - \theta_i) \quad (\text{W}) \quad (15)$$

waarin:

- α = warmteoverdrachtscoëfficiënt $\approx 5,5 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
- A_w = gezamenlijke oppervlakte accumulerende delen van vloer, wanden en plafond in m^2
- θ_{opp} = gemiddelde oppervlaktemperatuur van vloer, wanden en plafond in $^{\circ}\text{C}$
- θ_i = temperatuur van de ruimte in $^{\circ}\text{C}$

De totale hoeveelheid warmte die tijdens het ruimtegebruik wordt geaccumuleerd is afhankelijk van de warmtecapaciteit van de bouwmassa. De maximaal mogelijke warmteaccumulatie is:

$$\Phi_{\text{acc, max}} = \text{SWM} \cdot A_w \cdot c (\theta_1 - \theta_2) / dt \quad (\text{W}) \quad (16)$$

waarin:

SWM	= specifiek werkzame massa in kg/m ²
A _w	= gezamenlijke binnenoppervlakte van vloer, wanden en plafond in m ²
c	= soortelijke warmte van de massa (ca. 840 J/(kg.K) voor steenachtige materialen)
θ ₁	= gemiddelde temperatuur van de massa bij aanvang gebruik in °C
θ ₂	= gemiddelde temperatuur van de massa bij einde gebruik in °C
dt	= gebruiksduur in s

Wordt aangenomen dat de temperatuur van de wanden homogeen is en dat de aanvangtemperatuur (θ₁) en eindtemperatuur (θ₂) respectievelijk 22 en 24 °C is, dan is de gemiddelde temperatuur 23 °C. Bij deze aanname - die dient om de orde van grootte van de accumulatie te bepalen - kan verder worden uitgegaan van een gemiddelde ruimtetemperatuur (θ_i) van 24 °C en een gemiddeld temperatuurverschil (θ_{opp} - θ_i) over de gebruikstijd van ongeveer -1 °C.

4.2 Vrije koeling

Indien de gebouwmassa voor toegevoerde lucht bereikbaar is en daarnaast voldoende accumulerend vermogen beschikbaar is, kan via te openen ramen of via het ventilatiesysteem de gebouwmassa worden afgekoeld, zonder dat een koelmachine hoeft te worden ingezet. Dit is het geval indien de temperatuur van de buitenlucht lager is dan die van de binnenlucht, zoals in de nacht. Ook is het een optie om de gebouwmassa buiten gebruikstijd met water te koelen. Hiermee kan 10 – 35 W/m² worden gekoeld, met weinig of een beperkt energiegebruik, zoals uitsluitend ventilator- of pompenergie. Bij koeling met buitenlucht is een ventilatievoud van 3 - 10 of meer nodig. Deze mogelijkheden worden in een aparte module besproken.

5 Vertrekken met ramen in meer dan één gevel

Bij hoekvertrekken kan, als de ramen in beide gevels ongeveer gelijk zijn, worden volstaan met een koelbehoefteberekening voor het tijdstip van het maximum van de oriëntatie met het hoogste maximum (zie tabel 1). Voor hoekvertrekken met verschillende ramen, vertrekken met ramen in meer dan twee gevels of ramen in gevel en dak, moeten meer tijdstippen worden berekend. De hoogste waarde is de koelbehoefte. Omdat de convectieve zonnearmte (q_{conv}) op verschillende tijdstippen verschillend is moet de waarde uit tabel 1 worden gecorrigeerd met een factor f_d (zie tabel 2).

Zie voor verdere toelichting de rekenvoorbeelden in de betreffende module.

6 Invloed van de schaduw

Balkons en overstekende gebouwdelen kunnen, voor zover ze boven ramen zitten, bij de globale koel-behoefteberekening als luifel worden beschouwd. De in NEN 5067 beschreven methode - waarbij schaduw door diepliggende ramen, uitstekende gebouwdelen en gebouwen in de omgeving in rekening wordt gebracht - is voor een globale berekening te omslachtig. Om te voorkomen dat de berekening tot een niet realistisch koelvermogen leidt, moet de convectieve zonnearmte (q_{conv}) worden gecorrigeerd. Voor ramen die de hele dag geen zon krijgen kan de waarde voor Noord worden genomen. Voor ramen met gedeeltelijke schaduw kan een waarde worden genomen tussen die van de betreffende oriëntatie en Noord. Het is een kwestie van schatten waarbij een bezonningsdiagram kan helpen.

