



Duurzame lucht- behandeling voor erfgoedinstellingen

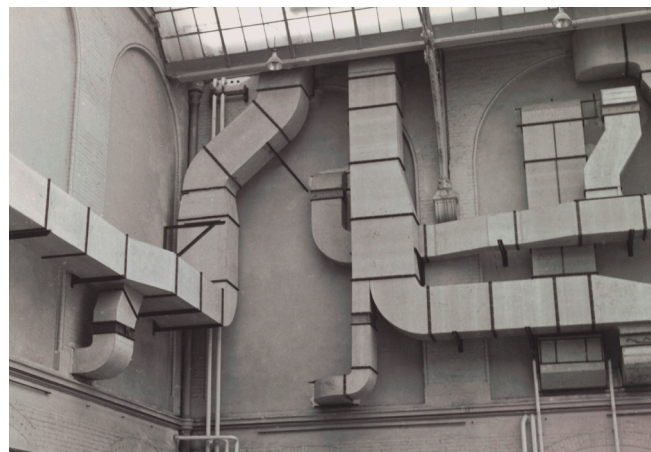
Luchtbehandeling is een veel toegepaste manier om het binnenklimaat van musea en depots te beheersen. In deze publicatie gaan we in op een aantal aspecten van luchtbehandeling met het oog op effectiviteit en efficiëntie. Beide zijn belangrijke voorwaarden voor duurzaamheid.

De volgende aspecten worden behandeld:

- de opbouw van een typische luchtbehandelingskast
- de klimaatspecificaties
- een regelstrategie
- verhoging van de energie-efficiëntie

Een duurzaam binnenklimaat

Het streven naar verduurzaming moet leiden tot een praktijk die tot blijvende veranderingen en aanpassingen in de organisatie leidt. Minder energie, minder afval, minder waterverbruik, slimmer gebruik van hulpbronnen en grondstoffen én meer kwaliteit in het beheer en het gebruik van de collectie. Deze brochure gaat dieper in op een duurzaam binnenklimaat voor musea en depots. Het is een zoektocht naar een binnenklimaat dat past bij de collectie, het gebouw, de mens, de organisatie en

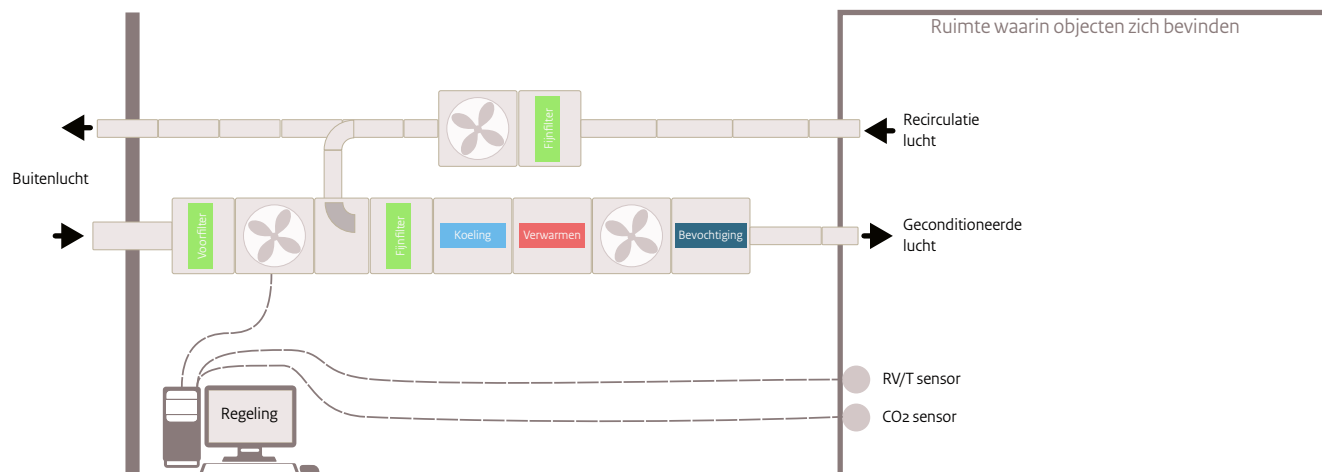


Lucht moet van de luchtbehandelingsinstallatie naar de zalen gebracht worden. Het formaat van de kanalen wordt zo gekozen dat de juiste hoeveelheid lucht met zo min mogelijk weerstand, maar met een juiste snelheid in de ruimte terecht komt.

