

Onderzoek naar methoden voor beperkte RV-beheersing in monumentale gebouwen aan de hand van casussen.

M.SC. THESIS



**instituut
collectie
nederland**



Door	Ing. Edgar Neuhaus
Studentnummer	0546308
Datum afstuderen	19 december 2006
Versie rapport	18 december 2006

Opleiding Installatietechnologie, Technische Universiteit Eindhoven

Afstudeerbegeleidingscommissie:

Dr.ir. H.L. Schellen (voorzitter, universitair hoofddocent TU/e)

Ir. G. Boxem (universitair docent TU/e)

Dr. H.A. Ankersmit (onderzoeker Instituut Collectie Nederland)

Dr. B.A.H.G. Jütte (voormalige medewerker Instituut Collectie Nederland)

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SUMMARY

SAMENVATTING

1	INLEIDING	1
1.1	PROBLEEMSTELLING.....	1
1.2	DOELSTELLING	2
1.2.1	<i>Specificeren van de doelstellingen</i>	2
1.2.2	<i>Onderzoeksvragen</i>	2
1.3	BELANG VAN HET ONDERZOEK	2
1.3.1	<i>Maatschappelijk belang</i>	2
1.3.2	<i>Wetenschappelijk belang</i>	3
1.4	METHODE	3
1.5	OPBOUW Afstudeerrapport.....	4
2	ANALYSE VAN MONUMENTALE GEBOUWEN EN BINNENKLIMAAT.....	5
2.1	GEBOUW TYPEN.....	5
2.2	BEDREIGINGEN VOOR GEBOUW, INTERIEUR EN OBJECTEN	6
2.2.1	<i>Het classificeren van risico's voor interieur en collectie</i>	6
2.2.2	<i>Het classificeren van risico's voor het gebouw</i>	7
2.2.3	<i>Definitie binnenklimaat</i>	7
2.2.4	<i>Het gevaar van de centrale verwarming</i>	11
2.2.5	<i>Onkundig beheer</i>	12
2.3	KLIMAATRICHTLIJNEN VOOR CONSERVERING.....	12
2.3.1	<i>Comfortabel binnenklimaat voor de mens</i>	12
2.3.2	<i>Klimaatrichtlijnen Instituut Collectie Nederland</i>	13
2.3.3	<i>Klimaatrichtlijnen ASHRAE</i>	13
2.3.4	<i>Klimaatrichtlijnen Rijksgebouwendienst</i>	14
2.3.5	<i>Haalbaarheid richtlijnen</i>	15
2.4	TOEGEPASTE TECHNIEKEN VOOR RV-BEHEERSING.....	15
2.4.1	<i>Complete luchtbehandeling</i>	15
2.4.2	<i>Mobiele bevochtigers</i>	17
2.4.3	<i>Mobiele ontvochtigers</i>	18
2.4.4	<i>Conservation Heating</i>	19
2.4.5	<i>Hygrostatisch geregeld ventileren</i>	21
2.4.6	<i>Toepassen van vochtbufferende materialen</i>	21
2.5	CONCLUSIES	22
3	METEN VAN BINNENKLIMAATPARAMETERS	24
3.1.1	<i>Luchttemperatuur</i>	24
3.1.2	<i>Relatieve luchtvochtigheid</i>	24
3.1.3	<i>Oppervlaktecondities</i>	25
3.1.4	<i>Stratificatiemeting</i>	25
3.1.5	<i>Invallende zonnestraling</i>	26
3.1.6	<i>CO₂-meting</i>	26
3.1.7	<i>Buitencondities</i>	27
3.1.8	<i>Infraroodthermografie</i>	27
3.1.9	<i>Ventilatievoudmeting</i>	28
3.1.10	<i>Presentatie meetresultaten</i>	29
4	MODELLEREN VAN BINNENKLIMAATPARAMETERS	31
4.1.1	<i>HAMBASE</i>	31
4.1.2	<i>Simulink</i>	31
4.1.3	<i>Fluent</i>	32

4.2	VERIFICATIE VAN DE MODELLEN	32
5	CASUS 1: LUCHTBEVOCHTIGING IN MUSEUM AMSTELKRING	33
5.1	INLEIDING	33
5.2	DOELSTELLINGEN CASUS	33
5.3	METHODE	34
5.4	BOUWKUNDIGE EN INSTALLATIETECHNISCHE INVENTARISATIE	34
5.5	ANALYSE VAN HET BINNENKLIMAAT	35
5.5.1	<i>Temperatuur en RV</i>	35
5.5.2	<i>RV nabij koude oppervlakken</i>	37
5.5.3	<i>Ventilatievoud</i>	37
5.5.4	<i>Bezoekersinvloed</i>	38
5.6	SIMULATIE	40
5.6.1	<i>Model 1: Warmte- en vochtsimulatie van de kerk m.b.v. HAMBASE</i>	40
5.6.2	<i>Model 2: Luchtstromingsmodel van de kerk m.b.v. Fluent</i>	43
5.7	DISCUSSIE	45
5.8	CONCLUSIES	45
5.9	AANBEVELINGEN	46
6	CASUS 2: CONSERVATION HEATING IN HET JACHTHUIS ST. HUBERTUS	47
6.1	INLEIDING	47
6.2	DOELSTELLINGEN CASUS	48
6.3	METHODE	48
6.4	ANALYSE VAN HET BINNENKLIMAAT	48
6.5	BOUWKUNDIGE EN INSTALLATIETECHNISCHE INVENTARISATIE	49
6.6	SIMULEREN VAN CONSERVATION HEATING	51
6.6.1	<i>Simulatie-resultaten</i>	52
6.7	MEETOPSTELLING	54
6.7.1	<i>Resultaten meetopstelling</i>	55
6.8	DISCUSSIE	57
6.9	CONCLUSIES	57
6.10	AANBEVELINGEN	58
7	RESULTATEN	59
7.1	CONCLUSIES	59
7.2	DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	59
	REFERENTIES	60
	NOMENCLATUUR	62
BIJLAGE A	UITGEBREIDE TABEL “9 AGENTS OF DETERIORATION”	
BIJLAGE B	MEETRESULTATEN KERK MUSEUM AMSTELKRING IN MOLLIERDIAGRAM	
BIJLAGE C	MEETRESULTATEN STRATIFICATIEMETING MUSEUM AMSTELKRING	
BIJLAGE D	UITWERKINGEN VV-METINGEN MUSEUM AMSTELKRING	
BIJLAGE E	INVOERTEXT HAMBASE-MODEL MUSEUM AMSTELKRING	
BIJLAGE F	CFD-ANALYSE MUSEUM AMSTELKRING: TEMPERATUURPROFIEL KERK	
BIJLAGE G	CFD-ANALYSE MUSEUM AMSTELKRING: LUCHTSNELHEIDSPROFIEL KERK	
BIJLAGE H	MEETRESULTATEN EETKAMER JACHTHUIS IN MOLLIERDIAGRAM	
BIJLAGE I	AFBEELDINGEN SIMULINK-MODEL JACHTHUIS	
BIJLAGE J	INVOERTEXT HAMBASE-MODEL JACHTHUIS	

Summary

The Netherlands are rich of cultural heritage. Historic buildings with their often special interior and art objects are part of this heritage. Unfortunately these buildings with their interior and art objects slowly deteriorate over time. If a correct indoor climate is created, building, interior and objects will deteriorate less quick. Practice however shows that the indoor climate in much historic buildings is incorrect for preservation. Often relatively small actions can provide a much more stable indoor climate, so that the risk of damage diminishes. This thesis describes the results of a study of appropriate technologies for limited relative humidity control in order to maintain the indoor climate within boundaries for preservation conditions.

This study encloses a research of appropriate technologies for limited relative humidity control in historic buildings. The study is commenced with a literature study after the desired indoor climate conditions in historic buildings and what technologies are used to create these. Then two case studies are used for the research after two specific technologies. The first case is the research of the use of humidification in a historic building: museum Amstelkring in Amsterdam. This case shows that if humidification is implemented in historic buildings, this may lead to various problems. The main problem is condensation on cold surfaces during the heating season. This may lead to deterioration of the building, interior and art objects placed near the cold surfaces. Solutions for reducing the condensation risk are investigated using computer modeling. Simulation results show that a reduction of the amount of humidification and heating leads to less condensation and less high relative humidity near the cold surfaces.

The second case describes the investigation of a alternative method to control the heating system in a historic building. In this case the hunting lodge St. Hubertus is used, located in Hoenderloo. During the heating season low relative humidities occur in monumental buildings. During the humid seasons, like autumn, high relative humidities occur. By controlling the heating system using a humidistat device, so called humidistatically controlled heating, a for conservation conditions more appropriate indoor climate is created. The suitability of this system is investigated both by a test setup and computer modeling. Furthermore simulation results show a significant lower energy expenditure compared to conventional thermostatically controlled heating. Thermal comfort however declines because during the heating season often only is heated to maintain relatively low basic temperatures. This makes humidistatically controlled heating mainly suitable for historic buildings which are closed during the winter season or know a partially use.

Samenvatting

Nederland is rijk aan cultureel erfgoed. Een deel hiervan bestaat uit monumentale gebouwen met hun vaak bijzondere interieurs en kunstobjecten. Helaas worden deze gebouwen met hun interieurs en kunstobjecten langzamerhand door de tand des tijds aangetast. Indien in het gebouw de juiste omgevingscondities heersen, zullen gebouw, interieur en objecten minder snel verouderen of verloren gaan. De praktijk wijst echter uit dat in veel monumentale gebouwen juist ongunstige binnencondities voor conservering heersen. Vaak is het met een relatief kleine ingreep mogelijk om het binnenklimaat dusdanig te verbeteren, dat het risico op schade vermindert. Dit afstudeerrapport geeft de resultaten weer van een studie naar verschillende maatregelen om de relatieve luchtvochtigheid in monumentale gebouwen binnen de voor collectiebehoud gewenste grenzen te handhaven.

De studie omvat een onderzoek naar geschikte technieken voor beperkte klimaatbeheersing in monumentale gebouwen. Deze studie is gestart met een literatuuronderzoek. Aan de hand van bestaande literatuur wordt bekeken wat nu een gunstig binnenklimaat is en welke technieken er toegepast worden om dit te bereiken. Vervolgens worden er met behulp van twee casussen enkele technieken nader onderzocht. De eerste casus betreft een onderzoek naar het toepassen van mobiele luchtbevochtiging in een monumentaal gebouw: museum Amstelkring te Amsterdam. Indien men luchtbevochtiging toepast in monumentale gebouwen, kan dit leiden tot een aantal problemen. Het voornaamste probleem is condensatie aan de koude delen van het gebouw tijdens het stookseizoen. Dit kan leiden tot aantasting van het gebouw, interieur en de tegen de koude wanden geplaatste kunstvoorwerpen. Middels simulatiemodellen zijn oplossingen onderzocht voor het verminderen van de optredende oppervlaktecondensatie. Simulatieresultaten tonen aan dat een combinatie van verlaging van de bevochtigingshoeveelheid en temperatuur leidt tot een verminderd risico op oppervlaktecondensatie. Tevens leidt dit tot minder hoge relatieve luchtvochtigheden nabij de koude oppervlakken.

De tweede casus betreft een onderzoek naar een alternatieve manier om de verwarmingsinstallatie in een monumentaal gebouw te regelen. Hiervoor is als casus het jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo gebruikt. Tijdens het stookseizoen treden voor collectiebehoud zeer lage relatieve luchtvochtigheden op. Gedurende de vochtige perioden, zoals de herfst, treden er vaak ongewenst hoge relatieve luchtvochtigheden op. Door het verwarmingssysteem te laten schakelen op basis van een hygrostaat, het zogenaamde hygrostatisch geregelde verwarmen, treden er voor collectiebehoud gunstigere binnenklimaatcondities op. Middels een testopstelling in het jachthuis en met behulp van simulatiemodellen, is de toepasbaarheid van dit systeem onderzocht. Simulatieresultaten tonen aan dat door het toepassen van hygrostatisch geregelde verwarmen bovendien een significant lager energiegebruik optreedt ten opzichte van conventioneel verwarmen. Thermisch comfort neemt echter sterk af, doordat er gedurende het stookseizoen vaak slechts tot een relatief lage basistemperatuur verwarmd wordt. Hierdoor is deze wijze van verwarmen met name geschikt voor monumenten die gedurende het winterseizoen gesloten zijn, of slechts een gedeeltelijk gebruik kennen.

1 Inleiding

Nederland is rijk aan cultureel erfgoed. Een deel van dit cultureel erfgoed bestaat uit monumentale gebouwen met hun vaak bijzondere interieur. Monumenten hebben dikwijls ook een waardevolle collectie in huis. Dit culturele erfgoed is voor Nederland van onschatbaar belang. Helaas worden al deze gebouwen met hun interieur en kunstobjecten langzamerhand door de tand des tijds aangetast. Zeker wanneer deze interieurs en kunstobjecten bewaard worden in voor behoud nadelige omstandigheden.

Bij het behoud van ons cultureel erfgoed kan men gebruik maken van zogenaamde passieve conservering (Jütte 1994). Het actieve conserveren bestaat uit het behandelen van het voorwerp zelf, zoals bijvoorbeeld restaureren. Passieve conservering is gebaseerd op het optimaliseren van de omgevingscondities waarin het object bewaard wordt, zoals de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid (RV). Indien in een gebouw met een monumentaal interieur en kunstobjecten namelijk de juiste omgevingscondities heersen, zullen deze minder snel verouderen of verloren gaan. Hierdoor behoeven deze minder snel gerestaureerd te worden en blijft het cultureel erfgoed beter en langer behouden.

De praktijk wijst echter uit dat er in veel monumentale gebouwen geen gunstige binnencondities voor conservering heersen. Met alle schade aan objecten en interieur van dien. Door ongunstige binnencondities treedt er aantasting van het interieur op door schimmelvorming, uitdroging, insecten en het uitzetten en krimpen van de materialen. Ook het gebouw zelf kan beschadigen ten gevolge van een slecht binnenklimaat. Deze beschadiging bestaat hoofdzakelijk uit aantasting van de houten delen van het gebouw ten gevolge van condensatie, schimmelgroei en uitdroging.

In de meeste gevallen is het vaak met een relatief kleine ingreep mogelijk om het binnenklimaat dusdanig te verbeteren, dat het risico op schade drastisch vermindert. Dit afstudeerrapport geeft de resultaten weer van een studie naar verschillende maatregelen om de relatieve luchtvochtigheid in monumentale gebouwen binnen de voor collectiebehoud gewenste grenzen te handhaven. Deze studie is uitgevoerd aan de hand van een literatuurstudie, praktijkstudies en simulatiestudies.

1.1 Probleemstelling

Uit de praktijk blijkt dat de binnenklimaatcondities die gedurende het jaar in een monumentaal gebouw met bijvoorbeeld een conventionele c.v.-installatie optreden, niet altijd even gunstig zijn voor het behoud van gebouw, interieur en eventueel aanwezige collectie (Neuhaus et al. 2004a, Neuhaus et al. 2006). De probleemstelling voor dit afstudeeronderzoek is dan ook als volgt geformuleerd:

“Het binnenklimaat in monumentale gebouwen is niet altijd even gunstig voor het behoud van gebouw, interieur en eventueel aanwezige collectie.”

De titel van het onderzoek luidt: onderzoek naar methoden voor beperkte RV-beheersing in monumentale gebouwen. Onder beperkte RV-beheersing moet in deze context het volgende verstaan worden:

“Beheersing van RV middels technieken anders dan met behulp van een luchtbehandelingskast en luchtkanalen.”

Het aanbrengen van een luchtbehandelingsinstallatie is meestal niet mogelijk en gewenst doordat er een luchtbehandelingskast en kanaalwerk geïnstalleerd moeten worden in het monumentale gebouw. Het gebouw wordt dan constructief aangetast. Tevens tasten in het zicht gemonteerd kanaalwerk en roosters de historische authenticiteit van het interieur aan. In specifieke gevallen is de montage van een luchtbehandelingssysteem echter wel wenselijk en mogelijk. Het kanaalwerk kan in deze specifieke situaties vaak volledig uit het zicht gemonteerd

worden, bijvoorbeeld door gebruik te maken van bestaande schachten en schouwen. Hierdoor blijft de ingreep op het gebouw en de visuele aantasting beperkt.

Door het toepassen van technieken voor een beperkte RV-beheersing is het vaak mogelijk om met relatief kleine ingrepen de extremen in het binnenklimaat te beperken. Bovendien zijn deze technieken vaak vele malen goedkoper dan een complete luchtbehandelingsinstallatie.

1.2 Doelstelling

Het hoofddoel van dit onderzoek is het beoordelen en mogelijk verbeteren van technieken voor een beperkte RV-beheersing teneinde aanbevelingen te doen voor de toepassing ervan. De doelstelling voor dit afstudeerproject kan dan ook als volgt worden samengevat:

“Onderzoek naar de toepasbaarheid van technieken voor een beperkte RV-beheersing in monumentale gebouwen middels literatuurstudie, simulatiestudie en experiment.”

1.2.1 Specificeren van de doelstellingen

De globale doelstellingen van het afstudeerproject kunnen als volgt gespecificeerd worden:

- Inzicht verkrijgen in de huidige stand van zaken betreffende RV-beheersing in monumentale gebouwen
- Het verder ontwikkelen van een in Nederland relatief onbekende techniek: het hygrostatisch geregeld verwarmen
- Het mogelijk verbeteren van het toepassen van mobiele bevochtiging door middel van onderzoek naar de optredende problemen en mogelijke oplossingen.

1.2.2 Onderzoeksvragen

De volgende algemene onderzoeksvragen volgen uit de doelstellingen:

1. Hoe kan er een classificatie gemaakt worden voor monumentale gebouwen in Nederland betreffende bouwfysica, installatie, collectie en gebruik?
2. Wat zijn de belangrijkste technieken voor RV-beheersing in monumentale gebouwen die in Nederland worden toegepast?
3. Wat zijn de optredende problemen bij deze technieken, wat is de reden hiervan en hoe kunnen deze problemen verholpen worden?

Onderzoeksvragen 1 t/m 3 zullen onderzocht worden door middel van een literatuurstudie. De volgende specifieke onderzoeksvragen volgen uit de doelstellingen:

4. Wat zijn de effecten van luchtbevochtiging in een monumentaal pand?
5. Hoe zijn de problemen m.b.t. condensatie en hoge relatieve luchtvochtigheden aan het oppervlak ten gevolge van bevochtiging te verminderen of op te lossen?
6. Wat is de bruikbaarheid van hygrostatisch geregeld verwarmen in het Nederlandse klimaat?
7. Welke technieken komen in bepaalde situaties het best tot hun recht?

Onderzoeksvragen 4 en 5 zullen onderzocht worden met behulp van casus 1: “Luchtbevochtiging in museum Amstelkring”. Onderzoeksvraag 6 zal onderzocht worden met behulp van casus 2: “Conservation heating in het jachthuis St. Hubertus”. De beantwoording van onderzoeksvraag 7 volgt uit de conclusies van het totale onderzoek.

1.3 Belang van het onderzoek

Er zijn verschillende belangen gebaat bij dit onderzoek. Het voornaamste belang is uiteraard het behoud van het cultureel erfgoed. Hieronder is respectievelijk het maatschappelijke belang en het wetenschappelijke belang weergegeven.

1.3.1 Maatschappelijk belang

- Behoud cultureel erfgoed
- Kostenbesparing

- Verbeteren technieken
- Kennisontwikkeling in Nederland
- Toegankelijk maken van technieken/kennis

Toelichting:

Meer inzicht in de toepasbaarheid van methodes voor beperkte RV-beheersing kan leiden tot een betere conservering van interieur en objecten.

Een verbeterde conservering van gebouw, interieur en objecten middels passieve conservering leidt tot mindere schade daarmee tot lagere restauratiekosten. Ook kan een betere regeling of meer inzicht in geschikte systemen leiden tot een daling van het primair energiegebruik, wat weer tot een kostenbesparing leidt. Bovendien kan een versimpeling van de techniek tot een kostenbesparing leiden.

Door onderzoek kunnen huidige technieken verbeterd worden, wat een betere conservering van interieur en objecten en tevens een kostenbesparing tot gevolg kan hebben.

In het buitenland (Verenigde Staten, Groot Brittanië) worden al jaren succesvol technieken toegepast die in Nederland nog betrekkelijk onbekend zijn, met name het hygrostatisch geregeld verwarmen. Indien deze technieken in Nederland worden toegepast, treden er vaak problemen op door onkundig beheer. Door gedegen onderzoek kan er ervaring met deze technieken opgedaan worden.

Door het presenteren van de onderzoeksresultaten in vakliteratuur, worden de onderzochte technieken toegankelijker gemaakt voor de Nederlandse markt.

1.3.2 Wetenschappelijk belang

Het verruimen van de kennis op het gebied van:

- beperkte RV-beheersing in monumenten met als doel een beter behoud
- het binnenklimaat in monumenten
- luchtbevochtiging in monumentale gebouwen
- hygrostatisch geregeld verwarmen.

Het uitdragen van de tijdens het onderzoek opgedane kennis en resultaten aan wetenschappers door middel van:

- congressen
- seminars
- symposia
- workshops
- studiedagen
- artikelen in vaktijdschriften en journals.

1.4 Methode

Een studie naar relevante literatuur en praktijksituaties heeft geleid tot een overzicht van de in Nederland gangbare technieken van RV-beheersing in monumentale gebouwen. Hierbij zijn per techniek de optredende problemen geïnventariseerd. Voor het onderzoek zijn twee specifieke projecten als casus gebruikt om enkele technieken nader te onderzoeken. Deze projecten zijn museum Amstelkring te Amsterdam en het jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo. Casus 1 betreft een onderzoek in museum Amstelkring naar de effecten van luchtbevochtiging in een monumentaal gebouw. Casus 2 betreft een onderzoek naar hygrostatisch geregeld verwarmen in het jachthuis St. Hubertus. In deze casussen heeft een nader onderzoek plaatsgevonden in de vorm van aanvullende metingen, een simulatiestudie of een testopstelling.

Er zijn simulatiemodellen opgezet om inzicht te krijgen in de situatie en oplossingen te genereren voor de optredende problemen. Deze modellen geven inzicht in de totstandkoming van het binnenklimaat, klimaatregelingen en het energiegebruik. Voor het bestuderen van de invloed van de installatie op het binnenklimaat is gebruik gemaakt van het programma HAMBASE en Simulink. Voor het bestuderen van luchtstromingen en temperatuurverdelingen in de ruimte, is gebruik gemaakt van CFD-berekeningen (Computational Fluid Dynamics).

Hiervoor is het programma Fluent gebruikt. De resultaten van de simulatiemodellen zijn waar mogelijk gevalideerd met behulp van meting verkregen middels een proefopstelling of uit de praktijk. Tijdens het afstudeeronderzoek zijn modellen ontwikkeld die inzicht geven in het effect van hygrostatisch geregeld verwarmen en luchtbevochtiging op het binnenklimaat, gebouw en energiegebruik.

1.5 Opbouw afstudeerrapport

Hoofdstuk 2 bespreekt de resultaten van de literatuur- en praktijkstudie. Er wordt toegelicht welk onderscheid we kunnen maken in monumentale gebouw en in de verschillende toegepaste technieken voor RV-beheersing. Daarnaast worden klimaatrichtlijnen en de totstandkoming van het binnenklimaat besproken.

Hoofdstuk 3 beschrijft de technieken die in het kader van dit onderzoek gebruikt zijn om het binnenklimaat van een monumentaal gebouw in kaart te brengen. Aan de orde komen de principes en methodes van temperatuurmetingen van de lucht en aan oppervlakken, RV-metingen, CO₂-metingen, ventilatievoudmetingen en infraroodthermografie. Tevens wordt de methode toegelicht voor het overzichtelijk presenteren van meetresultaten in het Mollierdiagram.

In hoofdstuk 4 wordt een korte introductie gegeven van de verschillende simulatieprogramma's die binnen dit afstudeeronderzoek zijn gebruikt.

Hoofdstuk 5 en 6 beschrijven de evaluatie van twee casussen waar nader onderzoek is gedaan naar technieken voor een beperkte RV-beheersing. De eerste casus betreft het onderzoek naar het gebruik van mobiele luchtbevochtigers in een 17^{de} eeuwse grachtenpand in Amsterdam: Museum Amstelkring. De tweede casus beschrijft het onderzoek naar het effect van hygrostatisch geregeld verwarmen in een van de meest waardevolle monumenten in Nederland: het jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo.

Hoofdstuk 7 bevat een samenvatting van de resultaten en conclusies van het afstudeeronderzoek. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met aanbevelingen voor het maken van een keuze van een techniek voor beperkte RV-beheersing.

2 Analyse van monumentale gebouwen en binnenklimaat

2.1 Gebouw typen

In monumentale gebouwen is vaak een verbeterd binnenklimaat gewenst ten behoeve van conservering van gebouw en interieur. Deze gebouwen zijn namelijk nooit ontworpen op een binnenklimaat ten behoeve van conservering. Conrad (1995) heeft een indeling in gebouwklassen in tabelvorm gemaakt met de mogelijkheden en beperkingen voor gebouwen in de Verenigde Staten die niet zijn ontworpen voor dit doel. Tabel 1 toont een specifiek op monumentale gebouwen aangepaste versie hiervan. De originele tabel bevat 6 gebouwklassen. Aangezien klasse V en VI gebouwen betreffen die specifiek met een museum- of opslagfunctie zijn ontworpen, zijn deze in de onderstaande tabel weggelaten. De gebouwklassen zijn onderverdeeld aan de hand van de volgende criteria:

- type regeling
- type constructie
- type gebouw
- type gebruik
- type klimaatinstallatie
- klimaatinstallatie die mogelijk is.

In de laatste kolom is weergegeven welke klasse van regeling mogelijk en haalbaar is in een dergelijk gebouw. Onder de klasse van regeling wordt in deze context verstaan: binnen welke bandbreedte het binnenklimaat betreffende temperatuur en RV gehandhaafd kan worden. In Tabel 3 zoals weergegeven in hoofdstuk 2.3 wordt hier verder op ingegaan.

Tabel 1 Classificatie van monumentale gebouwen aan de hand van verschillende criteria.

Gebouw klasse	Type regeling	Type constructie	Type gebouw	Gebruik	Klimaatinstallatie	Klimaat-installatie mogelijk	Klasse van regeling mogelijk*
I	Geen regeling	Open structuur	Latrine, opslag, brug, molen, put	Geen gebruik. Geopend het hele jaar	Geen	Geen	D (mild klimaat)
II		Bekleedde kolommen en balken	Hut, schuur, opslag, silo, ijskelder	Geen gebruik. Speciale evenementen	Afzuigventilatoren, open ramen, inblaas ventilatoren, zolderventilatie, geen verwarming	Ventilatie	C (mild klimaat) D (tenzij vochtig klimaat)
III	Beperkte regeling	Muren met casco en zijkanten, enkel glas	Vuurtoren, grof casco gebouw, smederij	Rondleidingen zomer, winters gesloten. Geen gebruik	Lage temperatuur verwarming, zomer ventilatie, hygrostatische ventilatie in winter	Verwarming Ventilatie	C (indien mild klimaat) D (tenzij warm klimaat)
IV		Zwaar metselwerk, of samengestelde muren met pleister. Dichte constructie, dikke beglazing	Gereed huis, kerk, ontmoetings-huis, winkel, herberg,	Medewerkers in aparte ruimte, cadeauwinkel, bezoekers route, beperkt gebruik, winters gesloten	Lage temperatuur luchtverwarming, zomerkoeling, aan/uit-regeling, DX-koeling, enige bevochtiging, warmerugwinning mogelijk	Basis	B (indien mild klimaat) C (indien milde winter) D

*zie Tabel 3 voor een weergave van de binnenklimaatrichtlijnen betreffende temperatuur en RV behorende bij deze klassen

Volgens eigen onderzoek zijn de eigenschappen van monumentale gebouwen in Nederland onder te verdelen zoals weergegeven in Tabel 2. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen bouwfysische aspecten, type installatie, RV gevoeligheid van de collectie en de wijze van gebruik van het gebouw. Binnen dit afstudeeronderzoek zijn twee monumentale gebouwen als casus gebruikt: museum Amstelkring te Amsterdam en jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo. In

Tabel 2 is tevens weergegeven welke eigenschappen deze gebouwen bezitten. Volgens Tabel 1 kunnen deze gebouwen beide ingedeeld worden in gebouwklasse 3 á 4.

Tabel 2 Verschillen in bouwfysische aspecten, installatie, gevoeligheid van de collectie en huidig gebruik van monumentale gebouwen in Nederland. De eigenschappen van de binnen dit afstudeeronderzoek gebruikte casussen zijn tevens weergegeven.

Bouwfysische aspecten		Installatie		RV gevoeligheid collectie		Huidig gebouw gebruik	
Zware muren		Geen installatie		Geen coll. behalve gebouw		Geen gebruik	
Enkel steens muren	A,S*	Lokale verwarming	A	Ongevoelig		Incidenteel gebruik	S
Spouwmuren ongeïsoleerd	S	Centrale verwarming	A,S	Gevoelig	A,S	Seizoens gebruik	
Buitenwand binnenw. geïsol.		Luchtverwarming		Erg gevoelig		Gedeeltelijk gebruik	S
Betonnen vloeren	S	Mech. ventilatie				Volledig gebruik	A
Houten vloeren	A	Luchtbehandeling					
Enkele beglazing	A,S	Mobiele bevochtiging	A				
Dubbele beglazing		Mobiele ontvochtiging	A				
Voorzet beglazing							
Achterzet beglazing	A						
Aanwezigheid schouwen	A						
Ongeïsoleerd dak	A,S						
Geïsoleerd dak							

* A= museum Amstelkring
S= jachthuis St. Hubertus

2.2 Bedreigingen voor gebouw, interieur en objecten

Als we over een monumentaal gebouw spreken, kunnen we onderscheid maken tussen drie aspecten met betrekking tot het gebouw. Deze drie aspecten zijn het gebouw zelf, het monumentale interieur en de aanwezige objecten.

Onder het gebouw verstaan we in deze context o.a.:

- de aan het buitenklimaat grenzende gebouwschil
- constructieve elementen als vloeren, wanden en balken

Onder het interieur verstaan we in deze context o.a.:

- afwerking van vloeren (bijv. parket en tapijten)
- afwerking van wanden (bijv. lambrisering en behang)
- afwerking van plafonds (bijv. ornamenten en cassetteplafonds)
- historische installaties

Onder de objecten verstaan we in deze context o.a.:

- meubels
- boeken, film- en fotomateriaal
- kunstobjecten (bijv. schilderijen en beelden)

Zowel het gebouw als het interieur en de collectie kennen hun eigen bedreigingen. Hieronder is een globaal overzicht weergegeven van deze bedreigingen.

2.2.1 Het classificeren van risico's voor interieur en collectie

Om de mogelijke oorzaken van verlies en schade aan het interieur en de collectie te classificeren is er door verschillende instellingen een indeling opgesteld. Door het Canadian Conservation Institute is een overzichtelijke classificatie opgesteld (Michalski 1994). Deze classificatie bestaat uit de zogenaamde *Nine Agents of Deterioration* (negen werkende oorzaken van verval), te weten:

- directe fysieke krachten (bijv. schok, vibratie, zwaartekracht)
- dieven, vandalen en verplaatsers (verwijdering door onbevoegd menselijk toegang)
- vuur
- water
- plaag: biologische agentia, insecten, ongedierte (bijv. bacteriën, ratten en vogels)
- gasvormige, vloeibare en vaste verontreinigingen (bijv. roet, stof, bepaalde zuren en gassen)

- straling (UV-licht en zichtbaar licht)
- onjuiste temperatuur (te hoge of te lage temperatuur, fluctuaties)
- onjuiste RV (te hoge of te lage RV, fluctuaties).

In bijlage A is de uitgebreide tabel weergegeven waarin de risico's, bedreigingen en het beheer van de negen oorzaken van verval is toegelicht.

2.2.2 Het classificeren van risico's voor het gebouw

Michalski (1998) beschrijft de bedreigingen en “wensen” van een monumentaal gebouw als volgt: “In een gebouw is een gemiddelde RV van rond de 50% gewenst om de afwerking van muren, lambrisering, olieverf en behang te beschermen. Dit betekent dat we het interieur niet hoger moeten opstoken dan de verwarming die we op natuurlijke basis kunnen verwachten van zonnestraling (maximaal 10°C boven de buitentemperatuur). Tegelijkertijd moet de combinatie van temperatuur en RV dusdanig zijn dat er geen risico op interne condensatie optreedt. Aan de andere kant moet bevriezing van de grond voorkomen worden. Dit kan namelijk leiden tot verzakking van het gebouw. Het monumentale gebouw wenst ook geen koeling in de zomer. Koeling kan namelijk leiden tot condensatie in en op de constructie. Bovendien tast het aanbrengen van een klimaatinstallatie de historische authenticiteit aan, zowel visueel als constructief.” Deze uitspraak is gebaseerd op het klimaat in Canada. Zo zal er in Nederland bijvoorbeeld geen dusdanige bevriezing van de bodem optreden dat het gebouw verzakt.



Figuur 1 De meest voorkomende bedreigingen voor gebouw en interieur zoals o.a. het buitenklimaat, een ongunstig binnenklimaat, ongedierte en schimmels, diefstal en vandalisme, water en brand.

We zien dat ongunstige binnenklimaatfactoren zoals temperatuur en relatieve luchtvochtigheid, zowel het gebouw als interieur bedreigen. In het kader van dit afstudeeronderzoek zullen de bedreiging voor gebouw en interieur door een ongunstig binnenklimaat nader onderzocht worden. In het hierna volgende deel zal er nader ingegaan worden op de definitie van het binnenklimaat en wat de belangrijkste parameters zijn die het binnenklimaat bepalen.

