

VERDRINGINGSVENTILATIE IN MUSEA

ONDERZOEK AAN DE HAND VAN EEN CASUS

 KLIMAATNETWERK

Het binnenklimaat in een recent gerenoveerd Nederlands museum¹ voldoet niet aan de in het bestek gestelde criteria en aan richtlijnen voor collectiebehoud, hoewel er een uitgebreide klimaatinstallatie in het gebouw aanwezig is. Bovendien laat de luchtkwaliteit in enkele zalen te wensen over bij hoge bezoekersaantallen. Om de situatie te beoordelen is door de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) een meetprogramma opgestart om onder andere luchttemperatuur en luchtvochtigheid op meerdere plaatsen langdurig in de tentoonstellingszalen te meten. Ook is gebruik gemaakt van simulatiemodellen om verbeteropties te onderzoeken.



ir. E. (Edgar) Neuhaus,
Ingenieursbureau
PHYSITEC, Rotterdam



ir. C.E.E. (Cor) Pernot,
Cor Pernot Consulting,
Heeze



ing. M.A.P. (Marcel) van
Aarle, Technische Univer-
siteit Eindhoven, faculteit
Bouwkunde



dr. ir. H.L. (Henk) Schellen,
Technische Universiteit
Eindhoven, faculteit Bouw-
kunde

Meetresultaten tonen aan dat de problemen vooral veroorzaakt worden door het disfunctioneren van het bevochtigingssysteem van de klimaatinstallatie. Bovendien blijkt de bevochtigingscapaciteit krap bemeten te zijn. Toetsing van de meetresultaten aan de in het Programma van Eisen gestelde eisen, welke zijn gebaseerd op de voormalige eisen van het Instituut Collectie Nederland [1], laat grote verschillen zien. Wordt het binnenklimaat getoetst aan klimaatrichtlijn ASHRAE B [2], wat voor een dergelijk monumentaal gebouw realistisch is, dan is het binnenklimaat, afgezien van de droge perioden veroorzaakt door het disfunctioneren van de klimaatinstallatie, nog niet slecht te noemen. Uit literatuur en metingen blijkt dat het toegepaste ventilatieprincipe in de tentoonstellingszalen, verdringingsventilatie in combinatie met een variabel volume systeem (VAV), per definitie niet geschikt is om een stabiel en homogeen binnenklimaat te creëren en daarom een ongelukkige systeemkeuze is. Verdringingsventilatie leidt namelijk tot een hygrothermische stratificatie over de hoogte van de ruimte en kunstobjecten. Een VAV-systeem zorgt daarnaast voor een slecht regelbare vochtbeheersing en luchtkwaliteit. Aangezien het veranderen van het ventilatiesysteem financieel en technisch niet haalbaar is, is aanbevolen de huidige situatie waar mogelijk te optimaliseren. Ondanks de ongelukkige systeemkeuze is op deze wijze een redelijk acceptabel binnenklimaat haalbaar, zonder al te grote temperatuur- en RV-gradiënten.

INLEIDING

Probleemstelling

Voor het behoud van de collectie is het van groot belang dat er in de expositieruimten in het gebouw museale klimaatcondities heersen. Metingen, uitgevoerd door het Instituut Collectie Nederland, wezen echter uit dat dit niet het geval is. Gedurende de winterperiode van 2005-2006 heerste er een lage relatieve luchtvochtigheid (RV) in het museum, met gemeten minima lager dan 20%. Tevens traden er gedurende het jaar sterke fluctuaties in temperatuur en RV op. Hierdoor is er een verhoogd degradatie-

risico voor de collectie aanwezig en is het niet verantwoord om de waardevolle collectie onder deze omstandigheden tentoon te stellen.

Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is tweeledig. Enerzijds is het belangrijk te achterhalen waarom in het museum de voor collectiebehoud gewenste luchtcondities niet gehaald worden, hoewel er een klimaatinstallatie in het gebouw aanwezig is. Anderzijds bestaat twijfel over de geschiktheid van een verdringingsventilatiesysteem in combinatie met een VAV-systeem in de museale omgeving.

Methode

Om antwoord te kunnen geven op deze vragen is onderzoek uitgevoerd dat is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- literatuurstudie naar het gewenste binnenklimaat in musea, verdringingsventilatie en het VAV-systeem
- het meten van de binnenklimaatcondities gedurende minimaal een jaar
- simulatiestudie naar luchtstromingen en regeling van de klimaatinstallatie

In dit artikel worden de resultaten van de uitgevoerde literatuurstudie en de resultaten van de klimaatmetingen beschreven.

BESCHRIJVING VAN DE SITUATIE

Het gebouw

Het museum is gevestigd in een rijksmonument, dat dateert uit de 17de eeuw. In 2005 heeft het museum een uitgebreide renovatie ondergaan. Naast bouwkundige aanpassingen is er een klimaatinstallatie in het gebouw aangebracht. Het doel van de renovatie was het opwaarderen van het gebouw opdat het bouwfysisch, bouwtechnisch en inrichtingstechnisch voldoet aan de te realiseren museale inrichting. Het totale jaarlijkse bezoekersaantal bedraagt ongeveer 35.000.

¹ Het betreffende museum is op verzoek geanonimiseerd.

Werking verdringingsventilatie

Bij verdringingsventilatie wordt de verse ventilatielucht laag in de ruimte toegevoerd, met een zeer lage luchtsnelheid. De inblaasluft is koeler dan de gemiddelde ruimteluchttemperatuur, met een typische onder temperatuur van 2 tot 4K en zal zich over de vloer verspreiden. Nabij warme objecten, zoals personen, computers of printers, zal de lucht opwarmen en opstijgen. Hierbij worden de emissies van deze objecten mee naar boven afgevoerd. Op één of meerdere posities hoog in het vertrek wordt de warmere en vervuilde lucht vervolgens afgevoerd. Deze wijze van ventileren wordt succesvol toegepast in onder andere restaurants, vergaderzalen en hoge ruimten zoals theaters.



De luchtbehandelingskast is op het dak geplaatst

Het museum telt vier bouwlagen, waarvan de eerste bouwlaag ongeveer één meter onder het maaiveld ligt. De voorgevel van het gebouw is symmetrisch opgebouwd en is west-zuidwest georiënteerd. Aan deze zijde bevinden zich ook de hoofdingang van het museum en een deel van de expositiezalen. Het totale vloeroppervlak van het gebouw bedraagt circa 1.300 m² en de inhoud van het gebouw circa 5.500 m³. In het souterrain bevindt zich het depot. De expositiezalen bevinden zich op de tweede tot en met vierde bouwlaag. De luchtbehandelingskast is buiten op het dak opgesteld.

De dragende buitengevels van het gebouw zijn opgebouwd uit massief gemetselde wanden van ongeveer 0,3 meter dik, welke aan de binnenzijde zijn geïsoleerd met XPS-beplating. Deze buitenwanden zijn aan de binnenzijde voorzien van voorzetwanden, bestaande uit een multiplexbeplating die op 0,05 meter afstand van de geïsoleerde buitenwand worden geplaatst, zodat er een luchtsponw gecreëerd wordt.