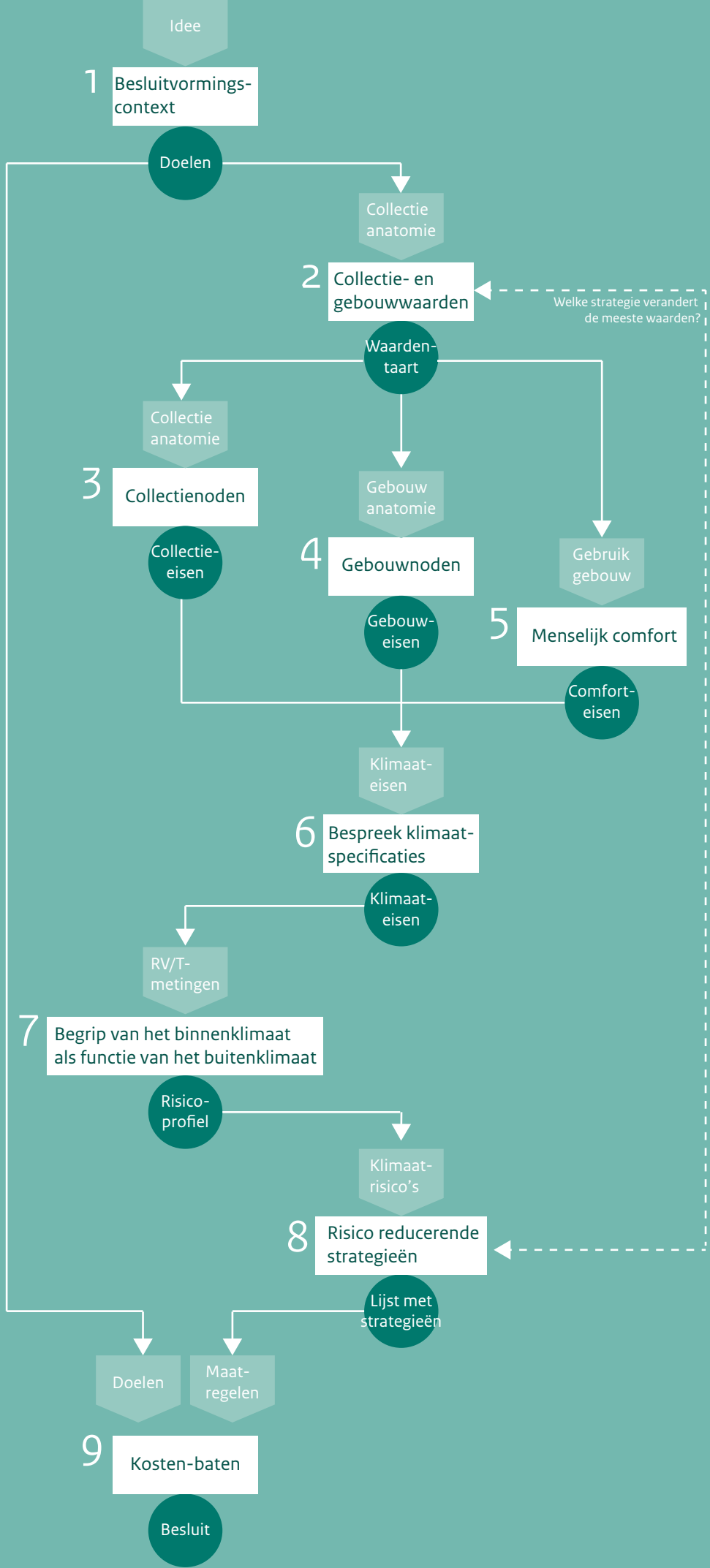
de middelen.

Het optimale klimaat is dus voor elk museum anders en dient voort te komen uit een gebalanceerde afweging tussen de aspecten collectiebehoud, menselijk comfort, gebouwbehoud en energiegebruik. Risicomanagement is een belangrijk concept om de collectie- en gebouw-eisen mee te nemen in de bepaling van de uiteindelijke klimaatspecificaties. Voor een voorbeeld van een stappenplan op basis van risicomanagement, zie figuur 1 op volgende pagina.

In het kort bepalen deze randvoorwaarden de klimaatspecificaties als volgt. De collectie-eisen beïnvloeden zowel de specificaties voor niveaus (setpoints) als de specificaties voor fluctuaties van relatieve luchtvochtigheid (RV) en temperatuur (T). Thermische



Figuur 2. Schematisch overzicht van een klimaatinstallatie met mogelijkheid tot (deels) recirculatie.



1 - Een goede keuze tussen de verschillende alternatieven om het binnenklimaat te beheersen, begint met een verkenning van de doelen van de organisatie die invloed hebben op die keuze. Hierbij kan gedacht worden aan een ambitie voor meer duurzaamheid, de wens kosten te beperken en het doel om de collectie te behouden.

2 - Het belang van het gebouw en de roerende collectie worden geëxpliciteerd. De verschillende culturele waarden bieden het kader waarin de impact van een maatregel op die waarden kan worden gewogen.

3 - De roerende collectie wordt onderverdeeld in verschillende gevoeligheidsklassen. Voor elke klasse kan vervolgens bepaald worden in welke mate het binnenklimaat daarop inwerkt en worden de risico's bepaald.

4 - De onderdelen van het gebouw die waardevol zijn en gevoelig voor een verkeerd binnenklimaat worden geïdentificeerd. Deze onderdelen worden in gevoeligheidsklassen onderverdeeld. Voor elke klasse worden de klimaatrisico's benoemd en de gewenste klimaatcondities beschreven.

5 - Voor elke klimaatzone worden de gewenste klimaatcondities voor de gebruikers van het gebouw geformuleerd.

6 - Als gevolg van specifieke bouwfysica biedt elk gebouw een (natuurlijk) binnenklimaat. Begrip van het functioneren van het gebouw en de mogelijke installaties geeft de mogelijkheid om te kijken naar manieren waarop de klimaatrisico's voor het gebouw en de collectie kunnen worden gereduceerd. Klimaatmetingen, bouwfysische opnamen en gebruikerservaringen zijn handige hulpmiddelen.

7 - Op een plattegrond worden de klimaatzones ingetekend. Vaak worden vier zones onderscheiden:
 - collectie – geen mens (depot);
 - mens – geen collectie (openbare ruimte);
 - collectie – mens (tentoonstellingsruimte);
 - geen mens – geen collectie (technische ruimte).
 Voor elke zone worden de klimaat-eisen voor de collectie, gebouw en gebruiker gewogen en een acceptabele bandbreedte (eventueel met een acceptabele seizoensfluctuatie voor RV en T) vastgelegd.

8 - Verschillende combinaties van bouwfysische en installatietechnische aanpassingen worden bedacht om het gewenste binnenklimaat (stap 7) te realiseren. Het effect van de verschillende klimaatstrategieën op de culturele waarden wordt bestudeerd. Voor elke optie wordt bekeken hoe de gebouw- en collectiewaarden worden beïnvloed.

9 - De verschillende strategieën worden met behulp van een kosten-batenanalyse gewogen. Voor elke strategie wordt gekeken in welke mate de doelen uit stap 1 gerealiseerd worden. Zo wordt geprobeerd om met de uiteindelijke keuze zoveel mogelijke doelen te verwezenlijken.

Figuur 1. De negen stappen van het besluitvormingsproces om te komen tot een keuze van klimatisering waarmee de meeste doelen worden gerealiseerd.

comforteisen beïnvloeden daarentegen, binnen de grenzen die al gelden voor collecties, vooral het niveau van de binnentemperatuur. Eisen betreffende gebouwbehoud, zeker in het geval van historische gebouwen, bepalen vooral de maximaal toelaatbare verschillen tussen het binnen- en buitenklimaat, en daarmee de gewenste seizoensaanpassingen voor T en RV.

Dynamisch klimatiseren is klimatiseren op basis van gecontroleerde fluctuaties en toegestane bandbreedtes voor T en RV en is een effectieve manier om de energievraag te beperken en tevens een optimale balans te bereiken tussen collectiebehoud, thermisch comfort en gebouwbehoud.