2.2.3 Definitie binnenklimaat

Voor het behoud van gebouw, interieur en eventueel aanwezige collectie in monumentale gebouwen, is een gunstig binnenklimaat een belangrijke factor. Het binnenklimaat wordt

gevormd door het buitenklimaat, de gebouwschil, de klimaatinstallatie en de gebruikers van het gebouw. Door verschillen tussen binnen- en buitenklimaat qua temperatuur en RV zal er warmte en damptransport optreden. Dit transport vindt hoofdzakelijk plaats via:

- infiltratie van lucht door kieren en naden
- ventilatie door openstaande deuren en ramen
- transmissie van warmte en vocht door de constructie

Bij de mate van uitwisseling spelen de bouwfysische aspecten een grote rol. Het binnenklimaat in een gebouw met grote ramen, veel kieren en naden rond kozijnen en deuren ondervindt meer invloed van het buitenklimaat dan een goed geïsoleerd gebouw.

Het binnenklimaat ondervindt niet alleen invloed door vereffening met het buitenklimaat, maar ook door zoninstraling door ramen en opwarming van muren en daken.

Het gebruik van een klimaatinstallatie is, afgezien van depots, primair gebaseerd op menselijk comfort. Afhankelijk van het gemonteerde systeem, wordt de lucht in de ruimte verwarmd, gekoeld, bevochtigd of ontvochtigd.

Gebruikers van het gebouw produceren warmte en vocht. Zij geven vocht direct aan het binnenklimaat af door verdamping aan het huidoppervlak en ademhaling. Tevens produceren zij indirect warmte en vocht door gebruik van verlichting, apparatuur en door bijvoorbeeld koken.

Als we over het binnenklimaat spreken denken we hoofdzakelijk aan de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Maar er zijn meer belangrijke factoren die het binnenklimaat bepalen, enkele hiervan zijn de luchtzuiverheid, luchtsnelheid, verlichting (UV-straling, infraroodstraling, zichtbaar licht), akoestiek en trillingen. Om te illustreren waarom de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid twee belangrijke factoren zijn waarmee we een gunstig binnenklimaat kunnen creëren voor conservering, wordt hieronder een en ander toegelicht.

Temperatuur

Temperatuur is een kwantificering van de hevigheid van de thermische beweging van atomen en moleculen. Over het algemeen zijn het gebouw en interieur minder gevoelig voor temperatuur dan voor de relatieve luchtvochtigheid. Toch is het beheersen van temperatuur, afgezien van comfortredenen, belangrijk.

Een te lage temperatuur in een monumentaal gebouw kan leiden tot:

- bevrozing van watervoerende leidingen en radiatoren ($T_i < 0^\circ\text{C}$)
- bros en breekbaar worden van materialen ($T_i < 5^\circ\text{C}$) (Mecklenburg et al. 1999)
- bepaalde chemische reacties van objecten, zoals bijvoorbeeld tinpest bij $T_i < 14^\circ\text{C}$

Een te hoge temperatuur kan leiden tot:

- versnelling van chemische degradatie zoals corrosie en chemische reacties in foto- en filmmateriaal
- versnelling van biologische processen zoals schimmelgroei (in combinatie met vocht)

Ook geldt dat ten gevolge van temperatuurschommelingen materialen krimpen en uitzetten, wat bij gevoelige objecten kan leiden tot schade.

Relatieve luchtvochtigheid

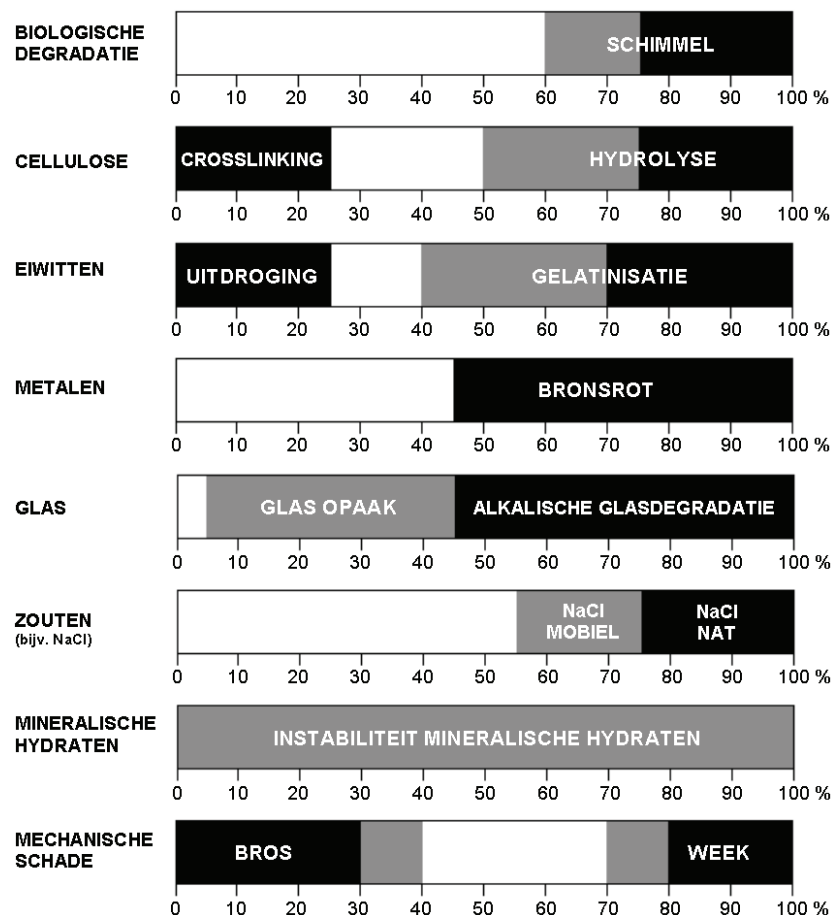
De relatieve luchtvochtigheid (RV), wordt gedefinieerd als het quotiënt van de heersende dampspanning en de maximale dampspanning van de lucht. In formule vorm weergegeven:

$$RV = \frac{p_h}{p_{sat}} \cdot 100\% \quad (1)$$

waarin: p_h = heersende dampspanning [Pa]
 p_{sat} = maximale dampspanning [Pa]

De maximale dampspanning, ook wel de verzadigingsdampspanning genoemd, is afhankelijk van de temperatuur. Bij een hogere temperatuur heerst een hogere maximale dampspanning. Zodra de heersende dampspanning gelijk is aan de maximale dampspanning, treedt er condensatie op.

Het beheersen van de RV in een monumentaal gebouw is over het algemeen belangrijker dan beheersing van temperatuur. Dat komt doordat het merendeel van de materialen, waaruit het gebouw en interieur bestaan, zogenaamde hygroscopische eigenschappen bezitten. Een hygroscopisch materiaal absorbeert waterdamp uit de omringende lucht wanneer de relatieve vochtigheid hoger wordt en kan vocht desorberen wanneer de relatieve vochtigheid zakt. Er vindt een voortdurende uitwisseling plaats tussen de waterdamp in de atmosfeer en het geabsorbeerde vocht in een materiaal. Dit heeft als gevolg dat het materiaal krimpt en uitzet bij een wisselende RV. Hygroscopische materialen zijn bijvoorbeeld organische materialen zoals hout, ivoor, wol, linnen, katoen en papier.



Figuur 2 De invloed van de relatieve luchtvochtigheid op materialen. [bron: Erhardt et al. 1994]

Hieronder is een opsomming gegeven van de meest voorkomende schades ten gevolge van een ongunstige RV (Erhardt et al. 1994, Erhardt et al. 1995). Zie ook Figuur 2.

Een te lage RV kan leiden tot:

- uitdroging van hygroscopisch materiaal met permanente vervorming als gevolg (bijv. scheuren)
- bros worden van bepaalde materialen met een verhoogd risico op mechanische schade als gevolg ($RV < 30\%$)

Een te hoge RV kan o.a. leiden tot:

- verhoogde microbiologische activiteit aan oppervlakken met als gevolg aantasting van het materiaal ($RV > 75\%$)

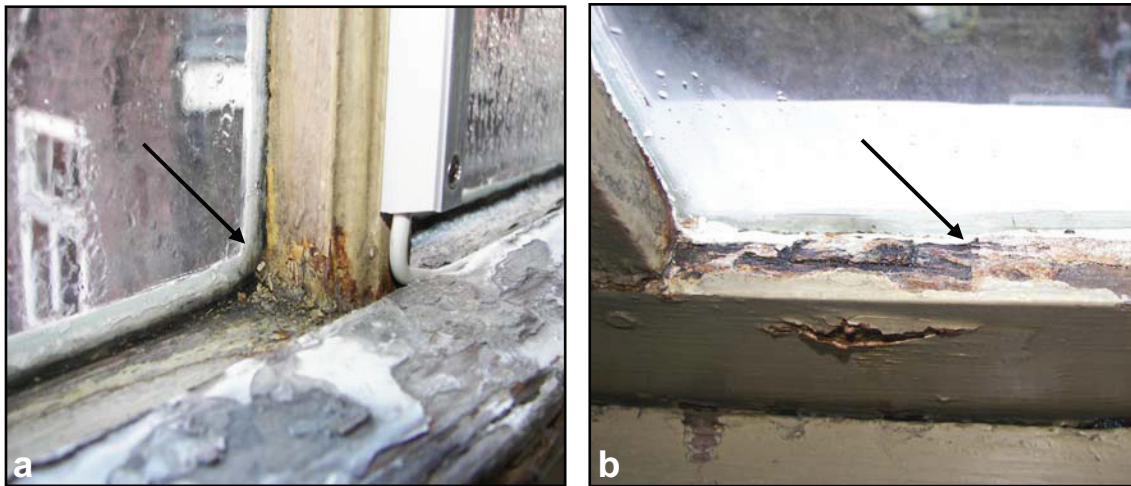
- een verbeterd leefmilieu voor schadelijke insecten zoals bijvoorbeeld zilversjes en kevers
- op gang komen van chemische processen zoals corrosie van metalen, hydrolyse van cellulose, bronsrot, gelatinisatie van eiwitten
- week worden van het materiaal met mechanische schade als gevolg ($RV > 80\%$)
- vloeibaar worden van zouten in objecten met als gevolg zouttransport en schade door herkristallisatie en zoutuitbloei ($RV > 75\%$)

Voorts kunnen grote schommelingen van de RV leiden tot mechanische schade door het uitzetten en krimpen van het materiaal.

Zoals formule (1) weergeeft, heerst aan een oppervlak met een temperatuur lager dan de ruimtetemperatuur een hogere RV. Afhankelijk van de temperatuur kan deze RV zelfs dusdanig hoog zijn dat er oppervlaktecondensatie optreedt. Indien dit proces zich in de constructie voor doet, spreken we van inwendige condensatie. Additionele gevaren van een hoge RV zijn dus:

- condensatie aan koude oppervlakken met schimmelmicrobiële groei als gevolg
- inwendige condensatie in de constructie met rotting als gevolg
- inwendige bevriezing in de constructie met vorstschade als gevolg

Zie Figuur 3 voor een voorbeeld van de gevolgen van oppervlaktecondensatie. Zie Figuur 4 voor een voorbeeld van de gevolgen van inwendige condensatie.



Figuur 3 Twee voorbeelden van houtrot (a) en schimmelmicrobiële groei (b) aan kozijnen ten gevolge van oppervlaktecondensatie aan beglazing.



Figuur 4 Afbeelding van een met behulp van epoxyhars gerestaureerde balkkop in een 17^{de} eeuws grachtenpand waar luchtbevochtiging wordt toegepast. Waarschijnlijk ten gevolge van inwendige condensatie in de buitenwand, is er rotting opgetreden aan de balkkop.

Biologische agentia

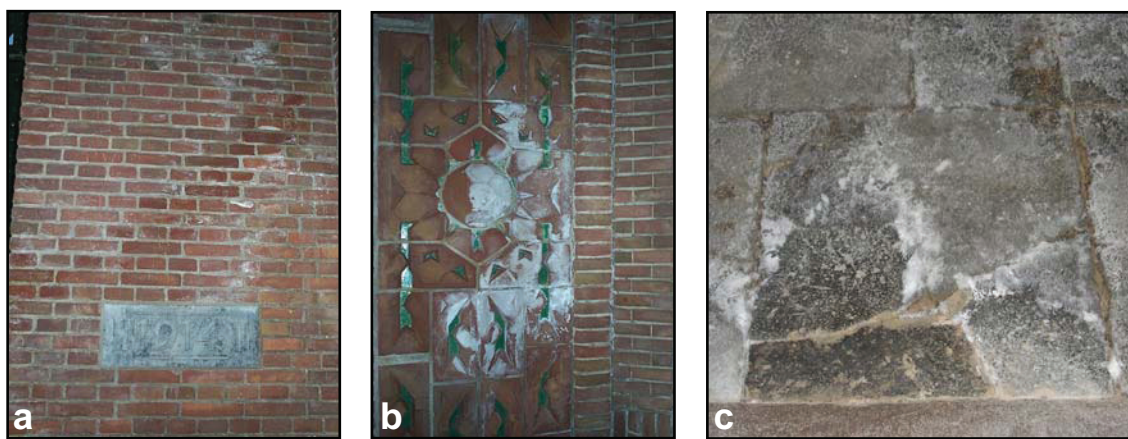
Onder biologische agentia verstaan we onder andere ongedierte, bacteriën, schimmels en virussen. Met name schimmels kunnen zorgen voor houtrot en aantasting van gebouw, interieur en objecten. Om goed te kunnen gedijen op gebouw en interieur, de voedingsbodem, is er een combinatie van factoren nodig, te weten:

- juiste voedingsbodem
- schimmelsporen
- juiste temperatuur
- juiste vochtigheid

Voor aërobe schimmels is tevens zuurstof nodig. Indien we één of meerdere groeicriteria wegnemen, is schimmelgroei te voorkomen. Het groeigebied van schimmels die we voornamelijk tegenkomen in monumentale gebouwen bevindt zich tussen de -2 en 40°C en een relatieve luchtvochtigheid van minimaal 60% (Michalski 1993, Scott 1994). De lucht in het gehele monumentale gebouw 100% vrijhouden van schimmelsporen is een zeer kostbare aangelegenheid en haast onmogelijk. Het gebouw zou dan kierdicht gemaakt moeten worden en voorzien moeten worden van een luchtfilteringsinstallatie. De temperaturen van het groeigebied liggen erg wijd. Het is dus zaak de RV lager dan het groeigebied te houden om schimmelgroei te vermijden, ook nabij koude oppervlakken.

Zoutuitbloei

Een andere bedreiging voor het gebouw, maar ook objecten, is zouttransport door steenachtige poreuze materialen. Sommige materialen zoals steen en aardewerk kunnen door capillariteit namelijk water absorberen, bijvoorbeeld afkomstig van oppervlaktecondensatie. Hygroscopische zouten in het materiaal kunnen hierdoor oplossen. Door vochtbewegingen kunnen de opgeloste zouten in het materiaal worden getransporteerd en op bepaalde plaatsen herkristalliseren. Door de spanningen die dan in het materiaal ontstaan kunnen bijvoorbeeld breuken ontstaan, of kan een glazuurlaag afgestoten worden. Indien deze zouten aan het oppervlak herkristalliseren, spreken we van zoutuitbloei (zie Figuur 5).



Figuur 5 Enkele voorbeelden van zoutuitbloei zoals aangetroffen bij de entree van het jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo (a, b) en zoals aangetroffen op de keldervloer van kasteel Amerongen (c).

2.2.4 Het gevaar van de centrale verwarming

Veel monumentale gebouwen van voor 1900 zijn voorzien van schouwen en haarden die vroeger dienden om te koken en thermisch comfort te bieden aan de bewoners. In monumenten gebouwd in het begin van de 20^{ste} eeuw zien we de opkomst van de centrale verwarming. Tegenwoordig is in veel monumentale gebouwen een centraal verwarmingssysteem geïnstalleerd, soms echter alleen in bepaalde delen van het gebouw. De klimaatinstallatie in monumentale gebouwen bestaat dus meestal slechts uit een c.v.-installatie die is geïnstalleerd om mensen thermisch comfort te bieden gedurende het stookseizoen.

Gedurende het stookseizoen is het absoluut vochtgehalte van de lucht vaak laag en treden er binnen voor conservering meestal te lage RV's op (<40%) ten gevolge van het stookgedrag. Buiten het stookseizoen treden er binnen vaak te hoge relatieve luchtvochtigheden op (>60%), ten gevolge van het hogere absoluut vochtgehalte van de lucht.

In veel gevallen zien we dat op de verwarmingsregelaar een nachtverlaging van de ruimtetemperatuur is ingesteld van bijvoorbeeld 5°C. Hierdoor treedt er gedurende het stookseizoen minimaal al een dagdifferentie in de temperatuur op van 5°C. Gecombineerd met een interne warmtebelasting en zoninstraling kan deze differentie nog groter zijn, zelfs boven 10°C per dag.

2.2.5 Onkundig beheer

Onkundigheid van de beheerder of eigenaar van een monumentaal pand leidt vaak tot een onjuist gebruik van de technieken en installatie. Dit onjuiste gebruik van technieken en installatie om het binnenklimaat te verbeteren leidt vaak tot een verslechterd binnenklimaat (Meul 2006). Voorbeelden hiervan zijn:

- het onjuist plaatsen en instellen van mobiele bevochtigers en ontvochtigers
- de installatie van onjuist setpoints voorzien
- het aanpassen van instellingen van installatie
- het onjuist bedienen van thermostaten
- slecht onderhoud van de installatie (bijvoorbeeld onnauwkeurige sensoren)

2.3 Klimaatrichtlijnen voor conservering

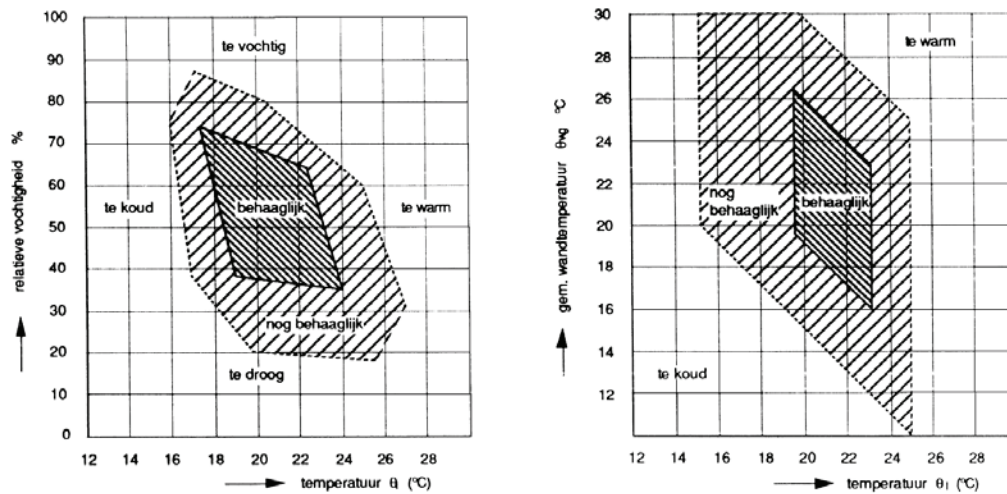
Er gelden in Nederland geen wettelijke normen die voorschrijven aan welke eisen het binnenklimaat van monumentale gebouwen moeten voldoen. De eigenaar bepaalt zelf welke richtlijnen gehanteerd worden, maar beschikt vaak niet over voldoende kennis hierover. Gewenste grenzen betreffende temperatuur en RV van het binnenklimaat moeten bepaald worden aan de hand van de gevoeligheid van de collectie, gebouw, gebruik en al dan niet de aanwezigheid van personen. Indien een monumentaal gebouw gebruikt wordt door mensen, is er immers ook thermisch comfort wenselijk. Indien een monumentaal gebouw niet gebruikt wordt door mensen, is een binnenklimaat wenselijk dat gunstig is voor de conservering van het gebouw, interieur en collectie. De binnenklimaatparameters die geschikt zijn voor conservering betreffende temperatuur en RV, vallen over het algemeen binnen een nauwere bandbreedte dan de parameters waarin een mens zich comfortabel voelt.

Zoals we uit het vorige hoofdstuk kunnen opmaken, zijn de waarden van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid aan de oppervlakken belangrijke parameters 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 binnen Nederland worden toegepast zijn opgesteld door het Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap (Jütte 1994), de ASHRAE (Kelter 2003) en de Rijksgebouwendienst (Rijksgebouwendienst 1996). Het Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap, nu het Instituut Collectie Nederland (ICN), is een onafhankelijk kennisinstituut voor beheer en behoud van roerend cultureel erfgoed. ASHRAE is de afkorting van 'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers'. Dit is een Amerikaanse vereniging van ingenieurs. De Rijksgebouwendienst is een overheidsinstelling met als belangrijkste taken het bevorderen en bewaken van stedenbouwkundige inpassing en de architectonische kwaliteit van rijksgebouwen. Tevens behoort het beheren van de rijksgebouwen tot hun taak.

2.3.1 Comfortabel binnenklimaat voor de mens

Uit verschillende onderzoeken (ASHRAE 2004, Fang 1998) is bekend dat de mens, afhankelijk van het seizoen, een relatief breed gebied voor wat betreft temperatuur en RV als comfortabel ervaart. Waarden van de RV tussen de 25% en 65% en temperaturen tussen de 17°C en 26°C worden afhankelijk van het seizoen als comfortabel ervaren. Figuur 6 geeft het verband weer

tussen luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Daarnaast spelen bij thermisch comfort onder andere oppervlaktetemperaturen en stralingsasymmetrie een rol.



Figuur 6 In bovenstaande grafieken is het gebied voor thermisch comfort weergegeven. In de linker figuur is de luchttemperatuur uitgezet tegen de RV. In de rechter figuur is de luchttemperatuur uitgezet tegen de gemiddelde wandtemperatuur. [bron: Leusden et al. 1951]

2.3.2 Klimaatrichtlijnen Instituut Collectie Nederland

Door middel van literatuur en eigen onderzoek heeft Instituut Collectie Nederland uitgangsklimaatrichtlijnen opgesteld voor een gemengde collectie. Deze richtlijnen zijn weergegeven in de publicatie “Passieve conservering; klimaat en licht” van Dr. Jütte (Jütte 1994). Het gewenste binnenklimaat voor conservering van een gemengde collectie en interieur is in deze publicatie als volgt gespecificeerd:

- de gewenste RV in de vertrekken bedraagt $52\% \pm 3\%$
- de gewenste temperatuur in de vertrekken ligt tussen de 2°C en 25°C
- de variatie mag per 24 uur niet meer dan 3°C bedragen
- de variatie in RV mag niet meer zijn dan 2% per uur en 3% per 24 uur
- indien men een vaste temperatuur handhaaft moet deze niet boven de 18°C gekozen worden, bij voorkeur tussen de 16°C en 18°C met een variatie van maximaal 1°C
- de RV dient ingesteld te worden op een absolute ondergrens van 48% en een absolute bovengrens van 55%.

Hierbij geldt dat aangegeven temperaturen minimum en maximum waarden zijn, indien men ervan uitgaat dat men met variabele temperaturen werkt.

2.3.3 Klimaatrichtlijnen ASHRAE

In het “ASHRAE applications handbook 2003” zijn in “Chapter 21: Museums, libraries and archives” (Kelter 2003) ontwerpparameters voor klimaatinstallaties in musea en monumentale gebouwen weergegeven. Tabel 3 geeft de mogelijke effecten weer van verschillende setpoints van de klimaatinstallatie, gebaseerd op onderzoeksresultaten. Voorkomende fluctuaties in het binnenklimaat zijn gereduceerd tot vijf klassen: AA, A, B, C en D. Klasse A en AA zijn vaak het hoogst haalbare voor de meeste musea en tentoonstellingsruimten. In deze klasse wordt het binnenklimaat door de installatie binnen een zeer nauwe bandbreedte gehouden. Klasse B en C zijn bruikbaar en toepasbaar voor veel kleine en middelgrote gebouwen en zijn vaak de best haalbare richtlijnen die mogelijk zijn in monumentale gebouwen. In klasse D speelt slechts het elimineren van hoge relatieve luchtvochtigheden een rol.

Tabel 3 Richtlijnen voor temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in musea volgens ASHRAE.

Setpoint voor jaarlijks gemiddelde	Maximale fluctuaties en gradiënten in geklimatiseerde ruimte			Risico's en voordelen voor collectie
	Klasse van regeling* *zie ook tabel 1	Korte fluctuaties plus ruimte gradiënten	Seizoens aanpassingen in setpoints	
50% RV (of historisch jaarlijks gemiddelde voor permanente collecties) Temperatuur tussen 15 en 25°C	AA Precieze regeling, geen seizoensveranderingen	±5% RV, ±2 K	RV constant, 5 K hoger, 5 K lager	Geen risico op mechanische schade voor meeste objecten en schilderijen. Sommige metalen en mineralen kunnen degraderen als 50% RV boven de kritische RV is. Chemisch onstabiele objecten beschadigd binnen decennia
	A Precieze regeling, enige gradiënten en seizoensveranderingen, niet beide	±5% RV, ±2 K	10% RV hoger, 10% RV lager, 5 K hoger, 10 K lager	Klein risico op mechanische schade voor zeer gevoelige objecten; geen risico op mechanische schade voor meeste objecten, schilderijen, foto's en boeken. Chemisch onstabiele objecten beschadigd binnen decennia
		±10% RV, ±5 K	RV constant, 5 K hoger, 10 K lager	
	B Precieze regeling, enige gradiënten plus temperatuurverlaging in winter	±10% RV, ±5 K	10% RV hoger, 10% RV lager, 10 K hoger, maar niet boven 30°C. Zo laag als nodig i.v.m. RV beheersing	Gematigd risico op mechanische schade aan zeer gevoelige objecten; minimaal risico voor de meeste schilderijen en foto's, sommige objecten en boeken; geen risico voor vele objecten en boeken. Chemisch onstabiele objecten beschadigd binnen decennia, korter als het regelmatig 30°C wordt, koude winters verdubbelen levensduur.
	C Voorkomt alle hoogrisico extremen	Tussen de 25 en 75% RV jaarlijks. Temperatuur zelden boven 30°C, gewoonlijk onder 25°C.		Hoog risico op mechanische schade voor zeer gevoelige objecten; middelmatig risico voor de meeste schilderijen en foto's, sommige objecten en boeken. Minimaal risico voor de meeste objecten en boeken. Chemisch onstabiele objecten beschadigd binnen decennia, korter als het regelmatig 30°C wordt, koude winters verdubbelen levensduur.
	D Voorkomt hoge RV	Betrouwbaar onder 75% RV		Hoog risico op plotselinge of opstapelende mechanische schade voor de meeste objecten en schilderijen door scheuren t.g.v. lage RV. Voorkomt aantasting door hoge RV, met name van fineer, schilderijen, papier en foto's. Chemisch onstabiele objecten beschadigd binnen decennia, korter als het regelmatig 30°C wordt, koude winters verdubbelen levensduur.

Bron: aangepast overgenomen uit (Kelter 2003). Aanpassingen betreffen het weglaten van de kolommen met de richtlijnen voor archieven en bibliotheken die chemisch instabiele collecties en speciale metaalcollecties bevatten.

2.3.4 Klimaatrichtlijnen Rijksgebouwendienst

Begin jaren '90 heeft het Ministerie van VROM in samenwerking met de Rijksgebouwendienst het Deltaplan voor Cultuurbehoud opgezet (Rijksgebouwendienst 1996). Het doel van deze adviesrichtlijn is om met een prestatie/kwaliteitsbeschrijving tot een verantwoord binnenklimaat te komen voor de bewaring van onze cultuurgoederen. Binnen het Deltaplan wordt met betrekking tot museumdepots gesproken over de vijf klassen:

- Klasse 1: strikte conservering
- Klasse 2: redelijke conservering
- Klasse 3: minimale conservering
- Klasse 4: geen conservering
- Klasse 5: specifieke conservering

Klasse 1 geeft als richtlijn in de winter een temperatuur $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $50\% \pm 5\%$. Voor de zomer geldt een temperatuur $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $55\% \pm 5\%$.

Klasse 2 heeft dezelfde setpoints als klasse 1, maar de temperatuur mag $\pm 4^{\circ}\text{C}$ fluctueren, de relatieve luchtvochtigheid $\pm 10\%$.

Klasse 3 wordt gebruikt voor een minimale conservering. De temperatuur moet in de winter minimaal 12°C zijn. Voor de zomer is er geen begrenzing voor de temperatuur opgegeven. De relatieve luchtvochtigheid in de winter dient minimaal 35% en in de zomer maximaal 75% te zijn. Er worden geen maximale fluctuaties gegeven.

Klasse 4 houdt in dat er geen specifieke klimaateisen worden gesteld aan een ruimte.

Klasse 5 tenslotte is voor bijzondere collecties waaraan specifieke eisen worden gesteld. Deze worden dan per geval apart bepaald.

Het is niet geheel duidelijk waarop de eisen van de RGD gebaseerd zijn. De strengste klasse, klasse 1, die door de RGD als strikte conservering wordt aangeduid, geeft een relatief ruime bandbreedte in vergelijking tot de klimaatrichtlijn zoals gegeven door het ICN.

2.3.5 Haalbaarheid richtlijnen

De klimaatrichtlijnen zoals gesteld door ICN zijn zonder het installeren van een luchtbehandelingssysteem voorzien van bevochtiging en ontvochtiging, niet haalbaar in een monumentaal pand. In een monument is het gezien de ingreep op het gebouw beter om met relatief eenvoudige middelen te streven naar een afvlakking van de extremen in het binnenklimaat. Dit komt ook de financiële haalbaarheid ten goede. Afhankelijk van het type monument en of het mogelijk en wenselijk is om op het binnenklimaat in te grijpen, kan bijvoorbeeld ASHRAE klasse B of ASHRAE klasse C als richtlijn aangehouden worden.

Eén ideaal klimaat voor een gemengde collectie bestaat niet. Omdat het niet mogelijk is om een waarde te vinden waarbij alle ideale waarden elkaar overlappen, moet er altijd gezocht worden naar een compromis. Om tot dit compromis te komen, moeten de effecten van de verschillende bedreigingen voor gebouw en interieur tegen elkaar afgewogen worden. Bijzonder gevoelige objecten kunnen bijvoorbeeld verplaatst worden naar een ruimte met stabielere condities, of in een klimaatvitrine geplaatst worden.

Het klimaat geschikt voor comfort en geschikt voor conservering heeft een overlappend gebied. Indien het gebouw en gebruiksfunctie heeft, is het wenselijk dat het binnenklimaat zich binnen dit gebied bevindt.

2.4 Toegepaste technieken voor RV-beheersing

In een monumentaal gebouw is het gewenst de extremen in het binnenklimaat te beperken in verband met de invloed op gebouw en interieur. Tevens is er vaak thermisch comfort gewenst omdat het gebouw nog een gebruiksfunctie heeft. Om thermisch comfort te bieden is er in de meeste gevallen een c.v.-installatie aangebracht, of zijn sommige vertrekken van lokale verwarming voorzien.

De in Nederland toegepaste technieken om de relatieve luchtvochtigheid in een monumentaal gebouw te beheersen kunnen we onderscheiden in:

- Complete luchtbehandeling
- Mobiele bevochtigers
- Mobiele ontvochtigers
- Hygrostatisch geregeld verwarmen
- Hygrostatisch geregeld ventileren
- Toepassen van vochtbufferende materialen

2.4.1 Complete luchtbehandeling

In Nederland bestaan veel monumentale gebouwen die voorzien zijn van een complete luchtbehandelingsinstallatie. Een luchtbehandelingssysteem is in staat het binnenklimaat vrijwel constant te houden door gebruik te maken van koeling, verwarming, bevochtiging en ontvochtiging van de lucht. Het plaatsen van een dergelijk systeem in een monumentaal gebouw

roept echter onherroepelijk een aantal problemen op, die alleen opgelost kunnen worden door het aanpassen van de constructie van het gebouw. De installatie van het systeem heeft, net als de aanpassing van de constructie, aantasting van de monumentaliteit tot gevolg.

Doordat buitenwanden in monumenten meestal ongeïsoleerd zijn, zal er tijdens het stookseizoen condensatie aan deze koude oppervlakken plaatsvinden ten gevolge van de bevochtigde binnenlucht. Indien enkel glas aanwezig is, treedt hier vaak het eerst condensatie op. Tevens bestaat er gevaar op condensatie in de constructie, ten gevolge van damptransport.