De verdiepingvloeren bestaan uit houten vloerdelen op een houten balklaag. Op de zolderverdieping begint het dak. Het dak is opgebouwd uit houten spanten met een houten nageïsoleerd dakbeschot en is bedekt met lestenen.

De binnenwanden zijn afgewerkt met stucwerk of er is een voorzetwand voor geplaatst. De voorzetwanden zijn met glasvezelbehang afgewerkt. Aan de voorzetwanden zijn de schilderijen opgehangen. De oorspronkelijke houten raamkozijnen in het gebouw zijn aan de binnenzijde voorzien van voorzetbeglazing. Aan de binnenzijde van de vertrekken op de tweede bouwlaag zijn houten luiken aanwezig. Deze luiken worden buiten de openingstijden gesloten. Tussen de buitenbeglazing en de voorzetbeglazing aan de binnenzijde zijn horizontale aluminium lamellen aangebracht. Het glasoppervlak bedraagt circa 30% van de gevel.

De houten scheidingsdeuren tussen de zalen en de hal zijn voorzien van draadglas. De vloeren in de expositiezalen op de tweede en derde bouwlaag zijn voorzien van houten vloerdelen. In het souterrain, de hal en op de tweede verdieping zijn de vloeren voorzien van een linoleum vloerbekleding of ze zijn betegeld.

De collectie

De gemengde collectie van het museum bestaat voornamelijk uit schilderijen en voorwerpen die de geschiedenis van de stad weergeven. Tevens bevond zich in het museum op het moment van het onderzoek een groot aantal waardevolle kunstvoorwerpen in bruikleen. Vanwege de belangrijke collectie is een hoge kwaliteit van het museale binnenklimaat dus een vereiste.

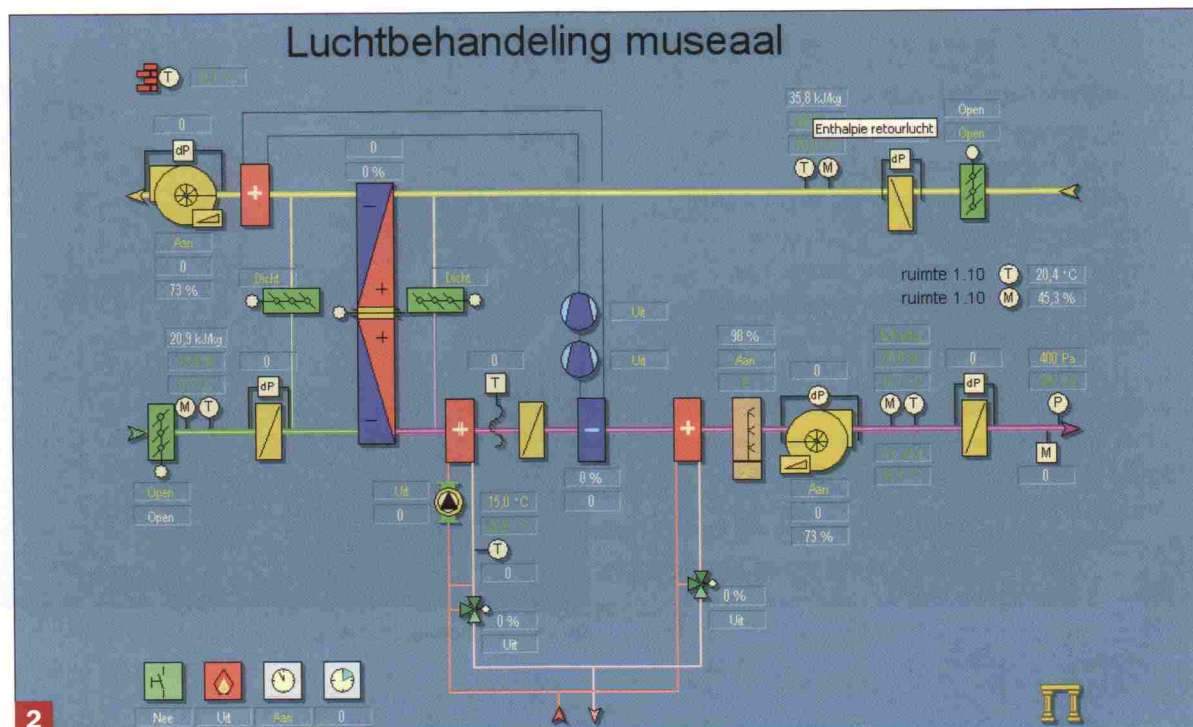
De installatie

Het museum is voorzien van een uitgebreide luchtbehandelingsinstallatie, waarmee de museale vertrekken bevochtigd, ontvochtigd, gekoeld en verwarmd kunnen worden. In de tentoonstellingszalen zijn onder de vensters radiatoren geplaatst.

De warmteopwekking vindt centraal plaats middels twee parallel geschakelde HR cv-ketels, met een totaal nominaal vermogen van 122 kW. Met behulp van deze ketels worden de verwarmingslichamen in het gebouw en de verwarmingssecties in de luchtbehandelingskast gevoed.

Om de in het bestek gestelde luchtcondities te bereiken, is gebruik gemaakt van een luchtbehandelingsinstallatie, waarvan de luchtbehandelingskast buiten is opgesteld. Het specifieke debiet van de luchtbehandelingskast bedraagt 5.760 m³/h. In figuur 2 is een schematische weergave van de luchtbehandelingskast weergegeven, deze afbeelding is afkomstig uit het gebouwbeheersysteem.

In de luchtbehandelingskast is een koelmachine opgenomen die werkt volgens het principe van directe koeling



Schematische weergave van de hoofdcomponenten en regeling van de luchtbehandelingskast

(DX). In deze zogenaamde DX-koeler wordt de lucht door middel van een in de luchtstroom opgenomen verdampers direct gekoeld. De condensor van de koelmachine is in de retouroluchtstroom opgenomen. In de luchtbehandelingskast is, voor de toevoerventilator een elektrische stoombevochtiger opgenomen. Hiervoor is de luchtbehandelingskast van een wateraansluiting voorzien.

Ook is een warmtewiel in de luchtbehandelingskast opgenomen, om in de winter warmte en in de zomer "koude" terug te winnen uit de retouroluchtstroom. Het betreft hier een zogenaamd regenererend warmtewiel, dat wil zeggen een warmtewiel met vochtterugwinnende eigenschappen. Het wiel is hiervoor aan de binnenzijde voorzien van een laagje silicagel. Naar verloop van tijd zal de regeneratieve capaciteit van het warmtewiel echter teruglopen.

Volgens het bestek zou de toevoer van lucht in de expositiezalen moeten geschieden op basis van verdringingsventilatie in combinatie met een variabel luchtvolume-systeem (VAV). Door het ontbreken van deugdelijke verdringingsroosters functioneert het systeem echter niet goed. Voor het VAV-systeem is in het aanvoerkanaal per ruimte een VAV-box opgenomen.