7 Ventilatieopeningen bij natuurlijke koeling

Ruimten kunnen op natuurlijke wijze worden gekoeld door ze via raamopeningen te ventileren. Anders dan bij mechanische koeling is het niet mogelijk om een bepaalde temperatuur te handhaven. Wel kan op deze manier de toename van de vertrektemperatuur - ten opzichte van de buitentemperatuur - worden beperkt. Voor verblijfsruimten wordt vaak een toename van 3°C toegestaan en voor serres, passages en andere verkeersruimten 5 °C. Omdat koele buitenlucht in de ruimte naar beneden stroomt is de temperatuurtoename onderin de ruimte - waar zich de leefzone bevindt - minder hoog dan de genoemde waarden. De voor natuurlijke koeling benodigde luchthoeveelheid is:

$$q_v = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (17)$$

waarin:

Φ_k = koelbehoefte in W

ρ = dichtheid van lucht $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$

c = soortelijke warmte van lucht $\approx 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$\Delta\theta$ = maximale temperatuurverschil tussen binnen en buiten in °C

Voor het effectief ventileren van ruimten zijn toevoer- en afvoeropeningen nodig. Bij verticale openingen stroomt koele buitenlucht aan de onderzijde naar binnen en opgewarmde lucht aan de bovenzijde naar buiten. Voor het bepalen van de benodigde oppervlakte van de openingen is een indicatieve methode te gebruiken die is afgeleid uit metingen bij natuurlijk geventileerde industriële ruimten. Hier werden in de ventilatieopeningen luchtsnelheden gemeten tussen 0,5 - 1,5 m/s, de laagste waarden bij ruimten tot ca. 3,0 m en de hoogste waarden bij ruimten van 9 m en hoger. Op grond hiervan kan als benadering bij atria, serres en passages met een snelheid van 1,0 m/s gerekend. Bij ruimten van 3,0 m en lager is het beter om een snelheid van 0,5 m/s of 0,4 m/s te nemen. Heeft de ruimte aparte toevoer- en afvoeropeningen op verschillende hoogten dan moeten die openingen elk een oppervlakte hebben van:

$$A = q_v / v \quad (\text{m}^2) \quad (18)$$

De benodigde oppervlakte voor de toevoer- en afvoeropeningen samen wordt dan bij benadering:

$$A_{tot} = 2 \cdot q_v / v \quad (\text{m}^2) \quad (19)$$

Bij toevoer en afvoer via dezelfde opening moet de oppervlakte 1,2 tot 1,4 maal zo groot worden genomen.

Een betere benadering is mogelijk met het in [3] afgeleide model:

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

waarin:

$A_{o,tot}$ = netto gezamenlijke oppervlakte voor toevoer- en afvoeropeningen in m²

y = situeringsfactor ventilatieopening (dimensieloos)

2,9 bij één enkele opening in verticale wand

2,4 bij meer openingen in verticale buitenwand

2,2 bij één enkele opening in dakvlak

2,0 bij openingen op verschillende hoogte (en gelijke oppervlakte toevoer en afvoer)

Φ_k = koelbehoefte in W

$\Delta\theta$ = maximale verschil tussen binnen- en buitentemperatuur in °C

h = de hoogte van de ventilatieopening in m

Is de gezamenlijke netto oppervlakte van de ventilatieopeningen bekend, dan kan het maximale temperatuurverschil tussen binnen en buiten (temperatuuroename van de lucht) worden berekend:

$$\Delta\theta = \exp [2/3 \ln \{ \Phi_k \cdot y / (130 \cdot h^{0,5} \cdot A_{o,tot}) \}] \quad (^\circ C) \quad (21)$$

8 Overige aandachtspunten koelbehoefteberekening

Het resultaat van de berekening kan een goed beeld geven van de totale *voelbare* koelbehoefte van een gebouw.

Voor de bepaling van de capaciteit van een koelmachine is dit evenwel nog onvoldoende. Dan moet ook rekening worden gehouden met:

- de invloed van eventuele ontvochtiging van de buitenlucht (*latente koelbehoefte*)
- de mate van gelijktijdigheid in het gebruik (bezettingsgraad) en de werkelijke zonbelasting op een bepaald tijdstip op de verschillende gevels

De invloed van ontvochtiging is hierbij aanzienlijk:

$$\Phi_{k, \text{ontvochtiging}} = Q \cdot \rho \cdot c_p (h_1 - h_2) \quad (W) \quad (22)$$

Waarin:

$\Phi_{k, \text{ontvochtiging}}$ = koelbehoefte t.b.v. ontvochtiging

Q = volumestroom toegevoerde ontvochtigde lucht in m³/s

ρ = volumieke massa lucht in kg/m³

h = enthalpie (energie-inhoud) lucht in J/kg

Moet bijvoorbeeld 1 m³/s lucht (= $Q = 3.600 \text{ m}^3/\text{h}$) worden ontvochtigd van een buitentemperatuur van 28°C en 60% relatieve vochtigheid (hoge enthalpie) naar een binnentemperatuur van 24°C en 50% relatieve vochtigheid (lage enthalpie) is de volgende hoeveelheid koelenergie nodig (zie Mollier-diagram):

$$28^{\circ}\text{C}, 60\% \text{ RV} = 65.000 \text{ J/kg lucht} = h_1$$

$$24^{\circ}\text{C}, 50\% \text{ RV} = \underline{47.900 \text{ J/kg lucht}} - 17.100 \text{ J/kg lucht} = h_2$$

= $1 \text{ (m}^3/\text{s)} \cdot 1,2 \text{ (kg/m}^3) \cdot 17.100 \text{ J/kg} = 20.520 \text{ J/kg} = 27 \text{ W/m}^2$ bij een minimaal benodigde hoeveelheid verse lucht van $1,3 \text{ dm}^3/\text{sm}^2$ voor kantoren volgens het Bouwbesluit.

