

Afgifte – Lucht - Vuistregels

Kennisbank Bouwfysica

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

1 Inleiding

Ingegaan wordt op enkele veel voorkomende functies met bijbehorende eigenschappen en standaardoplossingen. In hoofdzaak wordt ingegaan op klimaatbeheersing met lucht, maar de relatie met verwarming en koeling wordt eveneens aangegeven. Bij klimaatbeheersing van hoge en grote ruimten worden luchtstromingen gedetailleerder besproken, maar de kennis hiervan is nog sterk in ontwikkeling, zodat de bespreking een globaal niveau heeft.

2. Standaard oplossingen

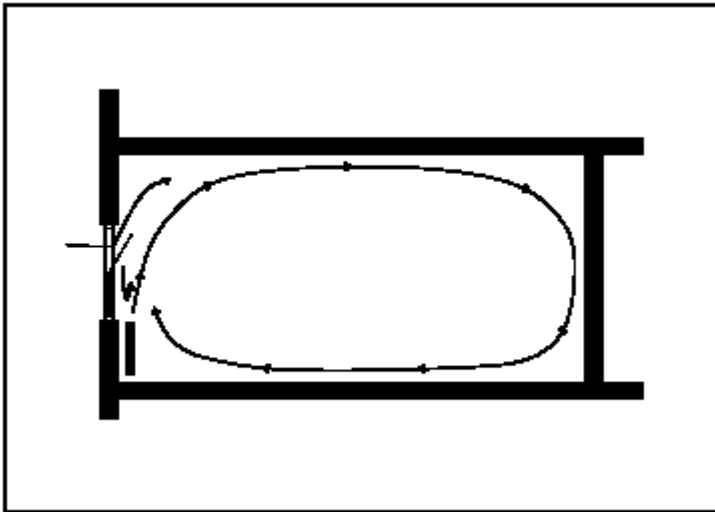
2.1. Woningen

Voor woningen is centrale verwarming met radiatoren of convectoren, eventueel aangevuld met vloerverwarming, het meest gebruikelijk. Het aantal woningen dat (vrijwel) alleen wordt voorzien van vloerverwarming neemt evenwel toe. Bij luxere woningen wordt ook wel luchtverwarming toegepast, vaak in combinatie met vloerverwarming. Luchtverversing vindt bij woningen meestal plaats met gevelroosters; koeling heeft plaats door middel van ventilatie via te openen ramen. Daarnaast wordt gebalanceerde mechanische ventilatie met warmteterugwinning toegepast. Als de warmtewisselaar wordt voorzien van een "bypass" wordt de toevoerlucht bij een koelbehoefte niet onnodig opgewarmd. Mechanische koeling is bij woningen nog niet gebruikelijk maar kan nodig zijn, bij voorbeeld als grote glasvlakken zonder adequate (buiten)zonwering zijn toegepast.

Daarnaast neemt door de toegenomen isolatie en warme, vochtige zomers de koelbehoefte toe. Niet voor niets worden door bewoners steeds vaker locale airco's aangeschaft. Bij woningen die zijn voorzien van warmtepompen aangesloten op energieopslag in de bodem is koeling meestal standaard aanwezig. Het gekoelde water uit de koude bron dat naar de woning wordt gevoerd wordt tijdens het koelen opgewarmd en naar de warme bron geleid. Tijdens het stookseizoen wordt dit warmere water nuttig gebruikt om een warmtepomp te voeden die het warme water op een hoger temperatuurniveau brengt. De warmtepomp produceert hierbij tegelijkertijd gekoeld water dat naar de koude bron wordt gevoerd.

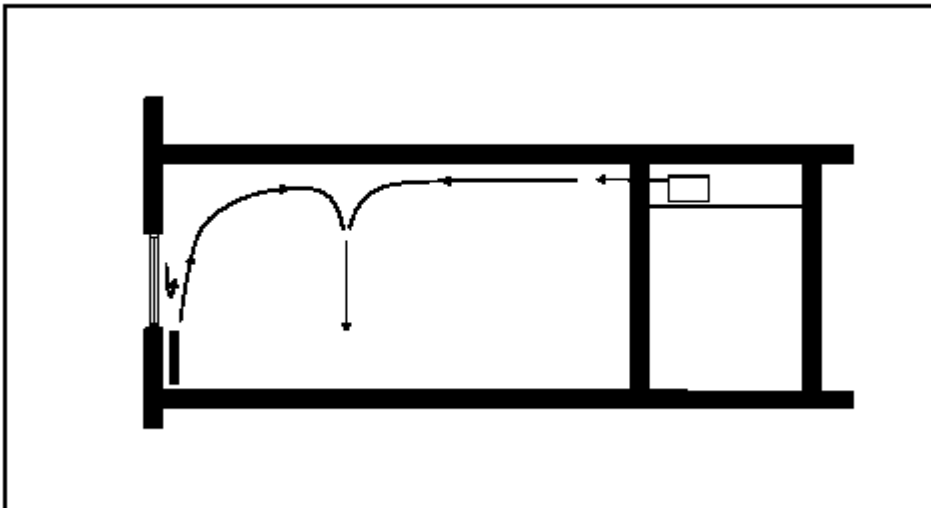
2.2. Kantoren met een geringe thermische belasting

Een standaard kantoorvertrek (breedte x diepte x hoogte = 3,6 x 5,4 x 2,7m) wordt meestal door één of twee personen gebruikt. Een traditionele systeemkeuze is: Verwarming met radiatoren in combinatie met natuurlijke ventilatie via gevelroosters en natuurlijke koeling via te openen ramen. Dit is een bruikbare oplossing als de Specifiek Werkzame Massa niet minder is dan 70 kg/m², niet meer dan één gevel voor 30% uit ramen met buitenzonwering bestaat, niet meer dan twee PC's worden gebruikt en de ramen open kunnen zonder hinder door stank of lawaai van verkeer of industrie (figuur 1).



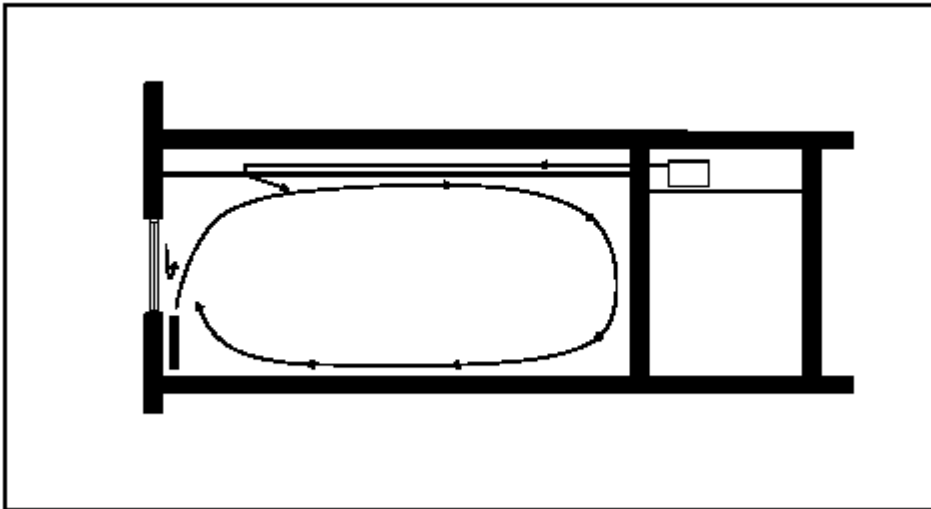
figuur 1 standaard kantoorvertrek met radiatorverwarming en natuurlijke ventilatie via te openen ramen; dit is een oplossing die in bestaande situaties nog voorkomt. In dit voorbeeld wordt lucht via dezelfde opening toe- en afgevoerd. Voor nieuwbouw is een aparte goed regelbare luchttoevoer en een aparte luchtafvoer noodzakelijk (Bouwbesluit). De luchttoevoer mag daarbij geen tocht veroorzaken. De wijze van luchttoevoer vraagt daarom speciale aandacht.

Kunnen de ramen niet open dan moet - als aanvulling op dit systeem - mechanische ventilatie worden toegepast. In het begin van de opkomst van mechanische ventilatie werd bij kantoren meestal lucht vanaf de gangzijde toegevoerd. Hierdoor ontstond vaak tocht op de plaats waar de toevoerstream en de door de radiator veroorzaakte luchtstream elkaar ontmoetten (figuur 2).



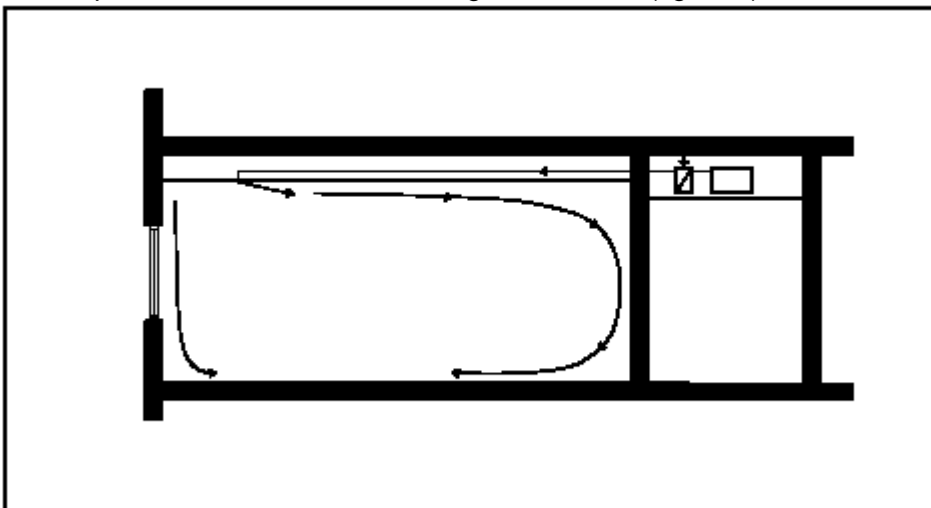
figuur 2 kantoorvertrek met mechanische luchttoevoer, radiatorverwarming en bijbehorend tochtprobleem

Men ontdekte dat het beter is om de lucht zo toe te voeren dat de beide luchtstromen elkaar versterken, bij voorbeeld door met een lijnrooster of een eenzijdig uitblazende plafonduitlaat ("anemostaat") op ca. 1 m vanaf de gevel de lucht horizontaal langs het plafond in de gangrichting te laten inblazen (figuur 3).