Regeling van de installatie

De klimaatinstallatie wordt geregeld via het gebouwbeheersysteem (GBS). In de regeling van het GBS zijn de afzonderlijke klimaatinstallaties, onder andere de cv-ketels en de luchtbehandelingskast, aan elkaar gekoppeld. De installateur kan op afstand inloggen in het systeem en zo de werking van het systeem controleren en instellingen veranderen. In het gebouw is ook een computer aanwezig waarmee op het GBS ingelogd kan worden. Het GBS kan tevens gemeten data zoals temperaturen, relatieve vochtigheden en aanstuursignalen opslaan.

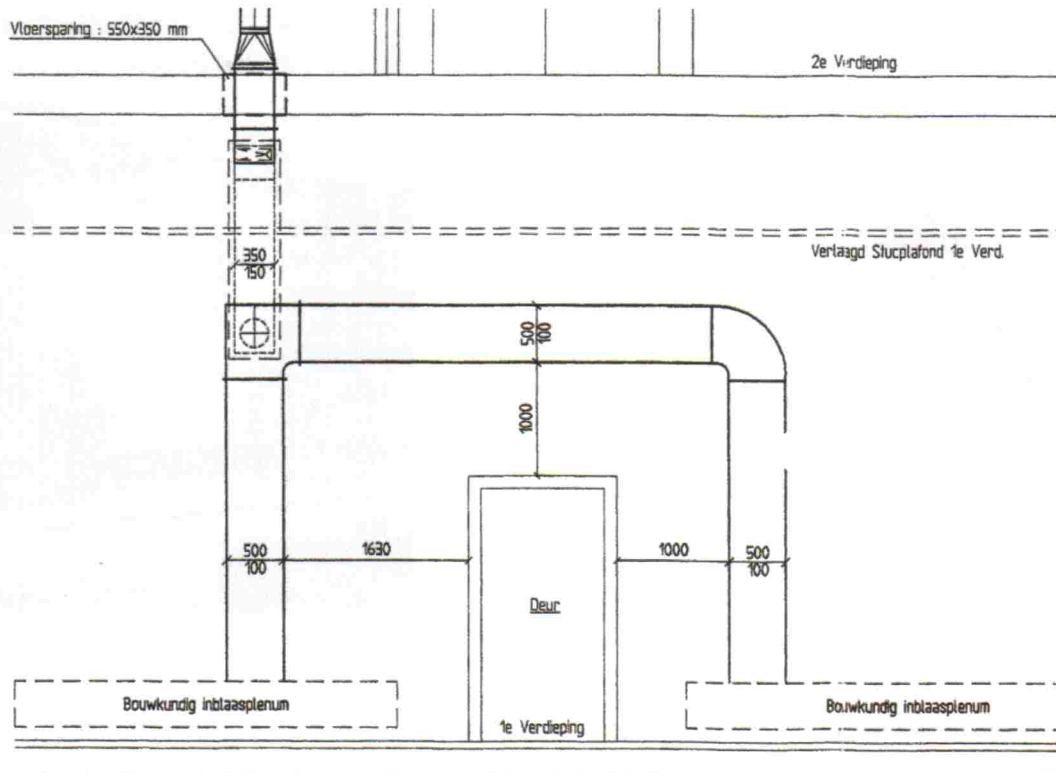
De aanvoertwatertemperatuur van de cv-installatie wordt geregeld op basis van de buitenluchttemperatuur. Hiervoor is een buitenluchttemperatuursensor aan de oostgevel van het gebouw aangebracht. De regelaars die zijn toegepast zijn voorzien van een instelbare stooklijn. Bij een lagere buitenluchttemperatuur, wordt een hogere aanvoertwatertemperatuur opgewekt. Naregeling in de expositiezalen vindt plaats middels thermostatische radiatorkranen.

De luchtuitredetemperatuur van de luchtbehandelingskast wordt geregeld middels de in de kast opgenomen verwarmers en koeler. De gewenste luchtuitredetemperatuur wordt bepaald op basis van de gemeten buitenluchttemperatuur. Naarmate het buiten warmer is, zal de luchtuitredetemperatuur van de luchtbehandelingskast lager zijn.

De koelmachine is uitgevoerd met twee compressoren. De tweede compressor schakelt pas in bij een hogere koelvraag. De toevoer- en afvoerventilator in de luchtbehandelingskast zijn toerengeregeld op basis van drukverschil.

Op vertrekniveau wordt de in de ruimte te brengen lucht-hoeveelheid geregeld door de VAV-box. De regeling van de VAV-box kent een zomer- en een winterinstelling. De zomerregeling is actief bij een buitenluchttemperatuur van 14°C of hoger. De winterregeling is actief bij een buitenluchttemperatuur onder de 14°C. Per expositiezaal is in de ruimte een temperatuur- en RV-sensor geplaatst. In het luchtaanvoerkanaal is zoals vermeld per expositiezaal een VAV-box gemonteerd. In de zomerperiode wordt de klepstand van de VAV-box op basis van gemeten en gewenste ruimteluchttemperatuur geregeld (20°C volgens het bestek).

Het absoluut vochtgehalte van de uittredelucht van de luchtbehandelingskast wordt door de in de luchtbehandelingskast opgenomen stoombevochtiger en koeler



3

Een detail van het werktuigbouwkundige ontwerp: de luchttoevoerkanalen in de expositiezaal zijn achter de voorzetwand aangesloten op een bouwkundig inblaasplenum

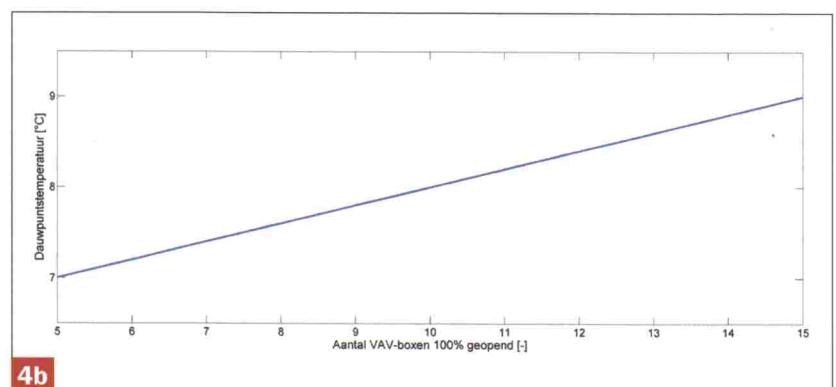
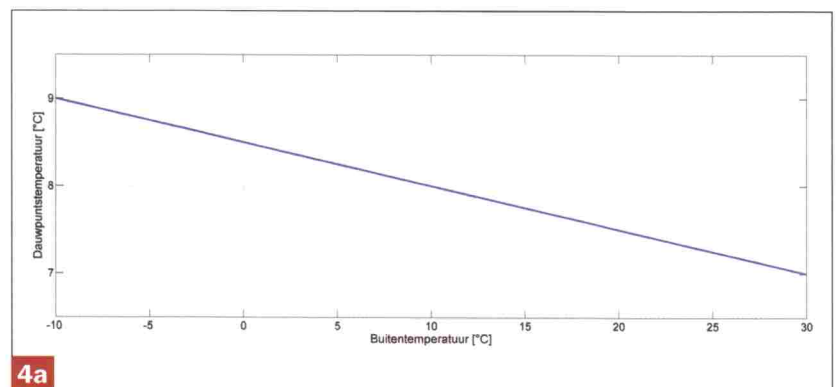
verzorgd. De gewenste absolute vochtigheid van de uitredelucht wordt bepaald aan de hand van twee criteria. Hiervoor wordt door het GBS een dauwpuntstemperatuur op basis van de buitenluchttemperatuur berekend, volgens een stooklijn-achtige constructie. Tevens wordt door het GBS het aantal 100% geopende VAV-boxen in het gebouw gecontroleerd. Aan de hand van het aantal 100% geopende VAV-boxen wordt, door middel van een stooklijn-achtige constructie, een tweede dauwpuntstemperatuur bepaald (zie figuur 4). Voor de hoogste van de twee op deze wijze bepaalde dauwpuntstemperaturen, wordt de bijbehorende absolute vochtigheid bepaald. Hieraan dient de luchtuitredeconditie te voldoen.