9 Literatuur

NNI. NEN 5076 Koellastberekening voor gebouwen. 1985.

1. ISSO 8. Berekening van het thermisch gedrag van gebouwen bij zomer-ontwerpcondities. 1985.
2. Schalkoort TAJ. Modelleren van warmte-, vocht-, lucht- en lichtstromen. TU-Delft, 2001 (voorlopige uitgave).

10 BIJLAGEN

10.1 Samenvatting vergelijkingen en globale koelbehoefteberekening

Globale koelbehoefte

$$\Phi_k = \Phi_i + \Phi_e \quad (W)$$

Interne belasting:

$$\Phi_i = \Phi_p + \Phi_l + \Phi_a \quad (W)$$

Warmtebelasting personen:

$$\Phi_p = \rho \cdot q_p \quad (W)$$

waarin:

ρ = aantal personen in de ruimte

q_p = warmte-afgifte per persoon in W -----> tabel 3

Warmtebelasting verlichting:

$$\Phi_l = q_l \cdot A_{vl} \quad (W)$$

waarin:

q_l = convectieve warmte-afgifte verlichting in W/m² -----> tabel 4

A_{vl} = vloeroppervlakte van de ruimte in m²

Warmtebelasting apparatuur (kantoren):

$$\Phi_a = q_a \cdot A_{vl}$$

waarin:

q_a = convectieve warmte-afgifte apparatuur in W/m² -----> tabel 5

A_{vl} = vloeroppervlakte van de ruimte in m²

Externe warmtebelasting:

$$\Phi_e = \Phi_{z,gl} + \Phi_{tr,gl} + \Phi_{z,w} + \Phi_{inf} \quad (W)$$

Zonbelasting via glas:

$$\Phi_{z,gl} = z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} \quad (W)$$

waarin:

z = zonweringsfactor luifel -----> tabel 6

A_{gl} = glasoppervlak in m²

ZTA = zontoetredingsfactor beglazing/zonwering -----> tabel 7

q_{conv} = convectieve warmte t.g.v. zonnestraling in W/m² -----> tabel 1

Transmissie via glas:

$$\Phi_{tr,gl} = U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad (W)$$

waarin:

U = warmtedoorgangscoefficiënt -----> tabel 7

A_{gl} = oppervlakte van het glas in m²

θ_e = ontwerp-buitemtemperatuur in °C (meestal 28 °C)

θ_i = ontwerp-binnentemperatuur in °C (meestal 25 °C)

Zonbelasting via wanden en dak:

$$\Phi_{z,w} = a \cdot A_{wi} \cdot q_w \quad (W)$$

waarin:

a = absorptiecoëfficiënt (gemiddeld 0,7)

A_{wi} = inwendige oppervlakte buitenwand in m²

q_w = warmtestroom via wanden en daken in W/m² -----> tabel 8

Warmtebelasting ten door infiltratie:

$$\Phi_{inf} = q_{inf} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad (W)$$

waarin:

q_{inf} = luchtvolumestroom in m³/s $\approx 0,2$ à $0,3 \cdot V/3600$ (V =ruimtevolume in m³)

ρ = dichtheid van lucht kg/m³ $\approx 1,2$ kg/m³

c = soortelijke warmte van lucht in J/kg.K ≈ 1000 J/(kg.K)

θ_e = ontwerp-buitemtemperatuur in °C (meestal 28 °C)

θ_i = ontwerp-binnentemperatuur in °C (meestal 25 °C)

10.2 Invulformulier globale koelbehoefteberekening

	aantal personen	W/per s	
warmtebelasting personen			

	A_{vloer}	W/m ²	
warmtebelasting verlichting			
warmtebelasting apparatuur			

	z	A_{glas}	ZTA	q_{conv}	f_d	
zonbelasting via glas						

	U	A_{glas}	$\theta_e - \theta_i$	
transmissie via glas				

	a	A	q_w	
zonbelasting borstwering ¹⁾				
„ dak ¹⁾				
„ zijwand ¹⁾				
„ zijwand ¹⁾				

	q_v	$\rho.c$	$\theta_e - \theta_i$	
infiltratie ¹⁾		1200		

totale koelbehoefte Φ_k	
--	--

¹⁾ wordt bij globale berekening wel verwaarloosd