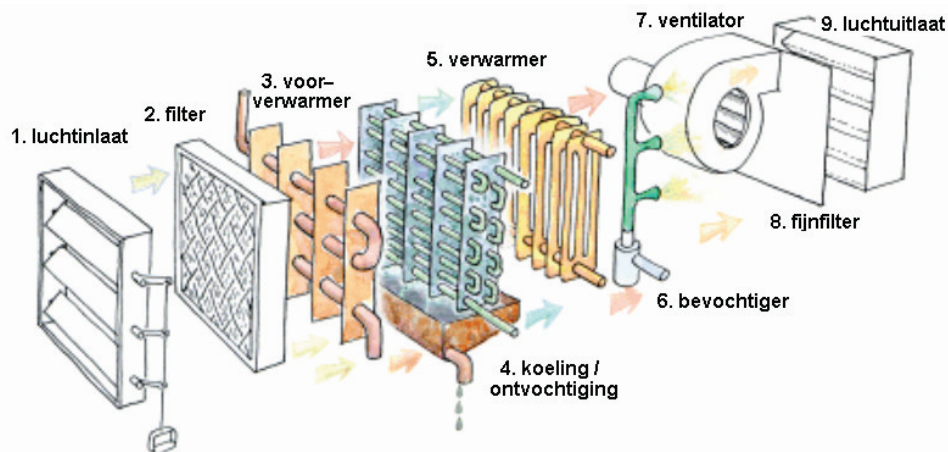
Deze risico's op condensatie moeten vervolgens opgevangen worden door het aanbrengen van:

- een dampremmende isolatie aan de binnenzijde van de buitenwanden en dak
- isolatie aan de buitenzijde van de buitenwanden
- achterzetbeglazing of dubbel glas

Het installeren en wegwerken van de luchtbehandelingskast, het kanaalwerk en roosters zorgen voor een ander probleem. Dit is een rigoureuze ingreep op het gebouw, waar vaak veel hak- en breekwerk bij komt kijken. In enkele gevallen is het echter mogelijk om gebruik te maken van bestaande schachten en schouwen. De constructieve en visuele ingrepen op het gebouw kunnen dan vaak beperkt blijven.

Werkingsprincipe

Zie Figuur 7 voor een schematische weergave van de werking van een luchtbehandelingskast. De door de luchtinlaat aangezogen lucht wordt eerst over het groffilter geleid. Vervolgens vindt er, indien nodig, voorverwarming van de lucht plaats. Dit is eventueel benodigd om aanvriezing aan de verdampers van de koelsectie tegen te gaan. In de koeler wordt de lucht indien nodig gekoeld en ontvochtigd door de lucht tot onder het dauwpunt te koelen. Na de koelsectie wordt de lucht tot de gewenste inblaastemperatuur gebracht en indien nodig bevochtigd. Via een ventilator wordt de lucht over het fijnfilter en actieve filters geblazen en verlaat vervolgens via de luchtuitlaat de luchtbehandelingskast. De behandelde lucht wordt hierna via kanalen en inblaasroosters de gewenste vertrekken in geblazen.



Figuur 7 Het werkingsprincipe van een typische luchtbehandelingskast. De lucht doorloopt na de luchtinlaat achtereenvolgens de volgende secties: grof-filter, voorverwarming, koel/droogsectie, verwarmers, bevochtiger, ventilator en het fijn-filter. [bron: www.padfield.org]

Voordelen

- binnenklimaat in termen van temperatuur, RV en luchtzuiverheid goed beheersbaar
- monitoring binnenklimaat via reeds voorhanden GBS mogelijk

Nadelen

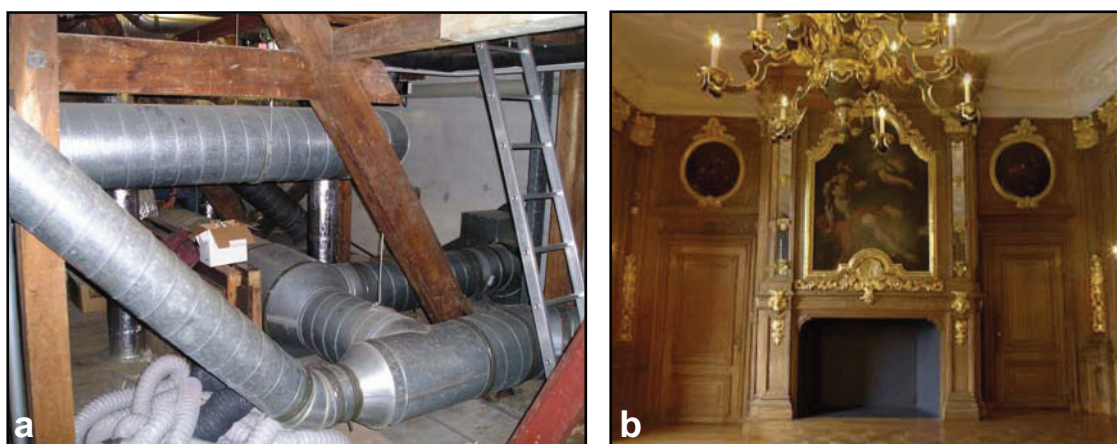
- aanpassing constructie noodzakelijk (isolatie aanbrengen, kieren dichten)
- visuele aantasting interieur door roosters en kanaalwerk

- hoog energiegebruik
- hoge installatiekosten
- onderhoudsgevoelig
- gevaar indien onjuist ingeregeld
- gevaar op storingen en/of uitval

Voorbeelden

Prominente voorbeelden zijn het Rijksmuseum te Amsterdam en het Mauritshuis te Den Haag. Momenteel wordt het Rijksmuseum rigoureus verbouwd. Het nieuwe gebouw zal een complete luchtbehandelingsinstallatie bevatten. De wanden worden voorzien van isolatie om condensatieproblemen te voorkomen.

Het Mauritshuis is ook voorzien van een complete luchtbehandelingsinstallatie. De luchtbehandelingskast bevindt zich op de zolder. De lucht wordt ingeblazen via vensterbanken onder de gevelopeningen. De lucht wordt via de originele schouwen afgezogen. In ruimten zonder gevelopeningen is een afzuigrooster weggewerkt in het plafond.



Figuur 8 Een afbeelding van het kanaalwerk op de zolder van het Mauritshuis (a). De via de vensterbanken ingeblazen lucht wordt via de schouwen afgezogen (b). [bron: TU/e en www.mauritshuis.nl]

2.4.2 Mobiele bevochtigers

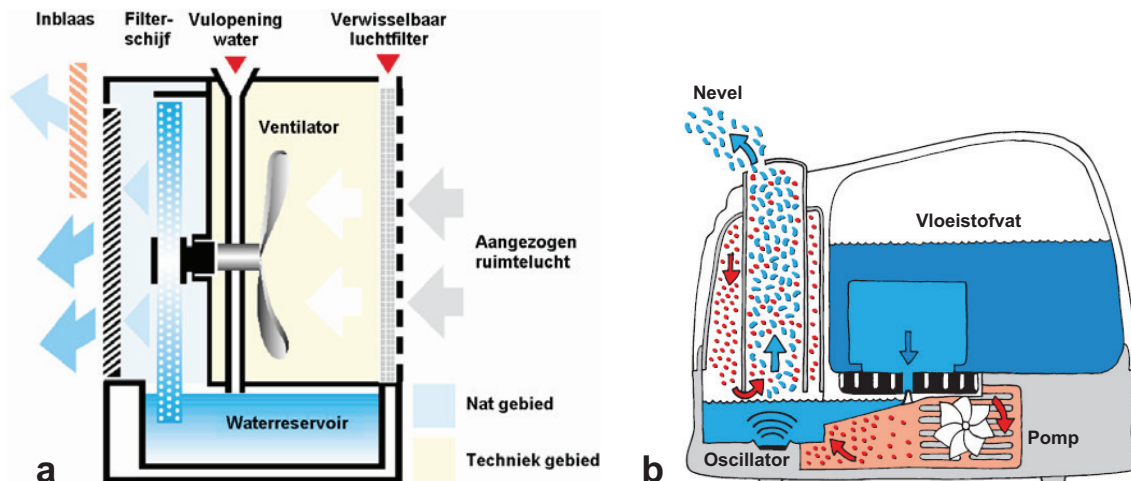
Er zijn in Nederland drie verschillende soorten luchtbevochtigers op de markt, onderverdeeld in twee categorieën. Het betreft hier de adiabatische bevochtiger en de isothermische bevochtiger. De adiabatische bevochtiger is onder te verdelen in de koudwaterverdamer en de ultrasone bevochtiger. De isothermische bevochtiger werkt volgens het principe van stoombevochtiging.

Werkingsprincipe

Adiabatische luchtbevochtigers voegen vocht aan de lucht toe zonder thermische energie aan het water toe te voegen. Bij de adiabatische luchtbevochtiger volgens het koudwaterverdampingsprincipe wordt de te bevochtigen lucht met een ventilator door een nat filter geblazen, zie Figuur 9a. Tijdens het passeren van de lucht door het filter neemt de luchtvochtigheid van deze lucht toe. Bij deze wijze van bevochtigen komen er geen waterdruppels in de ruimte en worden er dus ook geen kalk en mineraalaanslag veroorzaakt. Dit type bevochtiger komen we het meest tegen in musea.

Bij de adiabatische luchtbevochtigers volgens het ultrasoon bevochtigingsprincipe wordt met behulp van een oscillator ultrasoon geluid geproduceerd (zie Figuur 9b). Door de geluidsgolven wordt een waternevel gecreëerd welke bestaat uit zeer fijne waterdruppeltjes van 1 tot 5 μm .

Een isothermische stoombevochtiger verhit met een elektrisch verwarmingselement een waterreservoir. De bij een constante temperatuur verkregen waterdamp wordt vervolgens aan de lucht toegevoegd. De stoombevochtiger wordt veel toegepast in luchtbehandelingskasten van een airconditioninginstallatie en wordt nauwelijks als mobiele unit op de markt gebracht. De watertoevoer geschiedt namelijk vaak via een vaste waterleiding.



Figuur 9 Werkingsprincipes van een adiabatische luchtbevochtiger volgens het koudverdampingsprincipe (a) en een ultrasone luchtbevochtiger (b). Bij het koudverdampingprincipe wordt de aangezogen ruimtelucht door een nat filter geblazen. Bij de ultrasone bevochtiger wordt met behulp van ultrasone trillingen water verneveld en, na het afvangen van de grove druppels, aan de lucht toegevoegd. [bron: Brune GmbH]

Mobiele luchtbevochtigers worden middels een in het apparaat geïntegreerde, of in de ruimte gemonteerde hygrostaat geschakeld.

Voordelen

- mobiel inzetbaar
- filtering lucht mogelijk

Nadelen

- visueel
- foutief beheer (instelling, opstelplaats)
- geluid
- onderhoud (water toevoer, vervangen filters, kalibratie sensoren)

Voorbeelden

De effecten van luchtbevochtiging in een monumentaal gebouw zijn nader onderzocht in casus 1: Luchtbevochtiging in museum Amstelkring.

2.4.3 Mobiele ontvochtigers

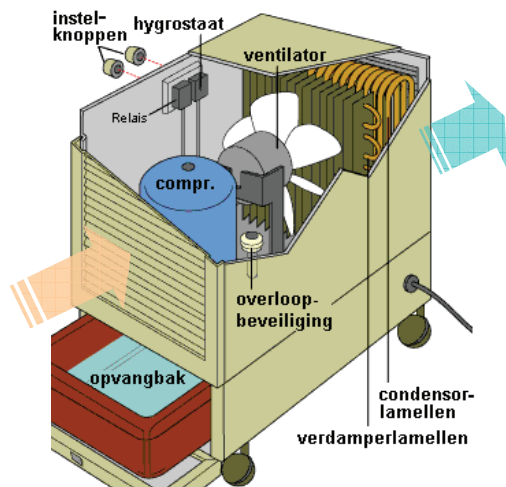
Mobiele ontvochtigingsunits kunnen we onderverdelen in twee types: ontvochtigers gebaseerd op koeldroging of ontvochtigers gebaseerd op absorptiedroging van de ruimtelucht.

Werkingsprincipe

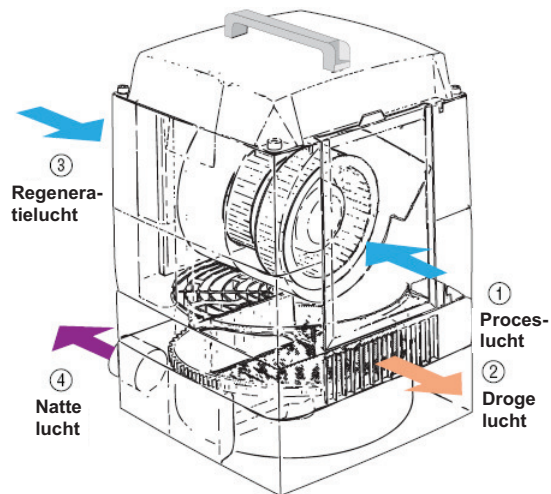
Bij koeldroging wordt lucht tot onder de dauwpuntstemperatuur afgekoeld, waardoor er condensatie plaatsvindt. Vervolgens wordt deze ontvochtigde lucht tot de ruimtetemperatuur naverwarmd en de ruimte ingeblazen. Het condenswater wordt opgevangen in een verzamelbak, of via een slang afgevoerd. Voor een schematische weergave van het werkingsprincipe zie Figuur 10.

Het principe van absorptiedroging is gebaseerd op een ontvochtigingswiel, dat vaak is bekleed met silicagel. De te ontvochtigen lucht stroomt door het ontvochtigingswiel, waar het zijn vocht af staat aan het wiel. De gedroogde lucht wordt vervolgens de ruimte ingeblazen. Om een verzadiging van het ontvochtigingswiel tegen te gaan wordt een verwarmde luchtstroom (regeneratielucht) in tegengestelde richting door een afgeschermd deel van het wiel geblazen. Deze regeneratielucht is 15 tot 20°C opgewarmd en heeft daarom een lage RV. De waterdamp

kan eventueel direct naar buiten worden afgevoerd of als condensaat in een reservoir worden opgevangen. Absorptiedrogers worden zelden als mobiele units toegepast, maar hoofdzakelijk in luchtbehandelingskasten. Voor een schematische weergave van het werkingsprincipe zie Figuur 11.



Figuur 10 Werkingsprincipe van een mobiele koeldroger. De lucht wordt over de verdamer geleid en tot onder het dauwpunt gekoeld. Vervolgens wordt de lucht na-verwarmd door de condensor. [bron: www.elite-uk.co.uk]



Figuur 11 Werkingsprincipe van een mobiele absorptiedroger. De aangezogen lucht wordt ontvochtigd m.b.v. het ontvochtigingswiel. [bron: Munters Vochtbeheersing]

Voordelen

- mobiel inzetbaar

Nadelen

- visueel
- foutief beheer (instelling, opstelplaats)
- geluid
- onderhoud (water afvoer, vervangen filters, kalibratie sensoren)

Voorbeelden

Mobiele ontvochtigers worden veelvuldig toegepast, zoals ook in kasteel Amerongen (zie naaststaande afbeelding).



Figuur 12 Het gebruik van een mobiele ontvochtiger in kasteel Amerongen.

2.4.4 Conservation Heating

Conservation heating wordt ook wel hygrostatisch geregeld verwarmen genoemd. Conservation heating wordt in Canada (LaFontaine 1982), de Verenigde Staten (Kerschner 1992) en Groot Brittanië (Staniforth 1984) reeds jaren succesvol toegepast. In Nederland is het slechts op beperkte schaal toegepast en niet al te succesvol. Hieraan ligt onjuist beheer ten grondslag.

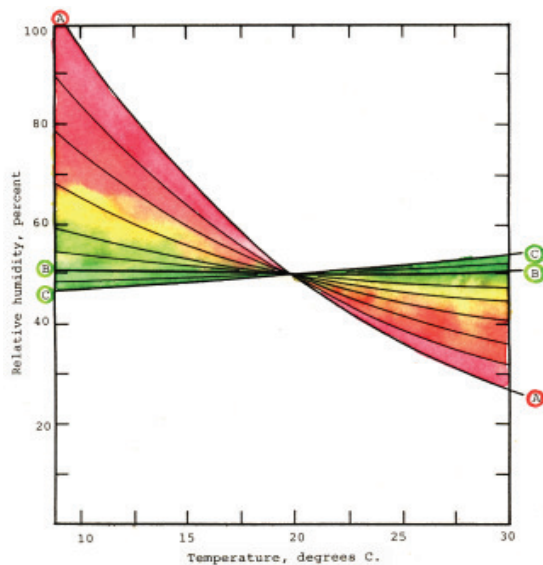
Werkingsprincipe

Dit principe van verwarmen maakt gebruik van het effect dat bij een constant absoluut vochtgehalte het variëren van de temperatuur leidt tot variaties in de relatieve luchtvochtigheid. Indien de RV van de ruimtelucht boven een ingestelde maximumwaarde komt, schakelt de verwarming in. Hierdoor stijgt de temperatuur en zal bij een constant absoluut vochtgehalte de RV dalen. Indien de RV zich weer onder de maximum grens bevindt, schakelt de verwarming

uit. De ruimte kan uiterlijk opgestookt worden tot een ingestelde maximum waarde en de verwarming zal uitblijven tot een ingestelde minimumwaarde. Het principe van conservation heating is mogelijk met behulp van verwarmingssystemen zoals bijvoorbeeld een bestaande c.v.-installatie, elektrische radiatoren of luchtverwarming. Het systeem is ideaal in een monumentaal gebouw dat niet of nauwelijks gebruikt wordt en waar dus geen thermisch comfort gewenst is. Het absoluut vochtgehalte is tijdens de koude periode namelijk relatief laag. Hierdoor zal een verwarmingssysteem geregeld volgens conservation heating gedurende deze koude periode vaak slechts tot de ingestelde ondergrens verwarmen. Dit leidt tot een laag thermisch comfort voor mensen.

Voor ruimtes met een laag ventilatievoud ($<1 \text{ h}^{-1}$) en veel hygroscopisch materiaal is bekend dat het toepassen van conservation heating tot problemen met de regeling kan leiden (Padfield 1996). Een voorbeeld van zo een ruimte is bijvoorbeeld een bibliotheek. Indien er een te hoge RV gemeten wordt zal het systeem beginnen met verwarmen. Door de stijgende temperatuur geven de aanwezige hygroscopische materialen (papier) vocht af aan de lucht. Hierdoor stijgt het absoluut vochtgehalte van de lucht. Bij de aanwezigheid van een grote hoeveelheid hygroscopisch materiaal is het zelfs mogelijk dat de RV stijgt bij een stijgende temperatuur (zie Figuur 13, lijn C-C). Het gevolg hiervan is dat het verwarmingssysteem ingeschakeld zal blijven en de temperatuur verder stijgt; oftewel instabiliteit van de regeling.

In bovengenoemd voorbeeld bepaalt het vochtgehalte van de aanwezige materialen de relatieve luchtvochtigheid. Dit effect wordt ook wel RV buffering genoemd (Padfield et al. 1990). Het opstellen van een ontvochtiger kan hier uitkomst bieden. Deze ontvochtiger neemt dan het vrijkomende vocht op, waardoor de regeling stabiel blijft.



Figuur 13 Lijn A-A geeft de RV in een lege ruimte weer indien de temperatuur stijgt. Bij een stijgende temperatuur daalt de RV. Als men hygroscopisch materiaal, zoals een bepaalde hoeveelheid cellulose aan de ruimte toevoegt, zal de RV constant blijven bij een variërende temperatuur (lijn B-B). Als er meer cellulose aan de ruimte wordt toegevoegd, zal de RV zelfs stijgen bij een stijgende temperatuur (lijn C-C).
[bron: www.padfield.org]

Uit de literatuur zijn er enkele varianten van conservation heating bekend. Bij een variant wordt er gedurende het hele jaar 5°C boven de gemiddelde buitentemperatuur gestookt. Ook is het mogelijk te verwarmen met een constant vermogen. Dit type van conservation heating kan uitkomst bieden in gevallen met veel hygroscopisch materiaal en een laag ventilatievoud.

Voordelen

- betere conservering van interieur en objecten t.o.v. conventioneel verwarmen
- energie zuiniger t.o.v. conventioneel verwarmen
- relatief simpel en goedkoop systeem
- klein temperatuurverschil binnen/buiten i.v.m. condensatie

Nadelen

- thermisch comfortverlies
- niet toepasbaar in ruimten met veel hygroscopisch materiaal
- versnelde chemische degradatie in vochtige perioden t.g.v. van hogere temperaturen

Voorbeelden

In Nederland wordt conservation heating toegepast in de Trompenburgh te 's Gravenland. Als verwarmingslichamen worden hiervoor authentiek uitzijnde kachels met een modern binnenwerk gebruikt. In het Natuur en Milieu Centrum te Weert was ook conservation heating toegepast. Echter door onjuist beheer is de RV te hoog opgelopen, met als gevolg schimmeligroei aan de collectie opgezette dieren.

In casus 2 is de toepasbaarheid van conservation heating in Nederland nader onderzocht middels een simulatiestudie en een testopstelling in het jachthuis St. Hubertus.

2.4.5 Hygrostatisch geregeld ventileren

Uit de literatuur (Maekawa 2002) is er bekend dat in een warm en vochtig klimaat met buitenlucht geventileerd kan worden om binnen de RV te beheersen. Het principe berust op het ventileren met warmere buitenlucht met een gelijk absoluut vochtgehalte als binnen. Hierdoor zal de RV binnen dalen en wordt eventueel accumulerend vocht weggeventileerd. Doen wij dit in een gematigd klimaat dan kan dit leiden tot condensatie in het gebouw (Schellen 2002). In een gematigd klimaat kan men echter ook met buitenlucht ventileren om de RV enigszins te beheersen. Afhankelijk van het absoluut vochtgehalte van de buitenlucht, kan middels ventilatie op bepaalde perioden binnenlucht gedroogd of bevochtigd worden.

Werkingsprincipe

Indien er geen vochtproductie in het gebouw aanwezig is en er geen overmatige vochtbuffering plaatsvindt, kan men ervan uitgaan dat het absoluut vochtgehalte van de binnenlucht het absoluut vochtgehalte van de buitenlucht volgt. Indien er binnen een vochtproductie plaatsvindt, zal het absoluut vochtgehalte van de binnenlucht over het algemeen hoger liggen dan het absoluut vochtgehalte van de buitenlucht. Als er in deze situatie geventileerd wordt met buitenlucht, wordt de binnenlucht ontvochtigd. Gedurende koude perioden is er naverwarming van de in te blazen lucht nodig.

Het is in het Nederlandse klimaat over het algemeen niet mogelijk om binnenlucht te bevochtigen met buitenlucht. Dit zal een ongewenst groot temperatuurverschil tot gevolg hebben. De toepasbaarheid van hygrostatisch ventileren in het Nederlandse klimaat behoeft nader onderzoek.

Voordelen

- ventilatie met buitenlucht
- filtering inblaaslucht mogelijk

Nadelen

- afhankelijk van het heersende absoluut vochtgehalte buiten
- extra luchtvervuiling binnen zonder filtering

Voorbeelden

Er zijn binnen Nederland geen voorbeelden bekend van toegepaste hygrostatische ventilatie. Momenteel doet de TU/e onderzoek naar het toepassen van hygrostatische ventilatie in het Muiderslot.

2.4.6 Toepassen van vochtbufferende materialen

In een ruimte slechts gevuld met lucht, zal de RV dalen als de temperatuur stijgt. Als er hygroscopisch materiaal, bijvoorbeeld hout of papier, aan de ruimte wordt toegevoegd, zal de verandering in RV gedeeltelijk gecompenseerd worden door de hygroscopische bufferwerking van het materiaal. Als de RV verandert, zal het materiaal vocht absorberen of desorberen aan de lucht. Bij bepaalde hoeveelheden hygroscopisch materiaal in de ruimte is het mogelijk dat de RV constant blijft bij een fluctuerende temperatuur. De RV is dan gebufferd door het hygroscopisch materiaal in de ruimte. Indien het vertrek in verhouding veel hygroscopisch materiaal bevat, is het zelfs mogelijk dat bij het verwarmen van de ruimte de RV stijgt. Zie ook

Figuur 13. Dit komt door de stijging van het absoluut vochtgehalte van de lucht door de afgifte van vocht door materialen.

Werkingsprincipe

Veelvuldig gebruikte hygroscopische afwerkingsmaterialen zijn bepleistering, houten vloeren en textielen. Bij renovaties van musea (zoals het Rijksmuseum te Amsterdam) wordt daarom geopteerd voor hygroscopisch bufferende pleisters. Wanneer de pleister beschilderd wordt met een onjuiste verfsoort, wordt de vochtbufferende werking echter grotendeels te niet gedaan. Het is daarom belangrijk dat een vochtdoorlatende verfsoort wordt toegepast, zoals bijvoorbeeld Keimverf.

Vochtbufferend materiaal is vroeger bijna nooit opzettelijk toegepast in monumentale gebouwen. Metingen in monumentale gebouwen maken het bufferende effect vooral zichtbaar in bibliotheken en archieven die veel vochtbufferend papier bevatten.

Silicagel zijn vaste, vochtabsorberende kristallen van een silicaat, gemaakt uit natriumsilicaat. Silicagel is ook een hygroscopisch materiaal dat de RV kan stabiliseren. Silicagel bindt echter water op een chemische wijze aan zich. Het gel kan water opnemen tot dat het verzadigd is. De gelkorrels kunnen dan geregenereerd worden door deze te drogen bij 150°C. Hierna zijn ze weer in staat om vocht op te nemen.



Figuur 14 Silicagelkorrels. [bron: mo.atz.jp/micro]

Voordelen

- te integreren in het interieur (bijvoorbeeld pleister)
- vaak reeds voorhanden in meer of minder mate (bouwmaterialen)

Nadelen

- foutief beheer: beschilderen van bufferende materialen met onjuiste verfsoort
- regeneratie silicagel nodig

Voorbeeld

Momenteel loopt er in het Rijksmuseum te Amsterdam een proef naar de toepassing calciumsilicaat als vochtbufferend pleistermateriaal.

2.5 Conclusies

Monumentale gebouwen kunnen geclassificeerd worden naar bouwfysische aspecten, aanwezige collectie en gebruik. Uit literatuur is bekend welk type installatie er mogelijk is in monumentale gebouwen, met het daaraan te koppelen binnenklimaat. Indien er bekend is binnen welke bandbreedte het binnenklimaat fluctueert, kunnen er uitspraken worden gedaan over de te verwachten risico's voor gebouw, interieur en collectie.

De in Nederland toegepaste technieken voor RV-beheersing in monumentale gebouwen bestaan voornamelijk uit een complete luchtbehandelingsinstallatie en mobiele be- en ontvochtiging. In mindere mate is hygrostatisch geregeld verwarmen (conservation heating) toegepast. Het gericht gebruik van vochtbufferende materialen zien we voornamelijk in toepassingen met silicagel. Hygrostatisch geregeld ventileren en het actief toepassen van vochtbufferende afwerkmaterialen zoals bepaalde typen pleister, worden momenteel onderzocht.

Optredende problemen bij het toepassen van deze technieken zijn onder te verdelen in:

- mechanische aantasting van gebouw en interieur door installatie
- visuele aantasting van interieur door installatiecomponenten (bijv. roosters en kanalen)
- aantasting ten gevolge van de werking van de toegepaste technieken (zoals oppervlaktecondensatie en foutieve instellingen)
- aantasting ten gevolge van foutief beheer en onderhoud.

3 Meten van binnenklimaatparameters

Het meten van de parameters van het binnenklimaat, is essentieel om de gesteldheid van het binnenklimaat te beoordelen. Binnen dit afstudeeronderzoek zijn er verschillende metingen uitgevoerd. Het betreft hier metingen naar temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, CO₂-concentratie, ventilatievoud en zonne-instraling. In dit hoofdstuk worden de theorieën en toegepaste methoden van het meten kort toegelicht.

3.1.1 Luchttemperatuur

De luchttemperatuur, ook wel droge bol temperatuur genoemd, is gemeten met behulp van een thermistor. Het woord thermistor is een afkorting van thermische resistor, een temperatuurgevoelige elektrische weerstand. Bij een veranderende temperatuur, verandert de weerstand over de sensor.

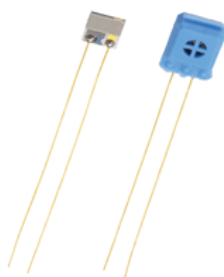


Figuur 15 Een afbeelding van thermistoren voor het meten van temperaturen.

3.1.2 Relatieve luchtvochtigheid

De relatieve luchtvochtigheid is gemeten met behulp van een capacitieve opnemer. Deze sensor bevat een polymeerfilm met hygroscopische eigenschappen. Deze film neemt vocht op of staat vocht af als de relatieve luchtvochtigheid van de omgevingslucht stijgt of daalt. De diëlectrische eigenschappen van de polymeerfilm zijn afhankelijk van de hoeveelheid opgenomen vocht. Als de RV van de omringende lucht verandert, veranderen ook de diëlectrische eigenschappen van de polymeerfilm. Via elektronica in de sensor wordt deze verandering omgezet in een waarde voor de relatieve luchtvochtigheid.

Om de RV en luchttemperatuur te meten is binnen dit onderzoek meetapparatuur toegepast die een combinatie van een temperatuur en RV-sensor bevatten (zie Figuur 17).



Figuur 16 Capacitieve opnemers voor het meten van relatieve luchtvochtigheden.



Figuur 17 Een gecombineerde T/RV-sensor. Onder de afschroefbare kap bevinden zich een thermistor en een capacitieve opnemer.

3.1.3 Oppervlaktecondities

De relatieve luchtvochtigheid nabij een oppervlak met een andere temperatuur dan de lucht, wijkt af van de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht. Vanwege het gevaar van hoge RV's en mogelijke condensatie aan koude oppervlakken dienen hier de oppervlaktetemperaturen gemeten te worden. Hiervoor zijn thermistoren gebruikt.

De relatieve luchtvochtigheid nabij het oppervlak (φ_s) kan vervolgens berekend worden met behulp van de verzadigingsdampspanning behorende bij de lucht- en oppervlaktetemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid van de ruimte (φ_a). De benadering van de verzadigingsdampspanning bij deze temperaturen wordt berekend met behulp van de Magnus-vergelijking:

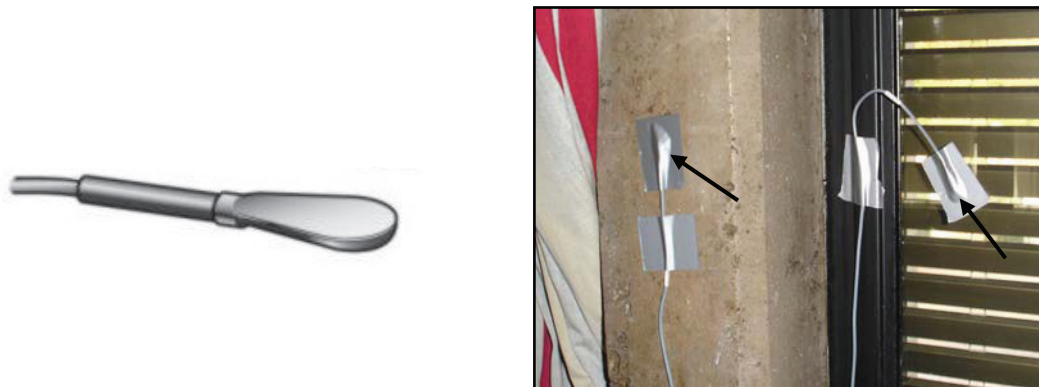
$$P_{sat} = c_1 \cdot \exp\left(\frac{c_2 \cdot T}{c_3 + T}\right) \quad (2)$$

Waarin	P_{sat}	= verzadigingsdampspanning	[Pa]
	c_1	= dampdruk bij 0°C = 611	[Pa]
	c_2	= 17,08	[-]
	c_3	= 234,18	[°C]
	T	= ruimte of oppervlaktemperatuur	[°C]

Deze vergelijking geldt voor temperaturen tussen de 0 en 100 °C. Vervolgens kan uit de verkregen verzadigingsdampspanningen en de RV van de ruimte, de RV aan het oppervlak berekend worden met behulp van:

$$\varphi_s = \frac{\varphi_a \cdot P_{sat_a}}{P_{sat_s}} \quad (3)$$

Waarin	φ_s	= relatieve luchtvochtigheid nabij het oppervlak	[-]
	φ_a	= relatieve luchtvochtigheid in het vertrek	[-]
	P_{sat_a}	= verzadigingsdampspanning behorende bij luchttemperatuur	[Pa]
	P_{sat_s}	= verzadigingsdampspanning behorende bij oppervlaktemperatuur	[Pa]



Figuur 18 Afbeelding van een oppervlakte temperatuursensor (links) en de toepassing ervan (rechts). De sensor wordt vaak met behulp van ducttape tegen het oppervlak aangebracht. In dit voorbeeld is een sensor aan de binnenzijde van een buitenwand en op het glasoppervlak aangebracht.

3.1.4 Stratificatiemeting

Doordat warme lucht opstijgt kan in een ruimte een verschil in temperatuur en relatieve luchtvochtigheid over de hoogte ontstaan. Voor hoge ruimtes zoals een kerk, kan dit verschil in RV oplopen tot enkele tientallen procenten. Dit kan lokaal leiden tot een zeer droge lucht en schade veroorzaken aan interieur en objecten.

Thermische en hygrische stratificatie wordt gemeten door op verschillende hoogten in de ruimte de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid te meten met behulp van een gecombineerde T/RV-sensor.

3.1.5 Invallende zonnestraling

Het is van belang de in het gebouw binnentredende zonnestraling te meten in verband met de hierbij optredende warmtelast ten gevolge van de infraroodcomponent van het licht. Hiertoe wordt er binnen in het verticale vlak en buiten in het horizontale of verticale vlak een pyranometer opgesteld. Met een pyranometer kan de globale inkomende zonnestraling gemeten worden. De globale straling is de som van de directe en diffuse straling en wordt uitgedrukt in de eenheid irradiantie (W/m^2).

Een pyranometer (Figuur 19) is opgebouwd uit een absorberende detector afgedekt door een dubbele glaskoepel. Zonnestraling in de golflengte van 285 tot 2800 nm, dringt door de glaskoepel en valt op een zwart, warmte absorberend oppervlak. Aan het absorberend oppervlak is een thermozuil bevestigd. Een thermozuil is een groep in seriegeschakelde thermokoppels die wordt opgewarmd. Deze thermozuil is in thermisch contact met het absorberend oppervlak, de warme of metende groep genaamd. Een andere gelijke hoeveelheid thermokoppels zijn niet in contact met het absorberend oppervlak, de koude of referentiegroep genaamd. Het temperatuurverschil tussen de metende en de referentiegroep produceert een spanning die proportioneel is aan de invallende zonnestraling (Lester et al. 2005).