In de winterperiode wordt de klepstand van de VAV-box op basis van de in de ruimte gemeten RV en gewenste RV geregeld (50% volgens het bestek). Als in de expositie-zaal een RV lager dan de gewenste waarde gemeten wordt, zal de VAV-box meer (voorbehandelde) lucht de ruimte inbrengen. Gewoonlijk wordt er door de luchtbehandelingskast 100% buitenlucht aangezogen. Alleen bij het inkomen van de koelmachine wordt er gedeeltelijk lucht gerecirculeerd.

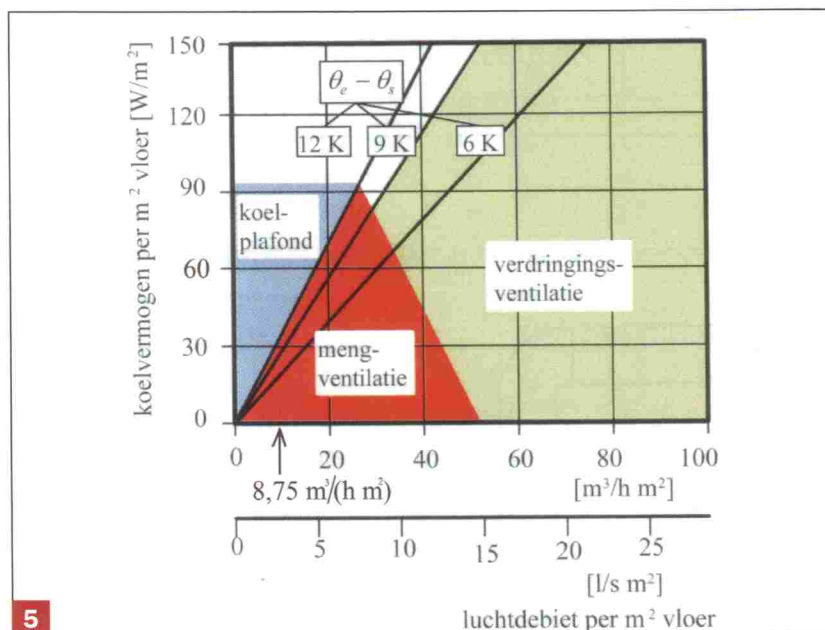
Het voor de expositiezaal geëiste binnenklimaat is in het bestek als volgt omschreven:

- minimale temperatuur in winterbedrijf afhankelijk van bouwfysische beperkingen, setpoint 18°C
- maximale temperatuur in zomerbedrijf 25°C, setpoint 22°C
- toegestane temperatuurvariaties maximaal 2K per uur en 3K per 24 uur
- minimale RV 45%, setpoint 50%, geen overschrijding (winter)

- maximale RV 55%, setpoint 50%, geen overschrijding (zomer)
- RV variatie maximaal 2% per uur en 3% per 24 uur



Het absoluut vochtgehalte van de inblaasluucht wordt bepaald op basis van de buitenluchttemperatuur (4a) of het aantal 100% geopende VAV-boxen (4b)



5 Het koelvermogen als functie van het luchtdebiet

LITERAATUURSTUDIE

Richtlijnen voor het binnenklimaat

Er gelden in Nederland geen wettelijke normen die voorschrijven aan welke eisen het binnenklimaat van monumentale gebouwen moet voldoen. De eigenaar bepaalt zelf welke richtlijnen gehanteerd worden, maar beschikt vaak niet over voldoende kennis hierover. Gewenste grenzen betreffende temperatuur en RV moeten bepaald worden aan de hand van de gevoeligheid van de collectie, gebouw en gebruik. Los van de luchtcondities in de ruimte, zijn de waarden van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid aan de oppervlakken belangrijke omgevingscondities voor conservering van gebouw en interieur. Ook van groot belang is de variatie van deze waarden per uur en per dag. Aan de hand van onderzoek door verschillende instanties zijn hiervoor richtlijnen opgesteld waarin een relatie gelegd wordt tussen temperatuur, RV en risico's voor de collectie. De belangrijkste richtlijnen die voor het museumklimaat gelden zijn opgesteld door het Klimaatnetwerk [3] en ASHRAE [2].

Verdringingsventilatie

Het principe van verdringingsventilatie wordt wel vaker in musea toegepast. Nabij de vloer wordt verse koele lucht ingeblazen. Nabij warmtebronnen wordt de lucht opgewarmd en zal opstijgen. Ter hoogte van het plafond wordt de warmere en vuilere lucht afgevoerd.

Enkele nadelen van verdringingsventilatie zijn:

- Er ontstaan verticale temperatuurgradiënten, die leiden tot plaatselijke verschillen in relatieve vochtigheid.
- Er is kans op koude luchtstromen over de vloer.
- Verwarming met behulp van toevoerlucht is niet effectief doordat de warme lucht direct naar boven stroomt en niet eerst in de ruimte circuleert.

In de REHVA ontwerphandleiding voor verdringingsventilatie [4] is weergegeven wanneer welk ventilatiesysteem zou moeten worden toegepast. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van figuur 5. In deze figuur is het koelvermogen



6 Opstelling voor het meten van de temperatuurstratificatie op ruimteniveau

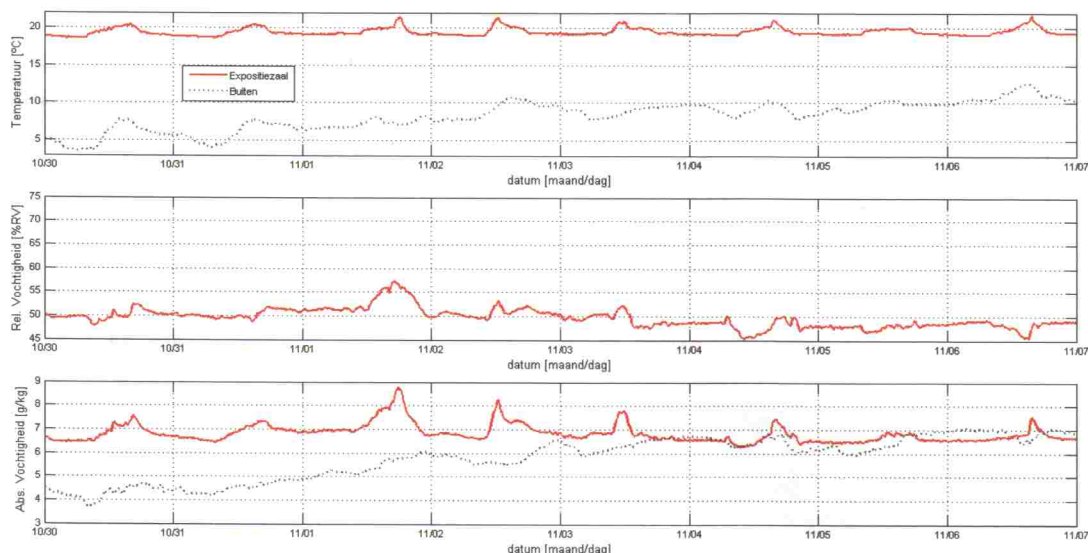
uitgezet als functie van het luchtdebiet, beide per m² vloeroppervlak.