Conditioneren

Het actief conditioneren van de lucht wordt gerealiseerd door verschillende secties in de luchtbehandelingskast, zie figuur 2. De volgende processen komen vaak voor in luchtbehandelingskasten in musea en andere erfgoedinstellingen: voorfiltering, voorverwarmen, koelen/ontvochtigen, bevochtigen, luchtdrukopbouw, naverwarmen, nafilteren.

Voorfiltratie

De eerste fase van het filtratieproces gebeurt door voorfilters. Deze filters zijn bedoeld om deeltjes en stof af te vangen zodat vervuiling van de LBK-componenten wordt beperkt en om de levensduur van dure fijnstoffilters te verlengen. Er dienen ten minste F7-filters te worden toegepast die 50% van de deeltjes in de grootte van 3 tot 10 micrometer afvangen. Betere voorfilters zijn beschikbaar, maar leiden tot hogere onderhoudskosten en energiegebruik.

Koelen

Koelen moet ervoor zorgen dat de ruimtetemperatuur niet boven de maximum geëiste waarde komt. In de regeling dient echter ook opgenomen te worden dat de inblaastemperatuur niet onder een bepaalde grenswaarde komt, bijvoorbeeld 18°C.

Koelen wordt bereikt door een koelmedium (vaak gekoeld water) door een warmtewisselaar (koelbatterij) te sturen. In die koelbatterij wordt warmte van de lucht overgedragen aan het koelmedium. De koelcapaciteit wordt bepaald door de aanvoertemperatuur van het koelmedium, de volumestroom van het koelmedium, en de karakteristieken van de koelbatterij.

Voor de koeling van voelbare warmte heeft het water een temperatuur van 10-12°C – het zogeheten hogetemperatuurkoelen, wat een energie-efficiëntere opwekking mogelijk maakt. De koelcapaciteit bepaalt met hoeveel graden de temperatuur van de lucht verlaagd kan worden. Gekoeld water wordt vaak opgewekt door een koelmachine of een warmtepomp. De meest efficiënte manier om lucht direct te koelen is met koelwater uit een Warmte-Koude-Opslag (WKO). Periodiek onderhoud van de

warmtewisselaars is essentieel, omdat ondanks de luchtfiltratie vervuiling van het warmtewisselaaroppervlak kan optreden, wat de efficiëntie achteruit doet gaan.

Ontvochtigen

Ontvochtiging van de binnenlucht wordt in Nederland meestal gerealiseerd door middel van koelen. De lucht wordt gekoeld tot onder de dauwpunttemperatuur, waardoor de relatieve luchtvochtigheid een waarde van 100% bereikt en er condens ontstaat. De lucht wordt vervolgens naverwarmd, zodat een acceptabele inblaastemperatuur wordt bereikt. Mede hierdoor vormt ontvochtigen een groot aandeel van het totale energiegebruik. Bovendien is een koud koelmedium, bijvoorbeeld gekoeld water van 2-6°C, nodig om voldoende te kunnen ontvochtigen, waardoor de opwekking minder energie-efficiënt is dan bij de eerdergenoemde hogetemperatuurkoeling.

In principe is het gedeelte van het koelproces tot aan het dauwpunt een noodzakelijk kwaad, want pas onder het dauwpunt treedt effectieve ontvochtiging op. De verhouding tussen de koelenergie tot aan het dauwpunt en de koelenergie om daadwerkelijk te ontvochtigen is vaak heel ongunstig. Dat wil zeggen dat er relatief veel energie nodig is om überhaupt te kunnen beginnen met ontvochtigen.

Om deze verhouding te verbeteren en de efficiëntie van het koelproces te verhogen kan een bypass opgenomen worden in de ontvochtigungssectie. Een aandeel van de lucht kan dan door de koelbatterij worden geleid en zal sterk gekoeld worden om zoveel mogelijk vocht eruit te halen. Het resterende aandeel van de lucht zal door de bypass geleid worden, en niet door de koelbatterij. De gewenste RV kan dan geregeld worden op basis van de verhouding tussen de hoeveelheid lucht die door de koelbatterij geleid wordt en de hoeveelheid lucht die door de bypass geleid wordt.



Het gewenste oppervlak voor technische ruimten in musea kan behoorlijk oplopen, want de Luchtbehandelingskasten zijn groot.

Een andere manier om de energie-efficiëntie van het ontvochtigingsproces te verbeteren is het gebruik van de condensorwarmte, die afkomstig is van het koelproces, om de lucht na te verwarmen.

Wanneer de gewenste RV laag is, ongeveer 30% tot 35%, of beheersing van de RV plaatsvindt onder lage temperatuurcondities zoals depots voor bijvoorbeeld fotografisch materiaal, kan ontvochtiging door middel van adsorptie een efficiëntere oplossing zijn dan lagetemperatuurkoeling. Adsorptiedroging elimineert de behoefte aan diepkoelen en naverwarmen, twee processen die veel energie vragen. Adsorptiematerialen zoals silica dienen geregenereerd te worden met warmte. De efficiëntie van het proces hangt af van de herkomst van deze warmte. Als restwarmte gebruikt kan worden, kan adsorptiedroging een heel efficiënte manier van ontvochtigen zijn.

Bevochtigen

Actieve bevochtiging is nodig om de ondergrens voor RV te kunnen beheersen door middel van het verhogen van het absolute vochtgehalte van de lucht. De combinatie van warmte en vocht leidt tot het risico van bacterie- en schimmelgroei. Daarom is een goed ontwerp en functioneren van de bevochtigingsinstallatie van groot belang. Stoombevochtiging wordt vaak toegepast, omdat het een hoge mate van hygiëne, effectiviteit, en betrouwbaarheid biedt. Daarentegen verbruikt stoombevochtiging veel elektrische energie.