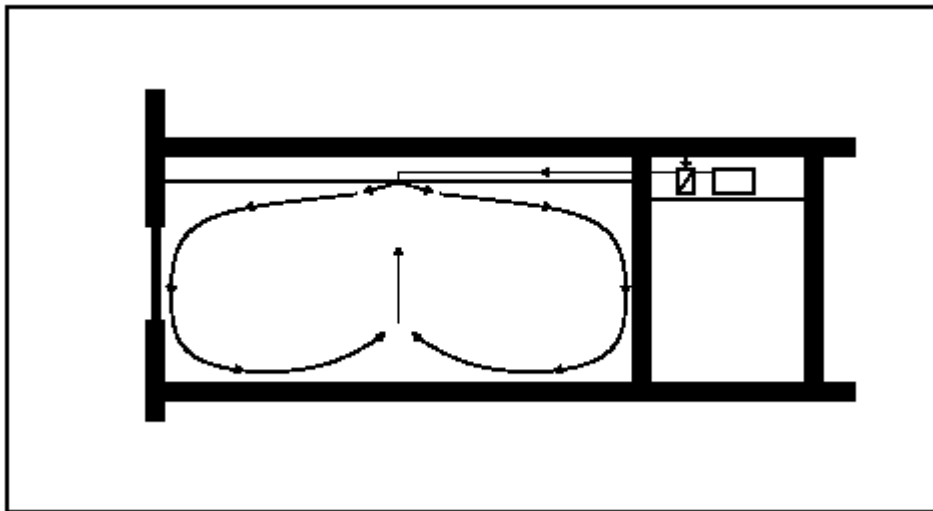
figuur 3 kantoorvertrek met radiatorverwarming en met mechanische luchttoevoer met een lijnrooster

De volgende stap in de ontwikkeling was het weglaten van de radiator en het - in plaats daarvan - toepassen van een warmtewisselaar in het luchttoevoerkanaal. Hierdoor ontstonden nieuwe problemen, zoals koudestraling en koudeval (figuur 4).



figuur 4 kantoorvertrek met mechanische luchttoevoer met naverwarmer en koudeval bij de gevel

De oplossing hiervoor was toepassing van minder glas, HR-glas of een klimaatraam of klimaatgevel. Een belangrijk nadeel bleef de tochtstroom die ontstaat als bij lage buitentemperaturen een raam wordt geopend. Een ander nadeel van het weglaten van de radiator was dat de mechanische ventilatie 's nachts en in het weekend in bedrijf moest blijven om de ruimte in de winter op temperatuur te houden. Verder bleek de werp van het rooster een probleem te zijn omdat deze bij toevoer van warme en koude lucht ongelijk is. Bij toevoer van warme lucht moet, om het ontstaan van een warme deken onder het plafond tegen te gaan en de werp de leefzone te laten bereiken, met een - relatief - hoge snelheid worden ingeblazen. Een zelfde snelheid heeft bij toevoer van koude lucht een grotere werp en daardoor tocht in de leefzone tot gevolg. Het beste wat in een situatie zonder radiator mogelijk is, is het toevoeren van de lucht vanuit het midden van de ruimte, bij voorbeeld met een vierzijdig uitblazende plafonduitlaat of met een tweezijdig uitblazend lijnrooster (figuur 5). De verschillen in werp bij koeling en verwarming zijn dan het kleinst.



figuur 5 kantoorvertrek met goede gevelisolatie en plafonduitlaat of tweezijdig uitblazend lijnrooster

2.3 Kantoren met mechanische koeling

Het systeem dat in de vorige paragraaf is besproken, is meestal eenvoudig aan te vullen met mechanische koeling waarbij de ruimtetemperatuur is te regelen met de hoeveelheid of met de temperatuur van de toevoerlucht. De *hoeveelheids*-regeling heeft een luchtregelklep (VAV-systeem, VAV = Variable Air Volume). De *temperatuur*-regeling heeft een na-verwarmer (CAV-systeem, CAV = Constant Air Volume) in het toevoerkanaal. In beide gevallen wordt een ruimtethermostaat gebruikt om de temperatuur individueel te kunnen instellen.

Een grote koelbehoefte kan het gevolg zijn van warmtebelasting door computers, personen, verlichting (vooral gloeilampen en indirecte verlichting), veel glas zonder adequate (buiten-)zonwering, ontbreken van luchtafvoer via de verlichtingsarmaturen, etc.. Hierdoor kan het koelvermogen van het in vorige paragraaf beschreven systeem ontoereikend zijn. De eenvoudigste manier om het vermogen te vergroten is toevoer van meer gekoelde lucht, bij voorbeeld tot maximaal 6 maal de inhoud van de ruimte per uur. Het specifieke koelvermogen is dan 45 W/m^2 vloeroppervlakte. Met inductieapparaten of ventilatorconvectoren kan 75 W/m^2 vloeroppervlakte aan koelvermogen worden bereikt. Combinatie met een gekoeld plafond geeft een vermogen van maximaal 100 W/m^2 . Deze getallen gelden voor een netto ruimtehoogte van 2,7 m.

2.4 Hoge ruimten

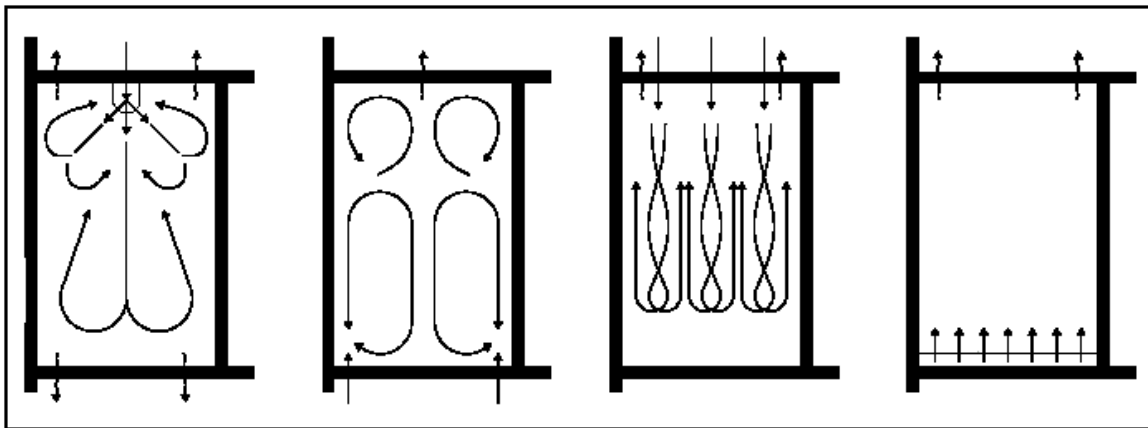
Door dichtheidsverschillen van warme en koele lucht ontstaan temperatuurverschillen; de verticale gradiënt is vaak $0,5$ tot $1,0 \text{ }^\circ\text{C/m}$. Daardoor kan bij hoge ruimten de temperatuur op vloer- en plafondhoogte tientallen graden verschillen. Dit verschijnsel is nuttig te gebruiken, zoals bij kwel- en verdringingsventilatie. Er zijn ook nadelen, zoals de beperkte bruikbaarheid van hoger gelegen delen van de ruimte door de hoge temperatuur ter plaatse. Een ander verschijnsel dat zich bij hoge ruimten sterker voordoet dan bij lage ruimten is tocht over de vloer door koudeval langs wanden die koeler zijn dan de lucht in de ruimte. Bij koeling ontstaat langs relatief warme wanden en ter plaatse van warmtebronnen een convectiestroom omhoog. Deze stroom stimuleert dat op andere vlakken of plaatsen lucht naar beneden gaat en zorgt eveneens voor tocht over de vloer. Daarom is het beter om ruimten van meer dan 4 m hoogte niet voor permanent verblijf te gebruiken. Hogere ruimten zijn niet bezwaarlijk als ze

voor kortdurend verblijf zijn bedoeld of door personen worden gebruikt die meer in beweging zijn, zoals verkeersruimten, sportzalen e.d.

Omdat verschillende luchtstromingen ontstaan, zijn bij hoge ruimten aparte voorzieningen nodig voor verwarming en koeling. Gebruik kan worden gemaakt van thermische invloeden voor het verlengen van de verticale worp, bij voorbeeld door warme lucht laag of koele lucht hoog toe te voeren.

Als belastingsverschillen met luchtsnelheidsregelingen worden gecorrigeerd, zijn bij diffuse luchtstroming en toevoer via nozzles, geen aparte voorzieningen voor verwarming en koeling nodig.

Hoge ruimten kunnen van verdringingsventilatie worden voorzien als ze thermisch goed zijn geïsoleerd en zoninstraling en interne warmtebelasting beperkt zijn. De koele of warme lucht kan gelijkmatig verspreid vanuit de vloer worden toegevoerd en hoog worden afgevoerd. De ruimte leent zich dan ook voor een wat langer verblijf, zoals een theaterzaal. Figuur 6 toont verschillende wijzen van luchttoevoer en -afvoer.



figuur 6 klimaatbeheersing bij hoge ruimtes, voorbeelden van luchttoevoer en -afvoer

Hoge ruimten zijn door de gradiënten en luchtstromingen die in de ruimte ontstaan niet voor alle ruimtefuncties even geschikt. Expositieruimten voor schilderijen en hallen voor assemblage van temperatuurgevoelige meetinstrumenten moeten bij voorbeeld een zo homogeen mogelijke temperatuur hebben.

Voor het op temperatuur brengen en houden van hoge ruimten die als tijdelijke verblijfruimte dienen is vloerverwarming gunstig, omdat:

- Vloerverwarming de temperatuurgradiënt positief beïnvloedt: Warme voeten en een koel hoofd.
- De meeste stralingswarmte daar is waar personen verblijven.

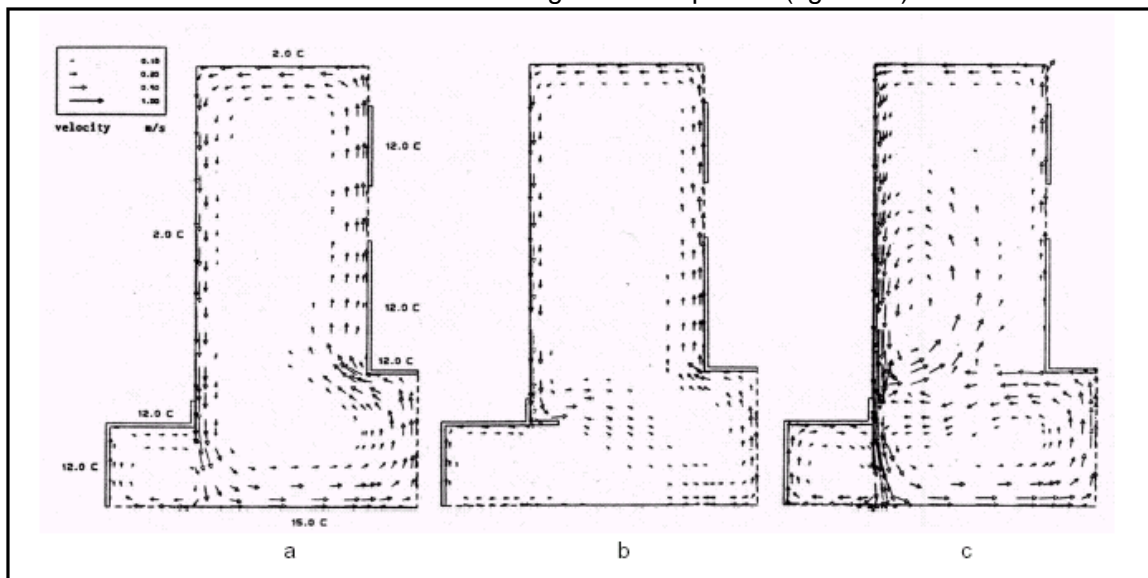
Voor de verwarming van hoge ruimten, zoals sportzalen, veilinghallen, fabriekshallen, e.d. worden ook wel hoog geplaatste stralingspanelen toegepast. Dit is minder gunstig vanwege het "warm hoofd en koude voeten"-effect en de hoge benodigde temperaturen.