Figuur 19 Afbeelding van een pyranometer.

3.1.6 CO₂-meting

Koolstofdioxide is een kleurloos en reukloos gas dat van nature in de atmosfeer voorkomt. De dichtheid bij 0°C en atmosferische druk bedraagt $1,97 \text{ kg/m}^3$. CO₂ is daarmee zwaarder dan lucht ($1,29 \text{ kg/m}^3$). Mensen produceren CO₂. Indien er onvoldoende geventileerd wordt, zal bij een hoge bezettingsgraad de concentratie stijgen. Hoge CO₂-concentraties kunnen leiden tot welzijnsklachten zoals stank en hoofdpijn (Seppänen 1999). Uit het verval van de CO₂-concentratie kan men over het algemeen een maat van het ventilatievoud opmaken.

Metingen worden verricht met behulp van een CO₂-sensor. Deze sensor berust op het principe dat CO₂ infraroodlicht absorbeert. De hoeveelheid geabsorbeerd infraroodlicht geeft een maat voor de concentratie CO₂ in de lucht. De meetwaarde wordt uitgedrukt in ppm, oftewel parts per million.



Figuur 20 CO₂-sensoren. [bron: Vaisala Group]

3.1.7 Buitencondities

Voor de juiste interpretatie van de meetresultaten en de simulatie van het binnenklimaat is een goede monitoring van het buitenklimaat belangrijk. Bij de verschillende projecten binnen het afstudeeronderzoek is permanent de buitenluchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid gemeten. Deze gecombineerde T/RV-sensor wordt buiten opgesteld onder een speciale kap om deze te beschermen tegen regen en vervuiling.

Tevens wordt buiten vaak de zonninstraling in het horizontale vlak gemeten met behulp van een pyranometer. Hiervoor wordt een pyranometer horizontaal geplaatst op een locatie waar de zonnestralen ongehinderd kunnen invallen.



Figuur 21 Het meten van de buitencondities geschiedt met behulp van een gecombineerde T/RV-sensor die is ondergebracht in een speciale afdekkap.

3.1.8 Infraroodthermografie

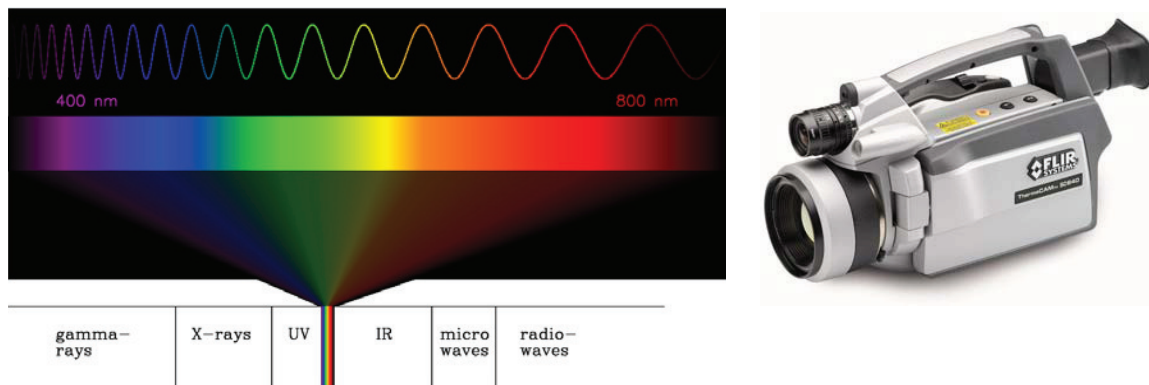
Infraroodthermografie is een techniek waarbij met behulp van een speciale camera infraroodbeelden worden gemaakt, om de thermische energie die een voorwerp uitstraalt te visualiseren.

Thermische energie of infraroodenergie, is licht dat voor mensen niet zichtbaar is omdat de golflengte ervan te lang is om door het oog te worden waargenomen. Het is het deel van het elektromagnetische spectrum dat we waarnemen als warmte. Ieder voorwerp dat warmer is dan het absolute nulpunt straalt warmte uit. Hoe hoger de temperatuur van een voorwerp, hoe groter de uitgezonden infraroodstraling. Infraroodthermografie maakt het hierdoor mogelijk zeer nauwkeurig en contactloos temperaturen te meten.

De nauwkeurigheid van de meting is afhankelijk van de emissiecoëfficiënt van het onderzochte oppervlak. De emissiecoëfficiënt ϵ , is de fractie waarmee een oppervlak uitstraalt ten opzichte van het oppervlak van een zwart lichaam en verschilt per materiaal. Zo is de emissiefactor van bijvoorbeeld beton 0,85 en voor glas 0,90. De juiste emissiefactor dient van te voren op de infraroodcamera ingesteld te worden.

Infraroodthermografie kan gebruikt worden om een beeld te krijgen van de bouwfysische eigenschappen van de gebouwschil. Aan de buitenzijde van een gebouw kan hiermee duidelijk gevisualiseerd worden waar de warmte naar buiten lekt. Omgekeerd kan aan de binnenzijde onderzocht worden waar zich koude oppervlakken bevinden. Aan deze koude oppervlakken treedt een hogere RV op en is zelfs condensatie mogelijk. De relatieve luchtvochtigheid nabij het oppervlak (ϕ_s) kan berekend worden met behulp van de maximale dampspanning behorende bij de lucht- en oppervlaktetemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid van de ruimte.

Infraroodthermografie aan gebouwen vindt bij voorkeur plaats op koude winterdagen. In de winter is het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur groot en daardoor duidelijker visualiseerbaar. De opname wordt dan gemaakt in de ochtend of op een bewolkte dag, dan is de gebouwschil namelijk niet opgewarmd door zonnestraling.



Figuur 22 Weergave van het elektromagnetisch spectrum en een infraroodcamera.

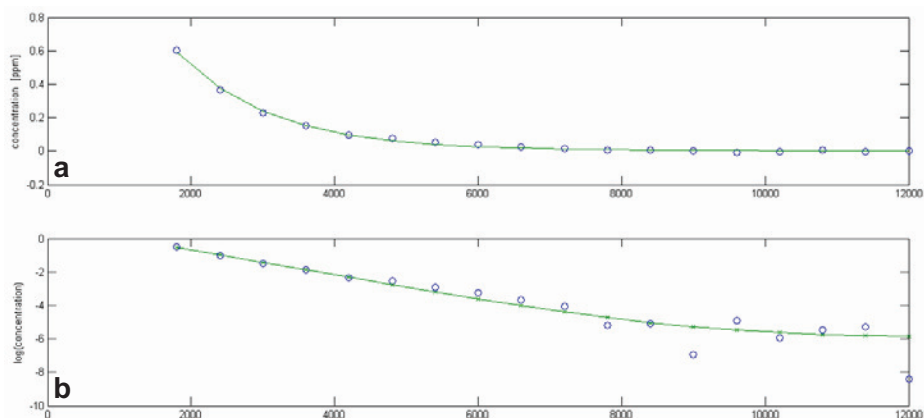
3.1.9 Ventilatievoudmeting

Voor het interpreteren van meetresultaten en het opstellen van simulatiemodellen is het belangrijk om te weten hoe groot het ventilatievoud van een ruimte is. Voor de bepaling van dit ventilatievoud is een standaard methode ontwikkeld waarbij gebruik wordt gemaakt van een zogenaamd tracergas (zwavelhexafluoride, SF_6). Dit tracergas is een in chemische en biologische zin niet-reactieve stof, waarvan de oplosbaarheid en het verspreidingsgedrag overeenkomt met die van de lucht. De dichtheid bij 0°C en atmosferische druk bedraagt $6,52 \text{ kg/m}^3$. SF_6 is daarmee ongeveer 5 maal zwaarder dan lucht ($1,29 \text{ kg/m}^3$). De tracergasmeting is een korteduur meting welk afhankelijk van het optredende ventilatievoud in totaal enkele uren tot dagen duurt. Door het inbrengen van een hoeveelheid SF_6 in de ruimte, ontstaat binnenlucht met een bepaalde concentratie SF_6 . Het is belangrijk dat de ingebrachte hoeveelheid gas goed met de ruimtelucht vermengd wordt. Door de afname van het tracergas in relatie tot de tijd te registreren, kan vervolgens het ventilatievoud van de ruimte bepaald worden met behulp van:

$$n = \frac{\ln C_0 - \ln C_1}{t} \quad (4)$$

Waarin n = ventilatievoud $[\text{h}^{-1}]$
 C_0 = concentratie op een bepaald tijdstip 0 $[\text{ppm}]$
 C_1 = concentratie op een bepaald tijdstip 1 $[\text{ppm}]$
 t = tijd $[\text{h}]$

De berekening kan handmatig gebeuren of met behulp van curve fitting. Bij het gebruik van curve fitting wordt de exponentiële afname bepaald middels rekenprogrammatuur.



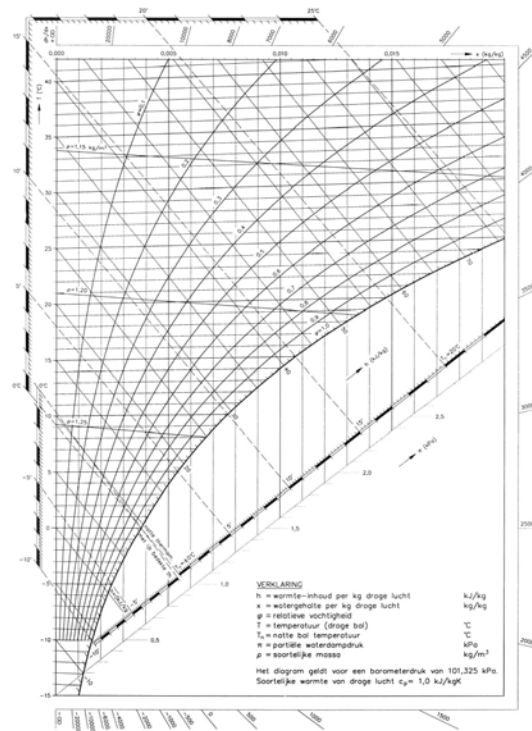
Figuur 23 Met behulp van curve fitting wordt een lijn gegenereerd die zo goed mogelijk tussen de meetwaarden (blauwe cirkels) ligt (a). Door het logaritme van de metingen te nemen wordt een lijn verkregen (b). Over het rechte traject van de lijn is het ventilatievoud constant.

3.1.10 Presentatie meetresultaten

De data verkregen tijdens dit afstudeeronderzoek zijn op verschillende wijzen gepresenteerd. Zo kunnen de data uitgezet worden tegen de tijd. Dit is een relatief eenvoudige en overzichtelijke methode.

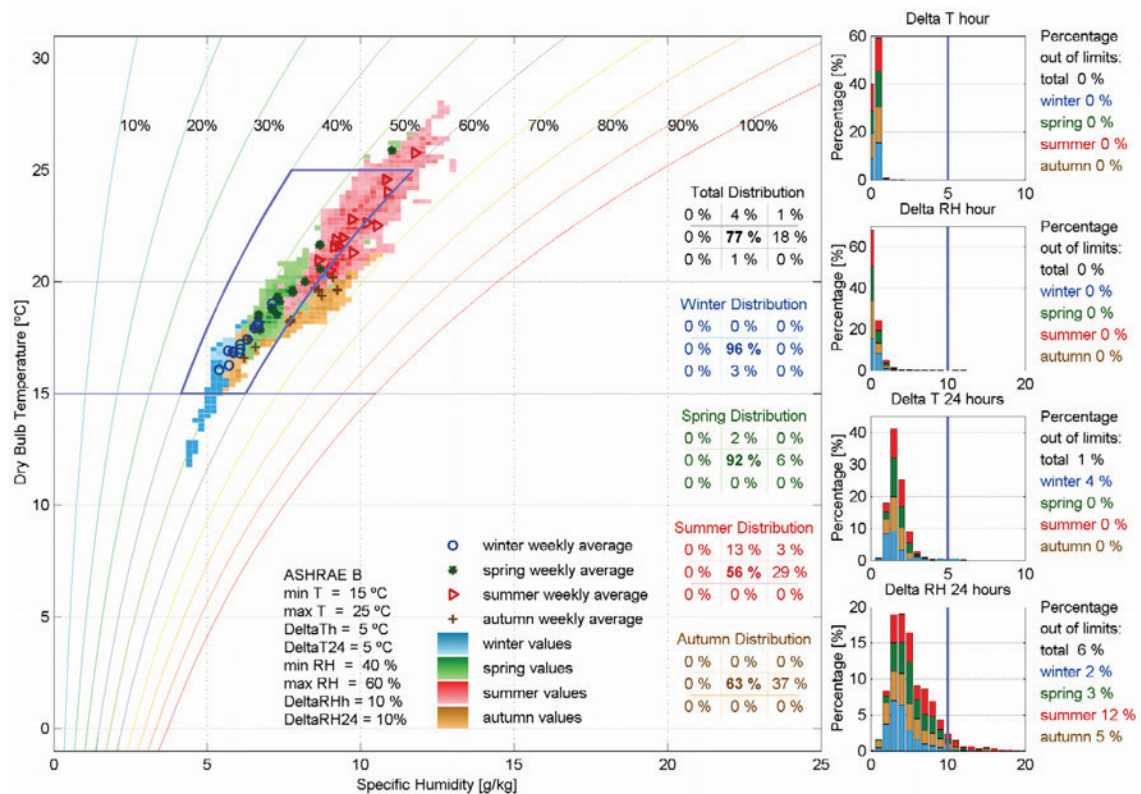
Om de combinatie van resultaten van temperatuur- en relatieve luchtvochtigheidsmetingen overzichtelijk te presenteren, kunnen we gebruik maken van het Mollierdiagram. Het Mollierdiagram, ook wel een h-x diagram of psychrometrische kaart genoemd, is in 1923 ontwikkeld. In dit diagram zijn diverse eigenschappen van vochtige lucht tegen elkaar uitgezet, namelijk:

- h warmte-inhoud per kg droge lucht [kJ/kg]
- x watergehalte per kg droge lucht [kg/kg]
- ϕ relatieve luchtvochtigheid [-]
- T droge bol temperatuur [°C]
- T_n natte bol temperatuur [°C]
- π partiële waterdampdruk [kPa]
- ρ soortelijke massa [kg/m³]



Figuur 24 Afbeelding van het originele Mollier-diagram, ook wel het h-x diagram of psychrometrische kaart genoemd.

Op de TU/e is software ontwikkeld om meetresultaten in een aangepaste versie van dit diagram te projecteren (Martens 2005). Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen de seizoenen en kunnen verschillende statistische gegevens zoals het weekgemiddelde en de variatie van de temperatuur en RV per uur en per dag weergegeven worden. Tevens is het mogelijk de meetwaarden te vergelijken met een binnenklimaatrichtlijn. Er wordt dan duidelijk weergegeven hoeveel procent van de meetwaarden binnen het gewenste gebied valt. Zie Figuur 25 op de volgende pagina voor een voorbeeld van een dergelijke grafiek.



Figuur 25 Afbeelding van het aangepaste Mollier-diagram waarmee meetwaarden geanalyseerd kunnen worden. De data worden als punten in het diagram geprojecteerd waarbij de kleuren seizoensgebonden zijn. Vervolgens is het mogelijk de verkregen data te vergelijken met een klimaatrichtlijn, zoals in dit voorbeeld ASHRAE klasse B.

4 Modelleren van binnenklimaatparameters

In dit hoofdstuk worden de tijdens het afstudeeronderzoek toegepaste simulatieprogramma's toegelicht. Het HAMBASE-model (Wit 2006) is gebruikt voor het modelleren van temperatuur en RV van het binnenklimaat.

Met behulp van Simulink (MathWorks 2006) is het mogelijk om middels een componentsgewijze opbouw een installatie te simuleren. Een koppeling van HAMBASE aan Simulink (Schijndel 2003) is toegepast om het effect van de installatie op het binnenklimaat nader te onderzoeken.

Het CFD-programma Fluent (Fluent 2005) is toegepast om inzicht te krijgen in luchtstromingen en luchtverdelingen van het binnenklimaat.

4.1.1 HAMBASE

HAMBASE is een simulatiemodel dat ontwikkeld is voor onderzoek naar het warmte- en vochttransport in een gebouw. HAMBASE is de afkorting van Heat Air Moisture Building And Systems Evaluation. Met het model kunnen temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de lucht en nabij oppervlakken berekend worden. Tevens geeft dit model inzicht in energiegebruik en capaciteiten van klimaatinstallatiecomponenten zoals verwarming, koeling, bevochtiging en ontvochtiging. Dit programma draait onder de Matlab omgeving.

De basis van HAMBASE is een bouwfysisch model van een gebouw, dat numeriek wordt ingevoerd. Dit gebouwmodel is te verdelen in verschillende zones waaraan vervolgens eigenschappen worden toegekend. Zo worden volumes, oppervlakten, scheidingsconstructies, beglazing, schaduwobjecten in de omgeving, interne warmte- en vochtbronnen en andere parameters gekoppeld aan een zone. Voorts is het mogelijk om een beperkte klimaatinstallatie en een dagindeling aan de zones te koppelen. Tenslotte wordt er een KNMI-buitenklimaatfile aan het gebouwmodel gekoppeld, waarop de warmte- en vochtstromen over een opgegeven tijdsinterval berekend worden met behulp van Matlab.

Om de warmte- en vochtstromen door het gebouw te berekenen wordt er gebruik gemaakt van de balans: $IN = UIT + OPSLAG$. Voor de warmtebalans kunnen we dit nader specificeren als:

$$\Phi_g + \Phi_p = \Phi_l + \Phi_s \quad (5)$$

Waarin:	Φ_g	=	warmtewinst door bijv. personen, zon en verlichting	[W]
	Φ_p	=	warmteproductie door klimaatinstallatie	[W]
	Φ_l	=	warmteverlies door gebouwschil t.g.v. transmissie en ventilatie	[W]
	Φ_s	=	warmteopslag in constructie, objecten en lucht	[W]

De vochtbalans kunnen we nader specificeren als:

$$G_g + G_p = G_l + G_s \quad (6)$$

Waarin:	G_g	=	vochtproductie door bijv. personen en planten	[kg/s]
	G_p	=	vochtproductie door klimaatinstallatie	[kg/s]
	G_l	=	vochtverlies door diffusie en ventilatie	[kg/s]
	G_s	=	vocht opslag in hygroscopische materialen	[kg/s]

De output van het model bestaat per zone uit onder andere een gemiddelde luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur en comforttemperatuur. Daarnaast bevat de output zaken als energiegebruik, transmissieverlies, ventilatieverlies, interne vocht- en warmtelast en opwarming ten gevolge van de zon. Deze output wordt weergegeven in grafieken en matrices.

4.1.2 Simulink

Wanneer een uitgebreider gebouw- en installatiemodel gewenst is, kan Simulink gebruikt worden. Door HAMBASE aan Simulink te koppelen, kan de werking van gecompliceerde

klimaatinstallaties en regelingen in combinatie met het binnenklimaat gesimuleerd worden. Simulink draait net als HAMBASE onder de Matlab omgeving.

Middels de HAMBASE-Simulink koppeling is het mogelijk per in HAMBASE gedefinieerde zone een aparte klimaatinstallatie te specificeren. Door de uitgebreide toolbox in Simulink zijn de mogelijkheden van het type installaties en regelingen zeer breed. De output van de simulatie wordt weergegeven in grafieken en matrices.

4.1.3 Fluent

Fluent is een Computational Fluid Dynamics (CFD) softwarepakket om stromingsproblemen te simuleren. Het maakt gebruik van de eindige volume methode om de basisvergelijkingen van een stroming op te lossen. Het verschaft de mogelijkheid om verschillende fysische modellen te gebruiken, zoals compressibel of incompressibel, viskeus of niet-viskeus, laminair of turbulent enzovoorts. Het invoeren van de geometrie en het grid van het vraagstuk geschied met behulp van het programma Gambit. In het kader van dit afstudeeronderzoek is het programma Fluent gebruikt om inzicht te krijgen in het verloop van luchtstromen in een gebouw.

De differentiaalvergelijkingen voor het berekenen van luchtstromingen in een gebouw bestaan uit de zogenaamde Navier-Stokes vergelijkingen (Shaw 1992). Voor het voorspellen van de luchtstromingen is het k- ϵ turbulentiemodel gebruikt.

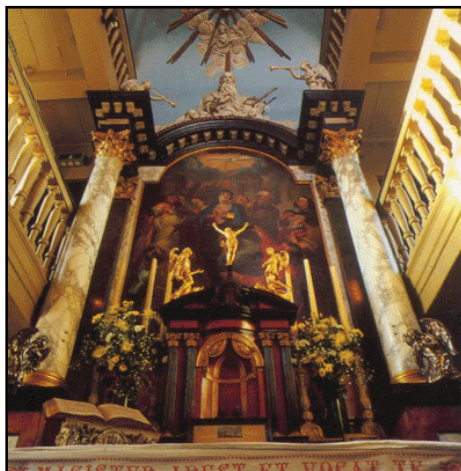
De output van Fluent bestaat uit een grafische weergave van de situatie waarin de berekeningen geconvergeerd zijn. In deze situatie wordt er van uitgegaan dat de stromingen nauwelijks meer veranderen. Tevens is het met Fluent mogelijk om een animatie te maken waarin de bewegingen van stromingen gevisualiseerd zijn.

4.2 Verificatie van de modellen

Voor modellen opgesteld in HAMBASE en Simulink is het relatief eenvoudig mogelijk om de nauwkeurigheid te verifiëren. De binnen dit afstudeeronderzoek gebruikte HAMBASE en Simulink modellen zijn geverifieerd door de verkregen resultaten te vergelijken met resultaten afkomstig uit metingen.

Voor een model opgesteld in Fluent is verificatie mogelijk door het uitvoeren van bijvoorbeeld rookproeven, luchtsnelheidsmetingen en temperatuurmetingen. Het CFD-model dat is opgesteld in dit afstudeeronderzoek is geverifieerd met behulp van temperatuurmetingen.

5 Casus 1: Luchtbevochtiging in museum Amstelkring



5.1 Inleiding

Museum Amstelkring is een authentiek grachtenpand gelegen aan de Oudezijds Voorburgwal in Amsterdam. Het gebouw is 350 jaar oud en biedt bezoekers al ruim 120 jaar de gelegenheid om dit museum te bezoeken. Alle ruimten zoals woonkamers, keukens, gangen en trappenhuizen zijn nog in redelijk originele staat aanwezig. Op de boven gelegen verdiepingen van de woning bevindt zich de schuilkerk “Ons’ Lieve Heer op Solder”. Deze kerk wordt nu nog steeds gebruikt voor bijvoorbeeld huwelijken, concerten en lezingen. In het museum worden zowel eigen als geleende kunstwerken tentoongesteld. In 2005 werd het museum bezocht door 75.000 bezoekers.

Uit vooronderzoek door de Technische Universiteit Eindhoven (Neuhaus et al. 2006) is gebleken dat het museum te kampen heeft met een aantal aan het binnenklimaat te relateren problemen. In de winter treedt er condensatie aan koude oppervlakken op, zoals aan ramen en kozijnen. Mogelijk treedt er ook inwendige condensatie op in de constructie, getuige de recent gerestaureerde balkkoppen. Deze balkkoppen, onder andere aan de noordwestgevel van het gebouw, waren namelijk aangetast door verrotting.

Uit metingen is gebleken dat er gedurende het stookseizoen voor collectiebehoud af en toe te lage luchtvochtigheden heersen. In de zomer heersen er voor collectiebehoud af en toe te hoge luchtvochtigheden. In het gebouw werden houtboorders geconstateerd, mogelijk veroorzaakt door te vochtige luchtcondities. Bovendien wordt het binnenklimaat in het museum door bezoekers in de zomer vaak als benauwd ondervonden. Metingen tonen aan dat de temperatuur in de zomer op kan lopen naar ruim 28°C. Gedurende activiteiten kunnen hoge CO₂-concentraties voorkomen in de kerk. Er zijn langdurig concentraties van boven de 1200 ppm gemeten met maxima van 2000 ppm. Om in de zomer enige verkoeling en ventilatie te verschaffen worden daarom ramen en deuren opengezet, waardoor ongefiltreerde buitenlucht naar binnen gelaten wordt. Dit kan weer voor andere ongewenste problemen zorgen, zoals bijvoorbeeld schommelingen in het binnenklimaat en het binnentreden van vuile buitenlucht en insecten.

5.2 Doelstellingen casus

In deze casus zal onderzocht worden wat mogelijke oplossingen zijn voor de RV gerelateerde problemen in dit gebouw. De onderzoeksvragen binnen deze casus zijn:

- Wat zijn de effecten van luchtbevochtiging in een monumentaal pand?
- Hoe zijn de problemen m.b.t. condensatie en hoge RV's aan het oppervlak ten gevolge van bevochtiging te verminderen of op te lossen?

De specifieke onderzoeksvragen kunnen als volgt gedefinieerd worden:

- Hoe is het huidige binnenklimaat in de kerkruimte te beoordelen?
- Wat is het ventilatievoud in de kerkruimte?
- Wat is het effect van het verlagen van de instellingen van de bevochtigers?
- Treedt er thermische en hygrische stratificatie op over de kerkhoogte?

5.3 Methode

Binnen deze casus zullen we ons beperken tot de kerkruimte. Het onderzoek is begonnen met een globale analyse van de bouwfysische aspecten en een inventarisatie van de bestaande klimaatinstallatie. Daarna heeft een langeduurmeting van de binnencondities plaatsgevonden om inzicht te verkrijgen in het binnenklimaat. Voor de langeduurmetingen zijn op verschillende locaties luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur en relatieve luchtvochtigheid gemeten. Aan de hand van de verkregen meetdata kan een beoordeling van het binnenklimaat plaatsvinden.

Zowel in de winter- als zomersituatie heeft er een ventilatievoudmeting plaatsgevonden. Het doel van het meten van het ventilatievoud is het inzicht krijgen in de mate waarop er vochtige en vervuilde (CO₂) lucht op natuurlijke wijze wordt weggeventileerd. Indien er een indicatie van het ventilatievoud bekend is, kunnen de meetresultaten van temperatuur en het vochtgehalte van de lucht beter geïnterpreteerd worden. Tevens geeft dit waardevolle informatie voor het opstellen van een simulatiemodel.

In de kerk is gedurende enkele maanden de CO₂-concentratie gemeten. Deze metingen geven inzicht in de invloed van bezoekers op het binnenklimaat. Bovendien is het uit het verval van de CO₂-concentratie mogelijk een indicatie van het ventilatievoud te bepalen.

In de winter zijn er met behulp van infraroodthermografie opnamen van het gebouw gemaakt om inzicht te krijgen in de locaties van koude oppervlakken in verband met condensatiegevaar en hoge RV's.

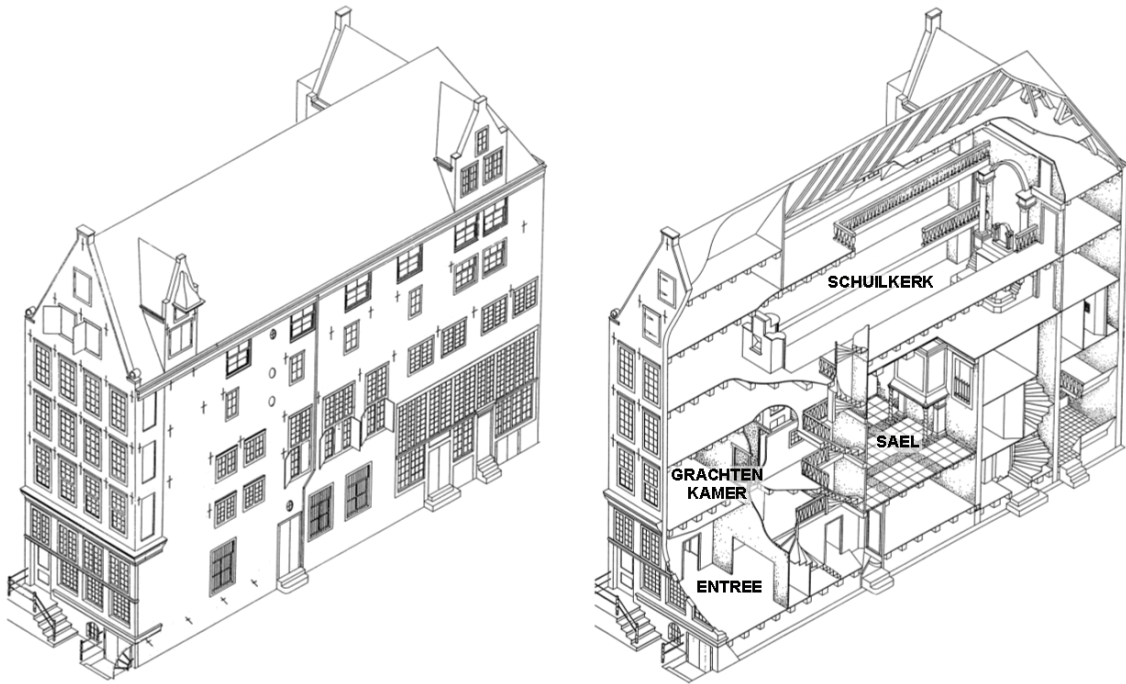
Mogelijke oplossingen voor de heersende problemen zijn onderzocht middels een simulatiestudie met behulp van HAMBASE en Fluent. Met behulp van HAMBASE is het optreden van condensatie aan de koude oppervlakken nader onderzocht en zijn mogelijke oplossingen bestudeerd. Met behulp van Fluent is eventuele thermische en hygrische stratificatie ten gevolge van de verwarming in de kerk nader onderzocht.

5.4 Bouwkundige en installatietechnische inventarisatie

De hoofdentree van het pand aan de Oudezijds Voorburgwal is op het zuidoosten georiënteerd. Buitenwanden en interne dragende wanden zijn uitgevoerd in metselsteen (kruisverband) van ± 0,35 m dik. Aan de buitenzijde is het metselwerk gevoegd, aan de binnenzijde gestuct en voorzien van witte afwerklaag. Op de onderste verdiepingen zijn de wanden gedeeltelijk betegeld. De kerkruimte beslaat de 3^{de} tot en met de 5^{de} verdieping. Het altaar bevindt zich aan de noordwestzijde van de kerk, tegenover het orgel. De kerk heeft een vloeroppervlak van ongeveer 150 m² bij een hoogte van ongeveer 9 meter. Het volume van de kerkruimte bedraagt ongeveer 900 m³. De vloeren en galerijen bestaan uit houten balken met houten vloerdelen. In de kerk is het plafond gestuct.

Bepaalde vloeren, zoals in de Sael, zijn betegeld. De Sael is voorzien van een cassetteplafond. De dakconstructie is opgebouwd uit houten balken met een ongeïsoleerd dakbeschot en is voorzien van dakpannen. Het gebouw is voorzien van grote ramen met enkel glas. Dit glas is aan de binnenzijde op de noordoost- en zuidoostgevel voorzien van lexan achterzetramen. De reden hiervan is UV-wering en om schade in het museum te voorkomen als er bijvoorbeeld een raam wordt ingegoooid.

Het gebouw is in de jaren 50 voorzien van een c.v.-installatie. Voor de kerkruimte zijn de aanwezige radiatoren geïnventariseerd en is er een schatting gemaakt van het vermogen. In de jaren 90 zijn door het gebouw verspreid mobiele bevochtigingsunits en enkele ontvochtigingsunits aangebracht. Deze zijn ingesteld op een RV van 50%. Het gebouw wordt op natuurlijke wijze geventileerd.

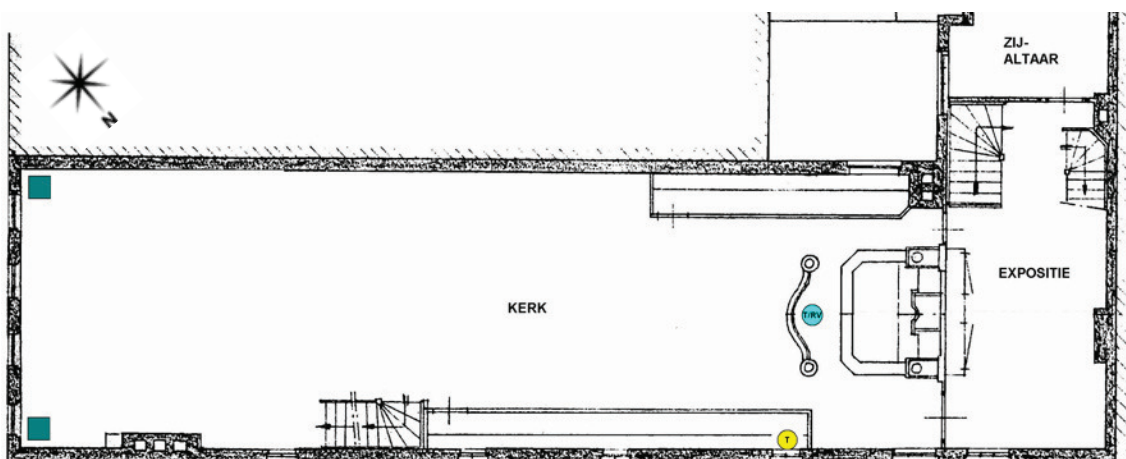


Figuur 26 Een aanzicht op het gebouw vanuit het oosten. In de opengewerkte versie is de locatie van de schuilkerk weergegeven; deze beslaat de derde tot en met de vijfde verdieping.