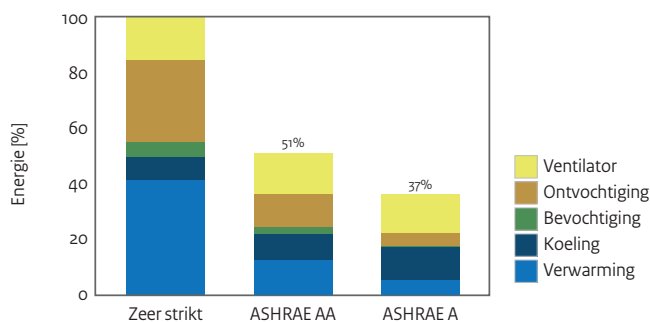
Een ultrasoonbevochtiger vernevelt water door ultrasonische trillingen. Bij hogedrukverneveling wordt water door heel kleine spuitmondjes geperst, waardoor het water vernevelt.

Deze mist bestaat uit grotere waterdeeltjes in vergelijking tot bevochtiging door middel van stoom, waardoor het risico bestaat op nevelneerslag, hetgeen kan leiden tot corrosie in de LBK. Bij een goede werking zullen de neveldeeltjes verdampen in de luchtstroom. Ultrasoonbevochtiging en hogedrukverneveling is energiezuiniger dan stoombevochtiging. Maar voor een goede mate van hygiëne en betrouwbaarheid is een waterinstallatie nodig die het water ontdoet van zouten. Deze extra installatie kan de aanschaf- en exploitatiekosten van ultrasoonbevochtiging en hogedrukverneveling hoger maken dan die van stoombevochtiging.

Ventilator

Luchtbehandeling vereist luchtstroming en daarvoor zijn drukverschillen nodig. Lucht stroomt immers van een hogedrukgebied naar een lagedrukgebied. In LBK's worden centrifugaalventilatoren toegepast met als primair doel het creëren van luchtdruk. De regeling van ventilatoren kan uiteenlopen van simpele aan-uitregelingen tot toerengeregelde ventilatoren op basis van frequentieregelaars.

Naast de gewenste luchtstroming ontstaat ook opwarming van de lucht door efficiëntieverliezen, dus warmteafgifte, van de motor en de ventilator zelf. De luchttemperatuur na de ventilator kan wel 1,9°C hoger zijn dan voor de ventilator onder normale bedrijfscondities. De hoeveelheid extra warmte die hiermee aan de luchtstroom wordt toegevoegd, kan aanzienlijk zijn. Vooral ook omdat in musea hoge ventilatievouden worden toegepast: een circulatievoud van 8 h⁻¹ impliceert dat het gehele luchtvolume van de ruimte acht keer per uur de ventilator passeert en dus opwarmt. De ventilatorenergie vormt vaak een behoorlijk aandeel van het totale energiegebruik voor luchtbehandeling, vooral als het toerental niet variabel is en de ventilator 24 uur per dag draait. Naarmate het energiegebruik voor conditionering afneemt door besparingsmaatregelen, bijvoorbeeld doordat het binnenklimaat geconditioneerd is volgens een minder strikte klimaatklasse, wordt het aandeel van de ventilatorenergie relatief groter, tot wel 40% van het totale energiegebruik voor luchtbehandeling, zie figuur 3.



Figuur 3. Aandeel van de ventilatorenergie (geel) van het totale energiegebruik voor luchtbehandeling voor de klimaatklassen 'zeer strikt' (21°C en 50-55% RV), 'strikt' (ASHRAE-klasse AA, 45-55% RV) en 'minder strikt' (ASHRAE-klasse A, 40-60% RV).

Een toerengeregelde ventilator heeft dus twee voordelen: (1) een besparing op het energiegebruik wanneer de hoeveelheid luchtstroming omlaag mag, bijvoorbeeld gedurende de nacht wanneer interne verstoringen, zoals bezoekers en verlichting, afwezig zijn; (2) vermindering van de opwarming van de luchtstroom door minder efficiëntieverliezen. In aanvulling hierop wordt het onderhoudsinterval verlengd doordat gemiddeld minder lucht door de LBK stroomt dan bij een constant-volumesysteem.

Verwarmen

Analoog aan koelen heeft verwarmen het primaire doel te zorgen dat de ruimtetemperatuur niet onder de minimum geëiste waarde komt. Daarbij dient de inblaasttemperatuur niet boven een bepaalde grenswaarde te komen, bijvoorbeeld 26°C. Het secundaire doel van de verwarming in een luchtbehandelingskast is om te zorgen dat de inblaasttemperatuur niet onder de minimum gewenste waarde komt wanneer ontvochtiging plaatsvindt door middel van diepkoelen.

Verwarming wordt meestal gerealiseerd door middel van een warmtewisselaar (verwarmingsbatterij genoemd) waardoor verwarmd water stroomt. Dit verwarmde water is vaak opgewekt door een gasgestookte CV-ketel, een warmtepomp, of een combinatie hiervan. In dit laatste geval kan de warmtepomp eerst ingezet worden en kan de CV-ketel vervolgens het water verder verwarmen om piekvermogens te bereiken, bijvoorbeeld in de winter. Daarnaast kan verwarming onmiddellijk elektrisch plaatsvinden. Vanuit het oogpunt van energiekosten heeft dit nog niet de voorkeur, tenzij lokaal elektriciteit opgewekt kan worden. Naast de genoemde elektrische verwarming, biedt de inzet van restwarmte potentie.

Periodiek onderhoud van warmtewisselaars is essentieel. Ondanks de luchtfiltratie treedt vervuiling van het oppervlak op waardoor de efficiëntie verminderd.

Fijnfiltratie

Fijnstoffilters filteren heel kleine deeltjes uit de lucht. De prestatie hangt af van het type filter. In de meeste situaties voldoet een filter dat 85% tot 90% van de deeltjes tot 0,3 micrometer afvangt (F9). Indien nodig kunnen HEPA-filters toegepast worden die tot 99,97% van de deeltjes kunnen afvangen tot een grootte van 0,3 micrometer. Alleen, bij het gebruik van HEPA-filters is het aan te raden hogere eisen te stellen aan de voorfilters om de levensduur van de dure HEPA-filters te verlengen. In sommige gevallen worden moleculaire filters zoals actieve-koolstoffilters of chemisch actieve filters toegepast om schadelijke gassen af te vangen.

Elektrostatische filters kunnen toegepast worden om schimmels en microben af te vangen, maar een bijwerking van deze filters is het genereren van ozon, wat weer dient te worden verwijderd door actieve koolstoffilters.

