

# Afgifte - Koeling - Systeemkeuze

Kennisbank Bouwfysica

Auteurs: ing. T.A.J. Schalkoort, dr.ir. Peter van den Engel

## 1 Systeemkeuze op basis van koelbehoefte

### 1.1 Algemeen

Bij kantoorvertrekken en vergelijkbare verblijfsruimten wordt de keuze van de klimaatregeling meestal bepaald door de koelbehoefte, wat niet betekent dat altijd mechanische koeling nodig is. Bij een specifieke koelbehoefte ("koellast") van minder dan 25 à 30 W/m<sup>2</sup> vloeroppervlakte kan onder bepaalde voorwaarden vaak worden volstaan met natuurlijke koeling of - als niet aan die voorwaarden wordt voldaan - met mechanische ventilatie met ongekoelde buitenlucht.

Tabel 1 geeft een overzicht van het specifieke koelvermogen van systemen en combinaties van systemen, afhankelijk van de hoogte van de ruimte en, bij luchtkoeling, van het ventilatievoud. De in deze tabel voor enkelvoudige systemen aangegeven vermogens zijn gebaseerd op de eerder besproken praktijkregels en, voor luchtkoeling, op de in paragraaf 1.2 afgeleide formule. Voor combinaties van systemen is gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur. Hieruit blijkt dat het koelvermogen van combinaties vaak lager is dan de som van de vermogens van de enkelvoudige systemen.

Een systeem of combinatie komt voor keuze in aanmerking als het specifiek vermogen gelijk is aan of groter is dan de berekende specifieke koelbehoefte van de ruimte. De tabel laat zien dat bij een geringe koelbehoefte uit meer systemen en combinaties is te kiezen dan bij een grote koelbehoefte, maar ook dat een systeem met een gering specifiek koelvermogen, zoals VAV en CAV, niet in aanmerking komt bij ruimten met een grote koelbehoefte.

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

systeem	ventilatievoud h <sup>-1</sup>	ruimtehoogte in meter						
		2,4 Δθ = 6 °C	2,7 8 °C	3,0 10 °C	3,5 12 °C	4,0 12 °C	5,0 12 °C	6,0 12 °C
A VAV of CAV <sup>1)</sup>	3	15 <sup>2)</sup>	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 <sup>3)</sup>	8	-	30	35	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>
C inductie / fan-coil	10	50	75	100	140	160	200	240
D plafondkoeling <sup>5)</sup> of betonkernactivering	-	60	60	60	60	60	60	60
E vloerkoeling <sup>5)</sup>	-	20	20	20	20	20	20	20
F zuivere verdringing <sup>6)</sup>	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	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>4)</sup>
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) Δθ max. 4 °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.

## 1.2 Bepaling specifiek koelvermogen

De voor luchtkoeling aangegeven waarden zijn bepaald met hieronder weergegeven vergelijkingen. Andere waarden zijn ontleend aan handboeken.

"Specifiek vermogen" is hier gedefinieerd als het maximale verwarmings- of koelvermogen dat een klimaatregelsysteem kan leveren zonder dat tocht of onaangename temperatuurverschillen in de te klimatiseren ruimte ontstaat. Het specifieke vermogen wordt uitgedrukt in Watt per m<sup>2</sup> vloeroppervlakte.

Het koelvermogen van lucht is:

$$\Phi_k = q_v \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (\text{W}) \quad (1)$$

waarin:

$q_v$  = volumestroom in m<sup>3</sup>/s

$\rho$  = volumieke massa van lucht  $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$

$c$  = soortelijke warmte van lucht  $\approx 1.000 \text{ J/(kg.K)}$

$\Delta\theta$  = temperatuurverschil tussen toevoer en afvoer in K

Het **specifiek** koelvermogen van het systeem bedraagt:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} \quad (W/m^2) \quad (2)$$

waarin:

$A_{vl}$  = vloeroppervlakte van de ruimte in  $m^2$

De volumestroom kan ook worden geschreven als:

$$q_v = n \cdot A_{vl} \cdot h / 3600 \quad (m^3/s) \quad (3)$$

waarin:

$n$  = ventilatievoud in  $h^{-1}$

$A_{vl}$  = vloeroppervlakte van de ruimte in  $m^2$

$h$  = hoogte van de ruimte in  $m$

Na substitutie leidt dit tot de vergelijking:

$$\Phi_{k,sp} = \frac{n \cdot A_{vl} \cdot h \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot \Delta\theta}{A_{vl} \cdot 3600} = \frac{n \cdot h \cdot \Delta\theta}{3} \quad (W/m^2) \quad (4)$$