Conform het bestek voor de werktuigbouwkundige installaties is als uitgangspunt voor de interne warmtelast 9,8 W/m² gehanteerd en voor de zontoetredingsfactor (ZTA-waarde) 0,15. Volgens het werktuigbouwkundig ontwerp geldt voor de expositiezalen een luchttoevoerdebiet van circa 8,75 m³/h per m² vloeroppervlak. Er is een relatief laag luchtdebiet nodig omdat onder andere de interne warmtelast ten gevolge van personen en verlichting laag is, waardoor er een laag koelvermogen benodigd zal zijn. Uit de ontwerprichtlijnen van figuur 5 volgt dan dat mengventilatie een goede keuze is. Door de geringe interne warmtelast en het lage toevoerdebiet, blijkt al uit de ontwerprichtlijnen dat verdringingsventilatie geen goede keuze is voor de expositiezalen.

Over het algemeen kan gesteld worden dat verdringingsventilatie niet wordt aanbevolen voor expositieruimten met waardevolle en gevoelige kunstobjecten. In deze ruimten is vaak een beperkte opwarming van de lucht door verlichting, apparatuur en personen mogelijk, evenals in de casus. Zoals in richtlijnen voor het museale binnenklimaat wordt beschreven [2, 3], zijn in een museale omgeving uit het oogpunt van conservering homogene ruimteluchtcondities gewenst. Verdringingsventilatiesystemen kenmerken zich per definitie door hun thermische en daarmee hygrische stratificatie. Daarnaast is het inbrengen van ventilatielucht over de vloer onwenselijk door het inbrengen van vervuilingen. Om deze redenen wordt in vakliteratuur dan ook afgeraden om verdringingsventilatie toe te passen in expositieruimten [3]. In expositieruimten verdient het toepassen van mengventilatie aanbeveling.

VAV-systeem

Bij een variabel luchtvolume systeem wordt de hoeveelheid toevoerlucht per zone nageregeld, middels een motorgestuurde klep (VAV-box) die opgenomen is in het toevoerkanaal vóór het inblaasrooster. De klepstand



7

Weergave van de gemeten luchtcondities (luchttemperatuur, RV en absolute luchtvochtigheid) in een representatieve expositiezaal van 30 oktober tot 7 november 2008

wordt door het gebouwbeheersysteem bepaald op basis van een temperatuurregeling, afhankelijk van de warmte- of koudevraag van het vertrek. De klepstand kan echter ook op andere parameters geregeld worden, zoals op RV of CO_2 -concentratie.

Nadelen van een VAV-systeem zijn:

- De inblaaslucht wordt met een variabel debiet ingeblazen.
- Er is geen constante regeling op RV mogelijk.
- Het ventilatievoud en daarmee de luchtkwaliteit, is afhankelijk van de ruimteluchttemperatuur.
- Naverwarming of radiatorverwarming is vaak noodzakelijk.

Wanneer in een ruimte de gewenste temperatuur heerst, zal de klep van de VAV-box nagenoeg dicht sturen. Hierdoor wordt de ventilatiehoeveelheid voor deze ruimte verminderd, waardoor verontreinigingen kunnen opbouwen. Indien er via de toevoerlucht ook bevochtigd of ontvochtigd wordt, zoals in het museum, is ook de RV in de ruimte niet meer te beheersen. Kenmerken van het VAV-systeem zijn de slechte vochtregeling, als gevolg van het optreden van een variabel inblaasdebiet en de inflexibiliteit om aan meerdere klimaatparameters te voldoen. Als belangrijkste voordeel van deze regeling wordt energiebesparing genoemd. In expositieruimten is het belangrijkste criterium echter zuivere lucht met een constante conditie qua temperatuur en RV. Op basis van deze eigenschappen wordt het VAV-systeem in vakliteratuur dan ook als een ongeschikte ventilatieregeling voor expositieruimten beschouwd [2]. Het toepassen van een constant volume systeem (CAV) geniet hier de voorkeur.

DX-koeling

Een algemeen bekend nadeel van directe koeling is de slechte regelbaarheid; het zaagtand-effect van de uittrede-temperatuur [5]. Met indirecte koeling is een stabielere temperatuur- en vochtregeling mogelijk.