2.5 Grote glasoverkapte ruimten (serres, atria, e.d.)

Grote/hoge glasoverkapte ruimten, zoals die in Nederland en qua klimaat vergelijkbare landen worden gebouwd, zijn meestal niet geschikt voor langdurig verblijf. Het is zelfs al lastig om ze aan de klimaateisen van verkeersruimten in gebouwen te laten voldoen. Daarom is het beter

om aan dergelijke ruimten lagere eisen te stellen of ze een andere bestemming te geven. Door eisen en mogelijkheden op elkaar af te stemmen zijn glasoverkapte ruimten aanvaardbaar te maken voor beperkte of tijdelijke gebruiksdoelen. Om de kans op klachten te beperken moet met de opdrachtgever en - als dat mogelijk is met toekomstige bewoners - zorgvuldig overleg plaatsvinden over de gebruiksmogelijkheden. **Atria** (alleen glas in het dak) zijn minder problematisch dan **serres**.

Naast de comfortproblemen die aan hoge ruimten kleven komen bij hoge glasoverkapte ruimten als extra complicatie de meestal geringe thermische isolatie (verwarmingsprobleem) en de vaak grote zonbelasting (koelprobleem). Een geringe thermische isolatie zorgt bij hoge verticale glasvlakken in de winter voor koudeval. Een krachtige warme luchtstroom vanuit de vloer langs het glas - convectoren helpen nauwelijks - kan de koudeval beperken, maar veroorzaakt ook een tochtstroom over de vloer in de richting van de gevel. Feitelijk leidt elke vorm van luchttoevoer tot meer luchtstroming en kans op tocht (figuur 7c).



figuur 7 luchtstromingen in een serre

Vloerverwarming heeft als nadeel dat vanuit het midden van de ruimte een verticale luchtbeweging ontstaat die de koudeval langs gevels versterkt. Uit onderzoek met 3-dimensionale stromingsmodellen blijkt dat een horizontaal vlak (een balustrade of iets dergelijks) als koudeval-breker kan dienen en de kans op tocht kan beperken (figuur 7b). Accepteert men enige tocht en temperatuurverschillen dan is het mogelijk om in serres een voor verkeersruimten aanvaardbare temperatuur van minimaal 10 à 12 °C te bereiken met beperkte bouwkundige middelen als enkel glas en beperkte verwarming. Een voorbeeld hiervan zijn de serres van het Ministerie van VROM. Om in de zomer een aanvaardbaar klimaat te realiseren, kan het gehele dak open.

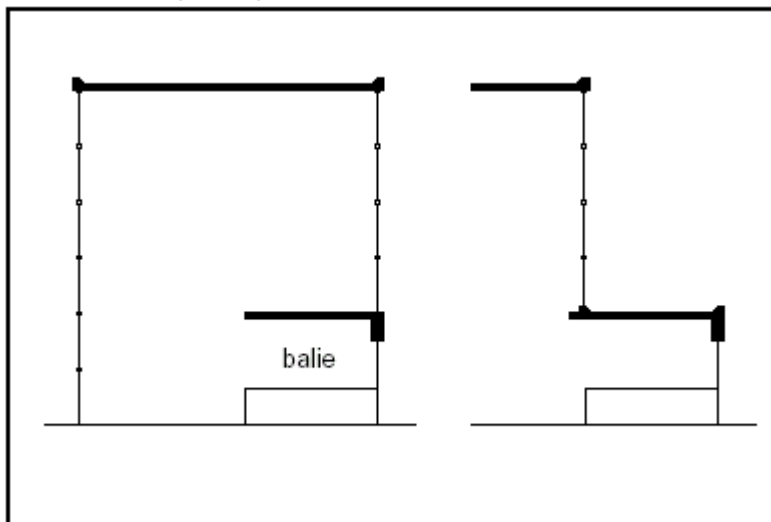
Doorgaans is het economisch niet verantwoord om zonbelaste **serres** te koelen, anders dan op een natuurlijke manier. De benodigde hoeveelheid buitenlucht is in dat geval echter zo groot dat enige tocht onvermijdelijk is. Tocht acceptierend, kan in de zomer een *aanvaardbaar* klimaat worden gerealiseerd als de luchttemperatuur niet meer dan 3-5 °C boven de buitentemperatuur komt. Voor de natuurlijke ventilatie zijn openingen in de gevel in combinatie met openingen in het dakvlak het beste. Om ervoor te zorgen dat luchtbewegingen niet te sterk tot de serrevloer doordringen mogen de gevelopeningen niet te laag zitten en moeten

deze klein van oppervlak zijn. Hoger gelegen openingen moeten zo worden gesitueerd dat mensen niet te dicht in de buurt daarvan komen, bij voorbeeld bij loopbruggen en bordessen. De zomerventilatie van **passages** kan op gelijke wijze plaatsvinden. **Atria** kunnen - indien buitenwanden ontbreken - alleen op natuurlijke wijze via openingen in het dak worden geventileerd.

Indien de zonwerendheid van de gevel of het dak kan worden verbeterd, kan de hoeveelheid ventilatie van het atrium in de zomer worden beperkt.

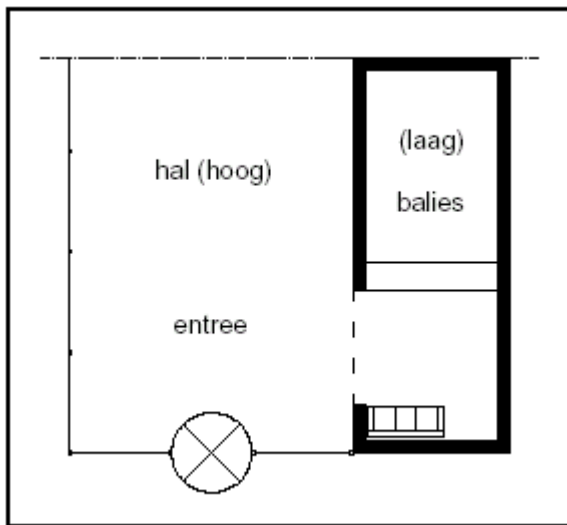
2.6 Balieruimten, kassa's, loketten, e.d.

Bankgebouwen, gemeentehuizen en dergelijke hebben publieksruimten met balies. Door toegangsdeuren, grote hoogte of grote glasoppervlakten kunnen deze ruimten niet altijd aan hoge klimaateisen voldoen. Het publiek, gekleed op het buitenklimaat, heeft daar geen last van omdat men kort in die ruimten verblijft. Baliepersoneel klaagt vaak over koude en tocht, net als personeel bij **kassa's** in supermarkten, e.d.. In publieksruimten geplaatste balies worden om die reden vaak al enkele maanden na ingebruikname afgeschermd. Dit soort verbouwingen kan worden voorkomen door balies zo ver mogelijk vanaf toegangsdeuren te plaatsen. Verder kan tocht worden te beperken door hoge publieksruimten ter plaatse van de balies te verlagen (figuur 8).



figuur 8 voorbeelden van balies in hoge ruimten

Grenst een balieruimte met een open verbinding aan een grote open ruimte dan kan een overgangsgebied ervoor zorgen dat eventuele tochtstromen worden beperkt, bij voorbeeld door balies haaks op de richting van de te verwachten tochtstroom te plaatsen (figuur 9).

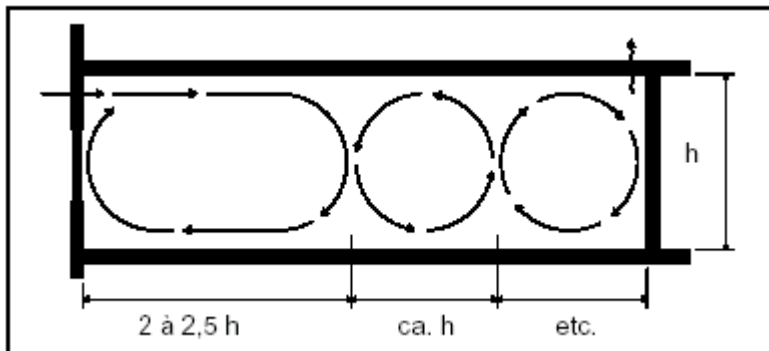


figuur 9 voorbeeld van een balie in een overgangsgebied

Loketten met kleine openingen zijn geen goede oplossing voor het tochtprobleem bij balies. Ze kunnen het probleem verergeren omdat in en direct achter de openingen hoge luchtsnelheden kunnen optreden door drukverschillen als gevolg van onbalans in de ventilatie, winddrukken op de gevel, open ramen of deuren, etc..

2.7 Ruimten met grote vloeroppervlakten

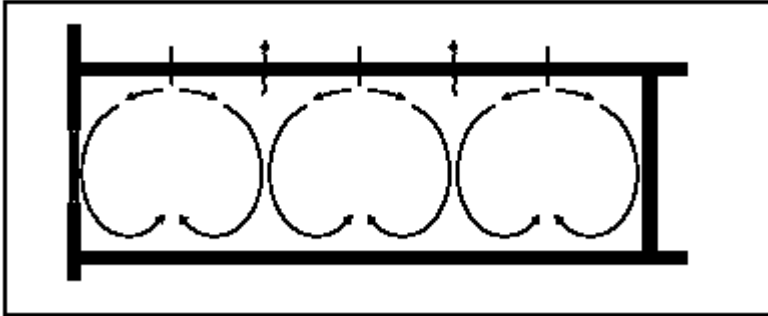
Het stromingsbereik (de worp) van wandroosters is beperkt. Daardoor ontstaan in uitgestrekte relatief lage ruimten (<3,0 m) bij dwarsventilatie met wandroosters primaire, secundaire en tertiaire wervels (figuur 10).