### 1.3 Bepaling afgiftevermogen oppervlaktes

Om een snelle indruk te krijgen welk afgiftevermogen een bepaald vlak bij een bepaalde oppervlaktetemperatuur heeft kan gebruik worden gemaakt van de volgende vergelijking:

$$\Phi_{k,sp} = \alpha \cdot \Delta\theta \quad (W/m^2) \quad (5)$$

waarin:

$\Phi$  = warmtestroom in  $W/m^2$

$\Delta\theta$  = temperatuurverschil tussen oppervlak en ruimtelucht in  $K$

$\alpha$  = warmteoverdrachtscoëfficiënt (straling + convectie) in  $W/m^2K$

Voor een gekoeld plafond is de alpha-waarde ( $\alpha$ ) vrij hoog, circa  $10 W/m^2K$ . Dit komt omdat koude lucht van nature naar beneden stroomt als de omgeving warmer is. Bij een gekoelde vloer of verwarmd plafond is de alpha-waarde lager omdat koude lucht moeilijker naar bovenstroomt en warme lucht slecht naar beneden stroomt. De alpha-waarde is in dat geval circa  $6 W/m^2K$ . Bij een gekoelde wand stroomt de lucht eveneens gemakkelijk naar beneden met een alpha-waarde van circa  $10 W/m^2K$ .

Uiteraard wordt dit ook beïnvloed door de totale ventilatie- of convectiestroom bij het vlak.

Bij een temperatuurverschil tussen plafond en ruimte van  $5 K$  is de koudeafgifte

$$\alpha \cdot \Delta\theta = 10 \cdot 5 = 50 W/m^2.$$

Om na te gaan hoeveel water hiervoor nodig is bij welk temperatuurverschil kan de al eerder genoemde vergelijking opnieuw worden gebruikt, maar nu voor water:

$$\Phi_k = q \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (\text{W}) \quad (1)$$

waarin:

$\Phi$  = warmtestroom in W

$q_v$  = volumestroom in  $\text{m}^3/\text{s}$

$\rho$  = volumieke massa van water  $\approx 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$

$c$  = soortelijke warmte van water  $\approx 4.200 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$\Delta\theta$  = temperatuurverschil tussen toevoer en afvoer in K

Een koudeafgifte van  $30 \text{ W}/\text{m}^2$  voor een vloerveld van  $10 \text{ m}^2$  ( $\Phi = 300 \text{ W}$ ) en een temperatuurverschil van 1 K tussen toe- en afgevoerd water leidt in bovenstaande vergelijking tot de volgende volumestroom:  $0,000071 \text{ m}^3/\text{s} = 0,071 \text{ l/s} = 255 \text{ l/h} = 25,5 \text{ l}/\text{hm}^2$ . Indien in een vloer verwarmingsbuizen zijn opgenomen en de inwendige diameter van de buis is 15 mm, is de stroomsnelheid:

$$U = q_v / A = \quad (\text{m/s}) \quad (6)$$

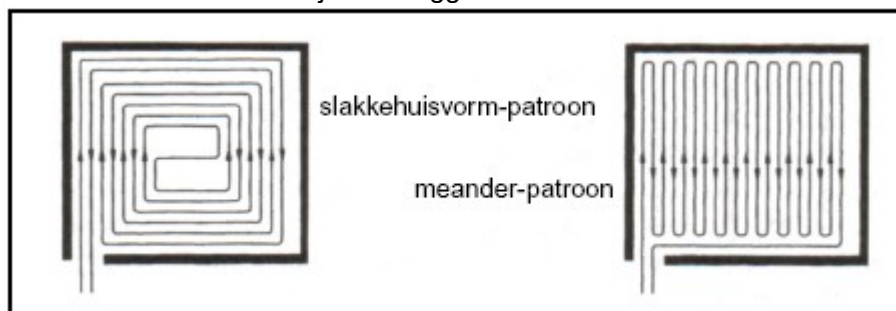
$U$  = stroomsnelheid in m/s

$q_v$  = volumestroom in  $\text{m}^3/\text{s}$

$A$  = inwendig oppervlak buis in  $\text{m}^2$

$$U = 0,000071 / ((\pi \cdot 0,015/2)^2) = 0,40 \text{ m/s}$$

De stroomsnelheid is laag. Bij een hoger gewenst afgiftevermogen, een kleinere buis of een groter vloerveld neemt de snelheid evenredig toe. Bij een grotere  $\Delta\theta$  neemt de stroomsnelheid daarentegen af. In figuur 1 is een voorbeeld van een legpatroon van buizen aangegeven. In het linker voorbeeld is de temperatuur gelijkmatig over het vloerveld verdeeld omdat toe- en afvoerbuis steeds dicht bij elkaar liggen.