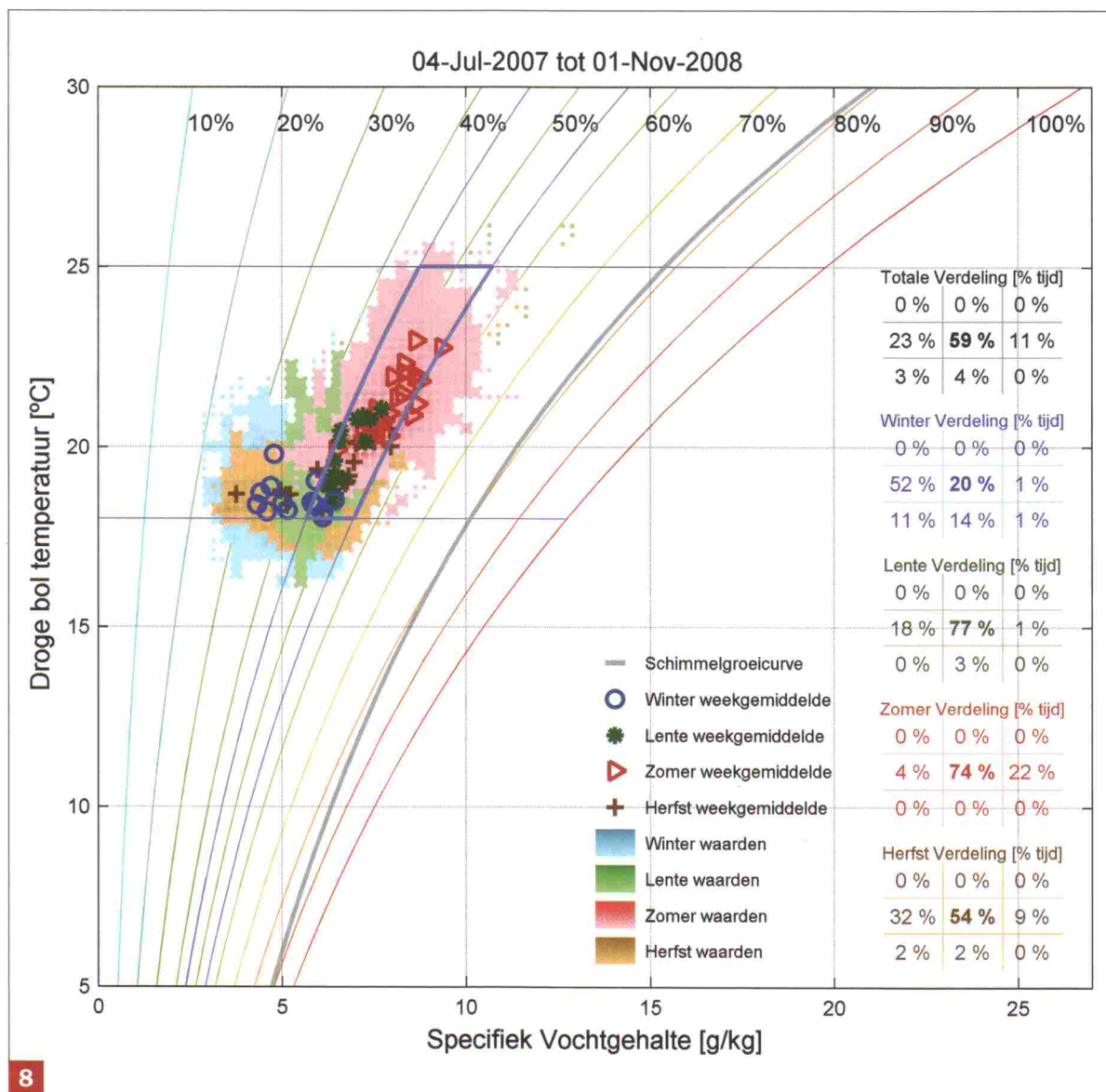
METINGEN

Na analyse van de meetdata kunnen er conclusies getrokken worden over het binnenklimaat en de prestatie van de klimaatinstallatie en de gebouwschil. Data van de klimaatinstallatie en het binnenklimaat zijn verzameld met het gebouwbeheersysteem (GBS) en het door de TU/e opgestelde telemetrische meetsysteem. Het GBS regelt de klimaatinstallatie, maar slaat ook data op van diverse parameters van de klimaatinstallatie. Het betreft hier onder andere lucht in- en uittredecondities van de luchtbehandelingskast, ruimteluchtcondities en stuursignalen naar de componenten van de klimaatinstallatie. Het telemetrische meetsysteem bestaat uit een draadloze meetset waarmee onder andere temperatuur en RV kunnen worden geregistreerd. De temperatuurgradiënt is op één positie in het museum gemeten, namelijk nabij een waardevol schilderij op doek. Deze meting is uitgevoerd met behulp van een statief waarop acht temperatuursensoren over de hoogte zijn aangebracht (zie figuur 6). De door de sensoren gemeten data worden verzonden naar de centraal opgestelde datalogger, waar de data worden opgeslagen. Ook de verbinding tussen datalogger en laboratorium van de TU/e is draadloos uitgevoerd, waardoor het mogelijk is de metingen op afstand te monitoren.

Metingen zijn verricht om de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid als functie van de tijd te kunnen toetsen aan de criteria zoals vermeld in het bestek en in richtlijnen voor collectiebehoud en om een uitspraak over het functioneren van het verdringingsventilatiesysteem te kunnen doen.

Langeduurmeting

De meetdata van de expositiezalen zijn geanalyseerd van 4 juli 2007 tot 1 november 2008. De luchttemperatuur en RV laten in alle zalen een dag-nachtschommeling zien (zie figuur 7). Vanaf 10 uur tot 17 uur (openingstijd) stijgt de luchttemperatuur ongeveer 2 à 3°C als gevolg van bezoekers en ingeschakelde verlichting.



De gemeten luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid in een representatieve expositiezaal geanalyseerd in de Klimaat Evaluatie Kaart

In figuur 8 zijn de meetresultaten van een expositiezaal weergegeven in de Klimaat Evaluatie Kaart [6]. Circa 26 % van de tijd ligt de RV in de zalen onder de 45 %. Dit komt voornamelijk voor in de herst- en winterperiode en is te wijten aan het niet functioneren van de bevochtiging gedurende het grootste deel van de koudere periode. De RV fluctuaties per 24 uur zijn zeer hoog: voor alle zalen is voor meer dan 90 % van alle meetdata de fluctuatie groter dan 3 % per 24 uur (figuur 9). In geen van de zalen zijn langer dan enkele uren temperatuuroverschrijdingen ($> 25^{\circ}\text{C}$) geregistreerd.

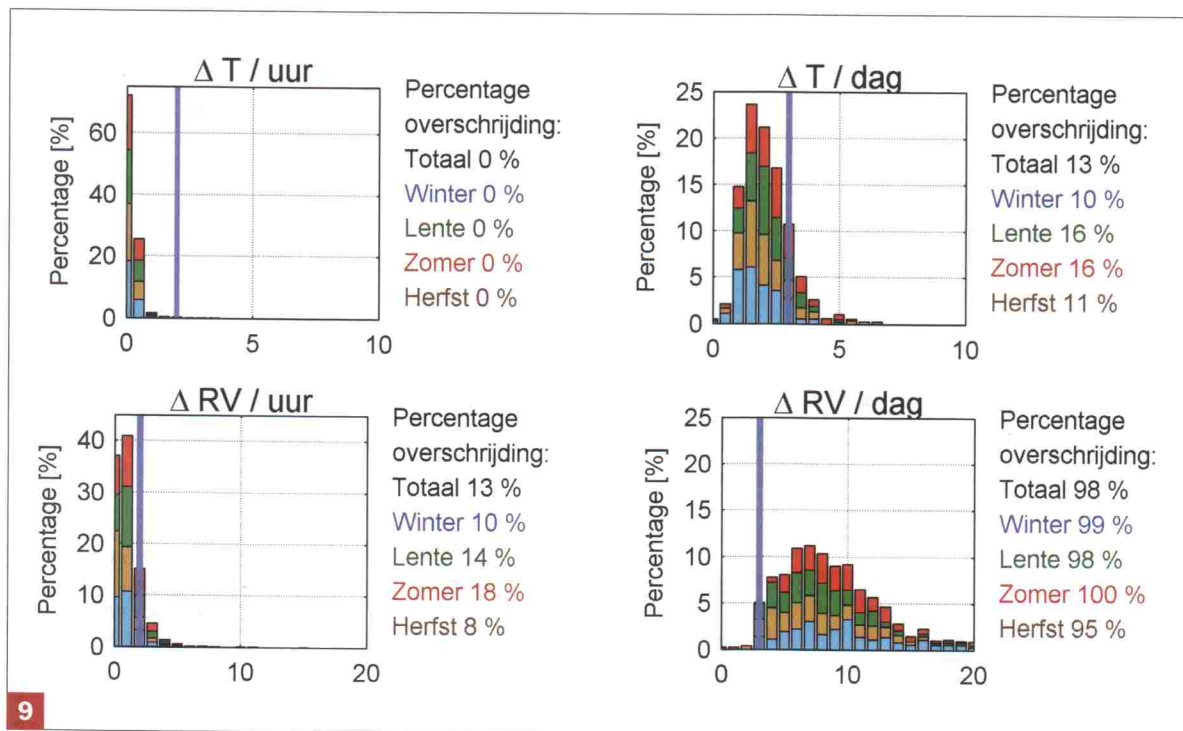
Stratificatiemeting

In figuur 10 zijn de luchttemperaturen op diverse hoogten in de ruimte als functie van de tijd uitgezet, zoals gemeten op 12 februari 2008. Te zien is dat om ongeveer 8 uur 's ochtends de verlichting wordt ingeschakeld. De luchttemperaturen boven de drie meter stijgen dan licht. Waarschijnlijk komen om 11 uur personen binnen. Onder een hoogte van twee meter zijn dan de grootste temperatuurpieken te zien. Omstreeks 17 uur komen veel personen binnen als gevolg van een