In het algemeen kan gezegd worden dat hoge eisen aan filtratie, die leiden tot de toepassing van bijvoorbeeld elektrostatische filters en koolstoffilters, gepaard gaan met hoge investeringen en onderhoudskosten en een verhoogd energiegebruik. Elke filter in de luchtstroom zorgt voor een toename van de ventilatorcapaciteit, omdat filters zorgen voor een grotere weerstand in de luchtstroom. Meer ventilatorcapaciteit betekent meer energieverbruik. Het is daarom van belang weloverwogen beslissingen te nemen met betrekking tot het gewenste prestatieniveau van filtratie.

Energieopslag (WKO)

Voor het renderen van een warmte-koude-opslag (WKO) in musea is het belangrijk dat er ongeveer evenveel warmte- als koudevraag is. Als dit niet het geval is ontstaat een onbalans, wat concreet betekent dat de ene bron uitput en de andere verzadigt. Dat mag niet in verband met vergunningen waarin eisen zijn gesteld aan de

maximale en minimale bodemtemperatuur. Maar let op, WKO's functioneren vaak niet goed voor musea. In veel gevallen is de koudevraag groter dan de warmtevraag. Deze onbalans ontstaat doordat naast het koelen en verwarmen ook koeling wordt toegepast voor ontvochtiging, terwijl bevochtiging vaak alleen elektrische energie vraagt, bijvoorbeeld voor stoomgeneratoren of ultrasoonbevochtigers. Het ontstaan van een onbalans betekent voor veel musea dat additionele maatregelen getroffen dienen te worden om de balans te herstellen, het zogenaamde regenereren. Dit resulteert echter vaak in een minder efficiënt systeem dan beoogd en dus hogere energiekosten dan verwacht.



De filters in luchtbehandelingskasten zorgen voor een drukverschil. Hoe meer filters worden toegepast hoe groter dit drukverschil en hoe hoger de frequentie van de ventilator is en hoe meer energie verbruikt wordt.

De regeling

Naast de keuzes die gemaakt worden op installatieniveau, zoals het type filters, of de recirculatievoud, is er een aantal meer fundamentele keuzes dat grote invloed kan hebben op de efficiëntie van de klimaatbeheersing. Dit geldt in het bijzonder voor de wijze waarop klimaatspecificaties worden vertaald naar een klimaatregeling. Specifiek wordt hier ingegaan op toegestane bandbreedtes en seizoensaanpassingen van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid.

Bandbreedte of één setpoint met dode zone?

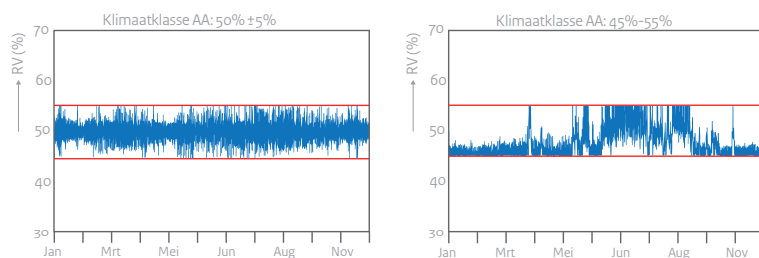
Zo is de keuze om het binnenklimaat te conditioneren rondom één setpoint, beschreven met bijvoorbeeld $50 \pm 5\%$ voor RV, of door het toepassen van een bandbreedte, bijvoorbeeld 45-55%, heel bepalend voor het uiteindelijke energiegebruik.

De conditionering op één setpoint voor T of RV leidt tot intensief corrigeren van het binnenklimaat, vaak resulterend in afwisselend verwarmen en koelen, of bevochtigen en ontvochtigen. Dit leidt doorgaans tot een hoog energiegebruik, een grote belasting van de installaties met een verkorte onderhoudsinterval en levensduur tot gevolg, een vergroot risico op gebouwschade en discomfort voor staf en bezoekers.

Om een rustiger regelgedrag te realiseren en daarmee een hoge belasting op de installatie te verminderen, kan het conditioneren rondom één setpoint gecombineerd worden met een zogeheten dode zone. Die wordt geformuleerd als een setpoint met een maximaal toegestane afwijking, bijvoorbeeld $50 \pm 5\%$ RV. Figuur 4 (links) laat een mogelijk verloop zien van de relatieve luchtvochtigheid bij een instelling van $50 \pm 5\%$ RV. Het voornaamste voordeel is de lagere belasting van regelkleppen, maar biedt niet de meest energiezuinige oplossing.

In plaats van steeds terug te regelen naar één setpoint kan een bandbreedte worden toegepast waarbinnen de temperatuur of relatieve luchtvochtigheid vrij mag variëren, wat een hogere energie-efficiëntie mogelijk maakt. De bandbreedte wordt gerealiseerd door middel van twee setpoints voor de temperatuur en twee setpoints voor de relatieve luchtvochtigheid: deze setpoints vormen de boven- en de ondergrenzen, zie figuur 1 (rechts). Wanneer de temperatuur of RV binnen deze grenzen variëren, vindt geen actieve conditionering plaats. Deze regeling heeft een aantal implicaties:

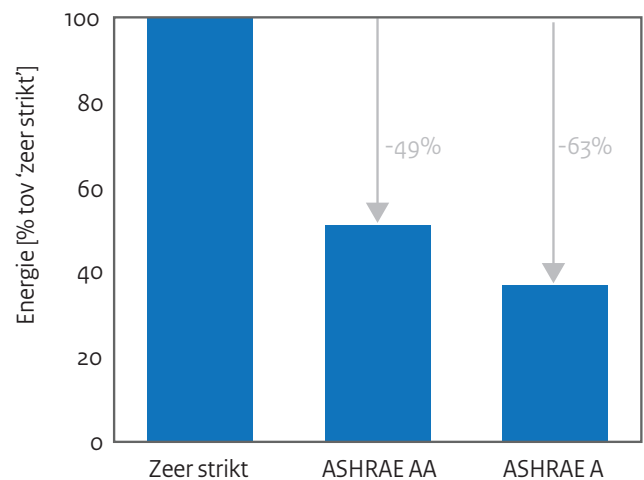
- de thermische en hygrische massa van het gebouw en de collectie worden effectief benut. Passieve maatregelen, zoals thermische massa, kan immers pas effect hebben bij variatie van het binnenklimaat;
- de effecten van interne warmte- en vochtbronnen hoeven niet direct gemitigeerd te worden en kunnen vaak zelfs een positief effect hebben op het binnenklimaat; Denk bijvoorbeeld aan het benutten van de warmte van lichtbronnen of bezoekers in de winter;
- de luchtbehandelingsinstallatie zal minder vaak hoeven te corrigeren.