figuur 1 spiraalvormen bij vloerverwarming

Om pompenergie te beperken moet de stroomsnelheid zo laag mogelijk zijn en bij voorkeur onder de 1 m/s blijven.

## 2 Afgiftesystemen

### 2.1 Natuurlijke koeling

Omdat de buitentemperatuur in Nederland gemiddeld circa  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  is, kunnen gebouwen gedurende een groot deel van de tijd op natuurlijke wijze met buitenlucht worden gekoeld.

Bij buitentemperaturen boven 18 °C kunnen verblijfsruimten via te openen ramen op natuurlijke wijze 10-voudig worden geventileerd en dus ook op natuurlijke wijze worden gekoeld. Als vuistregel voor verblijfsruimten geldt dat met natuurlijke koeling kan worden volstaan als de binnentemperatuur niet meer dan 3°C hoger wordt dan de buitentemperatuur. Hieruit volgt dat verblijfsruimten natuurlijk kunnen worden gekoeld als hun koelbehoefte niet meer is dan **25 à 30 W/m<sup>2</sup>** vloeroppervlakte. Deze waarde kan overigens ook worden bereikt met nachtventilatie.

Bij ruimten voor kortdurend verblijf, zoals sportzalen en verkeersruimten, is een hoger ventilatievoud mogelijk en worden grotere temperatuurverschillen toegestaan. Bij dergelijke ruimten met natuurlijke koeling is daardoor meer koelvermogen beschikbaar.

## 2.2 Mechanische koeling

### *Noodzaak van toepassing*

Als natuurlijke koeling via ramen onvoldoende effect heeft is mechanische ventilatie het eerste waaraan moet worden gedacht. Hiermee kan de ventilatie doelgerichter plaatsvinden en beter gebruik worden gemaakt van het warmteaccumulerende vermogen van gebouwen. Mechanische ventilatie met ongekoelde buitenlucht is voor ruimtekoeling voldoende als de interne warmtebelasting beperkt is en effectief gebruik kan worden gemaakt van de gebouwmassa voor **korte termijn** warmteopslag. De massa moet toegankelijk zijn door zo weinig mogelijk afscherming, zoals door verhoogde vloeren, lambriseringen en verlaagde plafonds.

## 3 Eindapparaten

### 3.1 Algemeen

Bij mechanische koeling zijn de warmtewisselaars (“koelbatterijen”) in luchtbehandelingskasten, inductieapparaten en ventilatorconvectoren de eindapparaten. Ook koelconvectoren, koelradiatoren, koelplafonds, koelvloeren zijn eindapparaten.

Door de opkomst van de informatietechnologie, met zijn steeds krachtiger computers en randapparatuur, was de interne warmtebelasting van utiliteitsgebouwen een tijdlang sterk toegenomen. De laatste jaren neemt deze overigens weer af door energiezuinige verlichting en computers. Uiteraard speelt de bezettingsgraad van de ruimte daarbij ook een rol.

Mede daardoor zijn eindapparaten ontwikkeld waarmee hoge koelvermogens kunnen worden gerealiseerd. Vaak combineren deze apparaten de functies van verschillende eindapparaten, bij voorbeeld een koelplafond dat plaatselijk is voorzien van koelribben waarlangs lucht wordt toegevoerd waardoor de convectieve warmteoverdracht van het plafond wordt versterkt. Technisch is veel mogelijk, maar niet alles wat mogelijk is, is wenselijk vanwege de neveneffecten zoals tocht. Dit blijft in alle gevallen een aandachtspunt. Voor verblijfsruimte van 2,7 m hoog is een specifiek koelvermogen van 100 W/m<sup>2</sup> vloeroppervlakte haalbaar.