figuur 10 dwarsventilatie van relatief lage ruimten met grote vloeroppervlakten

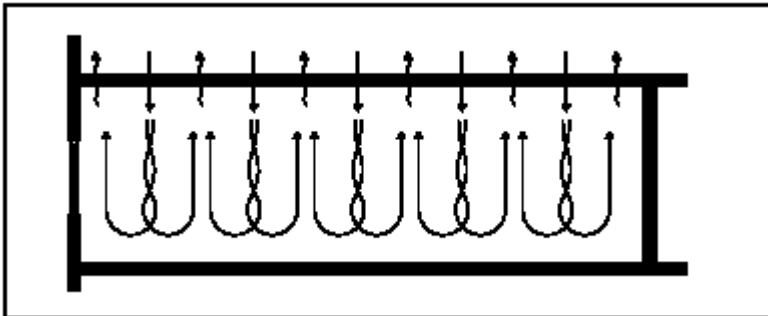
Als de roosters goed zijn gedimensioneerd en geplaatst, hoeft dit niet tot tocht te leiden. Wel kan door interne warmtebelasting een horizontaal temperatuurverschil ontstaan, waardoor het in de ruimte op enige afstand vanaf de toevoerroosters steeds warmer en benauwder wordt. Om een gelijkmatiger temperatuur te bereiken is het beter om bedoelde ruimten in verticale richting te ventileren. Plaatsing van toevoer- en afvoerroosters in het plafond is daarbij het gunstigst omdat de inrichtingsmogelijkheden van de ruimte dan niet worden beperkt. Toevoerroosters in de vloer hebben, voor zover ze zich in de leefzone bevinden, als nadeel dat het temperatuurverschil waarmee lucht kan worden toegevoerd (bij koeling maximaal 4 °C) geringer is dan bij toevoer vanuit het plafond. Om een gelijk koelvermogen te bereiken moet via vloerroosters vaak twee maal zoveel gekoelde lucht worden toegevoerd als via

plafondroosters. Als toevoerroosters kunnen horizontaal langs het plafond inblazende lijnroosters of "anemostaten" worden gebruikt (figuur 11).



figuur 11 verticaal georiënteerde ventilatie met anemostaten of lijnroosters

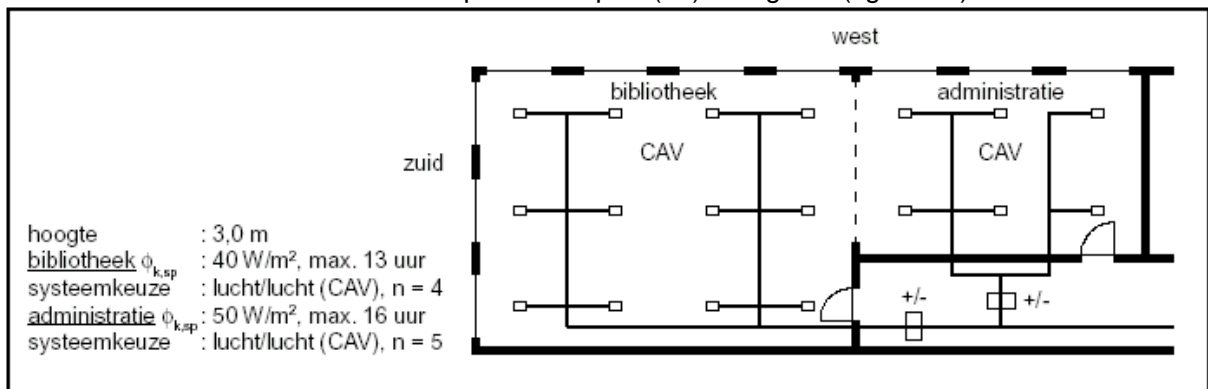
Bij ruimten van >3,5m hoog zijn verticaal naar beneden blazende wervelroosters zeer bruikbaar (figuur 12).



figuur 12 verticaal georiënteerde ventilatie met wervelroosters

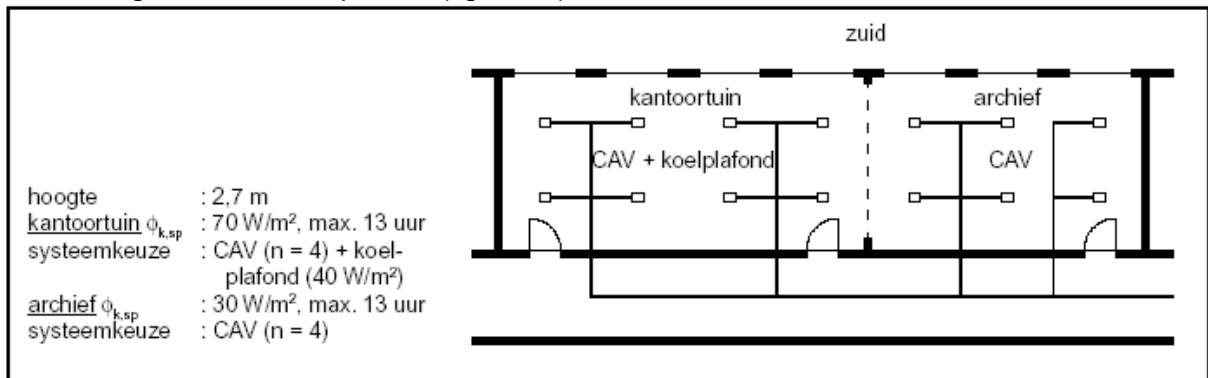
2.8 Gekoppelde ruimten

Bij gekoppelde ruimten kan worden gedacht aan ruimten die via grote openingen of via de klimaatinstallaties met elkaar in verbinding staan. Bij een **ruimtelijke** koppeling van ruimten die wat betreft hun functie, gebruik en specifieke warmte- en koelbehoefte ongeveer gelijk zijn, is het vanzelfsprekend dat die ruimten een identiek klimaatregelsysteem krijgen en tot dezelfde luchtbehandelingszone kunnen behoren. Zijn er verschillen in gebruik of verschilt het tijdstip waarop de maximale belasting optreedt dan is het beter om de ruimten als aparte zones te beschouwen en het klimaat per zone apart (na) te regelen (figuur 13).



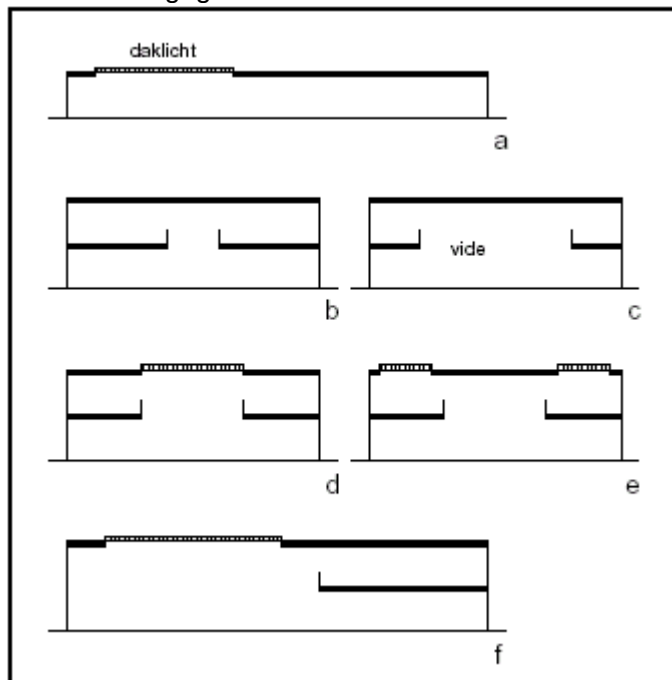
Figuur 13 Gekoppelde ruimten, verschil in gebruik of belastingsprofiel

Zijn de verschillen in de maximale warmte- of koelbehoefte groot, dan kan het nodig zijn de ruimten van verschillende systemen met verschillende specifieke vermogens te voorzien. Vaak is het mogelijk om delen van de installatie identiek te maken. Bij voorbeeld als alleen de maximale koelbehoefte sterk verschilt, kunnen de ruimten van een identiek ventilatiesysteem worden voorzien en krijgt alleen de ruimte met de hogere koelbehoefte een aanvullende voorziening, zoals een koelplafond (figuur 14).



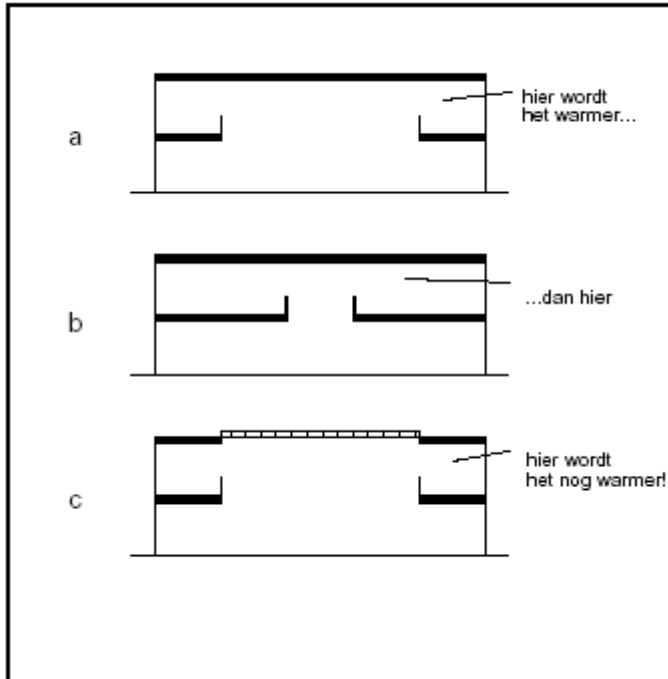
figuur 14 gekoppelde ruimten, verschil in maximale koelbehoefte

Bij een ruimtelijke koppeling kan zich ook een situatie voordoen waarbij de verschillen in gebruik en belasting klein zijn maar waarbij de vorm van de ruimten sterk verschilt. In dat geval kan één systeem worden toegepast met verschillende uitvoeringen, bij voorbeeld wat betreft de wijze waarop lucht wordt toe- en afgevoerd omdat de ene ruimte meer oppervlakte aan plafond heeft dan de andere ruimte. Vooral bij verticale koppelingen doet deze situatie zich voor, zoals bij ruimten die via een vide met elkaar in verbinding staan. In figuur 15 zijn voorbeelden gegeven.