Figuur 4. De relatieve luchtvochtigheid dient bijvoorbeeld beheerst te worden tussen de grenzen 45% en 55%. Dit kan middels (a) een dode zone, notatie $50 \pm 5\%$, en (b) twee setpoints die een boven- en ondergrens vormen waarbinnen de RV vrij kan variëren, notatie 45-55%. Optie b is energiezuiniger dan optie a.

Deze implicaties hebben drie belangrijke resultaten tot gevolg:

- een lagere belasting van de klimaatinstallatie en dus een verwacht langer onderhoudsinterval;
- een verlengde levensduur van de installatiecomponenten;
- een aanzienlijk lager energiegebruik.



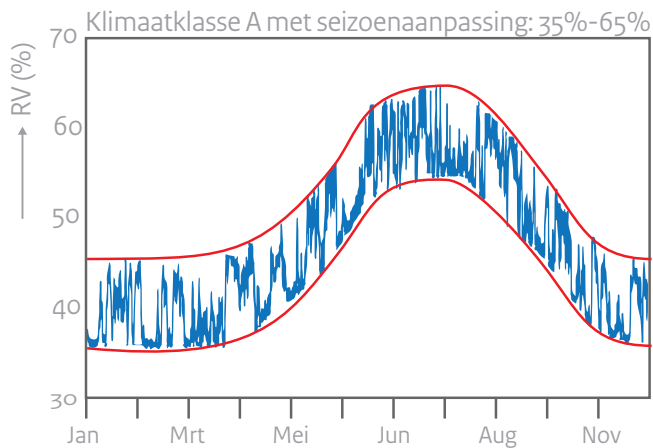
Figuur 5. Relatief energiegebruik bij conditioneren volgens ASHRAE-klasse AA geïmplementeerd middels een dode zone (zeer strikt = $50 \pm 5\%$, zie figuur 4), volgens ASHRAE-klasse AA geïmplementeerd als bandbreedte (AA = 45-55%, zie figuur 4b), en volgens ASHRAE-klasse A met seizoensvariatie (A).

Figuur 5 laat zien dat conditioneren op basis van een bandbreedte (AA) tot ongeveer 50% kan besparen ten opzichte van conditioneren rondom een vast setpoint (zeer strikt) met een dode zone.

Klimaatpecificaties zijn een essentieel onderdeel van een Programma van Eisen (PvE). In het PvE worden klimaatpecificaties vaak genoteerd als $x \pm y$, bijvoorbeeld $50 \pm 5\%$ voor RV. Mogelijk heeft de museummedewerker dit bedoeld als 'de relatieve luchtvochtigheid mag tussen de 45% en 55% variëren'. Echter, de installatietechnicus zal dit hoogstwaarschijnlijk regeltechnisch implementeren als een enkel setpoint van 50% met een dode zone van bijvoorbeeld $\pm 2\%$ RV om er zeker van te zijn dat het gerealiseerde klimaat binnen de specificaties ($\pm 5\%$ RV) valt. Zoals aangetoond, heeft dit grote consequenties voor het energiegebruik. Het is daarom essentieel de juiste notatie te hanteren voor de klimaatpecificaties. De notatie x_1-x_2 , bijvoorbeeld 45-55%, is sterk aan te bevelen zoals eerder is uitgelegd.

Seizoensvariatie

Naast de toepassing van een bandbreedte voor temperatuur en relatieve luchtvochtigheid, bieden seizoensvariaties de mogelijkheid om de energie-efficiëntie van de klimaatbeheersing te verhogen. Figuur 6 laat een mogelijk verloop zien van de RV onder behoud van seizoensvariatie.



Figuur 6. Mogelijk verloop van de relatieve luchtvochtigheid door het toepassen van seizoensvariatie.

Naast energie-efficiënt zijn seizoensvariaties in relatieve luchtvochtigheid en temperatuur dé manier om het risico op vochtgerelateerde schade aan het gebouw te voorkomen. Dit is voor de museale omgeving van groot belang, omdat ongeveer 90% van de musea in een historisch gebouw gehuisvest is. De gevels van de gebouwen zijn vaak niet geïsoleerd, waardoor de buitenmuren relatief koud zijn in de winter. Uitgaande van een luchtconditie in de expositiezaal van bijvoorbeeld 21°C en 50% RV, bedraagt het dauwpunt zo'n 10°C. Als de temperatuur van een gevel, venster of ander gebouwdeel kouder wordt dan 10°C, dan zal er oppervlaktecondensatie optreden. Naast een versnelde aantasting van bijvoorbeeld het verfwerk, kunnen bij houten constructiedelen of kozijnen bij langdurige condensatie houtrot en schimmelgroei ontstaan, zie figuur 7. Het verlagen in de winter naar 18°C en 40% RV verlaagt het dauwpunt al naar 4°C, waarmee het risico op vochtschade fors verlaagd wordt. Ook als de lucht niet tot het dauwpunt afkoelt, en condensatie dus uitblijft, kan schade ontstaan in de vorm van schimmelgroei wanneer de relatieve luchtvochtigheid lokaal langdurig boven de 70% blijft.

Snelheid van seizoensvariaties

Zoals weergegeven in figuur 6 dienen seizoensvariaties geleidelijk plaats te vinden, zodat objecten zich kunnen aanpassen aan de langzaam veranderende condities. Dat is belangrijker voor veranderingen van relatieve luchtvochtigheid dan van temperatuur. Welke variatie van relatieve luchtvochtigheid is toegestaan per seizoen (drie maanden), hangt af van de collectie. Het doel van de langzame variatie is immers de beperking van vochtgradiënten in de objecten om mechanische schade, zoals vervormingen en scheuren te voorkomen.