### 3.2 Koelplafond / klimaatplafond

Koelplafonds worden net zo uitgevoerd als verwarmingsplafonds. Het enige verschil is dat, om condensatie te voorkomen, bij koelplafonds de aansluitleidingen zijn geïsoleerd met dampremmende isolatie. Het koelvermogen van het plafond wordt geregeld met een set

bestaande uit een ruimtethermostaat, een regelklep in de toevoerleiding en een regelkastje. Een plafond voor zowel koeling als verwarming is een "4-pijps klimaatplafond".

Op een koelplafond ontstaat condensatie als de temperatuur van het oppervlak onder het dauwpunt van de lucht komt. Hierdoor is het koelvermogen van vlakke metalen plafonds meestal beperkt tot circa 60 W/m<sup>2</sup>. Door perforatie zoals voor geluidabsorptie neemt het koelvermogen af. Buitenlucht bevat bij hoge temperaturen meer vocht dan lucht in mechanisch gekoelde ruimten. Om condensatie te voorkomen is in natuurlijk of hybride geventileerde ruimten de temperatuur van de koelplafonds hoger en het vermogen daardoor minder. In de buurt van open ramen en op plaatsen waar het plafond de laagste temperatuur heeft (bij de aansluiting op de toevoerleiding) is de kans op condensatie altijd het grootst.

Energetisch en gevoelsmatig is het niet logisch om bij hoge buitentemperaturen de ramen open te zetten als het binnen kouder is dan buiten, alleen zijn gebruikers zich dit niet altijd bewust. Om die reden voorziet men ramen van ruimten met koelplafonds vaak van contacten die ervoor zorgen dat het koelplafond bij geopende ramen wordt uitgeschakeld, zodra het buiten warmer en vochtiger is dan binnen. Ook wordt het koelplafond vaak voorzien van een dauwpuntsregeling zodat de temperatuur van het plafond altijd boven de dauwpuntstemperatuur blijft. Gebruikers zouden met een rood lampje ook kunnen worden gewaarschuwd om aan te geven dat ze op bepaalde momenten van de dag de ramen beter gesloten kunnen houden.

Voor vrij hangende of geprofileerde plafonds vermelden sommige leveranciers koelvermogens tot twee maal zo hoge waarden dan in dit boek. Het genoemde koelvermogen van 60 W/m<sup>2</sup> heeft betrekking op vlakke gelakte metalen plafonds met een geringe perforatiegraad. Lak heeft een emissiecoëfficiënt voor straling van 0,92, dat wil zeggen dat 92% van de straling wordt uitgewisseld die een zwart oppervlak met de omgeving zou wisselen. Tabel 2 geeft een overzicht van de emissiecoëfficiënten van verschillende materialen en afwerkingen, de totale warmte-uitwisseling is vermeld als deel van de totale warmte-uitwisseling van gelakte plafonds. Hierbij is voor lak uitgegaan van een warmteoverdrachtsfactor voor convectie  $\alpha_c = 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  en voor straling  $\alpha_r = 5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

tabel 2 emissiecoëfficiënt voor straling van verschillende materialen

<b>materiaal</b>	<b>emissiecoëfficiënt</b>	<b>totale warmte-uitwisseling <sup>1)</sup></b>
<b>staal</b>		
- onbewerkt	0,80	0,92
- verzinkt nieuw	0,08	0,43
- verzinkt verweerd	0,26	0,55
- gelakt/gemoffeld	0,92	1,00
<b>aluminium</b>		
- onbewerkt	0,07	0,42
- gepolijst	0,05	0,41
- geanodiseerd, glanzend	0,10	0,44
- „ „ , mat	0,60	0,78
<b>verf</b>		
- aluminiumverf	0,35	0,61
- moffellak	0,92	1,00
<b>stuc, gips, marmer, beton</b>	0,94	1,01

<sup>1)</sup> ten opzichte van moffellak

**Voorbeeld** Een verzinkt stalen plafond heeft een koelvermogen van:  $0,43 \times 60 = 25,8 \text{ W/m}^2$ . Na verwerking neemt het vermogen toe tot:  $0,55 \times 60 = 33 \text{ W/m}^2$ .

### 3.3 Betonkernactivering

Bij betonkernactivering wordt zowel het plafond als de vloer gekoeld. Het gaat hier om een traag systeem waarbij de warmte- en koudevraag van de onder- en bovenliggende ruimte niet te veel mag afwijken. Doordat de vlakken tegen elkaar stralen is kan het vermogen van de vloer en het plafond niet bij elkaar worden opgeteld. Het vermogen is daardoor vergelijkbaar met dat van een klimaatplafond.