5.5 Analyse van het binnenklimaat

5.5.1 Temperatuur en RV

In de kerk is op verschillende locaties de temperatuur en RV gemeten gedurende de periode van januari 2005 tot januari 2006. De meetlocaties zijn een T/RV-sensor nabij het orgel en drie T/RV-sensoren verdeeld over de hoogte van de kerk. Deze stratificatiemeting heeft plaatsgevonden in de kerk onder de godslamp. Onder deze lamp zijn de drie T/RV-sensoren opgehangen om de luchttemperatuur en RV over de hoogte te meten. De hoogte van de sensoren boven de vloer zijn respectievelijk 3, 6 en 8 meter. Zie Figuur 27 voor een plattegrond van de kerk waarop de locaties van de sensoren zijn aangegeven.



Figuur 27 Plattegrond van de begane grond van de kerkruimte. Aan de zuidoostzijde staan twee mobiele bevochtigers opgesteld. Voor het altaar zijn over de kerkhoogte drie T/RV-sensoren opgehangen. Aan de noordoostgevel zijn oppervlaktecondities van muur, raam en kozijn gemeten.

Toetsing van de meetwaarden temperatuur en RV

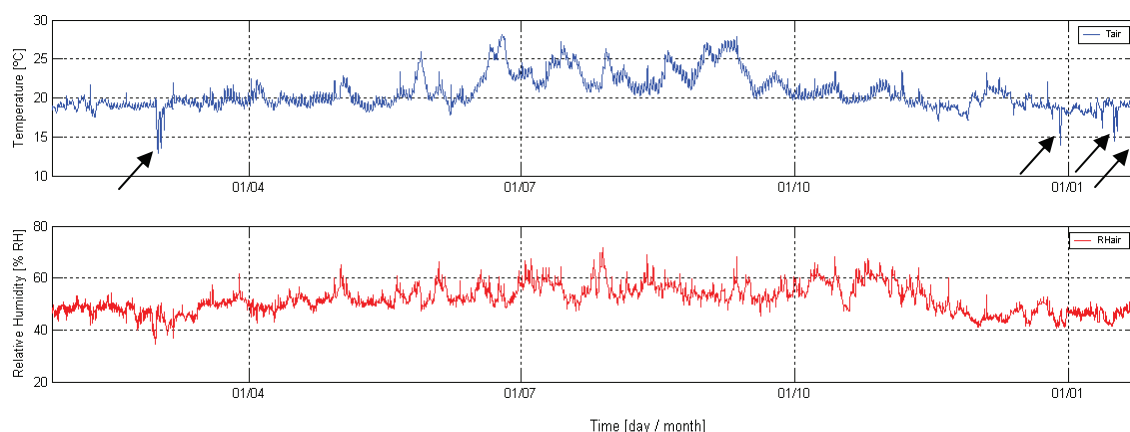
Een gebouw als museum Amstelkring kan men volgens de ASHRAE (zie Tabel 1) inschalen in klasse 3 á 4. In deze gebouwklassen zijn klimaatregelingen van de klasse B of C mogelijk (zie Tabel 3). Aangezien het museum waardevolle en gevoelige objecten bevat, zullen de verkregen meetdata getoetst worden aan de klimaatrichtlijn behorende bij klasse B.

Meetresultaten temperatuur en RV

Zie Figuur 28 en Tabel 4 voor een weergave van de meetresultaten betreffende temperatuur en RV in de kerk. Voor een weergave van de meetresultaten in het Mollierdigram, zie bijlage B. In deze figuur zijn de meetresultaten vergeleken met de klimaatrichtlijn zoals gesteld in ASHRAE klasse B.

Het jaarlijks gemiddelde van de gemeten temperatuur is 20,7°C, met een range van 12,9°C in maart en een maximum van 28,1°C in juni. De temperatuur blijft in de winter stabiel rond de 19°C liggen. In maart en december treden er enkele grote schommelingen op ten gevolge van de defecte c.v.-installatie. Tijdens de lente stijgt de temperatuur richting 21°C en treden er hogere dagelijkse variaties op. Voor 6% van de metingen is de temperatuur hoger dan 25°C.

Het jaarlijks gemiddelde van de gemeten RV is 52% met een minimum van 34% in maart en een maximum van 72% gemeten in juli. Gedurende het jaar is de dagelijkse variatie 5%. In november begint de RV te dalen richting de 40% en blijft gedurende de winter rond dit niveau hangen. Deze daling is het gevolg van het stookgedrag. Voor 6% van metingen is de RV hoger dan 60%.



Figuur 28 Meetresultaten van temperatuur en RV uitgezet tegen de tijd over de periode van januari 2005 tot januari 2006. Ten gevolge van enkele ketelstoringen (aangegeven met de pijlen) zijn er gedurende het stookseizoen enkele sterke schommelingen in de temperatuur waarneembaar. Het jaarlijks gemiddelde van de gemeten temperatuur bedraagt 20,7°C. In de zomer treden er geregeld temperaturen van boven de 25°C op. Het jaarlijks gemiddelde van de gemeten RV bedraagt 52%.

Tabel 4 Analyse van de meetresultaten van de kerkruimte over de periode 24 januari 2005 tot 24 januari 2006.

Variabele	T [°C]	RV [-]	x [g/kg]
Gemiddelde gemeten	20,68	51,69%	7,84
Minimum waarde gemeten	12,90	34,50%	4,17
Maximum waarde gemeten	28,10	71,80%	15,86
Standaard deviatie	2,21	5,19%	1,67

Over de gehele meetperiode valt 87% van de gemeten temperatuur en RV binnen de klimaatrichtlijn zoals gesteld in ASHRAE klasse B. De binnenluchtcondities in de kerk zijn wat de objecten betreft museaal gezien niet ongunstig te noemen voor een gebouw in deze klasse, afgezien van een beperkt aantal temperatuuroverschrijdingen in de zomer. Dit geldt voor objecten die niet geplaatst zijn aan de koude buitenwanden en niet geplaatst zijn in de directe nabijheid van bevochtigers, ontvochtigers en verwarmingslichamen.

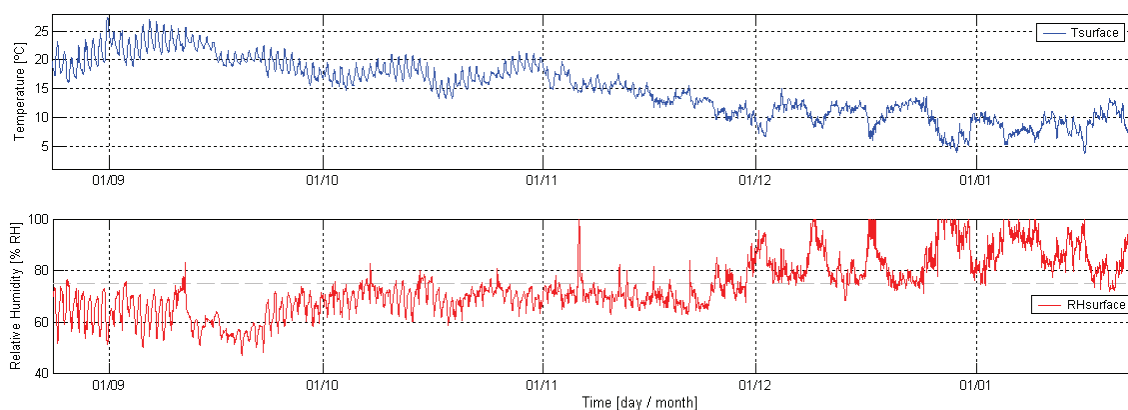
De stratificatie over de kerkhoogte bedraagt slechts enkele graden en is relatief gering te noemen. Zie bijlage C voor een grafische weergave van de gemeten thermische en hygrische stratificatie.

5.5.2 RV nabij koude oppervlakken

Oppervlaktetemperatuurmetingen

Van een raam, kozijn en wand aan de noordoostzijde van de kerk zijn de oppervlaktetemperaturen gemonitord over de periode van augustus 2005 tot januari 2006. Bij de gemeten oppervlaktetemperaturen is vervolgens de optredende RV nabij het koude oppervlak berekend.

Bij een afnemende buitentemperatuur worden de luchtvochtigheden aan de koude oppervlakken zorgelijk in de kerk, met name aan de noordoostgevel. Zie Figuur 29 voor de meetresultaten van het glasoppervlak. Er treedt gedurende de koude perioden regelmatig condensatie aan de beglazing op ten gevolge van het hoge absoluut vochtgehalte van de binnenlucht. De gemiddelde RV bedraagt gedurende de maand december aan het glasoppervlak 85% en aan het kozijn 60%. Het optreden van condensatie vindt ook plaats aan delen van het kozijn, met name de kruislatten tussen de beglazing. De hoge RV's aan de koude oppervlakken kunnen bijvoorbeeld de aantasting van de balkkoppen verklaren.



Figuur 29 Temperatuur en RV gemeten aan het raamoppervlak aan de noordoostzijde van de kerk. Gedurende de koude perioden treedt er veelvuldig condensatie aan het glasoppervlak op. De gemiddelde RV aan het oppervlak voor de maand december bedraagt 85%.

Infraroodthermografie

Gedurende een dag in januari zijn er in de kerk infraroodopnamen gemaakt van de binnenzijde van de kerk om de koude oppervlakken in kaart te brengen. Op deze dag lag de buitentemperatuur rond het vriespunt. Er zijn met name een aantal locaties onderzocht waarbij kunstwerken tegen de koude buitenwand zijn gehangen. Tevens zijn er thermografische opnamen gemaakt van kozijnen en een locatie waar aangetaste balkkoppen zijn geconstateerd (zie Figuur 30).

Veelvuldig zijn er kunstobjecten tegen buitenwanden geplaatst in het museum. Hierdoor treden er rond en achter het kunstobject gedurende koude perioden zeer hoge RV's op. Mogelijk in enkele gevallen zelfs condensatie. Ten tijde van de rondgang met de infraroodcamera is er rond 70% RV nabij schilderijen aangetroffen. Rond de balkkoppen is een RV aan het oppervlak van ongeveer 80% gemeten. Deze toestand is te verbeteren door het verlagen van de temperatuur, waardoor er minder bevochtigd hoeft te worden, of het verlagen van de instelling van de bevochtigers.

5.5.3 Ventilatievoud

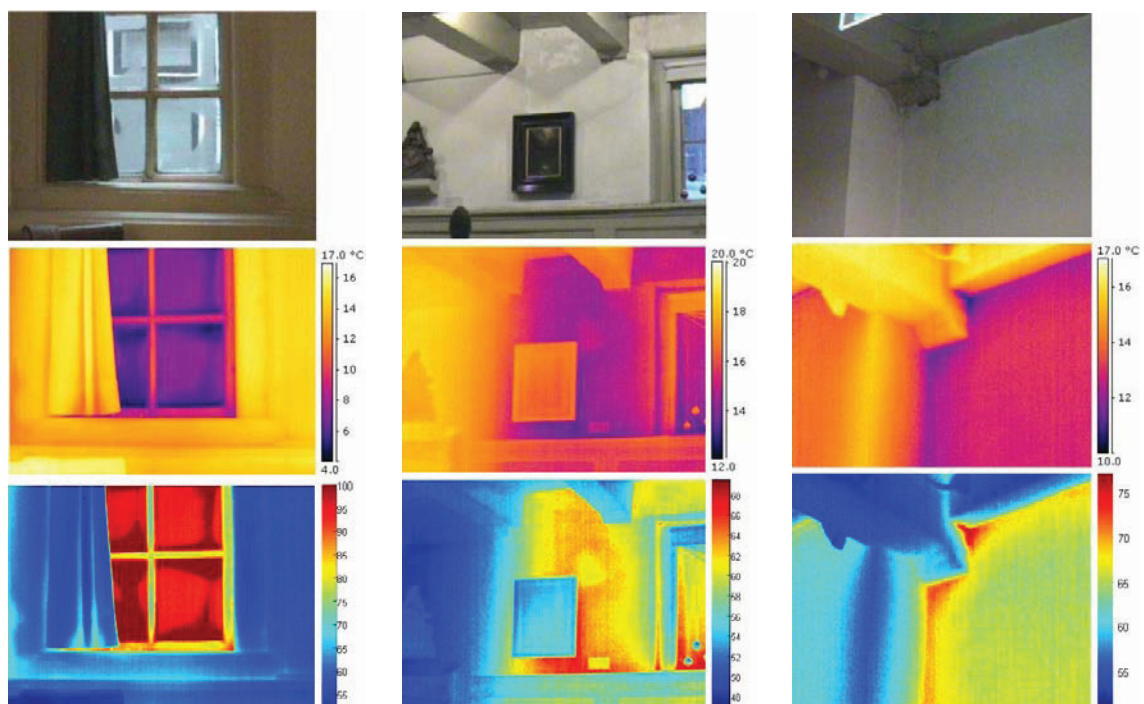
Gedurende een koude dag, 7 maart 2006 en gedurende een warme dag, 28 september 2006, is het ventilatievoud in de kerk gemeten met behulp van tracergas. Op de warme dag zijn er twee metingen uitgevoerd, namelijk een meting met gesloten ramen en een meting met een geopend

raam boven in de kerk. Dit raam wordt altijd geopend indien de lucht in de kerk als benauwd wordt ondervonden.

Het tracergas is op de begane grond van de kerk losgelaten. Met behulp van een ventilator is er getracht het gas homogeen te verdelen over het kerkvolume.

Er zijn relatief hoge ventilatievouden gemeten in de kerkruimte. Het ventilatievoud dat gemeten is gedurende de koude dag ligt rond de $2,5 \text{ h}^{-1}$. Gedurende de warme dag is er een ventilatievoud gemeten van $4,5 \text{ h}^{-1}$ met gesloten ramen en $5,9 \text{ h}^{-1}$ met een geopend raam. Zie bijlage D voor de uitwerking van de berekeningen van de meting.

In de zomer zijn hogere ventilatievouden gemeten dan in de winter. Dit komt waarschijnlijk doordat de deur bij de entree in de zomer gedurende bezoeken geopend is. Het openen van een raam hoog in de kerk verhoogt het ventilatievoud ten gevolge van thermische trek en drukverschil tussen binnen en buiten.



Figuur 30 Enkele voorbeelden van infraroodthermografie. Van links naar rechts gezien: een raam met condensatie aan glas en kozijn, een schilderij tegen een koude buitenwand, een balkkop in een koude buitenwand.

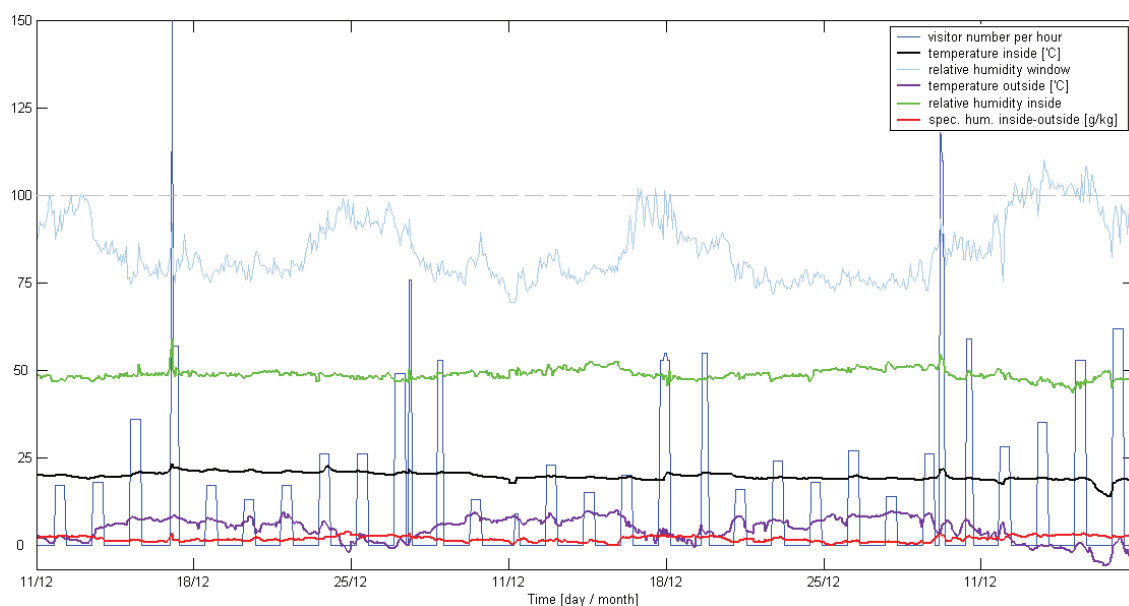
5.5.4 Bezoekersinvloed

Bezoekersaantallen

Bezoekers produceren vocht en warmte. Tijdens activiteiten in de kerk komen er vaak meer dan 100 personen voor enkele uren bijeen. Door het vrijkomen van vocht in de ruimte stijgt het absoluut vochtgehalte van de lucht. Dit kan leiden tot een verhoogde RV en gedurende koude perioden tot een verhoogd condensatierisico aan koude oppervlakken.

Gedurende de periode van januari 2005 tot januari 2006 is het aantal bezoekers en tijdstippen van activiteiten in de kerk bijgehouden. Door ten tijde van de activiteiten het berekende absoluut vochtgehalte van de lucht en de RV aan het oppervlak te analyseren, kan de invloed van de bezoekers op het binnenklimaat nader onderzocht worden.

Tijdens activiteiten en drukke dagen is er een stijging van het absoluut vochtgehalte van de lucht waarneembaar (zie Figuur 31). Nadat de bezoekers de kerk verlaten hebben is er een snelle afname van het absoluut vochtgehalte waarneembaar. Dit duidt op een hoog ventilatievoud of op opname van vocht door het hygroscopisch interieur. De gemeten relatief hoge ventilatievouden en het feit dat het interieur grote hoeveelheden hygroscopisch materiaal bevat liggen hier waarschijnlijk ten grondslag aan.



Figuur 31 In deze figuur is de invloed van bezoekers op het binnenklimaat van de kerkruimte zichtbaar gemaakt. Het bezoekersaantal per uur, binnen- en buitentemperatuur, RV, absoluut vochtgehalte en de RV aan het glasoppervlak voor de maand december 2005 zijn weergegeven. Tijdens de openingstijden is een stijging van het absoluut vochtgehalte (rode lijn) en een lichte stijging in de temperatuur en RV zichtbaar. Condensatie aan de beglazing treedt vooral op bij een dalende buitentemperatuur.

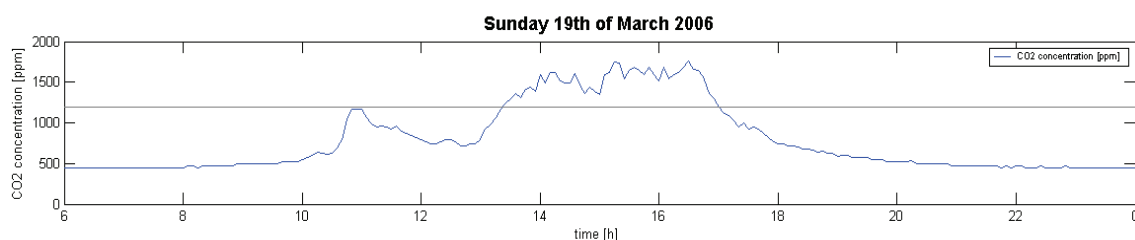
CO₂-meting

De CO₂-concentratie is gemeten in de kerk van maart tot en met juni 2006. De meetlocatie is nabij het orgel, ±1 meter boven de kerkstoelen.

Het CO₂ gehalte van de binnenlucht in de kerk ligt geregeld langdurig boven de in het Bouwbesluit weergegeven maximum toetswaarde van 1200 ppm (Regeling Bouwbesluit 2003). In Figuur 32 is een voorbeeld weergegeven van een dag waarop langdurig de 1200 ppm overschreden wordt.

Uit het gemeten CO₂-gehalte is het niet mogelijk een indicatie voor het ventilatievoud te bepalen, ten gevolge van een aantal factoren:

- het verschil tussen begin en eindwaarde is te klein. De afwijking van de sensor bedraagt reeds 30 ppm + 2% van de afgelezen waarde over het toegepaste meetbereik
- de CO₂-concentratie in de ruimte is niet uniform verdeeld. Bezoekers concentreren zich voornamelijk op de begane grond van de kerk. Bovendien heeft CO₂ een hogere dichtheid dan lucht
- de achtergrondconcentratie gedurende begin en eind van de rekeninterval is niet gelijk ten gevolge van de dag-nacht cyclus.



Figuur 32 Bovenstaande grafiek laat een voorbeeld zien van een dag waarop de CO₂-concentratie langdurig boven de 1200 ppm ligt. Op zondag 19 maart was er om 10 uur een activiteit in de kerk waarbij 100 personen aanwezig waren. Het was een relatief drukke dag met in totaal 523 bezoekers. Tussen 13:30u en 17:00u wordt langdurig de 1200 ppm overschreden.

5.6 Simulatie

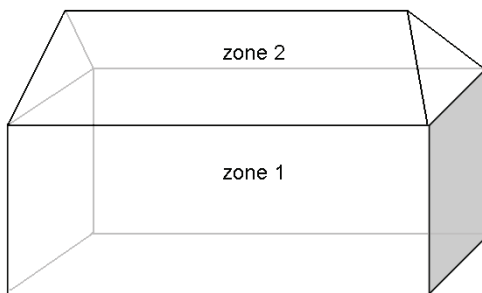
Voor het onderzoeken van het condensatiegevaar aan de koude oppervlakken is er in HAMBASE een model opgesteld. Voor deze simulatie is gebruik gemaakt van KNMI klimaatgegevens over het jaar 2005. Met behulp van het HAMBASE-model zal specifiek onderzocht worden bij welke instellingen van de bevochtigers er geen oppervlaktecondensatie meer optreedt.

Door middel van CFD-berekeningen met behulp van het programma Fluent, kan de te verwachten luchtstroming en temperatuursverdeling in kerk bepaald worden. Er is gelet op de te verwachten temperatuurstratificatie in het kerkvolume en de te verwachten luchtverdelingen in kerk. Met behulp van Fluent zijn geen relatieve luchtvochtigheden berekend. Wel kunnen er op basis van de temperatuursverdeling uitspraken gedaan worden over de verdeling van de RV.

5.6.1 Model 1: Warmte- en vochtsimulatie van de kerk m.b.v. HAMBASE

Met dit model is het binnenklimaat in de kerk voor de maand december in het jaar 2005 gesimuleerd. Er zijn twee varianten opgesteld:

- Variant a: dit model dient als uitgangspunt om verbeteringen met betrekking tot het condensatieprobleem te onderzoeken.
- Variant b: dit model heeft variant a als basis. Het setpoint van de bevochtigers is verlaagd van 50% naar 45%.
- Variant c: dit model heeft variant b als basis. Het temperatuursetpoint is 1°C verlaagd.



Figuur 33 Opbouw van het HAMBASE-model van de kerk. Het model bestaat uit twee zones; de kerkruimte en de bovengelegen zolder.

Variant a

Simulatieresultaten zijn vergeleken met behulp van meetresultaten om het model te valideren. Het model is opgebouwd uit twee zones, te weten de kerkruimte en de zolder. De kerkvloer en binnenwanden zijn ingevoerd als een adiabatisch oppervlak. Overige wanden en dak grenzen aan buiten. Zie bijlage E voor de invoertekst van het model.

Zie Tabel 5 voor een samenvatting van de instellingen van het model. Het model is gebaseerd op de aanwezigheid van 25 personen in de kerk gedurende de openingstijden. Hiervoor is ten gevolge van personen een totale vochtbelasting van 0,0008 kg/s en een totale warmtebelasting van 1250 Watt ingevoerd. Voor de warmtebelasting van verlichting en aanwezige apparaten is totaal 600 Watt aangenomen. Het ventilatievoud is ingesteld op 2 h⁻¹ (volgens de metingen ligt het VV in de winter tussen de 2 á 3 h⁻¹). Voor de vochtbelasting van de 8 aanwezige bevochtigers is in totaal 0,0012 kg/s aangenomen.

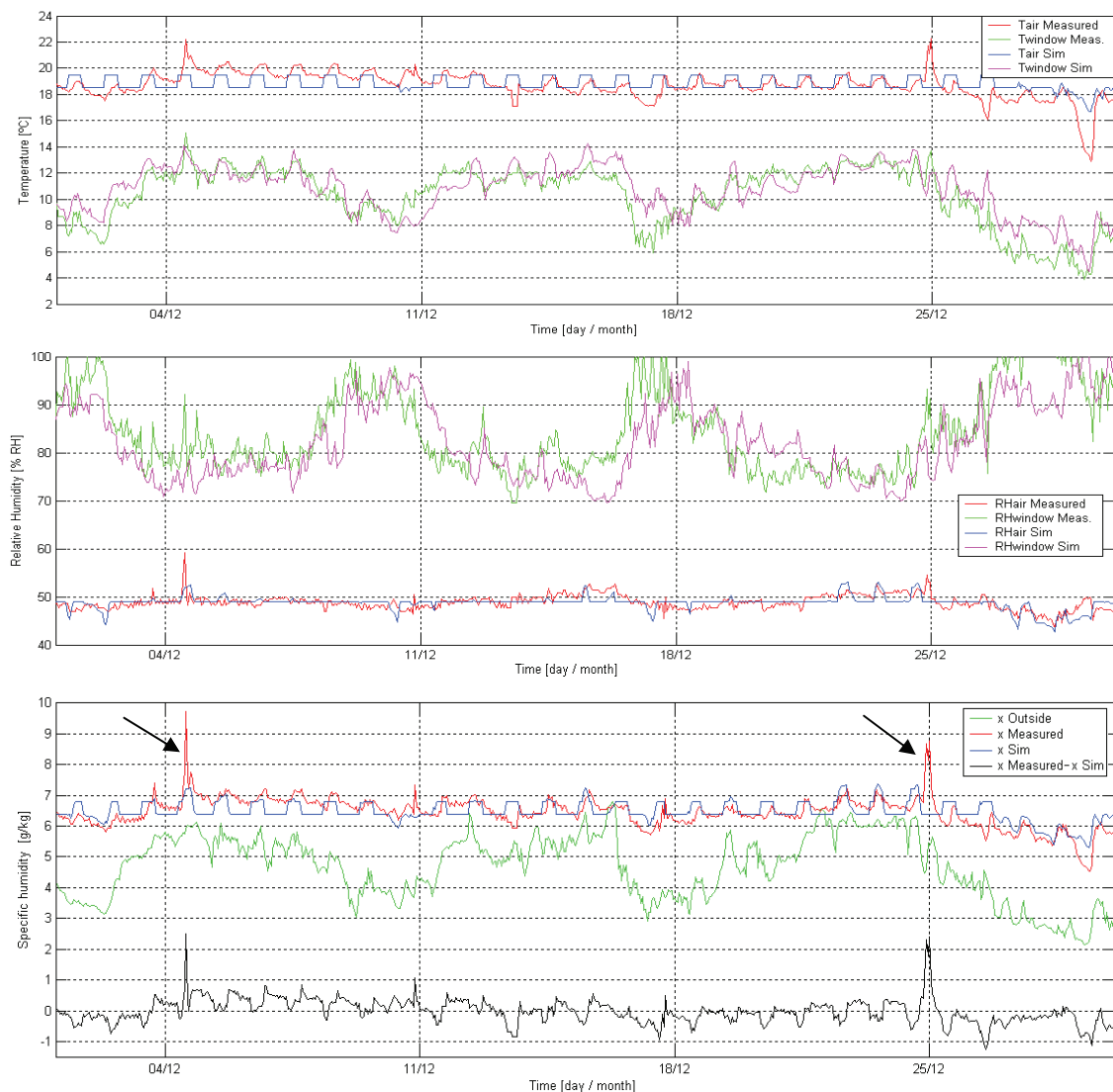
Tabel 5 Instellen van het HAMBASE-model van de kerk.

Omschrijving	Gedurende sluitingsuren	Gedurende bezoeken
Vochtproductie per persoon	0 kg/s	3 *10 ⁻⁵ kg/s
Warmteproductie per persoon	0 W	50 W
Vochtproductie per bevochtiger	1,5*10 ⁻⁴ kg/s	1,5*10 ⁻⁴ kg/s
Warmteproductie verlichting etc.	0 W	600 W
Ventilatievoud	1,5 h ⁻¹	2 h ⁻¹
Verwarmingsinstelling	18,5°C	19,5°C
Opgesteld verwarmingsvermogen	20 kW	20 kW
Instellingen bevochtigers	50%	50%
Inhoud kerk	900 m ³	n.v.t.
Inhoud zolder	200 m ³	n.v.t.

Simulatiere resultaten variant a

Resultaten van het model komen vrij goed overeen met de gemeten waarden betreffende temperatuur en RV (zie Figuur 34 en Tabel 6). Afwijkingen tussen de meet- en simulatiere resultaten zijn mogelijk door de volgende factoren te verklaren:

- het betreft een vereenvoudigd model van de kerkruimte, er zijn kleine verschillen tussen werkelijke en in het model ingevoerde materiaaleigenschappen, volumes en afmetingen
- er zijn verschillende (niet gesimuleerde) ketelstoringen opgetreden
- het variabele bezoekersaantal zorgt voor een van uur tot uur (niet gesimuleerde) variabele vochtproductie in de kerk.
- de voor het model gebruikte buitenklimaatdata zijn afkomstig van KNMI-station Schiphol. Deze data kunnen licht afwijken van het klimaat in de binnenstad van Amsterdam.



Figuur 34 Simulatie- en meetresultaten van het huidige binnenklimaat in de kerk en oppervlaktecondities van het raam voor de maand december in het jaar 2005. Uit de grafieken is op te maken dat de gemeten en gesimuleerde waarden redelijk goed overeen komen. Afwijkingen zijn mogelijk te verklaren door het optreden van ketelstoringen en het variabele bezoekersaantal. Voorts zijn buitenklimaatdata gebruikt van KNMI-station Schiphol. Deze data kunnen licht afwijken van het klimaat in de binnenstad van Amsterdam. De twee opvallende pieken in het gemeten absoluut vochtgehalte, aangegeven met de pijlen, zijn veroorzaakt door hoge bezoekersaantallen. Op 4 december was er een activiteit met 150 personen en op de 24^{ste} een activiteit met 120 personen.

Tabel 6 Analyse van de simulatie- en meetresultaten over de periode van 1 tot 31 december 2005.

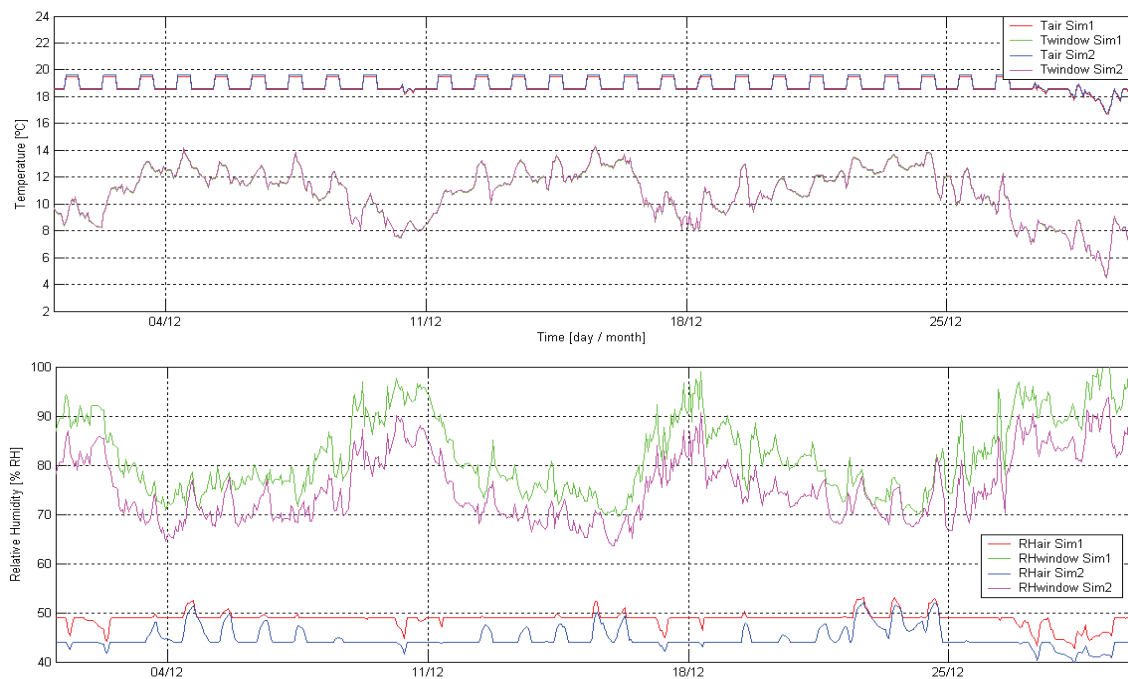
Variabele	T [°C]	RV [-]	x [g/kg]
Gemiddelde waarde gemeten	18,72	48,82%	6,45
Gemiddelde waarde gesimuleerd	18,79	48,77%	6,47
Minimum waarde gemeten	12,90	43,70%	4,53
Minimum waarde gesimuleerd	16,70	42,72%	5,30
Maximum waarde gemeten	22,30	59,10%	9,71
Maximum waarde gesimuleerd	19,50	53,14%	7,36
Gemiddeld verschil meet-simulatie	0,08	0,04%	0,02
Standaard deviatie verschil meet-simulatie	0,93	1,35%	0,39

Variant b

Hiervoor dient het eerste model als basis. Bij deze simulatievariant is er onderzocht bij welke instelling van de mobiele bevochtigers geen condensatie aan de koude oppervlakken meer optreedt gedurende het stookseizoen. Instellingen van het model zijn zoals weergegeven in Tabel 5, maar de instellingen van de bevochtigers zijn nu verlaagd van 50% naar 45%.