Als voorbeeld voor een specificatie van seizoensvariatie kan 10% genoemd worden: een basissituatie met een bandbreedte van 45-55% kan in de winter verlaagd worden naar een bandbreedte van 35-45% en in de zomer verhoogd naar een bandbreedte van



Figuur 7. Een museaal binnenklimaat met bevochtiging brengt vaak risico's met zich mee voor historische gebouwen. Zo leidt condensatie van waterdamp tot houtrot van bijvoorbeeld constructiedelen of kozijnen.

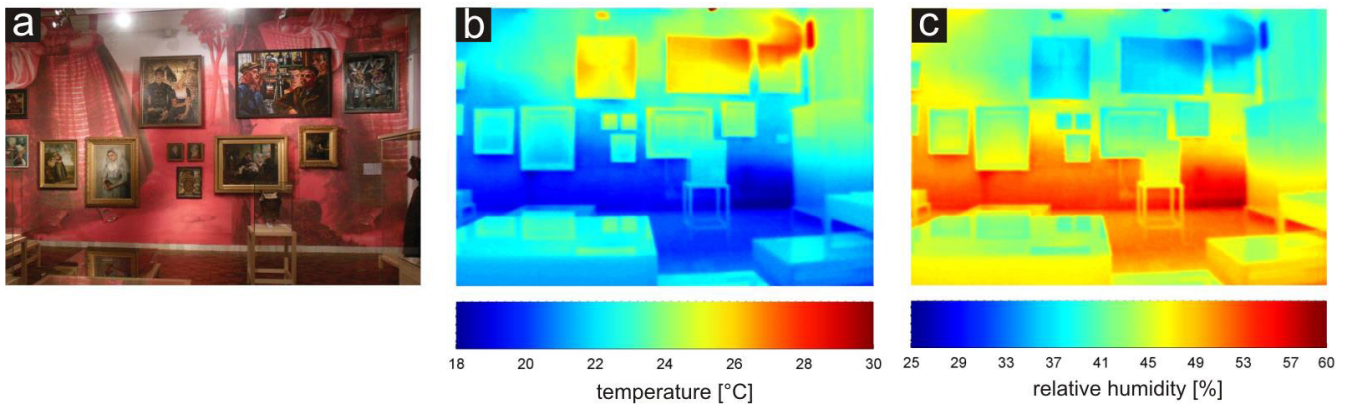
55-65%. Dit voorbeeld laat zien dat de toegestane bandbreedte voor kortdurende fluctuaties blijft gehandhaafd, maar dat de bandbreedte gedurende het jaar verschuift. Om te zorgen dat de seizoensvariatie geleidelijk plaatsvindt, dient de specificatie van bijv. 10% geïmplementeerd te worden als een grens voor de snelheid van verandering: de bandbreedte mag niet sneller dan 10% per 90 dagen (een seizoen) verschuiven. Dit impliceert dat de grootte van de verandering ook niet meer zal zijn dan 10% per 90 dagen.

Dynamische setpointcontrole

De combinatie van bandbreedtes en seizoensvariatie vormt een dynamische setpointcontrole die zowel voor temperatuur als RV toegepast kan worden. Figuur 3 laat de grote besparingspotentie van dynamische klimaatbeheersing volgens ASHRAE klimaatklasse A zien ten opzichte van een strikt binnenklimaat zonder bandbreedtes en seizoensaanpassingen. Collectie-eisen vormen de randvoorwaarden voor de uurlijkse berekening van de setpoints voor RV. Voor temperatuur zijn naast collectie-eisen ook thermische comforteisen belangrijke randvoorwaarden voor culturele instellingen met een publieksfunctie, bijvoorbeeld musea.

Naast de genoemde energie-efficiëntie, en dientengevolge kostenbesparing, en de verkleining van het risico op vochtschade aan het gebouw, volgt een aantal andere mogelijke voordelen van seizoensaanpassingen:

- verlaging van het risico op collectieschade in het geval van een defecte klimaatbeheersing, doordat het binnenklimaat meer afgestemd is op het buitenklimaat en de mogelijke verandering kleiner en minder abrupt zal zijn;
- verbeterd thermisch comfort doordat de binnentemperatuur beter is aangepast op de buitencondities, dat wil zeggen dat de binnentemperatuur iets lager in de winter en iets hoger in de zomer is;



Figuur 8. Schilderijen hangen aan een wand; b. Oppervlaktetemperatuur van de wand en de schilderijen; c. Relatieve luchtvochtigheid nabij de wand en de schilderijen.

- minder belasting van de installatie, bijvoorbeeld regelkleppen, doordat het binnenklimaat gedurende een bepaalde tijd van het jaar tussen de grenzen varieert en de installatie dus minder vaak actief dient bij te sturen.

Circulatie: recirculatie en ventilatie

Inblaascondities

Vaak wordt een master-slaveregeling toegepast om de binnenluchttemperatuur en RV te regelen. De masterregeling berekent de gewenste inblaasconditie op basis van het verschil tussen de gewenste en heersende binnencondities. De slaveregeling bestaat uit verscheidene regelaars die de aansturing van de componenten in de luchtbehandelingskast (LBK) bepalen op basis van het verschil tussen de gewenste en de heersende inblaasconditie. Een belangrijke denkfout kan zijn dat de inblaascondities gelijk zijn aan de beoogde ruimtecondities, oftewel gelijk aan de setpoints voor T en RV. Bijvoorbeeld, bij een gewenste binnentemperatuur van 21°C zou de inblaastemperatuur ook 21°C zijn. Dat is zeker niet het geval: de inblaascondities variëren om klimaatverstoringen op te vangen.

Om grote verschillen tussen inblaascondities en de ruimtecondities te voorkomen, worden de inblaascondities tussen een boven- en een ondergrens gelimiteerd. Bijvoorbeeld: de verwarmers in de LBK zorgt dat de inblaaslucht niet kouder is dan 18°C en de koeler in de LBK zorgt dat de inblaaslucht niet warmer is dan 26°C. Deze afwijkingen in temperatuur zijn dan ook de voornaamste redenen om de collectie niet in de inblaasluchtstroom te plaatsen. Figuur 8 laat het effect zien van de inblaaslucht op de T en RV nabij schilderijen die te dicht bij de inblaaslocatie zijn gepositioneerd. Het is dus van groot belang dat de inblaasluchtstroom niet direct op de collectie gericht is. Ook is het af te raden via de vloer in te blazen in verband met vervuiling die meegenomen wordt in de luchtcirculatie vanuit het loopgebied richting de collectie.