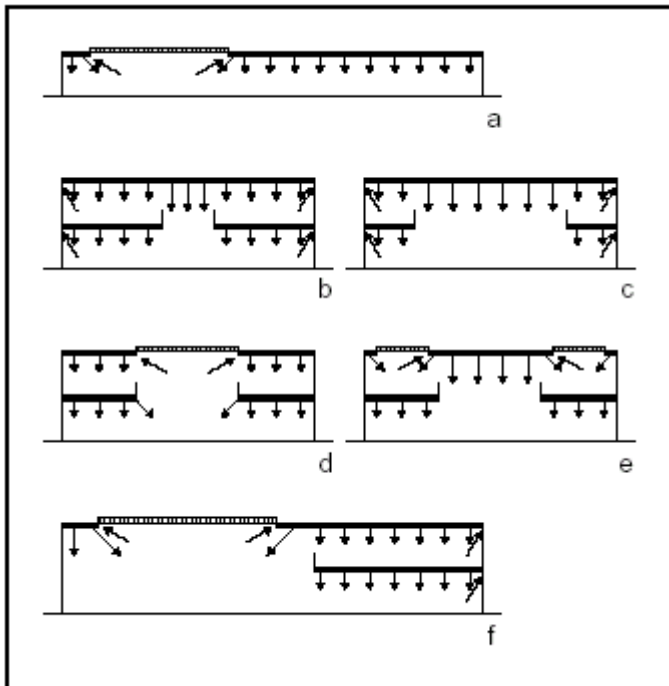
figuur 15 verticaal gekoppelde ruimten

Bij verticaal gekoppelde ruimten kunnen de hoogte en hoogteverschillen tot onderlinge beïnvloeding leiden en de temperatuurregeling minder eenvoudig maken. Figuur 16 laat zien wat er gebeurt door temperatuurgradiënten.



figuur 16 wat in verticaal gekoppelde ruimten gebeurt

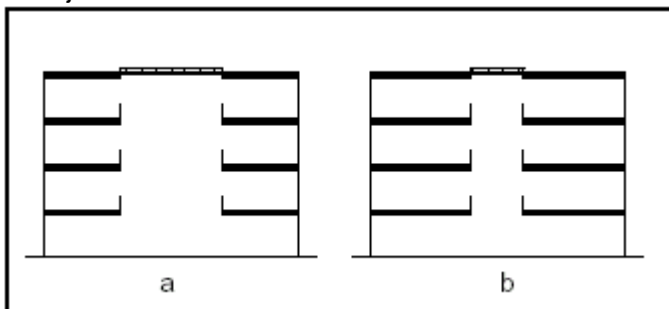
Oplossingen worden ingewikkelder als er eveneens belastingsverschillen zijn. Verder kunnen de verschillen in mogelijkheden om lucht of warmte toe of af te voeren de systeemkeuze complex maken en ertoe leiden dat het thermisch comfort niet wordt wat men ervan verwacht. In zo'n situatie bestaat er een conflict tussen de ruimtelijke kwaliteit en het comfort en is het nodig om tussen beiden een afweging te maken. Figuur 17 toont voorbeelden voor de plaatsing van luchttoevoer- en afvoerroosters die tot het best mogelijke resultaat kunnen leiden.



figuur 17 suggestie voor plaatsing van roosters

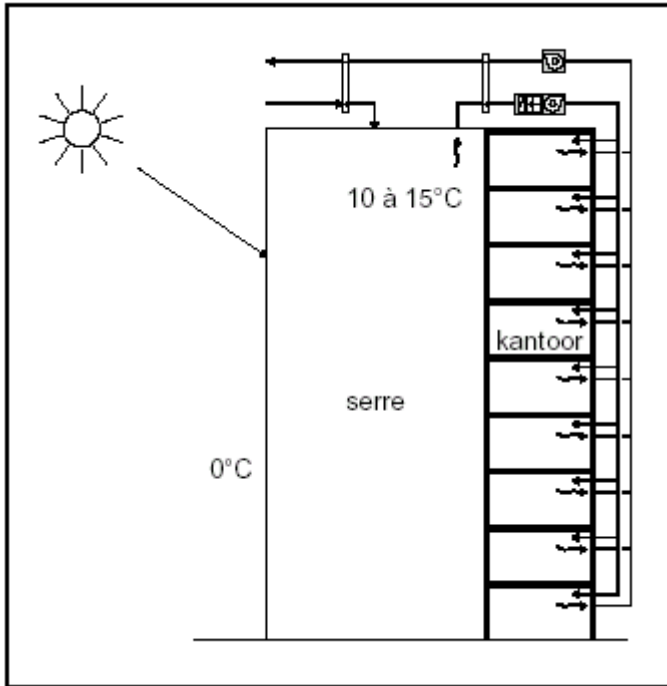
Zijn er belastingverschillen dan kan het koelvermogen - als er ruimte voor is - plaatselijk worden vergroot met koelplafonds.

Voorgaande alinea's beschrijven de koppeling van verblijfsruimten. Ruimten met verkeers- en andere dan gebruiksfuncties, zoals serres en atria, kunnen veel meer invloed op het klimaat in aangrenzende ruimten hebben als ze met die ruimten in open verbinding staan. De invloed is groter naarmate de vloeroppervlakte van de serre of het atrium groter is. De systeemkeuze van de aangrenzende ruimten wordt daardoor mede bepaald door de belasting van de serre of het atrium. Vooral bij ruimten die via een serre of atrium over een groot aantal verdiepingen zijn gekoppeld kan zich een complexe situatie voordoen, mede omdat in de serre of het atrium op zich al grote temperatuurverschillen ontstaan. Uit oogpunt van klimaatregeling is het daarom het beste om dergelijke situaties te vermijden. Is er een open verbinding met aangrenzende verblijfsruimten, zoals hiervoor omschreven, dan is de consequentie dat die ruimten minder comfortabel zijn. Alleen als de vloeroppervlakte van de serre of het atrium klein is, in vergelijking met de vloeroppervlakte van de aangrenzende verblijfsruimten, kunnen die ruimten aan redelijk strenge eisen voldoen, zie figuur 18b. De delen van de ruimten dichtbij de serre of het atrium blijven kritisch en kunnen beter voor een andere functie dan verblijfsruimte worden bestemd.



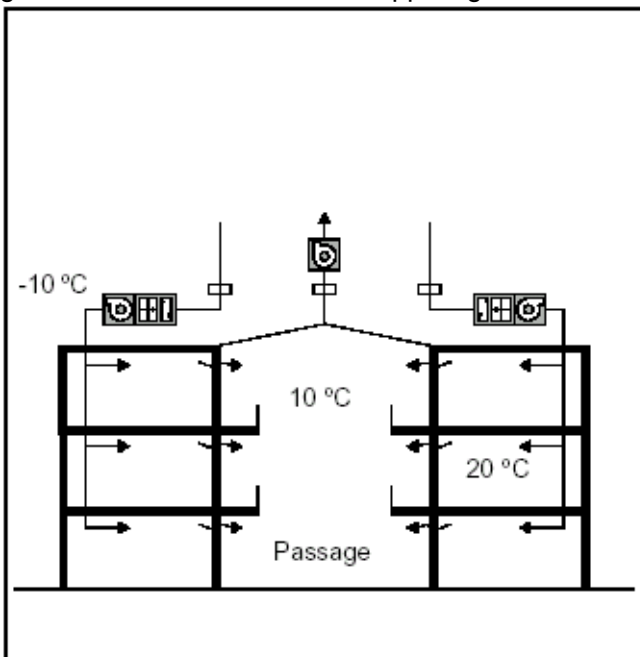
figuur 18 door middel van vides en atria gekoppelde ruimtes

Bij een koppeling van ruimten **via de klimaatinstallatie** kan worden gedacht aan het gebruik van lucht die vanuit de ene ruimte wordt afgevoerd om er een andere ruimte mee te ventileren, te verwarmen of te koelen. Een voorbeeld is een hoog kantoorgebouw met een grote hoge serre, zie figuur 19.



figuur 19 door middel van serre gekoppelde ruimte en kantoorvertrekken

De koppeling via de installatie dient om de voor de kantoren benodigde verse lucht in de winter te kunnen voorverwarmen met in de serres geabsorbeerde zonnewarmte. Figuur 20 geeft een voorbeeld van een koppeling tussen kantoren en een winkelpassage.

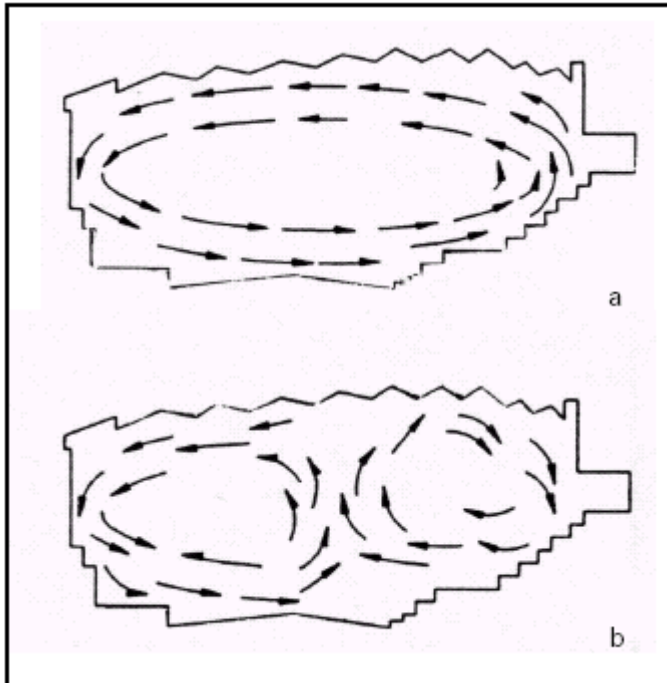


figuur 20 door middel van installaties gekoppelde winkels en passage

Met de warmte uit de lucht die uit de passage wordt afgevoerd wordt de toevoerlucht naar de winkels voorverwarmd.

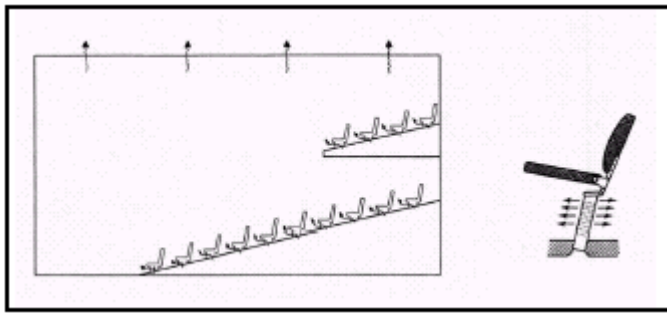
2.9 Theaterzalen

Theaterzalen zijn doorgaans hoog, o.a. om boven in de zaal een buffer met verse lucht te hebben. Vaak is de hoogte ook nodig vanwege belichting, projectie e.d. Omdat de luchtbuffer onvoldoende is voor een langdurige hoge zaalbezetting, is mechanische ventilatie nodig. In het verleden werden de toevoerroosters van theaters meestal in de wanden of het plafond aangebracht. Ondanks een zorgvuldige plaatsing bleek steeds tocht te ontstaan. Dit is, naast de hoogte van de ruimte, mede toe te schrijven aan de hoge interne warmtebelasting en de vaak ongelijkmatige zaalbezetting. Door de warmtebelasting van het publiek - en de convectiestroom die daarvan het gevolg is - kan een luchtstroming ontstaan die het beoogde stromingspatroon overheerst. Figuur 21 laat het verschil zien tussen een vol amfitheater (a) en hetzelfde theater met gedeeltelijke bezetting (b).



figuur 21 luchtstroming in een theater als gevolg van de thermische belasting van het publiek

Bij moderne theaterzalen voert men de verse lucht vaak laag en met een geringe snelheid toe, bij voorbeeld via de poot of rugleuning van fauteuils of via vloerroosters onder de fauteuils. De lucht wordt hoog afgevoerd, bij voorbeeld via de verlichtingsarmaturen. Dit is een onzuivere vorm van verdringingsventilatie (figuur 22).



figuur 22 theaterzaal met luchttoevoer via fauteuilpoten

Vanwege de lage plaats van de luchttoevoer mag de toevoertemperatuur niet meer dan circa 4 °C onder de zaaltemperatuur liggen en niet lager zijn dan ca. 20 °C. Anders ontstaan klachten over koude voeten. Ook dit systeem is niet zonder problemen. Door de verticale temperatuurgradiënt is het hoger in de zaal – bij voorbeeld ter plaatse van balkons - vaak te warm. Om die reden wordt dit systeem bij zeer grote zalen wel gecombineerd met variabele luchttoevoer via hoog in de ruimte geplaatste wervelroosters of nozzles. De luchttoevoer wordt in dat geval per rooster of per groep roosters geregeld op basis van de bezetting. Bij theaters en vergelijkbare zalen wordt meestal 35 m³/h verse lucht per persoon toegevoerd en wordt in de pauzes extra geventileerd. Meer luchttoevoer kan nodig zijn om de zaal voldoende te koelen (6- tot 8-voud).