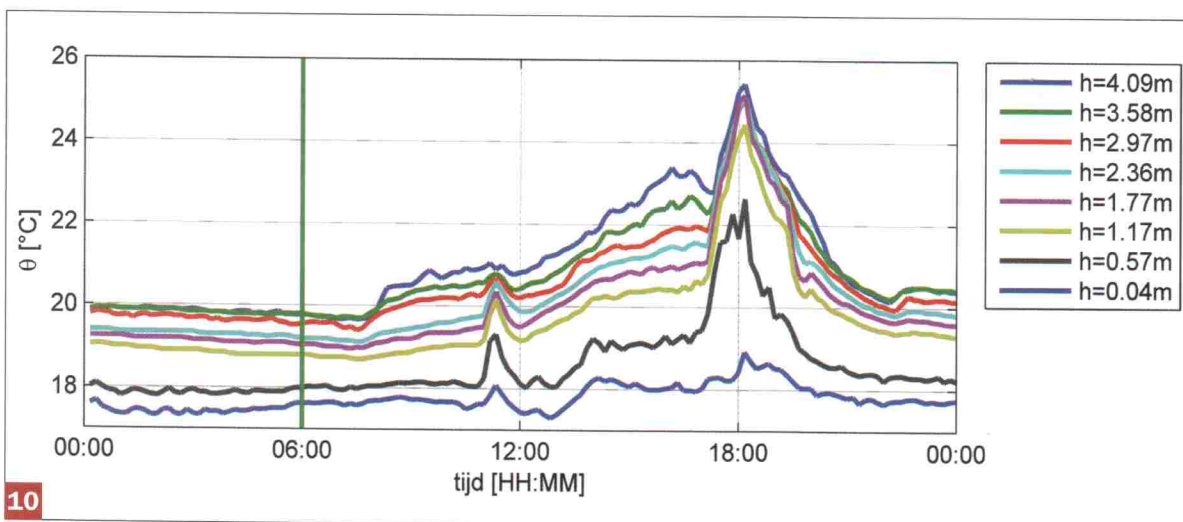
lezing, wat in de grafiek te zien is als een grote temperatuurstijging.

In figuur 11 en 12 is het temperatuurverschil weergegeven voor verschillende hoogten ten opzichte van de meting laag bij de vloer ($h = 0,04 \text{ m}$): er bestaat een duidelijke temperatuurgradiënt. Figuur 11 geeft de om 6:00 uur gemeten temperatuurverschillen over de hoogte ten opzichte van de meting laag bij de vloer weer en figuur 12 om 18:10 uur. In deze figuren is met blauw het temperatuurverschil op een bepaalde hoogte aangegeven ten opzichte van de temperatuur nabij de vloer. De berekende uurlijkse temperatuurfluctuaties op dat moment, de schommelingen in de tijd, zijn met groen aangegeven. De zwarte lijn geeft de totale temperatuurveranderingen weer. Dit is de som van de temperatuurverschillen over de hoogte en de uurlijkse temperatuurfluctuaties. De rode doorgetrokken lijn geeft het criterium van de temperatuurverandering weer, in deze situatie 4K (ASHRAE klasse A) [2].

In figuur 11 (6:00 uur) is te zien dat de temperatuurverandering (zwart) vrijwel alleen een gevolg is van de temperatuurgradiënt (blauw). De uurlijkse temperatuur-



Analyse van de opgetreden fluctuaties in het binnenklimaat van 4 juli 2007 tot 1 november 2008



Op verschillende hoogten gemeten luchttemperaturen op 12 februari 2008, uitgezet over de gehele dag

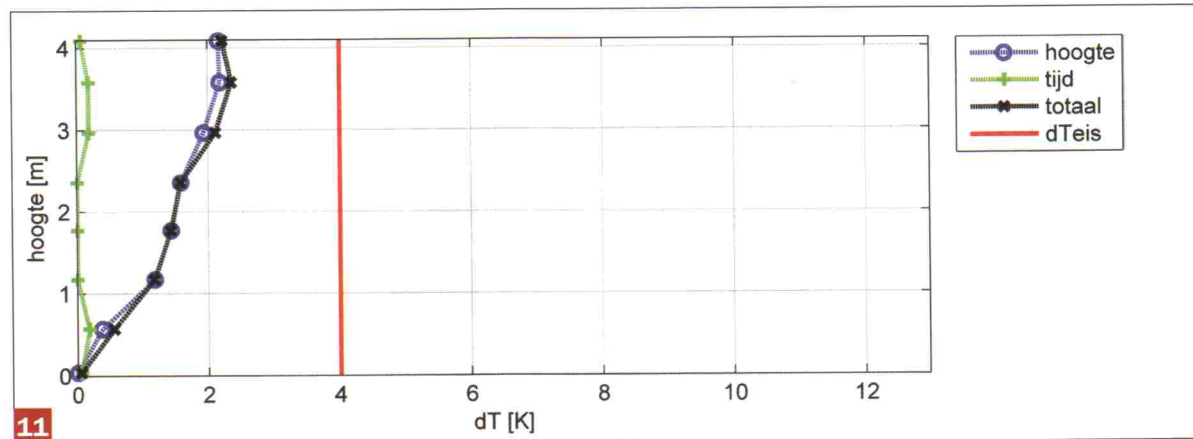
fluctuaties (groen) zijn nagenoeg gelijk aan nul. De totale temperatuurverandering is gelijk aan 2,3 K. Dit valt dus binnen het gestelde criterium. In figuur 12 (18:10 uur) is te zien dat de temperatuurverandering over de hoogte (blauw) het criterium van 4 K wel overschrijdt. Door de vele personen ontstaat een temperatuurverschil over de hoogte van meer dan 6 K. Daarnaast zijn de uurlijkse temperatuurfluctuaties (groen) groot, vooral onderin de zaal (< 2 meter). Opgeteld levert dit op een hoogte van bijvoorbeeld 1,77 meter, het gebied waar zich waardevolle collectie bevindt, een totale temperatuurverandering van meer dan 12 K op. Uit aangeleverde bezoekersaantallen blijkt echter dat 12 februari 2008 een extreme dag is geweest wat betreft het aantal personen in deze zaal.