Simulatieresultaten variant b

Indien de instellingen van de luchtbevochtigers verlaagd worden naar 45%, treedt er over de gesimuleerde periode nauwelijks condensatie op aan de beglazing. Door de verlaging van de instellingen met 5% RV, treedt er over de gesimuleerde periode een verlaging van gemiddeld 7,4% RV aan de beglazing op (zie Figuur 35). Dit heeft een gunstig effect voor het behoud van kozijnen, constructie en collectie geplaatst in de nabijheid van de koude oppervlakken.



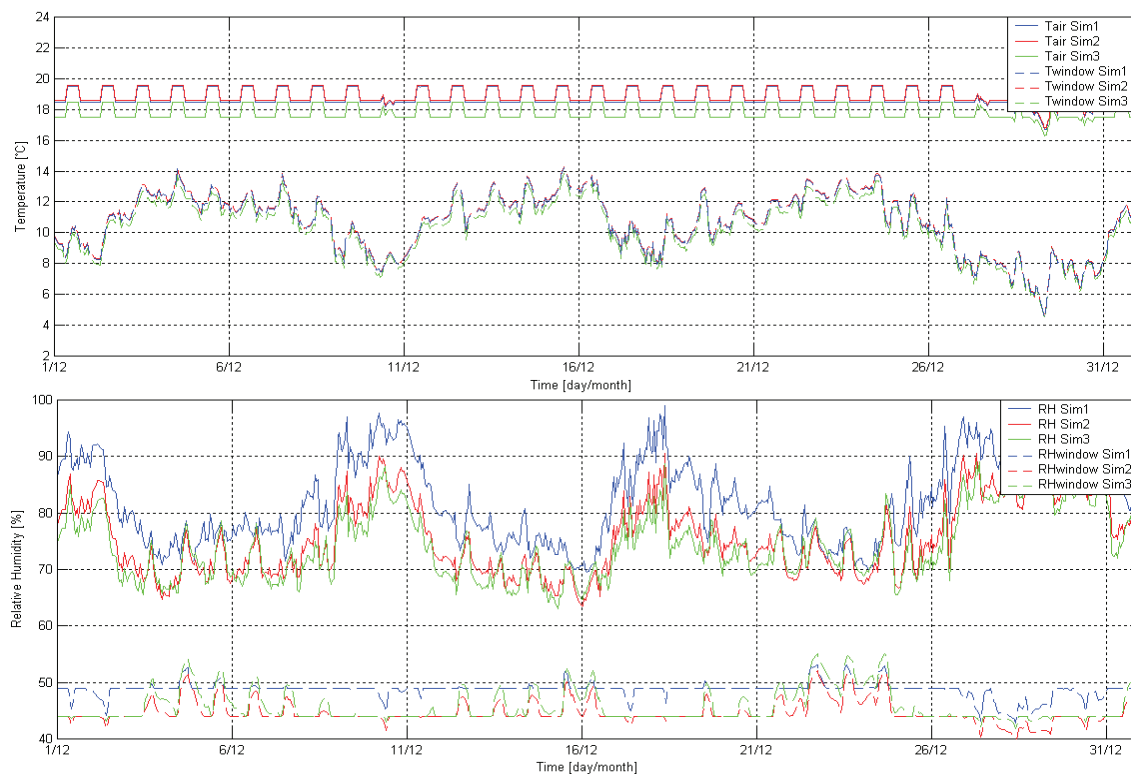
Figuur 35 Simulatieresultaten van variant a en variant b vergeleken. Bij variant b is de instelling van de bevochtiging verlaagd van 50% naar 45%, wat het condensatierisico aan de beglazing drastisch vermindert. Door de verlaging van de instellingen met 5%, daalt de RV aan het oppervlak over de gesimuleerde periode met gemiddeld 7%.

Variant c

Voor deze simulatievariant dient tevens het eerste model als basis. Bij deze variant is het effect van een verlaging van de instellingen van de bevochtigers in combinatie met een lichte temperatuurverlaging onderzocht. De instellingen van het model zijn zoals weergegeven in Tabel 5, maar de instellingen van de bevochtigers zijn verlaagd naar 45% en de instelling van de verwarming is verlaagd met gemiddeld 1°C.

Simulatieresultaten variant c

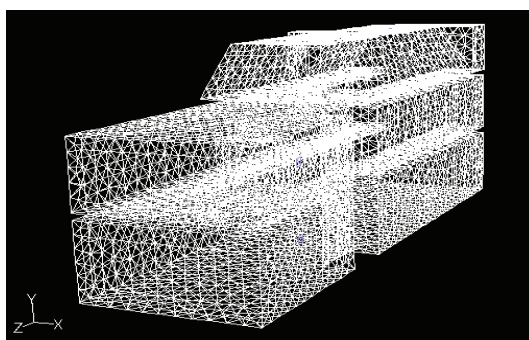
Door het verlagen van de instellingen van de bevochtigers te combineren met een lichte temperatuursverlaging, heeft er nog minder bevochtigd te worden. Nabij de koude oppervlakken zien we hierdoor een verlaging van de relatieve luchtvochtigheid van gemiddeld 8,7% ten opzichte van variant a. In onderstaande figuur zijn de simulatiesresultaten van variant c vergeleken met variant a en b.



Figuur 36 In bovenstaande figuur zijn de simulatiesresultaten van variant a, b en c met elkaar vergeleken. In vergelijking met variant a, de huidige situatie, zien we bij variant c de grootste verbetering van de oppervlaktecondities optreden. Bij variant b zijn slechts de instellingen van de bevochtigers met 5% verlaagd naar 45%. Bij variant c zijn de instellingen van de bevochtigers met 5% verlaagd naar 45% en is de instelling van de temperatuur met 1°C verlaagd naar gemiddeld 18°C. Het energiegebruik zal door het toepassen van variant c licht afnemen en de conserveringscondities nabij de koude oppervlakken verbeteren.

5.6.2 Model 2: Luchtstromingsmodel van de kerk m.b.v. Fluent

In deze simulatie is de 3D-geometrie van een vereenvoudigd model van de kerk in het CFD-programma ingevoerd en zal de wintersituatie doorgerekend worden. De berekeningen geven een driedimensionaal beeld van het verloop van luchtsnelheid en luchttemperatuur in de ruimte. Zie onderstaande figuur voor de ingevoerde geometrie van de kerkruimte.



Figuur 37 Het grid van het CFD-model van de kerk.

De randvoorwaarden van het te berekenen vertrek zijn stationair gekozen, dat wil zeggen dat de oppervlaktetemperaturen een vaste waarde hebben tijdens de berekening. Als oplossingsmethode is de “segregated solver” gebruikt, zodat er voor de oppervlakken vaste temperaturen ingevoerd kunnen worden. Voor het model zijn deze oppervlaktetemperaturen bepaald met behulp van HAMBASE (model 1 variant a). Gegevens van de instellingen van het model zijn samengevat in Tabel 7. Het standaard k-ε model is gebruikt om turbulentie te modelleren.

Voor het modelleren van de verwarmingslichamen zijn er objecten met de nagenoeg gelijke afmetingen als de bestaande radiatoren ingevoerd. Deze objecten zijn vervolgens gedefinieerd als radiator. Voor deze radiatoren is de warmtestroom q gespecificeerd. De warmtestroom is per radiator berekend door het geschatte vermogen te delen door het oppervlak:

$$q = P_r / A_r \quad (7)$$

Waarin q = warmtestroom [W/m²]
 P_r = vermogen radiator [W]
 A_r = oppervlakte radiator [m²]

Tabel 7 Instellingen van het CFD-model van de kerk.

Omschrijving	Waarde
Gebruikte oplossingmethode	Segregated solver
Gebruikt model	Standard k-ε
Temperatuur glas	5 °C
Temperatuur buitenwand	11 °C
Temperatuur binnenwand/vloer	20 °C
Volume kerk	900 m ³
Opgesteld verwarmingsvermogen	20 kW

Simulatieresultaten model 2

Een afbeelding van de middels de CFD-simulatie verkregen resultaten is weergegeven in Figuur 38. Deze figuur betreft een dwarsdoorsnede over de kerk waarin de temperatuurverdeling is weergegeven. Overige resultaten van de CFD-berekeningen voor de kerk zijn grafisch weergegeven in de bijlagen. In bijlage F zijn een lengte- en een dwarsdoorsnede van de kerk weergegeven. Middels kleuren zijn de verschillende temperaturen weergegeven. Over de kerkhoogte is een geringe thermische stratificatie van 1 á 2 graden waarneembaar. De hygrische stratificatie bij volledige menging van waterdamp is hierdoor maximaal 5% en niet zorgwekkend voor de RV-condities aan de bovenzijde van het altaar en orgel. Deze resultaten zijn deels gevalideerd middels de uitgevoerde stratificatiemeting.



Figuur 38 De middels simulatie verkregen temperatuurverdeling over de dwarsdoorsnede van de kerk in de wintersituatie. Er is slechts een geringe stratificatie van enkele graden waarneembaar.

In bijlage G zijn een lengte- en een dwarsdoorsnede van de kerk afgebeeld waarin de luchtstroming is weergegeven. In deze afbeeldingen zijn de snelheid en richting van de stroming weergegeven met behulp van pijltjes. Ten gevolge van de opgestelde radiatoren wordt er een opwaarts gerichte convectieve luchtstroming veroorzaakt. Hierdoor is er geen homogene luchttemperatuurverdeling in de kerk.

5.7 Discussie

Tijdens een rondgang door het gebouw, viel het op dat condensatie met name optreedt aan ramen die zicht hebben op de vrije hemel. Aan beglazing waarbij het zicht op de vrije hemel gehinderd wordt door omliggende bebouwing treedt minder condensatie op. Hieraan ligt ten grondslag dat het glas door straling naar de hemel meer warmte afstaat. De hemel heeft namelijk een lagere temperatuur dan de omliggende bebouwing.

In deze casus is aangenomen dat de aantasting van de balkkoppen in het gebouw het gevolg zijn van interne condensatie. Dit is aangenomen omdat er op meerdere locaties in het gebouw verrotte balkkoppen zijn gerestaureerd en niet alleen aan de noordwestgevel. De reden van aantasting behoeft echter nader onderzoek. De aantasting zou namelijk ook het gevolg kunnen zijn van in de constructie gedrongen regenwater.

5.8 Conclusies

De binnenluchtcondities in de kerk zijn wat de objecten betreft museaal gezien niet ongunstig te noemen voor een gebouw in deze klasse. Afgezien van de zomer, hier treedt een beperkt aantal temperatuuroverschrijdingen op: 6% van de gedurende het jaar gemeten temperatuur ligt boven de 25°C. In de zomer en de herfst treden lichte overschrijdingen van de RV op. Voor 6% van de gedurende het jaar gemeten RV ligt deze boven de 60%.

Voor objecten die geplaatst zijn aan de buitenwanden heersen gedurende de koude perioden voor collectiebehoud ongunstige waarden. De relatieve luchtvochtigheden aan de koude oppervlakken zijn zorgelijk in de kerk, met name aan de noordoostgevel. Doordat de huidige instellingen van de bevochtigers gedurende het stookseizoen ingesteld staan op 50% RV, treedt er condensatie op aan de koude oppervlakken. Simulatieresultaten tonen aan dat verlaging van deze instellingen gedurende het stookseizoen naar een waarde van 40 á 45%, het risico op oppervlaktecondensatie als ook interne condensatie verminderd. Over de gesimuleerde wintermaand leidt een verlaging van de RV-instelling met 5% tot een daling van de RV aan het oppervlak met gemiddeld 7%. Het verlagen van de instellingen vermindert de aantasting van de kozijnen door schimmelgroei en rot ten gevolge van afdruiptwater van de beglazing en condensatie. Ook het risico op aantasting van interne houten delen van de constructie zal hierdoor verminderen ten gevolge van het voorkomen van hoge relatieve vochtigheden en of condensatie. Een aanvullende temperatuurverlaging van gemiddeld 1°C leidt tot een verlaging van 8% RV aan het oppervlak. Bovendien resulteert dit in een lager energiegebruik.

Voor objecten die geplaatst zijn in de directe nabijheid van bevochtigers, ontvochtigers en verwarmingslichamen kunnen voor collectiebehoud ongunstige waarden heersen. In de nabijheid van be- en ontvochtigers kan namelijk lokaal een hoge of lage RV heersen. Dit is het gevolg van de door de apparaten ingeblazen be- of ontvochtigde lucht. Rond de verwarmingslichamen treedt gedurende het stookseizoen een zeer lage RV op ten gevolge van de opgewarmde lucht. Tevens kunnen kunstobjecten in de nabijheid van radiatoren aangestraald worden en daardoor beschadigen door uitdroging.

Er treden relatief hoge ventilatievouden op in het gebouw. In de winter is 2,5 h⁻¹ gemeten. In de zomer is 4,5 h⁻¹ met gesloten raam en 5,9 h⁻¹ met een geopend raam gemeten. In de zomer zijn de ventilatievouden waarschijnlijk hoger doordat de deur bij de entree gedurende bezoeken geopend is. Het openen van een raam hoog in de kerk verhoogt het ventilatievoud ten gevolge van thermische trek en drukverschil tussen binnen en buiten.

Er treedt slechts een geringe stratificatie op over de kerkhoogte. Door het hoge ventilatievoud wordt de lucht in de kerk waarschijnlijk goed gemengd, waardoor slechts een geringe stratificatie waarneembaar is.

5.9 Aanbevelingen

Hieronder volgt een opsomming van de uit het onderzoek naar voren gekomen aanbevelingen:

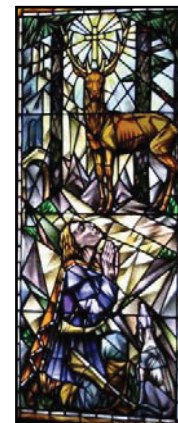
- de instellingen van de bevochtigers gedurende de winter verlagen naar 40 á 45%. Hiermee wordt het risico op condensatie verminderd.
- temperatuur verlagen in stookseizoenen naar bijvoorbeeld 17°C. Er is dan minder bevochtiging benodigd aangezien er bij een lagere temperatuur een hogere RV heerst. Tevens treedt er dan een lager temperatuursverschil op over de wanden.
- bevochtigers niet op stellen vóór radiatoren: door de relatief warme en droge lucht rond de radiator zal de ingebouwde hygrostaat geen representatieve waarde meten
- bevochtigers niet op stellen in de directe nabijheid van kunstobjecten: de uitblaas condities van deze apparaten kunnen verschillen van de ingestelde waarde
- directe zonaanstraling van mobiele bevochtigers vermijden
- ontvochtigers en bevochtigers niet in elkaars nabije omgeving te plaatsen. Indien bevochtigers en ontvochtigers in het zelfde vertrek staan opgesteld dient er een verschil tussen de setpoints te zijn ingesteld van bijvoorbeeld 10%. Hiermee wordt voorkomen dat de apparaten elkaar tegenwerken.
- het toepassen van dubbele beglazing, of een voorzetraam aan de binnenzijde, dat van buiten uit geventileerd wordt. Hiermee wordt het condensatierisico aan de beglazing verminderd.
- waardevolle collectie niet tegen koude buitenwanden plaatsen. Aan de buitenwanden heerst gedurende de koude perioden namelijk een voor collectiebehoud te hoge RV (>60%). Dit zorgt voor een hoge RV achter de objecten en hoge RV-gradiënt over objecten.

6 Casus 2: Conservation heating in het jachthuis St. Hubertus



6.1 Inleiding

Het jachthuis St. Hubertus, gelegen op de Hoge Veluwe, maakt onderdeel uit van het Nederlandse culturele erfgoed. Er wordt grote waarde gehecht aan het behoud van zowel het exterieur, als het interieur. Het gebouw is tussen 1914 en 1920 gebouwd in opdracht van het echtpaar Kröller-Müller. Het gebouw en het interieur zijn ontworpen door architect H.P. Berlage, geheel in de stijl naar de legende van de heilige St. Hubertus. In 1977 is het jachthuis de status van Rijksmonument verleend.



Figuur 39 Een impressie van het monumentale interieur, met van links naar rechts de zitkamer van Dhr. Kröller, de eetzaal en een detail van de glas-in-lood ramen in de entree.

Na onderzoek van het binnenklimaat door het Instituut Collectie Nederland en de Technische Universiteit Eindhoven is gebleken dat het binnenmilieu niet voldoet aan de richtlijnen voor collectiebehoud (Neuhaus et al. 2004a). Metingen laten zien dat gedurende het stookseizoen zeer lage RV's optreden die beschadigen aan interieur en objecten veroorzaken. Buiten het stookseizoen treden vaak hoge RV's op van rond de 70%. Deze hoge RV's vormen een risico voor interieur en objecten door het ontstaan van condities voor schimmeligroei (Erhardt et al. 1994).

Een belangrijk instrument om een verbeterde conservering mogelijk te maken in het jachthuis St. Hubertus is een juist ingeregelde verwarmingsinstallatie, om zo de gewenste binnencondities te handhaven op het gebied van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Simulaties wijzen uit

dat aanpassing van de huidige regeling kan leiden tot een beter binnenklimaat. Hierin worden de aanwezige objecten, zoals meubels, boeken en tapijten, beter geconserveerd. De huidige regeling wordt hiermee vervangen door een regeling die de verwarming schakelt op basis van de relatieve luchtvochtigheid: een zogenaamde hygrostatisch geregelde verwarming. Deze wijze van verwarmen wordt ook wel conservation heating genoemd

6.2 Doelstellingen casus

Doelstelling van het onderzoek beschreven in deze casus is om de bruikbaarheid van conservation heating vast te stellen in het Nederlandse klimaat en het optimaliseren van de regeling. De algemene onderzoeksvraag binnen deze casus is:

- Wat is de bruikbaarheid van hygrostatisch geregeld verwarmen in het Nederlandse klimaat?

De specifieke onderzoeksvragen kunnen als volgt gedefinieerd worden:

- Hoe is het huidige klimaat in het jachthuis St. Hubertus te beoordelen?
- Hoe is een algemeen gevalideerd simulatiemodel voor hygrostatisch geregeld verwarmen op te stellen?
- Wat is het effect van conservation heating in het jachthuis St. Hubertus?
- Hoe kan men aanvullend comfort creëren tijdens het toepassen van conservation heating?

6.3 Methode

Voorafgaande aan het onderzoek naar conservation heating is het binnenklimaat in verschillende vertrekken van het jachthuis gedurende een jaar gemeten. Op grond van de meetresultaten heeft een beoordeling van het binnenklimaat plaatsgevonden. Hieruit is de probleemstelling vastgesteld. Vervolgens heeft er een inventarisatie naar de installatietechnische en bouwfysische aspecten plaatsgevonden. Deze gegevens zijn onder andere van belang voor het opstellen van simulatiemodellen.

Simulaties van het binnenklimaat zijn uitgevoerd met behulp van het warmte- en vochtmodel HAMBASE gekoppeld aan Matlab Simulink. Een experiment in een gebouw op de campus van de TU/e met goed gedefinieerde bouwfysische aspecten en materialen maakt deel uit van het onderzoek. Met behulp van dit pre-testen is een algemeen gevalideerd simulatiemodel voor hygrostatisch geregeld verwarmen opgesteld. Met dit algemene model is het per gebouw mogelijk om inzicht te krijgen in de regeling, optimale setpoints, de invloed op het binnenklimaat en benodigde verwarmingscapaciteiten. Tevens is de mogelijkheid onderzocht of er beperkt thermisch comfort geboden kan worden door de regelstrategie minimaal uit te breiden.

Vervolgens is het algemene model aangepast en de toepasbaarheid van conservation heating in het jachthuis onderzocht. Het model is gevalideerd door data verkregen uit eerdere metingen.

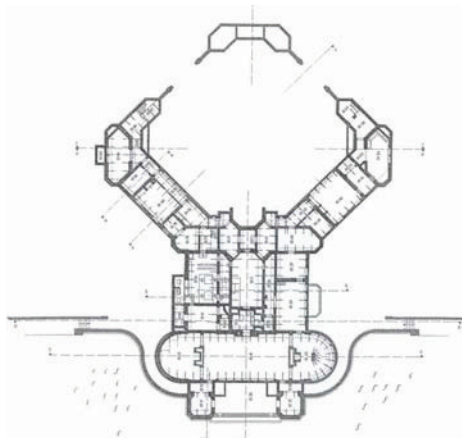
Voor een experimentele opstelling in het monument zijn twee gelijkwaardige vertrekken op de eerste verdieping geselecteerd. In een vertrek is een opstelling geplaatst om de ruimte te verwarmen volgens conservation heating. In een ander gelijkwaardig vertrek is een opstelling geplaatst om de ruimte thermostatisch te verwarmen. Het testen is gestart gedurende de koude wintermaanden in het jaar 2006 en zal in totaal een geheel jaar blijven draaien. Gedurende deze tests worden er waardevolle data verkregen ten behoeve van het verbeteren van simulatiemodellen en wordt er informatie verkregen over de interactie tussen klimaat, bouwfysica en installatie. Meetresultaten van het binnenklimaat zijn vergeleken met de klimaatrichtlijn zoals gesteld in de ASHRAE klasse B.

6.4 Analyse van het binnenklimaat

Het Instituut Collectie Nederland heeft een jaar lang, van 7 februari 2002 tot en met 7 februari 2003, metingen verricht aan het binnenklimaat. Met behulp van een draadloos meetsysteem zijn metingen uitgevoerd naar luchttemperatuur en RV, in 13 verschillende vertrekken. Afgezien van de torenkamer (niet op de cv-installatie aangesloten), vertonen de meetresultaten van de verschillende vertrekken gelijkenis. Als beoordeling van het binnenklimaat kan in hoofdlijnen gesteld worden:

- gedurende het stookseizoen treden er zeer lage RV's op (<20%)
- gedurende de vochtige seizoenen treden er hoge RV's op (>60%)

In bijlage H zijn de meetresultaten van de eetkamer in het Mollierdiagram weergegeven. In het diagram zijn de meetwaarden vergeleken met de klimaatrichtlijn zoals gesteld in ASHRAE klasse B. Een analyse van de metingen laat zien dat slechts 41% van de gedurende het jaar gemeten temperatuur en RV binnen het gewenste gebied vallen. Met name door de lage luchtvochtigheden is er reeds veelvuldig schade opgetreden aan interieur en objecten. Een voorbeeld hiervan zijn de scheuren in de waardevolle houten meubels. De lage RV's treden gedurende het stookseizoen op ten gevolge van het opwarmen van de binnenlucht door de c.v.-installatie.



Figuur 40 De vorm van de plattegrond van het gebouw is vermoedelijk op de vorm van een gewei gebaseerd, volgens de legende van de heilige Hubertus.

6.5 Bouwkundige en installatietechnische inventarisatie

Het gebouw heeft van bovenaf gezien de vorm van een gewei (zie Figuur 40) en is opgetrokken uit ongeïsoleerd metselsteen. De begane grond is voorzien van ongeïsoleerde spouwmuren. Vloeren zijn van beton, gedragen door stalen liggers. De beglazing bestaat uit enkel glas. De dakconstructie is opgebouwd uit houten balken met een ongeïsoleerd dakbeschot en is afgedekt met lestenen.

Het jachthuis is voorzien van een oliegestookte c.v.-installatie. De vertrekken zijn voorzien van radiatoren die merendeels weggewerkt zijn in de nog authentieke omkasting. In de badkamers en keukens zijn ook handdoekradiatoren toegepast, zie Figuur 41.



Figuur 41 De radiatoren in het jachthuis zijn grotendeels weggewerkt achter een originele omkasting. De badkamers zijn voorzien van originele handdoekradiatoren.

In het ketelhuis zijn 2 parallel geschakelde oliegestookte c.v.-ketels opgesteld met een nominaal vermogen van elk 140 kW. De rookgasafvoer geschiedt door middel van aansluiting op een bouwkundig rookgasafvoerkanaal. In het ketelhuis zijn ook de verdeler/verzamelaar en de

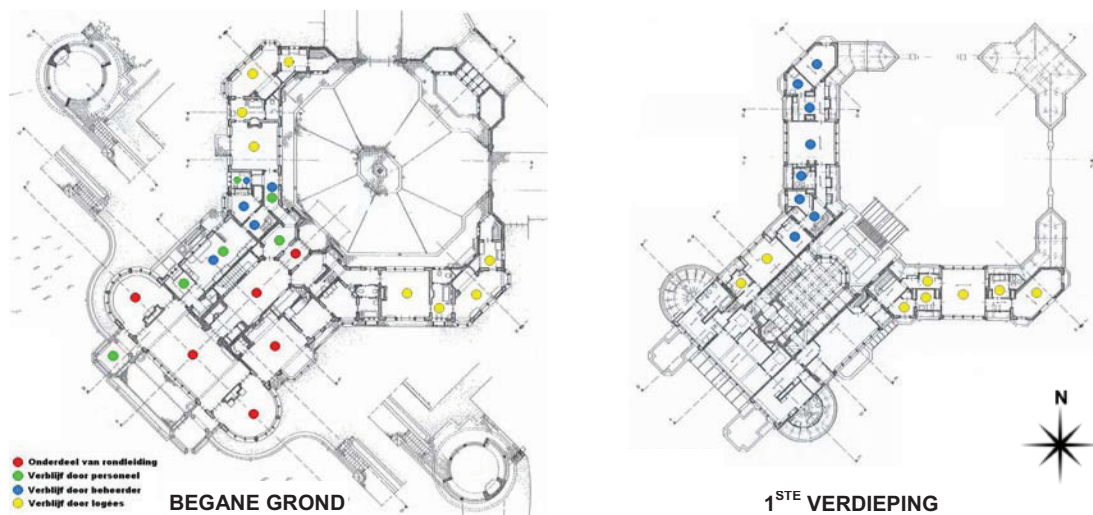
schakelkast ten behoeve van de regelinstallatie opgesteld. De gesloten verdeler en verzamelaar zijn voorzien van 4 radiatorgroepen:

- groep 1: radiatoren oostgevel
- groep 2: radiatoren westgevel
- groep 3: radiatoren zuidgevel
- groep 4: radiatoren woning westgevel

De ketels en groepen worden geregeld door de schakelkast waarin de verschillende regelaars, alsmede voedingen en motorgroepen zijn opgenomen. De groepen oost, west en zuid worden geregeld door de weersafhankelijke groepsregelaar welke is gemonteerd in de schakelkast. Afhankelijk van de gemeten buitentemperatuur wordt de aanvoerwatertemperatuur geregeld middels een stooklijn. Bij een afwijking van de aanvoerwatertemperatuur grijpt de regelaar in door het inschakelen van de groeps pomp en het verstellen van de drie-wegklep. Hierdoor wordt aanvoerwater uit de verdeler gemengd met retourwater uit de groep tot de volgens de stooklijn gewenste aanvoerwatertemperatuur.

De verwarmde vertrekken van het jachthuis worden gebruikt voor verschillende doeleinden:

- groep 1 (oostgevel): gebruik door rondleiding en logees
- groep 2 (westgevel): gebruik door beheerder, personeel en logees
- groep 3 (zuidgevel): gebruik door personeel, rondleiding
- groep 4 (woninggroep): gebruik door beheerdersechtpaar



Figuur 42 Het gebruik van de vertrekken door de rondleiding, beheerder, personeel en logees op de begane grond (links). In het geval van bijvoorbeeld een bruiloft wordt de hal, eetkamer en bibliotheek gebruikt. In de rechter figuur is het gebruik van de vertrekken op de 1^{ste} verdieping weergegeven. De vertrekken in de westvleugel worden bewoond door de beheerders. Sporadisch worden de overige vertrekken op de 1^{ste} verdieping gebruikt voor logees. Niet afgebeeld is het gebruik van de vertrekken op de 2^{de} verdieping. In het geval van logees wordt hier af en toe gebruik gemaakt van de biljartkamer en toilet.

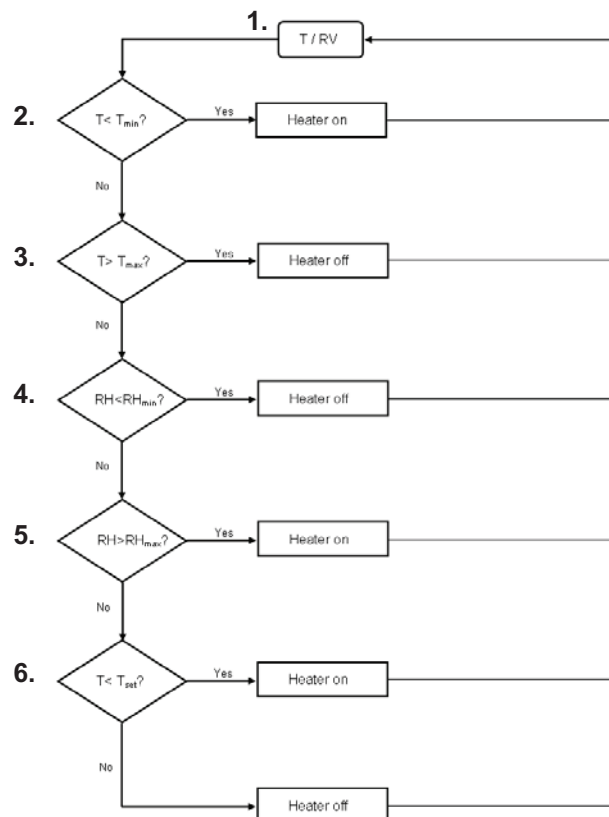
Een gedeelte van de westvleugel van het gebouw wordt continu bewoond door het beheerdersechtpaar. Een gedeelte van de begane grond maakt deel uit van een dagelijkse rondleiding waarin het historische interieur tentoongesteld wordt aan bezoekers. Enkele malen per jaar wordt een gedeelte van de begane grond gebruikt voor bruiloften of doet het gebouw dienst als onderkomen voor hoogwaardigheidsbekleders zoals regeringsleden. Het merendeel van alle vertrekken wordt echter niet gebruikt gedurende het jaar.

6.6 Simuleren van conservation heating

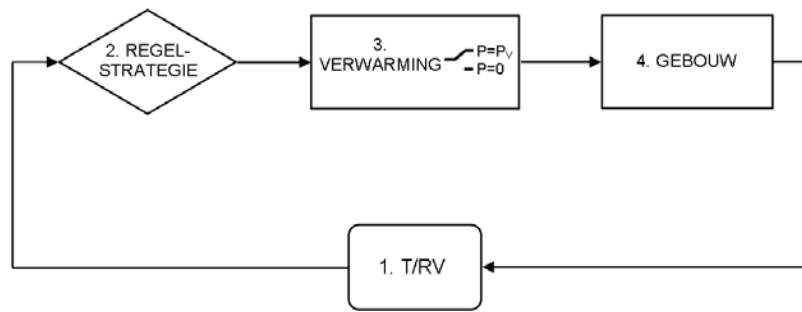
Voor het simuleren van conservation heating is gebruik gemaakt van het warmte- en vochtmodel HAMBASE, gekoppeld aan Matlab Simulink. Om het model te valideren is er een proefopstelling in een gebouw op de campus van de TU/e gebruikt. Dit gebouw heeft 2 identieke vertrekken en goed gedefinieerde bouwfysische aspecten en materialen. Het ene vertrek is thermostatisch geregeld en het andere vertrek hygrostatisch geregeld verwarmd.

De regelstrategie in de hygrostatisch geregelde ruimte is gebaseerd op het stroomschema zoals weergegeven in Figuur 43 en gemodelleerd met behulp van Simulink. De regelstrategie is als volgt opgebouwd. Als input van de regelaar dienen de gemeten temperatuur en RV van de ruimte (stap 1). Vervolgens wordt gecontroleerd of de ruimtetemperatuur lager is dan de ingestelde minimumtemperatuur $T_{\min}$ (stap 2). Als dit het geval is wordt de verwarming vrijgegeven. Dan wordt er gecheckt of de temperatuur hoger is dan de ingestelde maximumtemperatuur (stap 3). Als dit het geval is blijft de verwarming uit, ongeacht de waarde van de RV. Als de temperatuur zich tussen de ingestelde minimum- en maximumtemperatuur bevindt, controleert de regelaar vervolgens of er een correctie van de RV benodigd. Allereerst wordt gecontroleerd of de heersende RV lager is dan de ingestelde waarde van de minimum RV, $RH_{\min}$ (stap 4). Indien dit het geval is, blijft de verwarming uit om een verdere verlaging van de RV te voorkomen. Dan wordt gecontroleerd of de heersende RV hoger is dan de ingestelde maximumwaarde $RH_{\max}$ (stap 5). Indien dit het geval is wordt de verwarming aangestuurd totdat de RV gedaald is tot onder $RH_{\max}$, of tot de ingestelde maximumtemperatuur $T_{\max}$ is bereikt.

In monumentale gebouwen waar comfort gewenst is, is de mogelijkheid onderzocht of er beperkt thermisch comfort geboden kan worden door de regelstrategie minimaal uit te breiden. Indien de RV zich tussen $RH_{\min}$ en $RH_{\max}$ bevindt is het mogelijk om bij te stoken om de temperatuur en daarmee het thermisch comfort te verhogen (stap 6). Er wordt dan bijgestookt tot dat $RH_{\min}$ of de gewenste ingestelde comforttemperatuur T_{set} is bereikt.