2.10 Multifunctionele zalen

Zalen voor toneel, film, sport, feesten e.d. zijn nooit voor alle toepassingen even goed te klimatiseren, althans niet met een enkelvoudig systeem. Luchttoevoer, zoals bij theaters, kan niet omdat de zaalvloer voor een aantal functies volledig beschikbaar en vlak moet zijn. Door de mogelijkheid van een grote bezetting is een systeem met toe- en afvoerroosters in het plafond, eventueel aangevuld met lage afvoer (wand- of vloerroosters), het best denkbare. Verticaal naar beneden blazende wervelroosters zijn meestal een goede keus (zie figuur 6c). Voor het bij lage buitentemperaturen op temperatuur brengen en - bij geringe bezetting - op temperatuur houden van de zaal is vloerverwarming een goede aanvulling op dit systeem. In welke mate mechanische koeling nodig is, hangt af van de specifiek werkzame massa (SWM) van de zaal, van de maximale bezetting en van de temperatuureisen die bij verschillende bezettingen worden gesteld.

2.11 Sportzalen/tentoonstellingszalen e.d.

Het klimaat in sportzalen moet voor sporters en ook vaak voor toeschouwers aanvaardbaar zijn. Actieve sporters prefereren een lagere temperatuur dan toeschouwers. Sportzalen bij het onderwijs zijn meestal voorzien van te openen ramen en verwarming met radiatoren. Om te voorkomen dat sporters zich eraan verwonden zijn radiatoren vaak in ondiepe nissen geplaatst. Soms wordt luchtverwarming toegepast, in zijn eenvoudigste vorm bestaande uit een of meer vrij opgehangen indirect gestookte luchtverwarmers. Vloerverwarming is een luxe die men zich soms bij kleinere sportzalen voor gehandicaptenonderwijs veroorlooft.

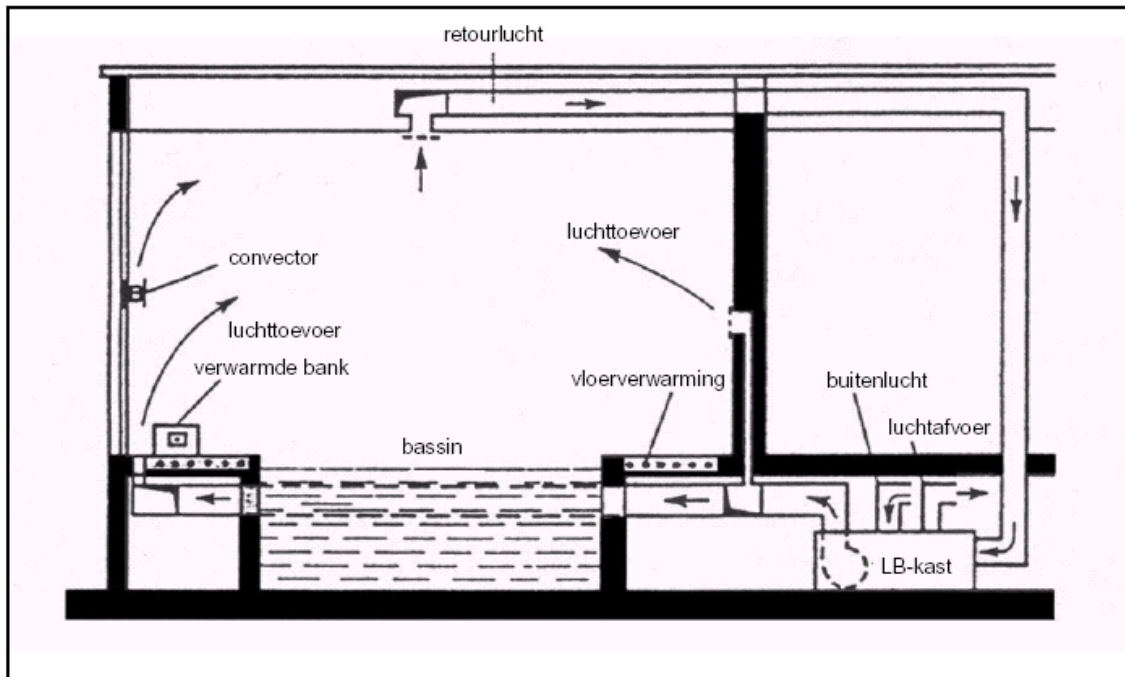
Verwarming die het meest tegemoetkomt aan de temperatuurbehoeften van sporters en toeschouwers is stralingsverwarming. Bij stralingsverwarming kan, bij gelijkblijvend comfort, een lagere luchttemperatuur worden toegepast dan bij luchtverwarming. Dat is gunstig omdat

bewegende sporters meer afkoeling van de koelere lucht ondervinden dan stilzittende toeschouwers. Bij tribunes kan plaatselijk meer warmte worden toegevoerd. Stralingsverwarming voor sportzalen kan bestaan uit een *middelhoog*- of een *laag*-temperatuursysteem. Bij middelhoge-temperatuur-systemen gebruikt men smalle stralingspanelen bestaande uit stevige metalen platen die aan watervoerende buizen zijn gelast. Bij lage-temperatuursystemen worden grote delen van het plafond als verwarmingsplafond uitgevoerd. Omdat deze plafonds bestaan uit dunne metalen platen of stroken zijn ze kwetsbaarder.

In Nederland is mechanische koeling voor sportzalen niet gebruikelijk. Sportzalen bij het onderwijs zijn meestal voorzien van hoog geplaatste klepramen waarmee, door ze tegen elkaar open te zetten, de temperatuur in de zomer redelijk is te beheersen. Tocht is daarbij niet uit te sluiten. Zalen van commerciële sportcomplexen met veel bezoekers (AHOY e.d.) hebben meestal wel mechanische koeling. Koeling van dergelijke ruimten is mogelijk met toevoer- en afvoerroosters in het plafond (zie figuur 6a en 6c). De luchtstroom mag niet op de toeschouwers zijn gericht. Horizontale luchttoevoer met nozzles in de wanden wordt ook wel toegepast, maar is - door de grotere kans op tocht - minder gunstig en bij sommige sporten, zoals badminton, ongewenst.

2.12 Zwembaden

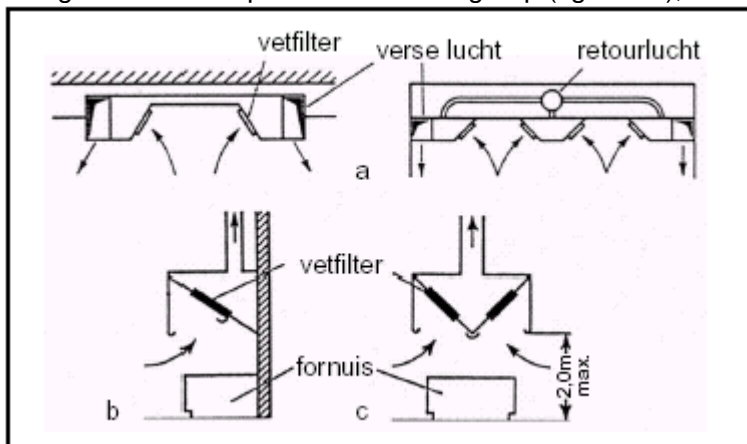
Bij zwembaden hebben natte zwemmers op de kant andere temperatuurbehoeften dan toeschouwers en personeel. Met name personeel bij overdekte zwembaden klaagt vaak over warmte, zelfs in het winterseizoen. Net als bij sportzalen is verwarming met stralingspanelen het meest ideaal omdat naar behoefte plaatselijk extra kan worden verwarmd. Bij moderne binnenbaden zijn de perrons meestal voorzien van vloerverwarming. Om de kans op condensatie op ramen en wanden te beperken worden zwembaden doorgaans ten minste 3-voudig geventileerd, bij lage buitentemperaturen met verwarmde buitenlucht en bij hoge buitentemperaturen met ongekoelde buitenlucht. Condensatie op ramen is eveneens te beperken met ribbenbuizen of convectorelementen of door warme lucht onder de ramen toe te voeren (figuur 23).



figuur 23 klimaatbeheersing in zwembaden

2.13 Bedrijfskeukens

In bedrijfskeukens ontstaat tijdens koken, bakken, braden, vaatwassen e.d. warmte en stoom. Bovendien komen vette dampen en kookluchtjes vrij. Warmte en stoom kunnen een thermische belasting vormen. De beste methode om deze belasting te beperken is het plaatsen van de afvoer zo dicht mogelijk bij de bron (kooktoestellen, vaatwassers e.d.). Doordat warmte en stoom komen zeer wisselend vrijkomen, zou een installatie gebaseerd op de maximale warmte- en stoomproductie zeer omvangrijk worden. Met een bufferruimte, zoals een grote wasemkap boven een kookgroep (figuur 24), kan de omvang worden beperkt.



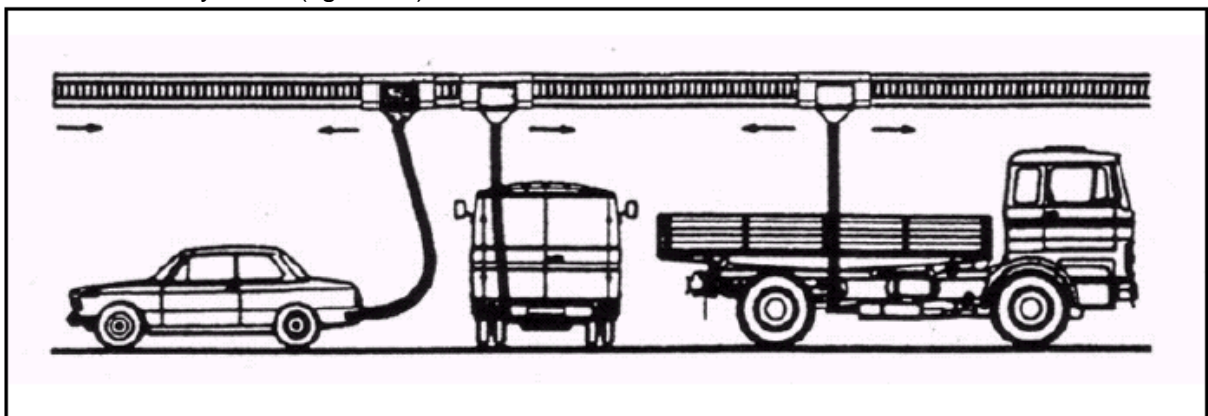
figuur 24 ventilatie van bedrijfskeukens

De ruimte boven de leefzone kan als buffer worden beschouwd voor de warmte en stoom die verspreid in de keuken vrijkomt of aan de wasemkap ontsnapt. Bedrijfskeukens moeten om die reden ten minste 3,0 m hoog zijn.