Omdat er dan geen verlaagd plafond meer is moet er een oplossing worden gevonden voor integratie van luchtkanalen, verlichting en geluidsabsorptie. Een voorbeeld daarvan wordt weergegeven in figuur 3. Het gaat hier om de hoogbouw van het Ministerie van Binnenlandse Zaken waarin eilandplafonds zijn toegepast om dit op te nemen.

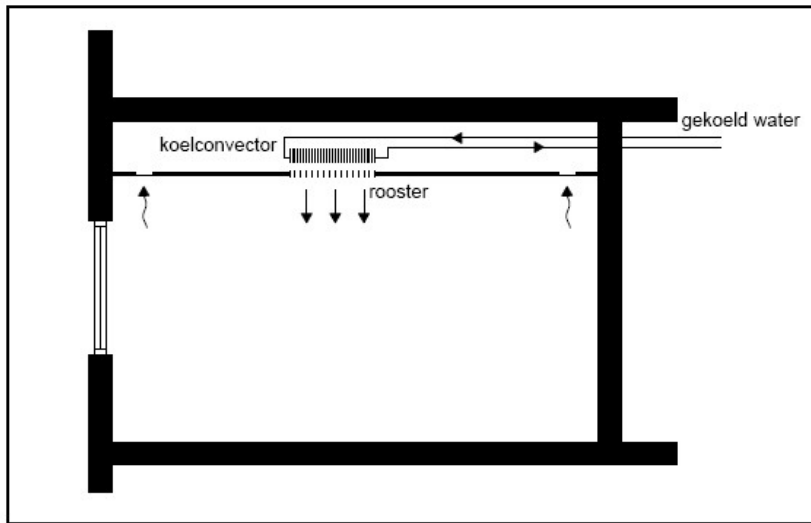


figuur 3 voorbeeld toepassing van betonkernactivering in een kantoor (architect Kolhoff)

Hier zijn ook te openen tweede huidramen en radiatorverwarming toegepast om aan individuele wensen van de gebruiker tegemoet te kunnen komen. De verse lucht wordt het hele jaar door met circa  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  toegevoerd.

### 3.4 Koelconvectoren

Koelconvectoren zijn - net als verwarmingsconvectoren - buizen waarvan de uitwendige oppervlakte met lamellen is vergroot. Ze worden gevoed met gekoeld water waarvan, om condensatie te voorkomen, de temperatuur net boven het dauwpunt van de ruimte ligt ( $>18 \text{ }^\circ\text{C}$  bij te openen ramen). Door convectie stroomt lucht van boven naar beneden langs de convector. Koelconvectoren plaats je daarom hoog in de ruimte, eventueel boven een verlaagd plafond met daarin een rooster waardoorheen de koele lucht naar de ruimte kan stromen. Via een ander rooster of via vrijgehouden randen ("eilandplafond") stroomt lucht terug naar de plafondruimte, zie figuur 3.



figuur 3 koelconvectoren

Bij de situering van koelconvectoren moet rekening worden gehouden met de inrichting van de ruimte om te voorkomen dat personen in de koude luchtstroom onder een convector komen te zitten. Is dit niet te vermijden dan moet een minder lage watertemperatuur worden toegepast (>21 °C).

### 3.5 Koelradiatoren

Elke radiator kan voor koeling worden gebruikt. Figuur 4 laat zien hoe in een Japanse kliniek design-radiatoren werden toegepast voor koeling en tevens voor separatie van behandelruimten.



figuur 4 ruimtescheidende koelradiatoren

Het koelvermogen van (hoogtemperatuur) radiatoren is per m<sup>2</sup> iets groter dan van koelplafonds maar beduidend lager dan het verwarmingsvermogen, namelijk ongeveer 10 % van de in tabel 3 aangegeven waarden.



tabel 3 verwarmingsvermogen radiatoren en paneelconvectoren per m<sup>2</sup> aanzichtsoppervlakte

type		W/m <sup>2</sup>
10	éénplaats paneelradiator	1.300
11	één „ paneelconvector	1.900
20	twee „ paneelradiator	2.200
21	twee „ paneelconvector	2.700
22	twee „ „	3.300
33	drie „ „	4.500
110LR	tweekoloms ledenradiator	2.400
160LR	drie „ „	3.300
220LR	vier „ „	5.000