Figuur 43 Stroomschema conservation heating met beperkte comfortfunctie. Als input dienen de gemeten temperatuur en RV van de ruimte (1). Vervolgens wordt gecontroleerd of de temperatuur zich tussen het gewenste minimum en maximum bevindt (2 en 3). Daarna wordt gecontroleerd of de RV zich tussen het gewenste minimum en maximum bevindt (4 en 5). Als dit het geval is kan er, indien thermisch comfort gewenst is, bijgestookt worden (6).



Figuur 44 Stroomschema van de opbouw van het simulatiemodel. Na de input van de in de ruimte gemeten temperatuur en RV beslist de regelaar of er gestookt moet worden. Vervolgens geeft de verwarming een vermogen af aan de ruimte en worden opnieuw temperatuur en RV gemeten.

In Figuur 44 is het stroomschema van de opbouw van het simulatiemodel gegeven. Het blok ‘gebouw’ bevat het HAMBASE-model van het te simuleren vertrek. Een afbeelding van het complete Simulink model is gegeven in bijlage I. Het grootste blok bevat het HAMBASE gebouwmodel. De blokken aan de rechter zijde bevatten de regelaars van de verschillende zones van het model. De structuur van een conservation heating regelaar is weergegeven in bijlage I. De input van dit blok zijn temperatuur en RV van de te regelen zone. De heersende condities worden vergeleken met de ingevoerde waarden zoals weergegeven in het stroomschema in Figuur 43. De output van de regelaar is nul of indien stoken gewenst is, de verwarmingscapaciteit voor deze zone.

De setpoints van beide regelaars (van twee gelijkwaardige onderzochte vertrekken) zijn weergegeven in Tabel 8. De conventionele thermostatische regelaar is ingesteld op een constante temperatuur van 17°C, om opzettelijke fluctuaties te vermijden. Het ventilatievoud in de vertrekken is niet gemeten en geschat op een waarde van 0,8 h⁻¹.

Tabel 8 Instellingen van de regelaars in het Simulink-model.

Thermostatisch geregelde ruimte		Hygrostatisch geregelde ruimte	
Vermogen	3000 W	Vermogen	3000 W
Start dagperiode	8:00 uur	T _{min}	10°C
Start nachtperiode	22:00 uur	T _{max}	25°C
T _{dag}	17°C	T _{set}	17°C
T _{nacht}	17°C	RH _{min}	45%
		RH _{max}	55%

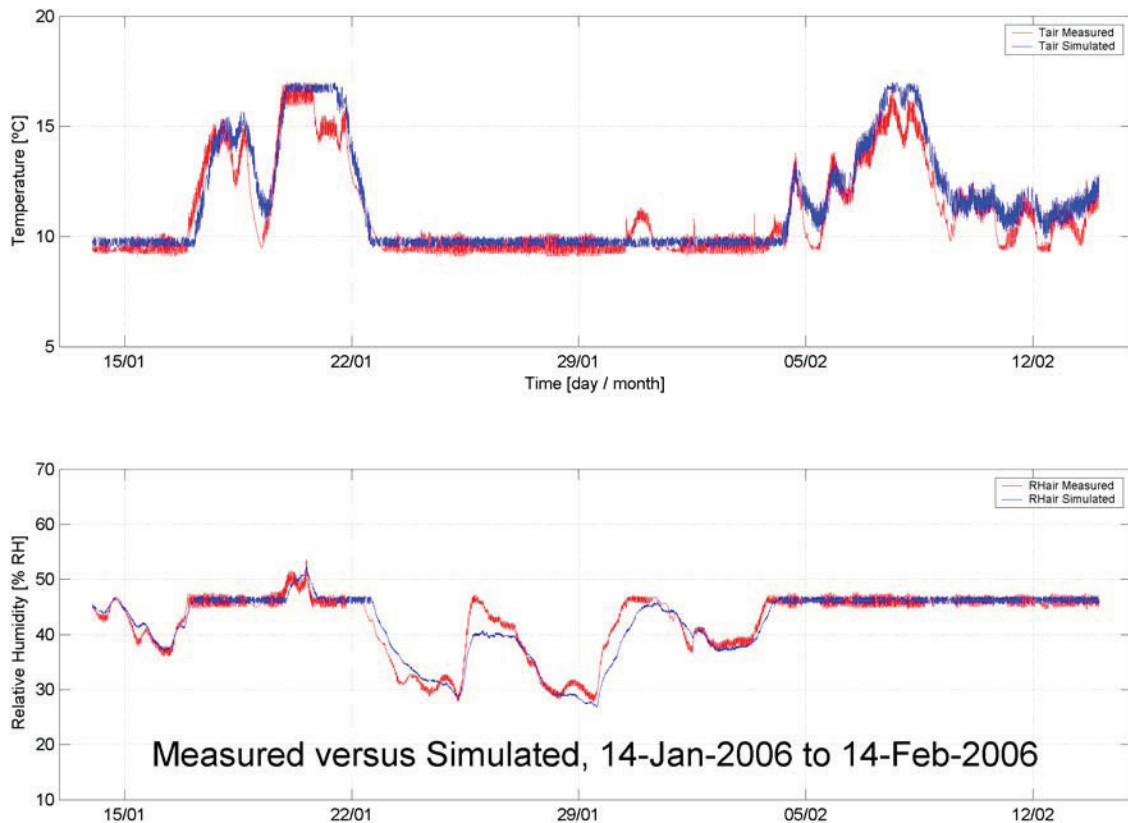
6.6.1 Simulatieresultaten

Zie voor de invoertekst van het HAMBASE-model van de oostvleugel van het jachthuis bijlage J. Figuur 45 laat de simulatieresultaten zien van de relatieve luchtvochtigheid over de periode van 14 januari tot 14 februari 2006 in het hygrostatisch geregelde vertrek van het jachthuis. Tabel 9 bevat een analyse van de simulatie- en meetresultaten. De simulatieresultaten zijn geverifieerd middels metingen (rode lijn). De temperatuur wijkt over de gesimuleerde periode gemiddeld 0,4°C af en de RV gemiddeld 0,2%. De afwijkingen tussen het model en de gemeten waarden zijn mogelijk te verklaren door:

- het ventilatievoud in het model bedraagt over de gehele gesimuleerde periode 0,8 h⁻¹
- het model bevat minimale verschillen in de constructiegegevens, afmetingen en volumes
- de regelsensoren en de meetsensoren van de proefopstelling hebben een afwijking.

Het is zichtbaar dat met een ingestelde minimumtemperatuur van 10°C het niet mogelijk is om een minimale RV van 45% te handhaven. Dit is het gevolg van het lage absoluut vochtgehalte van de buitenlucht gedurende de winter (Figuur 45: 22 januari tot 4 februari). Over de gesimuleerde periode zou in deze situatie T_{min} verlaagd moeten worden tot ongeveer 4°C om te voorkomen dat de RV onder de 45% zakt.

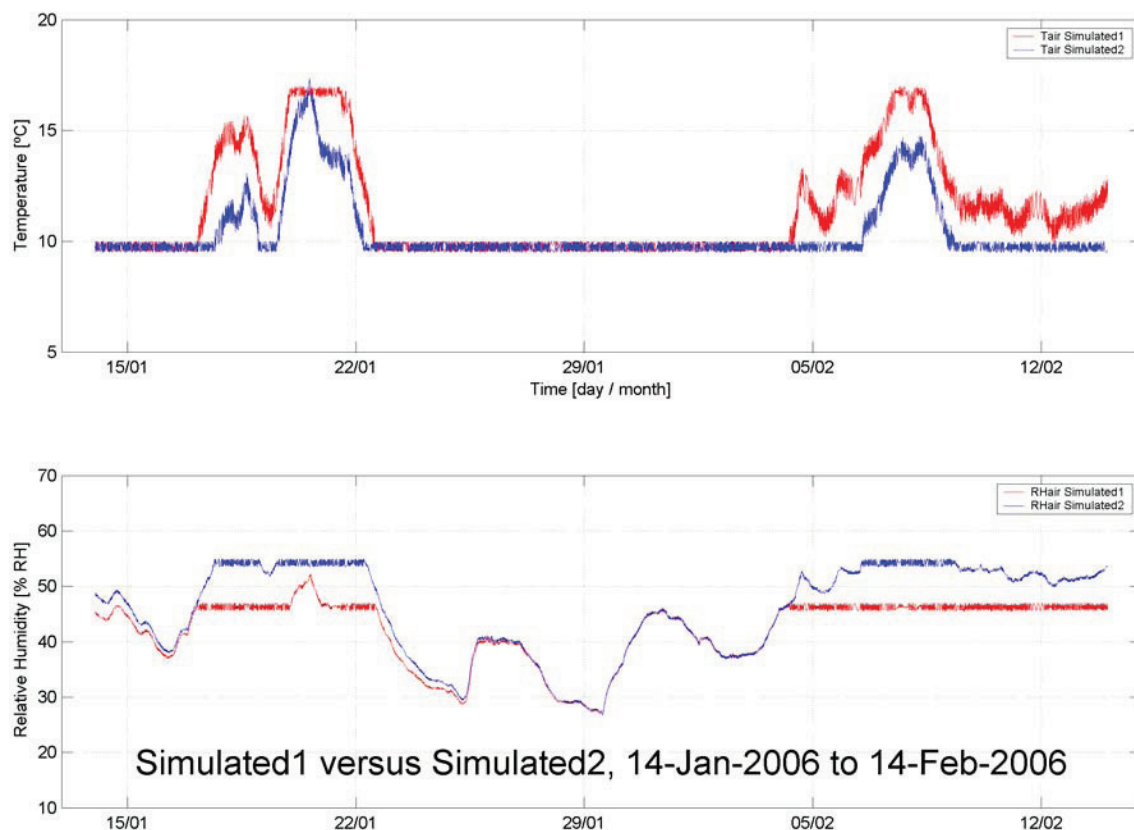
In Figuur 46 zijn simulatieresultaten van temperatuur en RV weergegeven indien de verwarmingslichamen in het vertrek hygrostatisch geregeld worden met (simulated1) en zonder (simulated2) beperkte comfortfunctie. Gedurende de tijd dat de RV binnen de grenzen is (Figuur 46: 17 januari tot 23 januari en 4 februari tot 14 februari) wordt er indien mogelijk bijgestookt tot de ingestelde comforttemperatuur T_{set} om beperkt thermisch comfort te bieden. Dit resulteert over de gesimuleerde periode in een temperatuursverhoging van gemiddeld 1°C . De temperatuur tot waar de ruimte opgestookt kan worden is echter sterk afhankelijk van het absoluut vochtgehalte van de lucht. Zonder het gebruik van de beperkte comfortfunctie wordt er alleen gestookt om een minimumtemperatuur T_{min} en een maximum RV-grens RH_{max} te bewaken. Dit resulteert in een lager energiegebruik.



Figuur 45 Simulatieresultaten (blauwe lijn) en meetresultaten (rode lijn) van temperatuur en RV in het hygrostatisch geregelde vertrek van 14 januari tot 14 februari 2006. Uit de grafieken valt op te maken dat de gesimuleerde en gemeten waarden redelijk goed overeenkomen. De temperatuur wijkt over de gesimuleerde periode gemiddeld $0,4^{\circ}\text{C}$ af en de RV $0,2\%$. Afwijkingen zijn mogelijk te wijten aan het niet constante ventilatievoud in de praktijksituatie, sensorafwijkingen en minimale verschillen tussen de ingevoerde constructiegegevens en de bestaande constructie.

Tabel 9 Analyse van simulatie- en meetresultaten over de periode 14 januari tot 14 februari 2006.

Variabele	T [$^{\circ}\text{C}$]	RV [-]	x [g/kg]
Gemiddelde waarde gemeten	11,06	42,45%	3,46
Gemiddelde waarde gesimuleerd	11,44	42,21%	3,55
Minimum waarde gemeten	9,10	27,70%	2,04
Minimum waarde gesimuleerd	9,50	26,78%	1,94
Maximum waarde gemeten	17,00	53,70%	6,07
Maximum waarde gesimuleerd	17,00	52,22%	6,09
Gemiddeld verschil meet-simulatie	0,38	0,24%	0,09
Standaard deviatie verschil meet-simulatie	0,76	1,90%	0,25



Figuur 46 Simulatieresultaten van temperatuur en RV indien er beperkt comfort wordt toegepast (rode lijn) en indien niet (blauwe lijn). Indien er beperkt comfort wordt toegepast zal er bijgestookt worden tot dat de gewenste temperatuur is bereikt, hier 17°C, of tot de minimale gewenste RV is bereikt, hier 45%. Over de gesimuleerde periode is het gemiddeld 1°C warmer bij het toepassen van de comfortfunctie.

In Tabel 10 is het jaarlijkse energiegebruik van vier verschillende verwarmingsstrategieën vergeleken. Deze waarden zijn verkregen door simulaties met behulp van het programma HAMBASE. Hierbij zijn KNMI klimaatgegevens van het jaar 2005 gebruikt. De resultaten laten zien dat door gebruik te maken van conservation heating met de geoptimaliseerde instellingen van de regelaar ($T_{\min}=4^{\circ}\text{C}$, geen comfortfunctie) ongeveer 36% minder energie gebruikt wordt vergeleken met een thermostatische regeling.

Tabel 10 Een schatting van het jaarlijkse energiegebruik in 2005 berekend m.b.v. HAMBASE.

Verwarmingsstrategie	Instellingen T/RV	Jaarlijks energiegebruik [kWh]
Thermostatisch geregeld ¹	15-20°C / n.v.t.	6133
Conservation heating met beperkte comfort functie ²	10-25°C / 45-55%	5431
Conservation heating zonder beperkte comfort functie	10-25°C / 45-55%	4329
Conservation heating zonder beperkte comfortfunctie, met geoptimaliseerde instellingen	4-25°C / 45-55%	3828

¹ dagtemperatuur 20°C met 5 K nachtverlaging tussen 22u en 8u.

² $T_{\text{set}} = 17^{\circ}\text{C}$

6.7 Meetopstelling

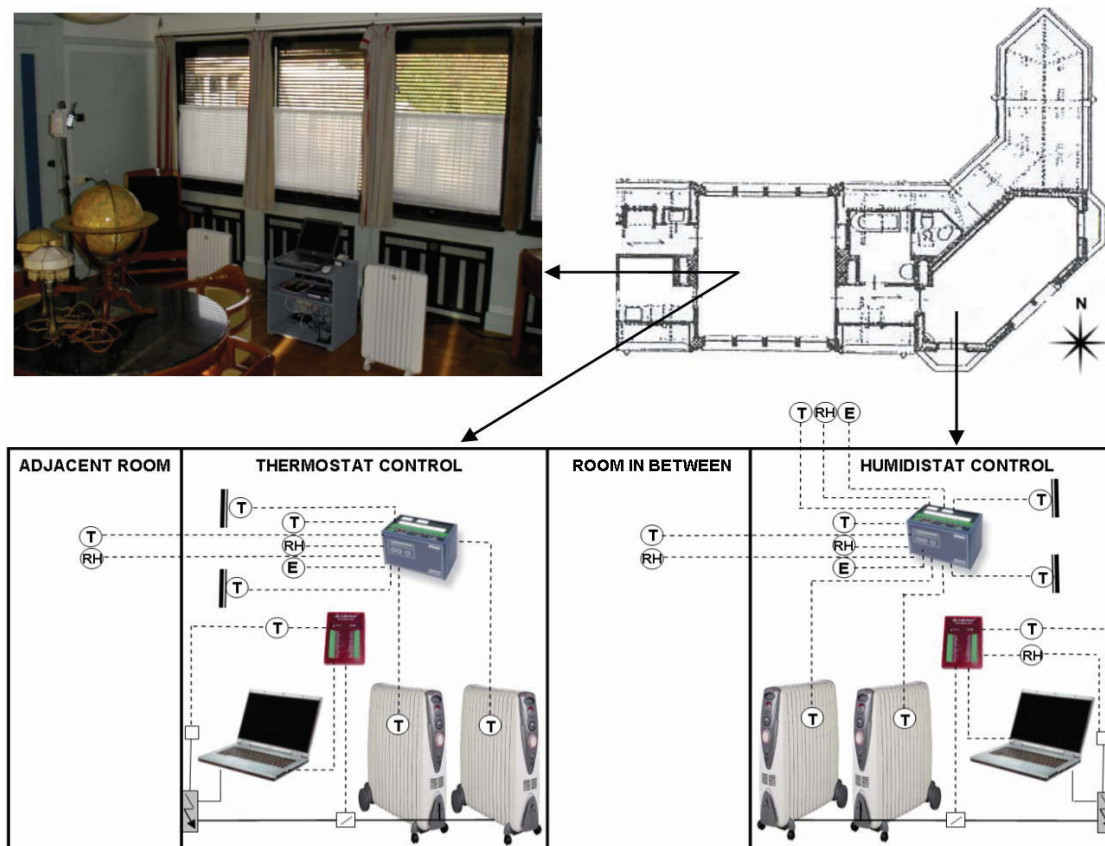
Voor een experimentele opstelling in het jachthuis zijn twee gelijkwaardige vertrekken op de eerste verdieping geselecteerd. Gedurende de tests is dit gedeelte van het gebouw niet in gebruik en blijven deuren en ramen gesloten. Er zijn geen vochtbronnen bekend in dit museale gedeelte van het gebouw; de badkamers worden niet gebruikt en er wordt niet gekookt. De zonwering is gedurende het experiment voor ongeveer 60% gesloten (Figuur 47). In één vertrek is een

opstelling geplaatst om de ruimte te verwarmen volgens conservation heating. De configuratie van de meetopstelling bestaat in elk vertrek uit een laptop computer voor de regeling, drie oliegevulde elektrische radiatoren van elk 1 kW en een gecombineerde T/RV-sensor. De in de vertrekken reeds aanwezige radiatoren zijn uitgeschakeld.

De software van de regelaar is geprogrammeerd volgens het stroomschema zoals weergegeven in Figuur 43. Iedere 10 seconden wordt door de software een loop doorlopen met de huidige temperatuur en RV als input.

In een ander gelijkwaardig vertrek is een opstelling geplaatst om de ruimte thermostatisch te verwarmen. De setpoints van de regelaars zijn vergelijkbaar zoals weergegeven in Tabel 8. In de thermostatisch geregelde ruimte is opzettelijk geen nachtverlaging toegepast. Dit is gedaan om RV schommelingen in het monumentale interieur te voorkomen en hiermee het risico op schade aan het interieur gedurende het experiment te minimaliseren. De elektrische radiatoren worden aangestuurd middels een aan/uit-regeling. Aanvullende warmteproductie in de vertrekken is minimaal door het gebruik van een laptop computer per vertrek om de verwarmingslichamen aan te sturen.

In de onderzochte vertrekken zijn de luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur van wand en beglazing, RV en invallende zonnestraling in het verticale vlak gemeten (Figuur 47). In de aanliggende vertrekken is de luchttemperatuur en RV gemeten. Tevens zijn buiten de temperatuur, RV en invallende zonnestraling in het horizontale vlak gemonitord.



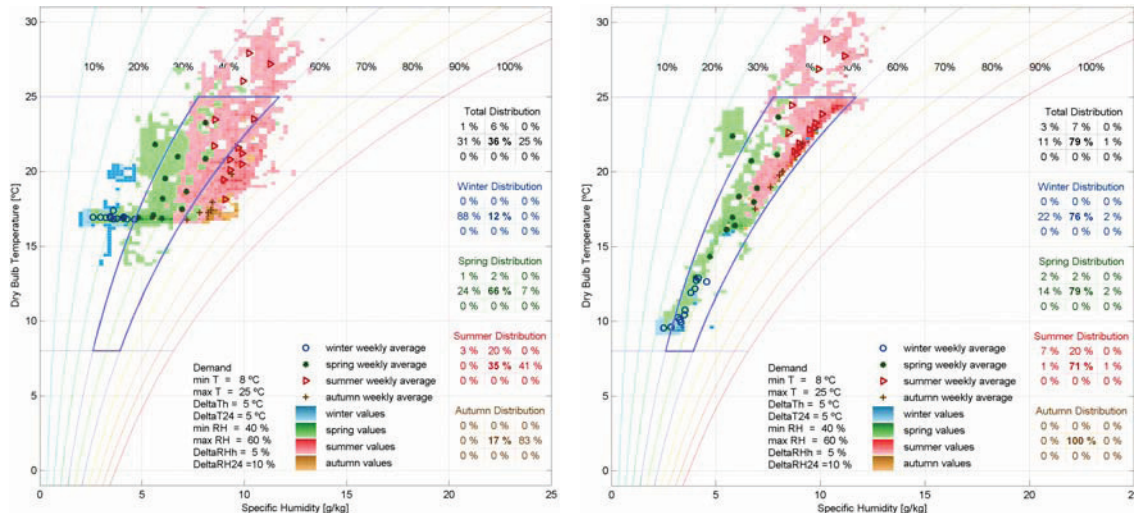
Figuur 47 De afbeelding linksboven toont de opstelling in het thermostatisch gestookte vertrek. Rechtsboven is een plattegrond van de vertrekken weergegeven waar de opstellingen zijn geïnstalleerd. Een schematische weergave van de meetopstelling en sensoren is eveneens afgebeeld.

6.7.1 Resultaten meetopstelling

In Figuur 48 zijn temperatuur en RV in het Mollierdiagram weergegeven voor zowel het thermostatische als het hygrostatisch geregelde vertrek. Het betreft hier de periode van 1 januari tot 1 november 2006. In het thermostatisch geregelde vertrek treedt gedurende perioden van een lage absoluut luchtvochtigheid (winter) lage RV's op (<40%). Voor 33% van de gemeten

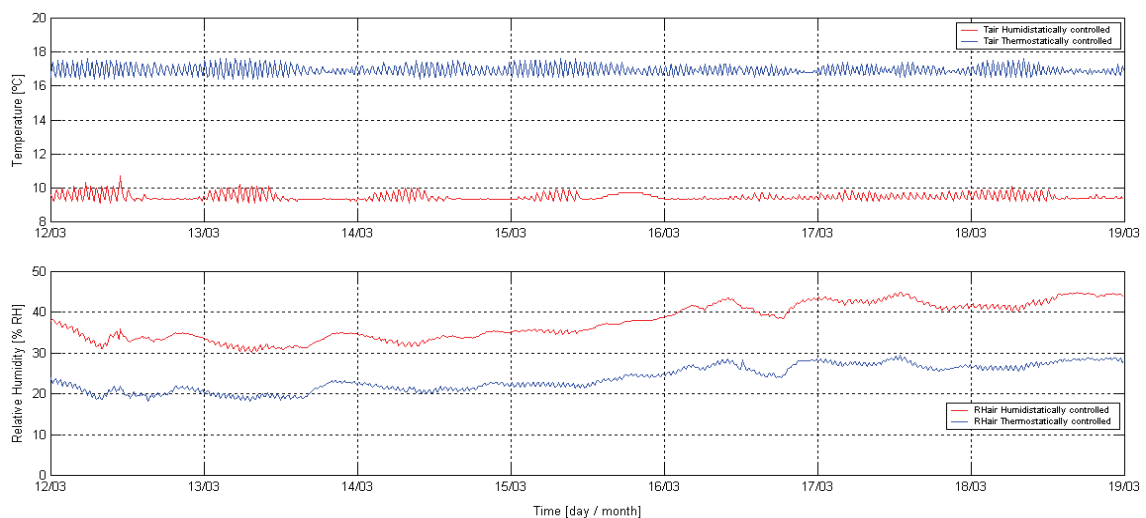
waarden ligt de RV onder de 40% met een minimum van 16% RV. In dezelfde periode is de RV in het hygrostatisch geregelde vertrek hoger, ten gevolge van een lagere temperatuur. Hier ligt de RV voor 14% van de meetwaarden onder de 40% met een minimum van 28% RV.

Gedurende vochtige perioden in de zomer wordt er in het hygrostatisch geregelde vertrek enkele graden bijgestookt om de RV te verlagen. De maximum gemeten RV in het thermostatisch geregelde vertrek bedraagt 88% ten opzichte van 69% RV in het hygrostatisch geregelde vertrek. Voor het thermostatisch geregelde vertrek ligt 24% van de meetwaarden boven de 60%. Voor het hygrostatisch geregelde vertrek is dit slechts 1%.

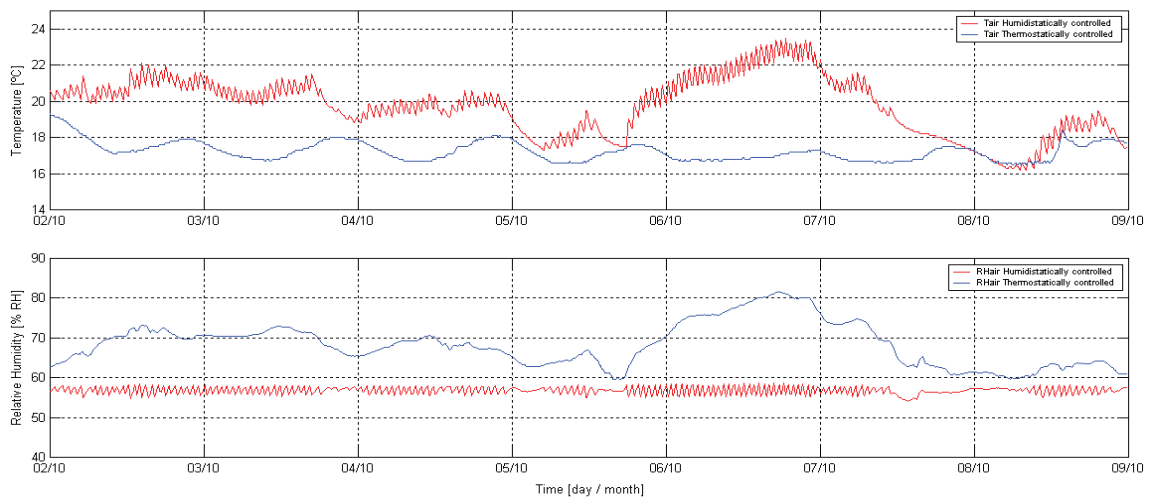


Figuur 48 De meetresultaten van de thermostatisch (links) en hygrostatisch (rechts) geregelde vertrekken over de periode van 1 januari tot 1 november 2006. De RV in het hygrostatisch geregelde vertrek ligt voor 14% van de gemeten waarden onder de 40% RV. Voor het thermostatisch geregelde vertrek ligt 32% van alle meetwaarden onder de 40% RV. De RV in het hygrostatisch geregelde vertrek ligt voor slechts 1% van de gemeten waarden boven de 60% RV. Voor het thermostatisch geregelde vertrek geldt dit voor 25% van alle meetwaarden.

In onderstaande figuren zijn de meetresultaten in het hygrostatisch geregelde vertrek nogmaals vergeleken met het thermostatisch geregelde vertrek. Het betreft hier een typische droge winterweek en een typische vochtige herfstweek.



Figuur 49 In deze figuur zijn de meetresultaten van een typische winterweek weergegeven. In het thermostatisch geregelde vertrek (blauwe lijn) heersen voor collectiebehoud ongewenst lage RV's. Tevens heerst er een hogere temperatuur dan in het hygrostatisch geregelde vertrek. Door de hogere temperatuur, over deze afgebeelde week gemiddeld 7,5°C, is de RV in het thermostatisch geregelde vertrek gemiddeld 13,8% lager.



Figuur 50 In deze figuur zijn de meetresultaten van een typische herfstweek weergegeven. In het thermostatisch geregelde vertrek heersen voor collectiebehoud ongewenst hoge RV's. In het hygrostatisch geregelde vertrek wordt enkele graden bijgestookt. De RV ligt daardoor over de afgebeelde periode gemiddeld 11,6% lager dan in het thermostatisch geregelde vertrek en blijft rond de ingestelde maximumwaarde van 55% schommelen.

6.8 Discussie

Indien gedurende specifieke tijden thermisch comfort gewenst is, kan de beperkte comfort functie gebruikt worden gedurende het hygrostatisch geregeld verwarmen. Door de regeling te voorzien van een schakelklok is het mogelijk om extra bij te stoken om thermisch comfort te bieden indien dit ook daadwerkelijk gewenst is. In dit geval is het belangrijk om de regeling van een opstookbegrenzing te voorzien om te snel opstoken van het vertrek te voorkomen. De opstookbegrenzing komt tevens van pas indien de installatie bijvoorbeeld opnieuw opgestart wordt.

Tijdens het gebruik van conservation heating kan er afhankelijk van de situatie gebruik gemaakt worden van gericht toegepaste verwarming. Te denken valt hier bijvoorbeeld aan kerkbankverwarming (Limpens-Neilen 2006). Hierbij wordt slechts lokaal stralingswarmte gebruikt en wordt de omringende lucht niet of nauwelijks opgewarmd.

De testopstelling liet ook een ongewenst neveneffect zien. Tussen het hygrostatisch geregeld vertrek en het thermostatisch geregeld vertrek bevindt zich een houten deur die licht kromgetrokken was ten gevolge van het verschil in temperatuur en RV aan beide zijden van de deur. Het verdient aanbeveling deze verschillen te verminderen in deze situaties.

Literatuur laat zien dat conservation heating niet toegepast kan worden in een vertrek met een laag ventilatievoud en indien zich veel hygroscopisch materiaal in het vertrek bevindt. Ten gevolge van het vrijkomen van vocht gedurende het stoken kan er instabiliteit van de regeling optreden (Padfield 1996).

Instellingen van de regelaar moeten zo gekozen worden dat er een minimaal gebruik van de verwarmingsinstallatie optreedt in verband met de energiezuinigheid en om de levensduur van de installatie te bevorderen. De optimale instellingen kunnen per project verschillen. De instellingen zijn afhankelijk van zowel de specifieke bouwfysische aspecten alsmede de aanwezige collectie en de gewenste mate van thermisch comfort. Indien er geen comfort gewenst is kan de minimumtemperatuur bepaald worden aan de hand van de eventuele aanwezigheid van watervoerende leidingen en de temperatuurgevoeligheid van de aanwezige collectie.

6.9 Conclusies

Het huidige binnenklimaat in het jachthuis St. Hubertus is voor collectiebehoud ongunstig. Gedurende het stookseizoen treden er zeer lage RV's op (<20%). Gedurende de vochtige seizoenen treden er hoge RV's op (>60%).

Conservation heating is een geschikte techniek om conserveringscondities in een monumentaal pand in Nederland te creëren. Het grootste voordeel is het elimineren van extremen in de RV. In het thermostatisch geregelde vertrek ligt voor 33% van de gemeten waarden de RV onder de 40%, met een minimum van 16% RV. In dezelfde periode ligt de RV in het hygrostatisch geregelde vertrek voor 14% van de meetwaarden onder de 40% met een minimum van 28% RV. De maximum gemeten RV in het thermostatisch geregelde vertrek bedraagt 88%, ten opzichte van 69% RV in het hygrostatisch geregelde vertrek. Voor het thermostatisch geregelde vertrek ligt 24% van de meetwaarden boven de 60%. Voor het hygrostatisch geregelde vertrek is dit slechts 1%.

Fluctuaties van het binnenklimaat in temperatuur en RV zijn bovendien lager dan bij een conventioneel gestookte verwarmingsinstallatie met nachtverlaging. Afgezien van verbeterde conserveringscondities is het jaarlijkse energiegebruik significant lager in vergelijking met een conventioneel geregelde verwarmingsinstallatie om thermisch comfort te bieden. Simulaties van de testruimte in het jachthuis tonen een 36% lager energiegebruik aan dan wanneer er thermostatisch geregeld wordt. Voor het toepassen van conservation heating in Nederland worden, afhankelijk van de aanwezige collectie, instellingen van 4-25°C en 40-60% aanbevolen. Met behulp van HAMBASE gekoppeld aan Matlab Simulink is het mogelijk een simulatiemodel voor conservation heating op te stellen. Hiervoor dienen bouwfysische aspecten zoals toegepaste bouwmaterialen, afmetingen en volumes bekend te zijn. Simulatieresultaten tonen aan dat modelleren een bruikbaar gereedschap is om het effect van conservation heating op het binnenklimaat te onderzoeken. Verder is modelleren nuttig om de optimale instellingen van de regelaar te bepalen en inzicht in het energiegebruik te verkrijgen.

Aanvullend comfort kan geboden worden door beperkt bij te stoken indien de RV zich binnen de gewenste grenzen bevindt. Deze mogelijkheid is sterk afhankelijk van het absoluut vochtgehalte van de buitenlucht en bedraagt over de gesimuleerde periode gemiddeld slechts een graad.

6.10 Aanbevelingen

Simulatieresultaten tonen aan dat de instelling voor $T_{\min}$ verlaagd kan worden tot ongeveer 4°C om een ondergrens van 45% RV te handhaven in het Nederlandse klimaat. Bij deze minimumtemperatuur treedt er geen bevroeringsgevaar van watervoerende leidingen en radiatoren op.

7 Resultaten

Hieronder volgt een samenvatting van de resultaten en conclusies die uit het afstudeeronderzoek naar voren zijn gekomen.

7.1 Conclusies

Monumentale gebouwen in Nederland zijn te classificeren door onderscheid te maken in bouwфysische aspecten, aanwezige installatie en het gebruik.

Belangrijkste technieken voor RV-beheersing die in monumentale gebouwen in Nederland worden toegepast zijn: complete luchtbehandeling, mobiele be- en ontvochtiging en hygrostatisch geregeld verwarmen (conservation heating). Het gericht toepassen van vochtbufferende materialen om de ruimte-RV te stabiliseren wordt nog nauwelijks gebruikt.