Afhankelijk van de warmte- en vochtbelasting worden bedrijfskeukens 15- tot 20-voudig geventileerd. Bij verblijfsruimten zouden dergelijke ventilatievouden tot tochtklachten leiden. Bij keukens gebeurt dit minder snel omdat keukenpersoneel veel in beweging is en bovendien meer accepteert. Toevoer van grote luchthoeveelheden via open ramen zou tocht veroorzaken, zeker als de diepte van de keuken meer dan tweemaal de hoogte is (vuistregel). Daarom is bij grotere keukens mechanische ventilatie altijd en mechanische koeling vaak nodig. De benodigde verse lucht wordt vaak langs de rand van een afzuigkap toegevoerd om te voorkomen dat kooklucht zich verspreidt (figuur 24a). Om dezelfde reden wordt in keukens daarom ook meer lucht afgevoerd dan toegevoerd.

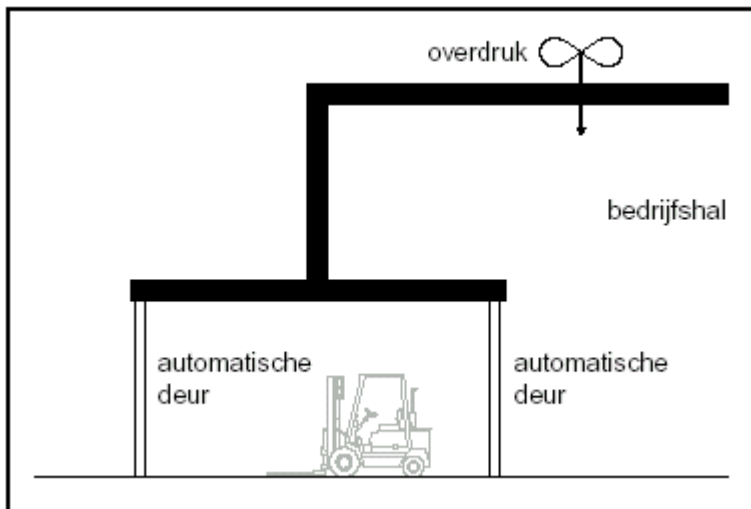
2.14 Industriële ruimten

Bij industriële ruimten moet de klimaatregeling op de processen zijn gericht. Industriële processen kunnen hoge eisen stellen aan het thermische klimaat en de luchtreinheid. De productie van micro-elektronische componenten in zogenaamde “clean rooms” is hiervan een voorbeeld. Anderzijds kunnen processen de ruimte thermisch en chemisch zwaar belasten. Deze belasting is het meest effectief te bestrijden door warmte en verontreinigingen zo dicht mogelijk bij de bron af te voeren. Een goed voorbeeld is de afvoer van uitlaatgassen in garagebedrijven. Bij proefdraaiende auto's wordt de uitlaat met een slang aangesloten op een centraal afvoersysteem (figuur 25).



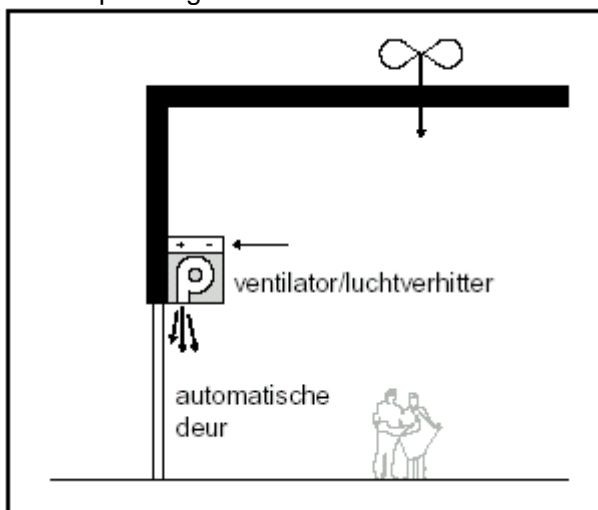
figuur 25 directe afvoer van uitlaatgassen bij proefdraaien

Bij industriële ruimten vraagt transport vaak bijzondere aandacht. Voor het transport van grote voorwerpen, zoals bij de scheeps- en apparatenbouw, zijn zulke grote toegangsdeuren nodig dat bij lage buitentemperaturen door het openen van deuren veel tocht en warmteverlies kan ontstaan. Een simpele methode om dit tegen te gaan, echter met een beperkt effect, is het plaatsen van plastic stroken in de deuropening. Een luchtsluis in combinatie met automatische deuren (figuur 26) is nagenoeg ideaal, maar ook kostbaar en het vraagt ruimte.



figuur 26 luchtsluis met automatische deuren

Automatische deuren in combinatie met een luchtgordijn (figuur 27) zijn vaak een bruikbare tussenoplossing.



figuur 27 automatische deur met luchtgordijn

Hoewel in industriële ruimten vaak een ruw klimaat heerst, is het niet zo dat er geen hoge op mensen gerichte klimaateisen aan worden gesteld. Moeten fysieke inspanningen worden geleverd die vergelijkbaar zijn met kantoorarbeid of moeten nauwkeurige handelingen worden verricht, dan gelden vergelijkbare klimaateisen. Echter, de omstandigheden staan niet altijd toe dat aan die eisen wordt voldaan. Vaak is het gebouw daarvan de oorzaak. Het voert te ver om hier in te gaan op alle aspecten van een geïntegreerd ontwerp van industriële gebouwen met hun processen en klimaatinstallaties. Duidelijk is dat ook hier een taak ligt voor gebouwontwerpers.

2.15 Winkels/winkelcentra

Bij winkels in winkelcentra kunnen zeer uiteenlopende koelbehoeften voorkomen. De koelbehoefte is vooral hoog als veel gloeilampen of halogeenlampen worden gebruikt. Deze lampen produceren veel warmte en hebben een relatief geringe lichtopbrengst. Tabel 1 geeft de lichtopbrengst van verschillende lampen. Gloeilampen en halogeenlampen gebruikt men

voor sfeer of om de vorm en glans van voorwerpen goed te kunnen zien. Lampen met een goede kleurweergave maken het natuurgetrouw zien van kleuren mogelijk. Fluorescentielampen (TL) hebben een goede kleurweergave maar ze geven ook vrij diffuus licht waardoor vormen minder goed zijn waar te nemen. Tabel 2 geeft voor verschillende winkels de meest toegepaste verlichting. Verder vermeldt de tabel het gemiddelde koelvermogen, het aandeel van de verlichting hierin en de vloeroppervlakte per persoon. Indien bekend is voor welk type winkel een ruimte is bedoeld, dan is daarmee ook ongeveer bekend op welke thermische belasting moet worden gerekend; er kan een klimaatregelsysteem worden gekozen. Bij winkelcentra van beleggingsmaatschappijen is meestal niet meer bekend dan de branche die in delen van het centrum komt. Is precies bekend welke winkel waar komt, dan nog moet rekening worden gehouden met verhuisbewegingen. Daarom is het gebruikelijk winkelcentra te voorzien van leidingen en kanalen waarmee een standaard hoeveelheid warmte, koude en lucht kan worden toe en afgevoerd. Hebben winkels meer nodig dan moeten aanvullende voorzieningen worden aangebracht, zoals compacte koelunits. Dergelijke units mogen winkeliers vaak in eigen beheer installeren, wat te zien is aan de condensors aan de achterzijde van het pand. Dit niet fraaie verschijnsel is tegen te gaan door de koelcentrale en de koelleidingen ruimer te dimensioneren dan op basis van de standaard koelbehoefte. Voor winkelcentra neemt men vaak een koelvermogen van 80 W/m^2 . Uit tabel 2 valt af te leiden dat soms 200 W/m^2 nodig is. Het is een investerings- en exploitatievraagstuk waar verschillende projectontwikkelaars en beleggingsmaatschappijen verschillend over denken.

tabel 1 prestatie van verschillende typen lampen

type lamp	licht opbrengst lm/W	kleur weergave
gloeilamp		
- "gewoon"	8 - 17	uitstekend
- halogeen	13 - 25	uitstekend
fluorescentie		
- compact ("PL")	50 - 88	goed
- buislamp ("TL")	50 - 104	uitstekend
natrium		
- hoge druk	66 - 138	(middel)matig
- lage druk	100 - 200	geen

tabel 2 thermische belasting winkels

type winkel	Totaal W/m²	verlichting W/m²	type	m²/persoon
café	80	20	gloeilamp	1 - 2
geschenken	90	30	TL	5
huishoudelijke artikelen	90	30	TL	5
juwelier	100	60	halogeen	5
kleding	80	30	TL	5
lederwaren	100	60	halogeen	5
passage	--	10	HD-natrium	5
restaurant	80	30	gloeilamp	2 - 3
schoenen	100	60	halogeen	5
suikerwaren	100	50	halogeen/TL	3 - 5
supermarkt	120	30	TL	5
TV/elektrische apparaten	150	50	halogeen/TL	5
verlichting	200	150	diverse	5
warenhuis	80	30	TL	5
woninginrichting	50	30	TL	20

2.16 Musea

Om onvervangbare cultuur- en natuurhistorische voorwerpen vele eeuwen onaangetast te kunnen bewaren, moet het klimaat en de verlichting in opslag- en expositieruimten vaak aan strenge eisen voldoen. Verf, doek en lijsten van olieverfschilderijen bij voorbeeld zijn gevoelig voor vocht en moeten worden bewaard bij een relatieve luchtvochtigheid van $55 \pm 5\%$. Ook houten voorwerpen, zoals beelden en meubelen, vragen een vergelijkbare niet te vochtige en niet te droge atmosfeer. Stenen en metalen beelden zijn minder vochtgevoelig.