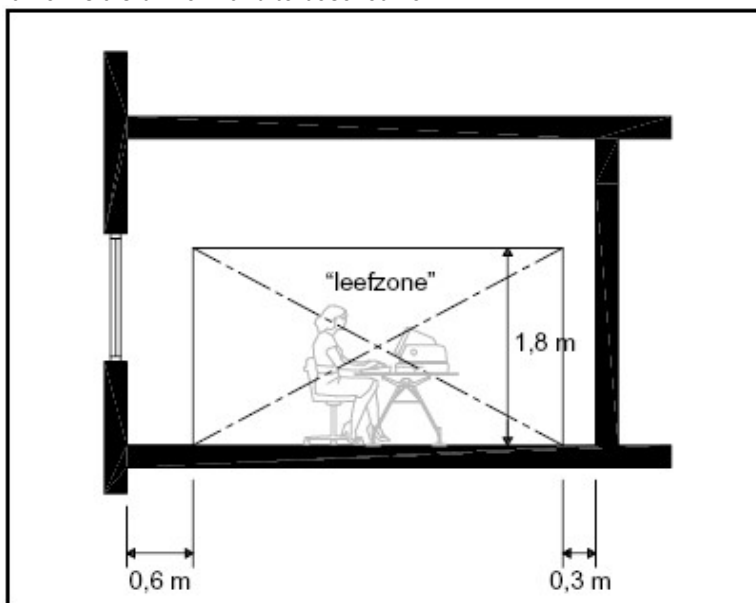
### 3.6 Koelvloeren

Met vloerverwarming, bestaande uit metalen of kunststofbuizen die in de deklaag van de vloer zijn opgenomen, kan ook worden gekoeld. Ter voorkoming van klachten over koude voeten is het praktisch haalbare koelvermogen van vloeren maximaal circa 20 W/m<sup>2</sup>.

### 3.7 Toevoertemperatuur bij luchtkoeling

Bij luchtkoeling kan de kans op tocht worden beperkt door het temperatuurverschil tussen de luchttoevoer en de ruimte niet te groot te maken. Het maximaal mogelijke verschil is afhankelijk van de hoogte van de ruimte, de wijze van toevoer en de plaats van het toevoerpunt. Als geen eisen worden gesteld aan de luchtvochtigheid en in de ruimte weinig vochtontwikkeling plaatsheeft, kan tabel 4 worden aangehouden. Deze tabel geldt voor verblijfsruimten met het luchttoevoerpunt buiten de "leefzone".

*NB Leefzone is de ruimte tussen de vloer en 1,8 m boven de vloer. Een strook van 0,3 m langs binnenwanden en 0,6 m langs buitenwanden valt buiten deze zone (zie figuur 4). Een buitenwand zonder ramen is als binnenwand te beschouwen.*



figuur 5 leefzone in een kantoor

Wordt een geringe temperatuurgradiënt nagestreefd, zoals in expositieruimten voor schilderijen, fabricageruimten voor temperatuurgevoelige meetinstrumenten, dan is het beter om geen groter temperatuurverschil toe te passen dan 8 °C. Bij lage toevoer, zoals bij kwelventilatie en verdringingsventilatie, is het aan te bevelen om het verschil te beperken tot maximaal 4 °C.

tabel 4 maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht

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

Koele lucht kan minder water bevatten dan warme lucht. Hierdoor wordt de absolute luchtvochtigheid in luchtgekoelde ruimten vaak laag, vooral als de lucht met een groot temperatuurverschil wordt toegevoerd. De luchtvochtigheid wordt minder laag als vochtontwikkeling in de ruimte plaatsvindt. In dat geval kan condensatie op toevoerroosters en oppervlakken in de directe omgeving van die roosters ontstaan. Veel installatieontwerpers beschouwen daarom 10 °C als het maximale temperatuurverschil waarmee gekoelde lucht kan worden toegevoerd. Als een bepaalde relatieve vochtigheid in de ruimte ontstaat of wordt nagestreefd is het maximaal mogelijke temperatuurverschil daarvan afhankelijk en gelden de waarden uit tabel 5.

tabel 5 maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht afhankelijk van relatieve vochtigheid

RV	$\Delta\theta$
%	°C
30	18
40	14
50	11
60	8
70	5