Figuur 13 toont een thermografische opname van een schilderij boven een inblaasopening. Zichtbaar is de inblaas van koelere lucht (circa 17°C) over de vloer. De hygrothermische stratificatie over het schilderij bedraagt

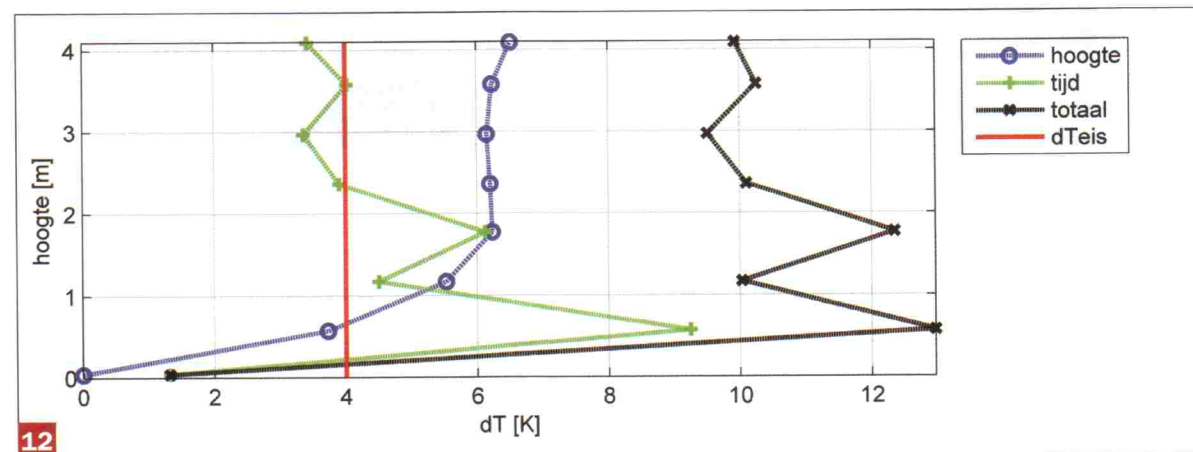
circa 1,5°C/m en 4% RV/m. Het totale vochtverschil over de hoogte van het schilderij bedraagt volgens de opname circa 10% RV. De oppervlaktetemperatuur van het doek wordt echter ook beïnvloed door verlichting en een variabele afstand tot de wand.

CONCLUSIES

De binnenklimaatproblemen in het museum werden veroorzaakt door een combinatie van verschillende factoren. Ten eerste is een dergelijk historisch gebouw niet geschikt om een strikt museaal klimaat te creëren: de gebouwschil is niet luchtdicht genoeg en gedurende de koude perioden treden condensatie of hoge luchtvochtigheden op nabij koude oppervlakken. Ten tweede is het klimatiseringsconcept niet geschikt voor de museale omgeving. Verdringsventilatie zorgt namelijk voor grote temperatuur- en vochtgradiënten over de hoogte van de zalen en over de hoogte van de collectie. Uit metingen volgen veranderingen in temperatuur en relatieve vochtigheid over de hoog-



11 De gemeten temperatuurverschillen over de hoogte van de ruimte om 6:00 uur



12 De gemeten temperatuurverschillen over de hoogte van de ruimte om 18:10 uur

te van de expositiezaal die groter zijn dan de gestelde criteria van respectievelijk 4 K en 10% RV. Uit literatuur volgt dat een mengventilatiesysteem beter geschikt is voor museale ruimten, omdat temperatuur- en RV-gradiënten dan kleiner zijn ten gevolge van een betere menging van het luchtvolume.

Met een VAV-systeem is vochtbeheersing slecht mogelijk. Het toegepaste VAV-systeem kan niet in de benodigde luchtverversing voorzien door de regeling ervan: als er veel personen in een expositiezaal aanwezig zijn, bijvoorbeeld in een zaal waar regelmatig bijeenkomsten gehouden worden, zal de RV stijgen. De regeling zal de VAV-boxen voor deze zaal in de wintersituatie namelijk dichtsturen, omdat de RV voldoende hoog is, met als gevolg dat de RV toeneemt.

In de klimaatinstallatie is directe koeling toegepast. Uit literatuur en de metingen blijkt dat DX-koeling leidt tot een slecht regelbare koelvraag en ontvochtiging.

Tenslotte werden storingen voorheen laat opgemerkt door een onjuiste monitoring van het functioneren van de klimaatinstallatie. Hierdoor traden gedurende de koude periodes zeer lage RV's op, als gevolg van een lang onopgemerkt gebleven storing van de stoombevochtiger.

Omdat het niet realistisch is om de complete klimaatinstallatie en regeling te vervangen, zijn aanbevelingen ge-

daan om de huidige installatie met beperkte ingrepen te optimaliseren. Er is aanbevolen om:

- het ventilatiesysteem om te zetten naar een constant volume systeem, door de kleppen van de VAV-boxen te vergrendelen,
- de klimaatregeling gedurende het gehele jaar primair op RV te laten geschieden,
- klimaatmonitoring met een automatische alarmeringsfunctie toe te passen,
- een storingsprotocol op te zetten, zodat in geval van een storing of calamiteit vlug en adequaat gehandeld kan worden en zo de downtime van de klimaatinstallatie verkort,
- een tweede stoombevochtiger parallel te plaatsen, om de betrouwbaarheid van de RV-beheersing te verhogen,
- en het RV-setpoint in de winter te verlagen naar 45% RV en in de zomer te verhogen naar 55% RV, middels een gedurende het jaar glijdende setpointverschuiving.

Een recente analyse van meetdata uit de expositiezalen toont dat het museale binnenklimaat fors verbeterd is nu het merendeel van de voorgestelde aanpassingen zijn doorgevoerd.

DANKWOORD

De auteurs zijn dank verschuldigd aan de medewerkers van het museum als ook aan de opdrachtgever, die dit onderzoek heeft mogelijk gemaakt. ■



Thermografische opname van een groot schilderij opgehangen boven een luchtinblaasopening

BRONNEN

- [1] Jütte, B.A.H.G., Passieve conservering; klimaat en licht, Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap, Amsterdam, 4^{de} druk, ISBN 90-72905-33-4, 1994
- [2] ASHRAE, Museums, libraries and archives (Chapter 21) in: ASHRAE handbook: Heating, ventilating, and air-conditioning applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, p.p. 21.1-21.23, 2007
- [3] Ankersmit, B., Klimaatwerk; richtlijnen voor het museale binnenklimaat, Instituut Collectie Nederland, november 2009
- [4] Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P van, Hagstrom, K., Railio, J., Displacement ventilation in non-industrial premises, Rehva Guidebook no. 1, Norway, Trondheim, 2002
- [5] Knoll, W.H., Wagenaar, E.J., Handboek Installatietechniek, ISSO, Rotterdam, 1994
- [6] Martens, M.H.J., Schijndel, A.W.M., Schellen H.L., Klimaat evaluatie kaart: een nieuwe manier voor weergave van het binnenklimaat, Bouwfysica vol. 18-3, p. 34-38, 2005

■ UW ADVERTENTIE
OOK OP DEZE PAGINA?

Meld u aan als sponsor bij de NVBV