Lucht met een temperatuur van $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een relatieve vochtigheid (RV) van 55% geeft bij een temperatuurverhoging van $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ een RV-verlaging van 5%. In een ruimte met een gemiddelde temperatuur van $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een verticale temperatuurgradiënt van $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ verandert de RV daardoor $5\%/m$. In die situatie kunnen schilderijen van meer dan 2 meter hoogte zich nooit

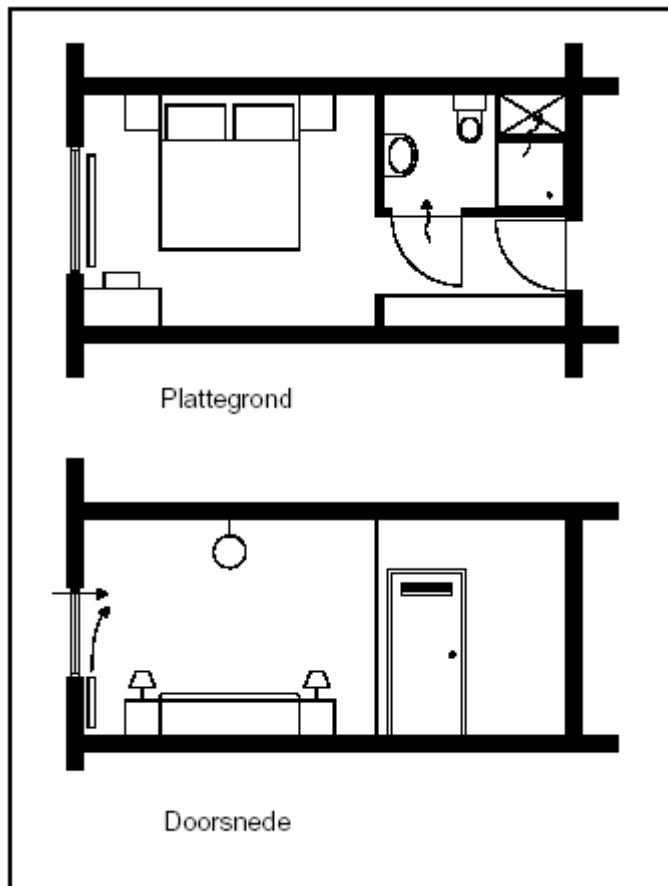
geheel in het voorgeschreven thermische klimaat bevinden. Daarbij komt dat het onmogelijk is om de temperatuur zo te regelen dat deze ter plaatse van het midden van alle schilderijen altijd de vereiste waarde heeft. Om die reden moet bij schilderijen een klimaatregeling worden toegepast die een zo klein mogelijke temperatuurgradiënt geeft, zoals verdunningsventilatie. Verdringingsventilatie of kwelventilatie komen om deze reden niet in aanmerking. Transparante ruimten met veel direct zonlicht hebben vaak een grote temperatuurgradiënt en daardoor grote verschillen in relatieve vochtigheid. Dat maakt transparante ruimten slechts geschikt voor een beperkt aantal expositiedoelen en in ieder geval niet voor schilderijen.

Buitenlucht bevat stof, roetdeeltjes en etsende verontreinigingen, zoals zwaveloxiden. Ook bezoekers verontreinigen de lucht. Aan expositieruimten voor schilderijen, textiel en metalen voorwerpen worden luchtreinheidseisen gesteld. Aan die eisen kan worden voldaan met mechanisch ventilatie met fijnfiltering. Natuurlijke ventilatie is ongeschikt voor musea.

Wandkleden, tapijten en kleding verkleuren door licht en vooral door ultraviolette straling. Etsen, waterverf, pen- en potloodtekeningen zijn extreem gevoelig voor ultraviolet. Sommige prenten zijn gevoelig voor violet of zelfs voor blauw licht en moeten om die reden in gedempt licht van speciale lampen worden tentoongesteld. Om vormen goed te kunnen zien, zoals van beelden, is veel meer licht en zijn vooral contrasten nodig. Direct zonlicht kan een bijzonder effect geven, maar is ongeschikt voor houten beelden. Om de lichtovergang niet onaangenaam groot te laten zijn en bezoekers aan het gedempte licht van een prentenkabinet te laten wennen moeten deze ruimten niet direct aan beeldenzalen grenzen. Beide typen expositieruimte moeten door een gematigd verlicht overgangsgebied van elkaar zijn gescheiden. Olieverfschilderijen kunnen meer licht verdragen dan prenten maar geen direct zonlicht. Zalen met veel horizontaal glas (daklichten) of ramen op zuidelijke oriëntaties waardoorheen direct zonlicht kan toetreden zijn ongeschikt als expositieruimte voor schilderijen. Ruimten met diffuus daglicht van op het noorden gerichte ramen of speciale lichtkappen zijn ideaal.

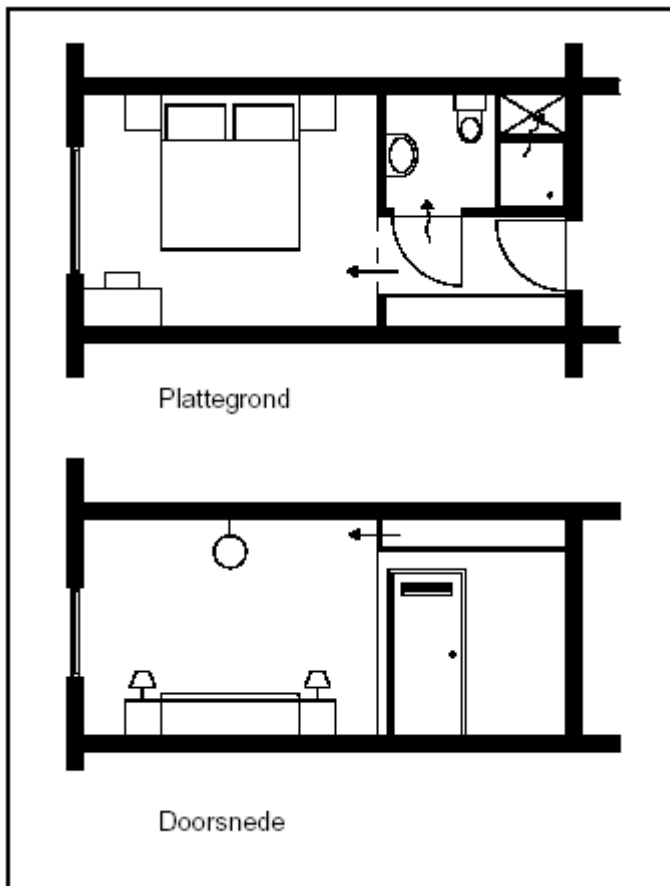
2.17 Hotels

Aan hotelkamers worden dezelfde eisen gesteld als aan woon/slaapvertrekken. Hotelkamers krijgen vaak elk een badruimte met daarin een bad of douche, wastafel en toilet. De badruimte bevindt zich dan meestal direct naast de hal/garderobe bij de toegangsdeur (figuur 28 en 29).



figuur 28 hotelkamer met radiator en natuurlijke luchttoevoer

Badruimten van naast elkaar gelegen kamers worden vaak naast elkaar gesitueerd om het aantal schachten te beperken. Een standaard hotelkamer wordt verwarmd met een radiator. Sommige ontwerpers willen dat niet en passen liever een convecteur of luchtverwarming toe. De aansluitleidingen van radiatoren en convectoren kunnen in het zicht lopen en aangesloten worden op eveneens in het zicht lopende verticale leidingen ("strangen"). Steeds vaker legt men de aansluitleidingen, net als bij woningen, in de afwerklaag. De verticale hoofdleidingen lopen dan in de schacht van de badkamer of in een aparte schacht in de hal (bij voorbeeld naast de garderobekast). De badruimte wordt mechanisch geventileerd. Lucht stroomt vanuit de kamer via een spleet onder of een rooster in de deur naar de badruimte. De hotelkamer zelf wordt meestal natuurlijk geventileerd via een rooster in of boven het (te openen) raam. Het te openen raam is nodig om de kamer bij zomerse omstandigheden niet te warm te laten worden. Als de kamer een zeer transparante gevel heeft, kan mechanische koeling nodig zijn. De hal/garderobe krijgt dan een verlaagd plafond met daarboven de luchtkanalen (figuur 29).



figuur 29 hotelkamer met mechanische luchttoe- en afvoer, luchtverwarming en luchtkoeling

Dit is eveneens een goede plaats voor de kanalen als voor luchtverwarming is gekozen. Het toevoerrooster wordt in beide gevallen in het verticale deel van het verlaagde plafond tussen hal en kamer geplaatst en blaast de lucht horizontaal in, in de richting van de gevel. Het bed moet zo worden geplaatst dat gasten niet op de tocht komen te liggen.

Hotels hebben voor het maken van ontbijt en bereiding van lunches en diners meestal aparte keukens. Met name keukens, waarin veel warmte en stoom vrijkomen van kooktoestellen en afwasmachines, moeten fors worden geventileerd en ten minste 3 m hoog zijn (zie ook paragraaf 2.13). Aan de lounge, de bar, het restaurant e.d. worden gebruikseisen gesteld die zijn afgestemd op de vaak hoge bezetting. Voor de lounge en het restaurant kan met 1 persoon per 3 m² worden gerekend, voor de bar van een hotel met één persoon per 2 m².

2.18 Monumentale gebouwen/restauratie

Bij monumentale gebouwen, waarbij een verbouwing als restauratie moet worden opgevat, mag in de regel weinig aan het aanzien veranderen. Buitenzonwering is meestal taboe en originele details, zoals balkenplafonds, moeten vaak zichtbaar blijven. Voor het creëren van horizontale inbouwruimte voor leidingen en luchtkanalen kan aan verhoogde vloeren worden gedacht. Als voor dit doel een verdiepingsvloer wordt verhoogd kan dit zowel voor de bovenliggende als voor de onderliggende ruimten inbouwruimte bieden. Is weinig schachtruimte beschikbaar dan kan met lambriseringen verticale inbouwruimte worden gemaakt. Ondanks dit type van mogelijkheden is bij restauratieprojecten vaak onvoldoende ruimte te creëren om al die installaties in te bouwen die op grond van moderne criteria

gewenst zijn. Je moet jezelf in die situatie daarom afvragen of die eisen niet te hoog zijn en of er niet een beetje geschipperd mag worden. Is het bij voorbeeld nodig om te eisen dat de hoogste gebruiksbelasting bij de hoogste ontwerp-buitentemperatuur wordt gehaald? Bewoners en publiek accepteren het vaak als vanzelfsprekend dat het klimaat in monumentale gebouwen niet aan moderne comforteisen voldoen.

Bij restauratie wil men vaak weinig van de installaties zien. De opvattingen hierover verschillen. Sommigen vinden dat installaties een toevoeging zijn waarvan het onvermijdelijk is dat die worden gezien. Ze accepteren de installaties, laten ze zien, duidelijk zien of gebruiken ze zelfs als vormgevende elementen. Er zijn verschillende mogelijkheden om installaties niet te laten zien. Kanalen, leidingen e.d. kunnen worden ingebouwd. Anders is het met eindapparaten. Een licht schoepenrooster valt op door de donkere ruimte tussen de schoepen. Een dergelijk rooster is bijna niet waarneembaar als deze donkerbruin of zwart is en wordt opgenomen in een vlak met dezelfde kleur, vooral als zo'n rooster hoog in de ruimte is geplaatst.