Recirculatie

Recirculatie omvat het aandeel van de afvoerlucht uit de ruimte dat niet naar buiten is geblazen, maar wordt teruggevoerd naar de LBK. Circulatie omvat de combinatie van recirculatie en ventilatie (verse buitenlucht) en vormt de totale luchtstroom die door de LBK is geleid. Tijdens de circulatie van de lucht door de LBK kunnen de luchtcondities gecorrigeerd worden en kunnen verontreinigingen uit de luchtstroom gefilterd worden. Het primaire doel van recirculatie is het realiseren van veel luchtbeweging om stilstaande lucht te voorkomen. Stilstaande lucht kan immers leiden tot microklimaten, lokale verschillen in temperatuur en vocht. Bovendien is het risico op schimmelgroei groter bij weinig luchtbeweging. Het aantal keren per tijdseenheid dat het ruimtevolumen door de LBK is gecirculeerd is het circulatievoud. Vaak wordt een circulatievoud aangehouden van 6 tot 8 per uur, oftewel, het totale volume van de ruimte wordt zes tot acht keer per uur volledig vervangen door oude lucht.

Ventilatie

Ventilatie is het aandeel verse buitenlucht dat is toegevoegd aan de gerecirculeerde lucht. Vaak zijn de buitenluchtcondities verre van gelijk aan de gewenste binnenluchtcondities. In dat geval zal de toevoer van buitenlucht verdere conditionering vereisen om deze afwijking te corrigeren. Dit komt erop neer dat gedurende het grootste deel van het jaar, de toevoer van buitenlucht leidt tot energiegebruik. Het – voor zover mogelijk – minimaliseren van de benodigde hoeveelheid buitenlucht is dus een energiebesparende maatregel.

Dat is in musea te bereiken door een ventilatieregeling op basis van een CO₂-gestuurde buitenluchtoevoer: wanneer het CO₂-niveau boven een bepaalde waarde stijgt, zal de buitenluchtklep open gestuurd worden, waardoor een gedoseerde hoeveelheid verse buitenlucht toegevoerd wordt. CO₂ moet niet gezien worden als een indicator voor andere gassen die de gezondheid en/of het collectiebehoud negatief zouden kunnen beïnvloeden, zoals vluchtige organische verbindingen (VOC's) die geïmitteerd

worden door organische collecties inclusief hout, papier en leer. Voor musea kan CO₂-gestuurde ventilatie, in vergelijking met een vast aandeel buitenlucht, resulteren in aanzienlijke energiebesparingen.

Overdruk

Overdruk kan een maatregel zijn om infiltratie te beperken, maar kent ook risico's. Overdruk in historische gebouwen is moeilijk te realiseren door de vaak geringe luchtdichtheid van de gevel en gebouwconstructie. De overdruk die de ventilator moet realiseren kost extra energie, maar kan ook leiden tot vochtschade aan het gebouw doordat in de winter de verwarmde en bevochtigde binnenlucht door kieren en spleten exfiltreert door de overdruk. Deze lucht koelt gedurende de route door de gevel af, hetgeen kan resulteren in condensatie van de waterdamp in de lucht tot vocht in de gevelconstructie.

Minder techniekafhankelijk: passieve maatregelen

Actieve klimaatbeheersing door middel van luchtbehandeling gaat gepaard met een zeker mate van techniekafhankelijkheid: geregeld onderhoud is noodzakelijk voor een betrouwbare werking, maar desondanks kan de techniek een museum in de steek laten. In dat geval kunnen ontoelaatbare variaties optreden in de luchttemperatuur of RV. Daarnaast leidt actief conditioneren tot energiegebruik. Passieve maatregelen kunnen bijdragen aan de verlaging van het energiegebruik, maar ook de techniekafhankelijkheid verminderen.

Zonwering, isolatie, en de verhoging van de luchtdichtheid van de gevel zijn voorbeelden van passieve maatregelen die de invloeden van het buitenklimaat op het binnenklimaat mitigeren. Voldoende beschikbare thermische en hygrische massa mitigeren naast externe invloeden ook de interne invloeden van bezoekers en audiovisuele apparatuur.

Thermische en hygrische massa kunnen een groot effect hebben op de beperking van variaties in temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid en als een gevolg daarvan een verlaging van het energiegebruik en techniekafhankelijkheid. Belangrijk om te beseffen is dat in het geval van strikte klimaatbeheersing de thermische en hygrische massa niet aangesproken worden en de klimaatinstallatie al het werk doet en de massa dus onbenut blijft. Enige variatie in het binnenklimaat is essentieel om te profiteren van energiebesparing en verminderde techniekafhankelijkheid door gebruik te maken van het dempende effect van thermische en hygrische massa. Het concept van dynamisch klimatiseren op basis van bandbreedtes en eventueel seizoensvariaties kan daarin voorzien.

Verder lezen

Ankersmit, B. (2010), Meten van het binnenklimaat: waarom, waar? Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Ankersmit, B., et al. (2009), Klimaatwerk. Richtlijnen voor het museale binnenklimaat, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Ankersmit, B., Stappers, M. (2016), Managing Indoor Climate Risks in Museums, Cultural Heritage Science, Springer.

Kramer, R.P., Schijndel, van A.W.M., Schellen, H.L. (2017), 'Dynamic setpoint control for museum indoor climate conditioning integrating collection and comfort requirements: Developments and energy impact for Europe', Building and Environment 118, p. 14-31.

Stappers, M. (2016), Klimaatbeheersing in monumentale kerken, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Hebt u vragen?

Bel dan 033 - 421 7 456 of stuur een mail naar info@cultureelerfgoed.nl.
www.cultureelerfgoed.nl

Tekst: Rick Kramer en Edgar Neuhaus (Ingenieursbureau Physitec), Bart Ankersmit en Marc Stappers (RCE).

Afbeeldingen: Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, tenzij anders vermeld.

Aan deze uitgave kunnen geen rechten worden ontleend.

Juli 2018

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Smallepad 5, 3811 MG Amersfoort.

Met kennis en advies geeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed de toekomst een verleden.