Het foutief toepassen van installatietechnische maatregelen in monumentale gebouwen leidt altijd tot schade aan het gebouw en ongewenste condities van het binnenklimaat. Vooral het inblazen van bevochtigde lucht gedurende het stookseizoen is een veel voorkomend probleem. Dit leidt tot hoge RV's aan koude oppervlakken, zoals buitenwanden en glas en zelfs regelmatig tot oppervlakte- en interne condensatie.

De condensatieproblemen kunnen verminderd of opgelost worden door het verlagen van de instellingen van de bevochtiging gedurende de koude perioden. Simulatieresultaten tonen aan dat hier als richtlijn, als de collectie dit toelaat, een setpoint van 40% RV aangehouden kan worden. Een andere oplossing is het verlagen van de ruimtetemperatuur met enkele graden, waardoor er minder bevochtiging benodigd is. Het aanbrengen van dampremmende isolatie aan de binnenzijde van dak en buitenmuren en het toepassen van dubbel glas behoren theoretisch tot de mogelijkheden. Op de locaties waar constructiedelen door de isolatie heen steken, zoals bij binnenwanden en tussenvloeren, zal echter alsnog condensatie optreden. Bovendien hebben deze maatregelen aantasting van de historische authenticiteit tot gevolg.

Bij het toepassen van conservation heating wordt de verwarming middels een hygrostaat geschakeld. Hierdoor treden er gedurende het jaar voor collectiebehoud significant gunstigere binnencondities op betreffende de RV. Met name monumenten die gedurende het stookseizoen niet of nauwelijks gebruikt worden komen hiervoor in aanmerking. Het nadeel van conservation heating is namelijk het verminderde thermische comfort gedurende de koude perioden. Het thermisch comfort kan verbeterd worden door de regeling enigszins uit te breiden of door het toepassen van lokale stralingswarmte.

Alvorens technieken voor een beperkte RV-beheersing in te zetten is een gedegen vooronderzoek een absoluut vereiste. Dit vooronderzoek bestaat uit metingen naar de heersende binnenklimaatcondities en een inventarisatie van de bouwфysische en installatietechnische aspecten. Aan de hand van deze gegevens, mogelijk aangevuld met een simulatiestudie, kan overwogen worden welke technieken in deze specifieke situatie het best tot hun recht komen.

De te handhaven bandbreedte betreffende relatieve luchtvochtigheid moet bepaald worden aan de hand van de meest kritische voorwerpen in de ruimte. Indien mogelijk, kan overwogen worden gevoelige voorwerpen te verplaatsen naar bijvoorbeeld een geklimatiseerde ruimte of een klimaatvitrine. Hierdoor is een minder nauwe bandbreedte van het binnenklimaat benodigd.

7.2 Discussie en aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In dit onderzoek zijn de voornaamste in Nederland toegepaste technieken voor een beperkte RV-beheersing besproken, waarvan twee technieken nader onderzocht zijn. Technieken zoals de toepasbaarheid van hygrostatisch ventileren en het toepassen van vochtbufferende materialen, behoeven nader onderzoek.

Modellen voor het simuleren van conservation heating en hygrostatisch ventileren, die ontwikkeld zijn tijdens dit afstudeeronderzoek, worden inmiddels succesvol toegepast bij andere onderzoeken.

Referenties

ASHRAE (2004) 'Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy', ANSI/ASHRAE Standard 55-2004.

Conrad, E.A. (1995) 'Balancing Environmental Needs of the Building, the Collection, and the User', Landmark Facilities Group, Connecticut.

Erhardt, D. en Mecklenburg M. (1994) 'Relative Humidity Re-Examined', Preventive Conservation Practice, Theory and Research, IIC Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, September 12-16 1994, p. 32-38.

Erhardt, D. en Mecklenburg, M. (1995) 'Accelerated VS Natural Aging: Effect of Aging Conditions on the Aging Process of Cellulose', Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 352, p. 247-270.

Fang, L., Clausen, G. en Fanger, P.O. (1998) 'Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality', Indoor Air, vol. 8, nr. 2, p. 80-90.

Fluent Inc. (2005) 'Fluent 6.2 users guide', Fluent, Lebanon.

Jütte, B.A.H.G. (1994) 'Passieve conservering; klimaat en licht', Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap, Amsterdam, 4^{de} druk, ISBN 90-72905-33-4.

Kelter, S.L. e.a. (2003) 'Museums, Libraries and Archives', ASHRAE Applications Handbook SI edition, hoofdstuk 21.

Kerschner, R.L. (1992) 'A Practical Approach to Environmental Requirements for Collections in Historic Buildings', Journal of the American Institute for Conservation, vol. 31, p. 65-76.

LaFontaine, R.H. (1982) 'Humidistatically-controlled Heating: A New Approach to Relative Humidity Control in Museums Closed for the Winter Season', Journal for International Institute for Conservation: Canadian Group, vol. 7, p. 35-41.

Lester, A. en Myers, D.R. (2005) 'A Method for Improving Global Pyranometer Measurements by Modeling Responsivity Functions' Solar Energy vol. 80-3, p. 322-331

Leusden, F.P. en Freymark, H. (1951) 'Darstellung der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch', Gesundheits-Ingenieur 72, p. 271-273.

Limpens-Neilen, D. (2006) 'Bench Heating in Monumental Churches, Thermal Performance of a Prototype', Dissertatie, Technische Universiteit Eindhoven, Unit BPS, ISBN 90-386-1776-3.

Maekawa, S. en Toledo, F. (2002) 'Controlled Ventilation and Heating to Preserve Collections in Historic Buildings in Hot and Humid Regions', Paper presented at the ICOM-CC 13th Triennial Meeting in Rio de Janeiro, Brazil, September 22-27 2002.

Martens, M.H.J., Schijndel, A.W.M. en Schellen H.L. (2005) 'Klimaat evaluatie kaart: een nieuwe manier voor weergave van het binnenklimaat', Bouwfysica, vol. 18-3, p. 34-38.

MathWorks, The (2006) 'Simulink, Simulation and Model-Based Design', version 6, Natick, Massachusetts, USA.

Mecklenburg, M. en Tumosa, C.S. (1999) 'Temperature and Relative Humidity Effects on the Mechanical and Chemical Stability of Collections', ASHRAE Journal, vol. 41-4, p. 77-82.

- Meul, V. (2006) 'Luchtspiegelingen, procedureel onderzoek naar het binnenklimaat bij drie rijkscollecties', CONCEPT, Erfgoed Inspectie, Den Haag.
- Michalski, S. (1993) 'Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values', ICOM Committee for Conservation, 10th Triennial Meeting, Washington 1993, preprints, p. 624-629.
- Michalski, S. (1994) 'A Systematic Approach to Preservation: Description and Integration with other Museum Activities', Preventive Conservation Practice, Theory and Research, IIC, London, Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, p.8-11.
- Michalski, S. (1998) 'Climate Control Priorities and Solutions For Collections In Historic Buildings', Historic Preservation Forum, vol. 12-4, p. 8-14.
- Neuhaus, E. en Schellen, H.L. (2004a) 'Jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo, vooronderzoek naar het binnenklimaat', Technische Universiteit Eindhoven, Unit BPS, 04.94.K (interne rapportage).
- Neuhaus, E. en Schellen, H.L. (2004b) 'Jachthuis St. Hubertus te Hoenderloo, inventarisatie c.v.-installatie', Technische Universiteit Eindhoven, Unit BPS, 04.60.K (interne rapportage).
- Neuhaus, E. en Schellen, H.L. (2006) 'Museum Amstelkring te Amsterdam: adviesrapport binnenklimaat', Technische Universiteit Eindhoven, Unit BPS, 05.20.K (interne rapportage).
- Oreszczyn, T., Cassar, M. en Fernandez, K. (1994) 'Comparative Study of Air-conditioned and non Air-conditioned Museums', Preventive Conservation - Practice, Theory and Research: Preprints of the IIC Congress, Ottawa, Canada.
- Padfield, T. en Jensen, P. (1990) 'Low Energy Climate Control in Museum Stores', International Council of Museums, Committee for Conservation, 9th triennial meeting, Dresden 1990, p. 596-601.
- Padfield, T. (1996) 'Low Energy Climate Control in Museum Stores - a postscript', Proceedings of the ICOM-CC Conference Edinburgh, September 1996, vol. 1, p. 68-71.
- Regeling Bouwbesluit (2003), Ministerie van VROM, Den Haag.
- Rijksgebouwendienst (1996) 'Adviesrichtlijn Luchtkwaliteit Museumdepots', Directie Ontwerp & Techniek, Den Haag.
- Schellen, H.L. (2002) 'Heating Monumental Churches, Indoor Climate and Preservation of Cultural Heritage', Dissertatie, Technische Universiteit Eindhoven, ISBN 90-386-1556-6.
- Schijndel, A.W.M. van en Wit, M.H. de (2003) 'Advanced Simulation of Building Systems and Control with Simulink', 8ste IBPSA Conferentie te Eindhoven, Augustus 11-14 2003, p. 1185-1192.
- Scott, G. (1994) 'Moisture, Ventilation and Mould Growth', IIC-Congress Ottawa, preprints, p. 149-153.
- Seppänen, O. A., Fisk, W.J. en Mendell, M.J. (1999) 'Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings', Indoor Air, vol. 9, nr. 4, p. 226-252
- Shaw, C.T. (1992) 'Using Computational Fluid Dynamics', Prentice Hall, UK.
- Staniforth, S., Hayes, B. en Bullock, L. (1994) 'Appropriate Technologies for Relative Humidity Control for Museum Collections Housed in Historic Buildings', The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC), London, p. 123-128.
- Wit, M.H. de (2006) 'HAMBASE, Heat, Air and Moisture Model for Building and Systems Evaluation', Technische Universiteit Eindhoven, Unit BPS, ISBN 90-6814-601-7.

Nomenclatuur

c	constante	[-]
C	concentratie	[ppm]
G	vochtproductie	[kg/s]
h	warmte-inhoud per kg droge lucht	[kJ/kg]
k	turbulente kinetische energie per massa-eenheid	[J/kg]
n	ventilatievoud	[h ⁻¹]
p	dampspanning	[Pa]
P	vermogen	[W]
t	tijd	[s]
T	droge bol temperatuur	[°C]
x	watergehalte per kg droge lucht	[kg/kg]

Griekse symbolen

ε	turbulente dissipatie kinetische energie per massa-eenheid	[m ² /s ³]
ε	emissie coëfficiënt	[-]
π	partiële waterdampdruk	[kPa]
ρ	soortelijke massa	[kg/m ³]
φ	relatieve luchtvochtigheid	[-]
Φ	warmtestroom	[W]

Subscripts

0	initieel tijdstip	n	natte bol
1	volgend tijdstip	p	productie
a	lucht	s	oppervlak
g	winst	s	opslag
h	heersend	sat	verzadiging
i	intern	sat_a	verzadiging lucht
l	verlies	sat_s	verzadiging oppervlak
max	maximum	set	instelling
min	minimum	v	verwarming

Afkortingen

3D	drie dimensionaal
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	computational fluid dynamics
CO ₂	koolstofdioxide
DX	direct expansion
GBS	gebouw beheersysteem
HAMBASE	Heat Air Moisture Building And System Evaluation
ICN	Instituut Collectie Nederland
K	Kelvin
kHz / MHz	kilohertz / megahertz, eenheden van frequentie
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
m	meter
ppm	parts per million
RV	relatieve luchtvochtigheid
SF ₆	zwavelhexafluoride
TU/e	Technische Universiteit Eindhoven
UV	ultraviolet

Bijlage A

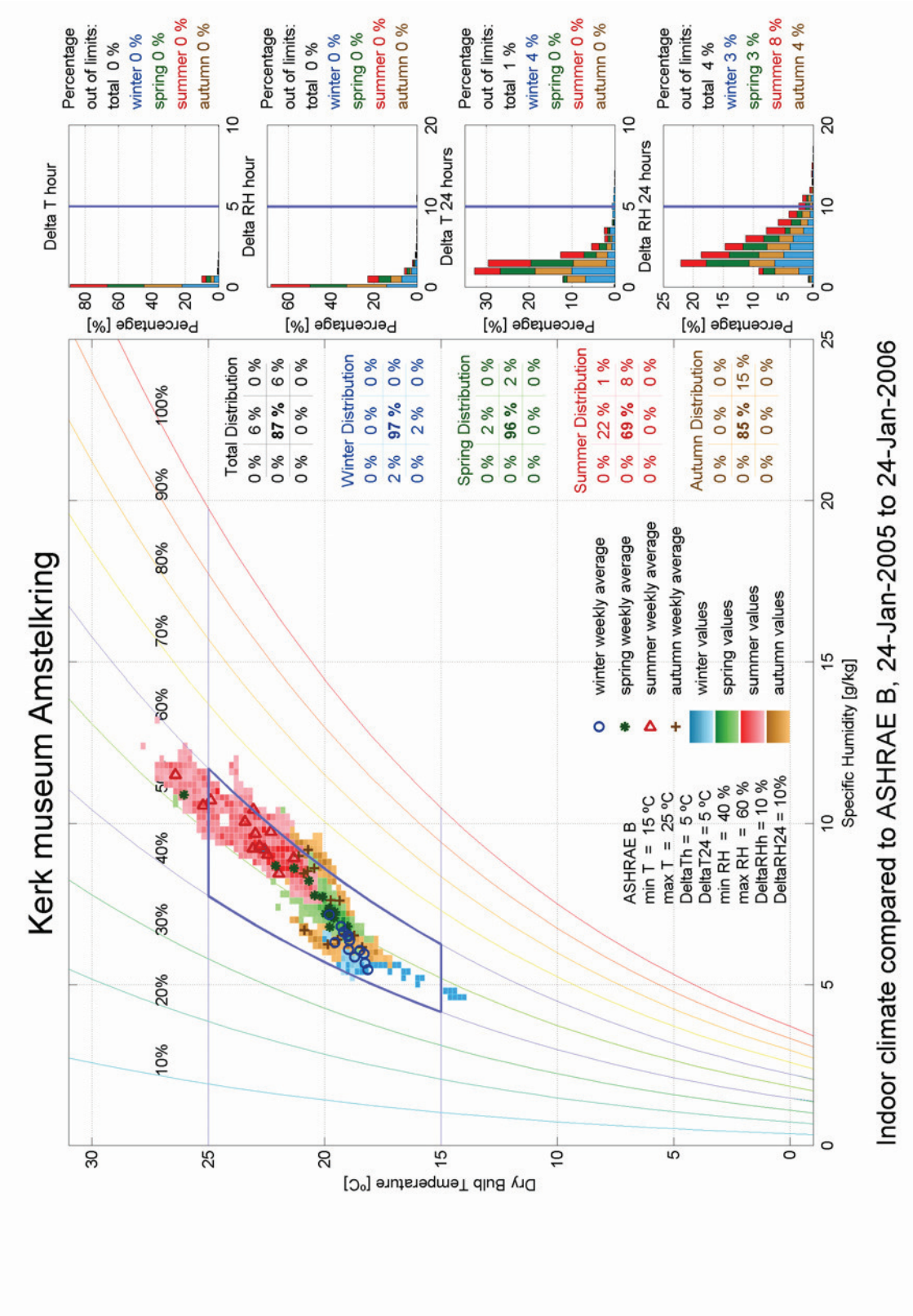
Tabel '9 agents of deterioration' volgens het Canadian Conservation Institute.

Oorzaak van verval	Risico (wijze van verlies of schade en de kwetsbare collectie)	Bedreiging	Beheer
Directe fysieke kracht bijv. schok, vibratie, afslijting, zwaartekracht	Breuk, vertekening, perforatie, deuken, krassen, slijtage. Alle kunstvoorwerpen.	Aardbeving. Oorlog. Slechte behandeling. Overvolle opslag. Vervoer in en buiten museum.	Conserveren. Museum personeel voor ontdekken, hanteren en voor noodmaatregelen. Schoonmakers. Paraatheid voor noodsituatie; museum en overheid.
Dieven , vandalen, verplaatsters Bijv. onbevoegd menselijk toegang en verwijdering 1. opzettelijk 2. niet opzettelijk	1. Totaal verlies, tenzij hersteld. Alle kunstvoorwerpen, maar speciaal waardevolle en verplaatsbare. Misvorming, in het bijzonder populaire en symbolische kunstvoorwerpen. 2. Verlies of verkeerd plaatsen. Alle kunstvoorwerpen.	Professionele en amateur criminelen. Algemene publiek. Personeel. Goed zichtbare waardevolle kunstvoorwerpen.	Beveiliging. Collectiebeheerder. Conservatoren en onderzoekers. Politie.
Vuur	Totale vernietiging zonder herstel. Verschroeien. Rookschade. Bijkomende waterschade. Alle kunstvoorwerpen.	Tentoonstellinginstall. Foute elek. bedrading, verlichting. Brandstichting. Onvoorzichtig roken. Naastgelegen bebouwing.	Beveiliging. Personeel voor detectie. Brandweer. Conservering.
Water	Uitbloei of markering in poreuze materialen t.g.v. overstroming. Zwellen van organische materialen. Corrosie van metalen. Oplossen van lijm. Delaminatie, indeuken, bollen van meerlaagse objecten. Loskomen, breken, corroderen van aaneengehechte componenten. Krimp van dicht geweven textiel of canvas.	Overstroming. Storm. Defect dak. Defecte waterleiding en riolering (intern en extern). Natte blusleidingen.	Conservering. Paraatheid voor noodgevallen; museum en overheid. Personeel voor detectie en alarmering. Schoonmakers.
Plaag 1. insecten 2. ongedierte 3. schimmel, bacteriën (zie Onjuiste RV)	1. Consumptie, perforatie, snedes, gangen. Afscheidingen die vernietigen, verzwakken, vervormen, etsen. Speciaal bont, veren, huiden, insectencollectie, textiel, papier, hout. 2. Consumptie van organische mat., verplaatsing van kleine objecten. Bevuiling met uitwerpselen en urine. Perforatie, bevuiling van anorganische mat. als deze organisch materiaal afschermen.	Omringend landschap. Afval. Binnenkomend bouw materiaal, kunstvoorwerpen, personeel, bezoekers. Gemorst eten.	Conservering. Gebouwmaatregelen. Kantines. Tentoonstellingsontwerp. Personeel. Verdelgingsbedrijven. Biologen voor ident.
Verontreiniging 1. Gassen (bijv. luchtvervuiling, zuurstof) 2. Vloeistoffen (bijv. oplosmiddelen, vet) 3. Vaste stoffen (bijv. stof, zout)	Vervallen, verkleuring, corrosie van alle kunstvoorwerpen. Special reactieve of poreuze materialen.	Stadse/natuurlijke luchtvervuiling. Bouwmaterialen. Verpakkingsmaterialen. Bepaalde kunstvoorwerpen. Schoonmaakmiddelen.	Conservering. Gebouwmaatregelen. Tentoonstellingsontwerp. Schoonmakers.
Straling 1. UV-licht 2. Zichtbaar licht	1. Vervallen, verschromp, verdonkeren, vergelen van buitenlaag van organisch materiaal en enige gekleurde anorganische materialen. 2. Verschromp of verdonkeren van de ondoorzichtige buitenlaag van verf en hout tot een typische diepte van 10 tot 100 µm of dieper bij meer transparante lagen.	Daglicht. Bovenlichten, ramen. Elektrische verlichting.	Conservering. Architecten. Gebouwmaatregelen. Tentoonstellingsontwerp. Beveiliging.
Onjuiste temperatuur 1. Te hoog 2. Te laag 3. Fluctuaties	1. Geleidelijk vervallen of verkleuren van organische materialen, vooral chemisch onstabiele (bijv. foto- en filmmateriaal) 2. Bros worden, met scheuren in verf en polymeren als gevolg 3. Scheuren en delaminatie in bros , vast materiaal, vooral indien gelaagd. De reden van RV-fluctuatie.	Lokaal klimaat. Zonlicht. Defecte installatie.	Conservering. Architecten. Gebouwmaatregelen. Tentoonstellingsontwerp.
Onjuiste RV 1. Vochtig 2. RV boven of onder bep. kritieke waarde 3. RV boven 0% 4. Fluctuaties	1. Schimmels (die (an)organisch materiaal bevleken en verzwakken), corrosie (van metalen), krimp (van dicht geweven textielen). 2. (De)hydratie van enkele mineralen en gecorrodeerd metaal dat zouten bevat. 3. Geleidelijk verval en verkleuring van organisch materiaal met name chemisch onstabiel (bijv. zuurhoudend papier) 4. Krimpen en zwellen van vrij organisch materiaal. Verbrijzelen en scheuren van aaneengehecht organisch materiaal. Delaminatie, deuken of bollen van organisch materiaal. Loskomen van hechtingen in organische componenten	Lokaal klimaat. Waterlekkage. Koude wanden. Defecte installatie. Onvoldoende ventilatie	Conservering. Architecten. Gebouwmaatregelen. Tentoonstellingsontwerp.

Bron: vertaald overgenomen uit (Michalski 1994)

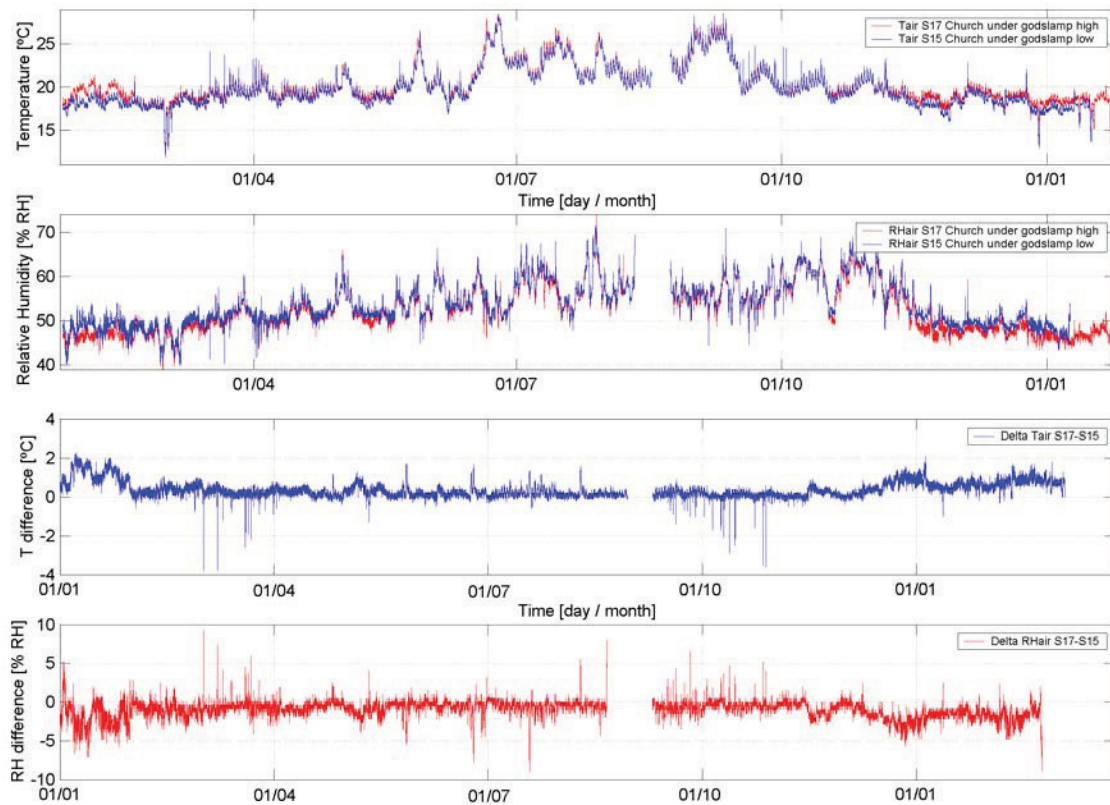
Bijlage B

Weergave meetresultaten kerk museum Amstelkring weergegeven in het Mollier-diagram.



Bijlage C

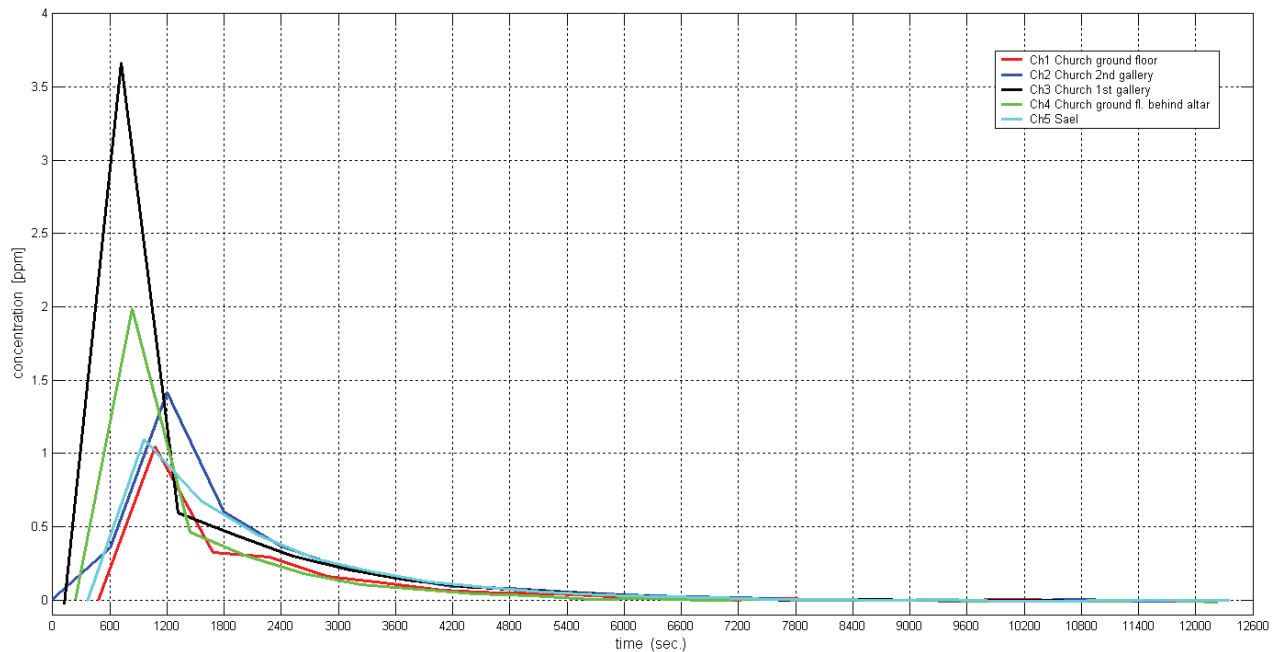
Weergave meetresultaten stratificatiemeting museum Amstelkring.



Bijlage D

Uitwerkingen VV-meting museum Amstelkring.

Eerste meting (13 maart 2006)



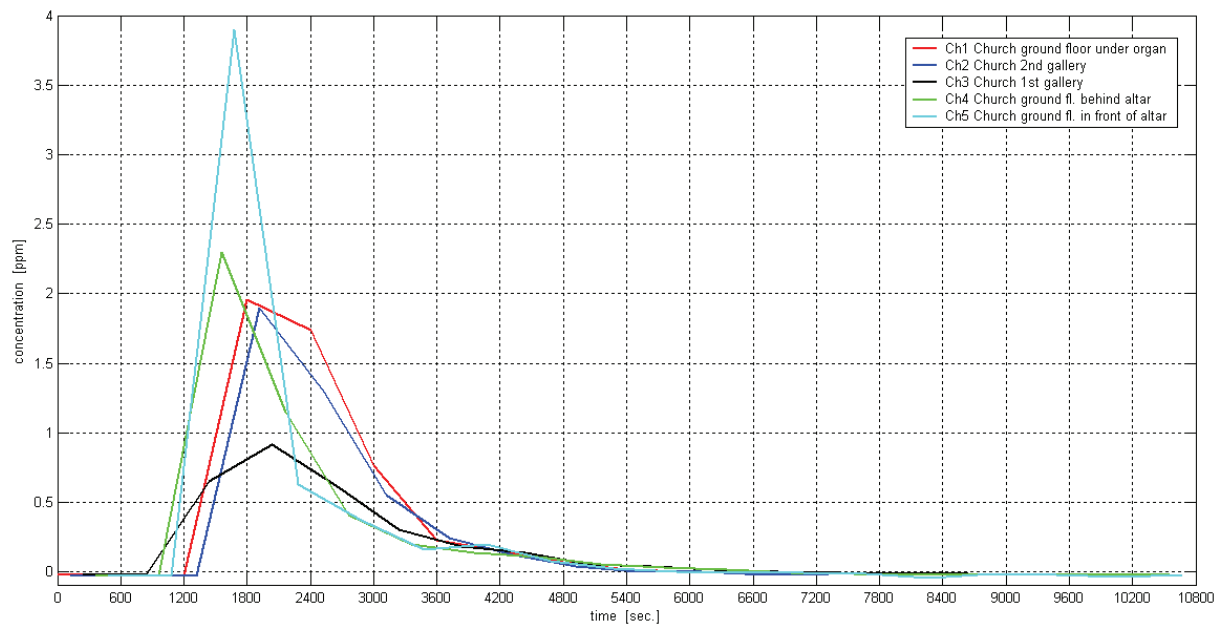
Resultaten van de tracergasmeting van kanaal 1 t/m 5 uitgezet tegen de tijd.

Berekende ventilatievouden zoals bepaald m.b.v. Matlab en berekend met de hand.

Channel	Location	Result using Matlab-file "fitfunstart.m"*	Calculations done by hand
1	Church ground floor	2.1 h^{-1}	1.9 h^{-1} between 1680 - 10080 sec.
2	Church 2nd gallery	2.7 h^{-1}	2.0 h^{-1} between 1800 - 10800 sec.
3	Church 1st gallery	2.3 h^{-1}	2.8 h^{-1} between 1920 - 9720 sec.
4	Behind altar	2.8 h^{-1}	2.2 h^{-1} between 2040 - 11640 sec.
5	Sael	2.5 h^{-1}	2.5 h^{-1} between 2160 - 9360 sec.

*Gegeven waarden zijn berekend over een periode van 10200 seconden

Tweede meting (29 september 2006)



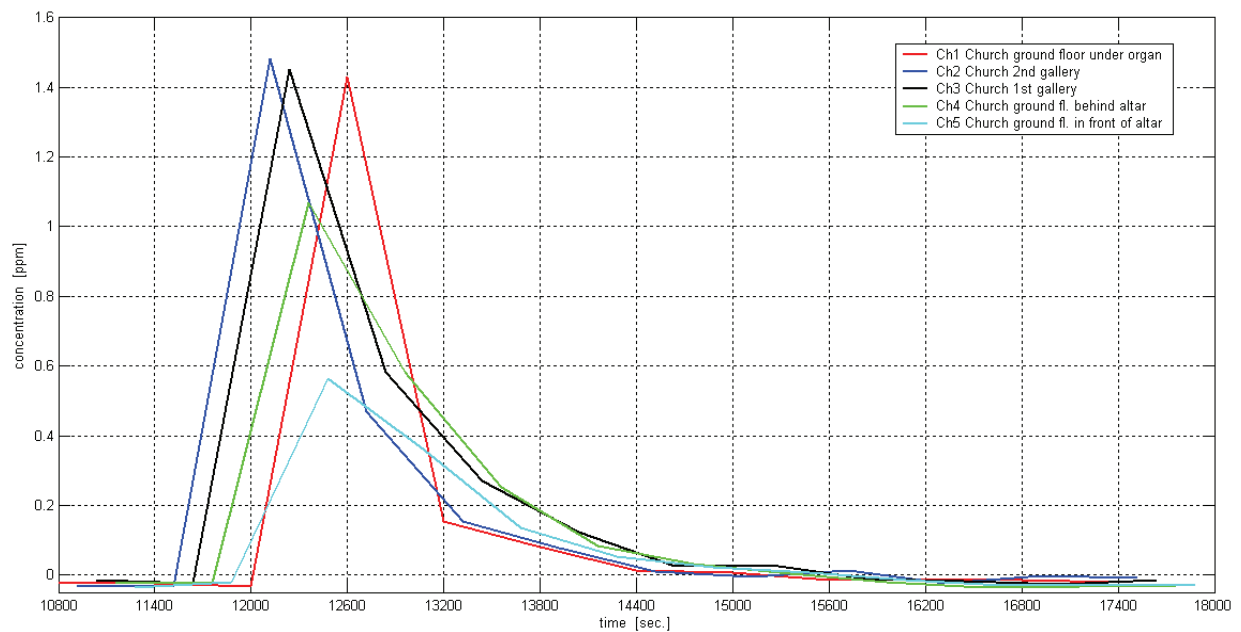
Resultaten van de tracergasmeting van kanaal 1 t/m 5 uitgezet tegen de tijd. Alle ramen in de kerk waren gesloten.

Berekende ventilatievouden zoals bepaald m.b.v. Matlab en berekend met de hand.

Channel	Location	Result using Matlab-file "fitfunstart.m"*	Calculations done by hand
1	Ground fl. under organ	5.2 h ⁻¹	5.8 h ⁻¹ between 2400 - 5400 sec.
2	Church 2nd gallery	4.9 h ⁻¹	6.2 h ⁻¹ between 2520 - 6120 sec.
3	Church 1st gallery	3.4 h ⁻¹	3.7 h ⁻¹ between 2640 - 6240 sec.
4	Behind altar	2.8 h ⁻¹	3.5 h ⁻¹ between 2760 – 5760 sec.
5	Church in front of altar	2.6 h ⁻¹	4.0 h ⁻¹ between 2880 - 5280 sec.

*Gegeven waarden zijn berekend over een periode van 7800 seconden

Derde meting (29 september 2006)



Resultaten van de tracergasmeting van kanaal 1 t/m 5 uitgezet tegen de tijd. Een raam boven in de kerk was geopend.

De per kanaal met de hand berekende ventilatievouden. Per kanaal zijn twee waarden berekend.

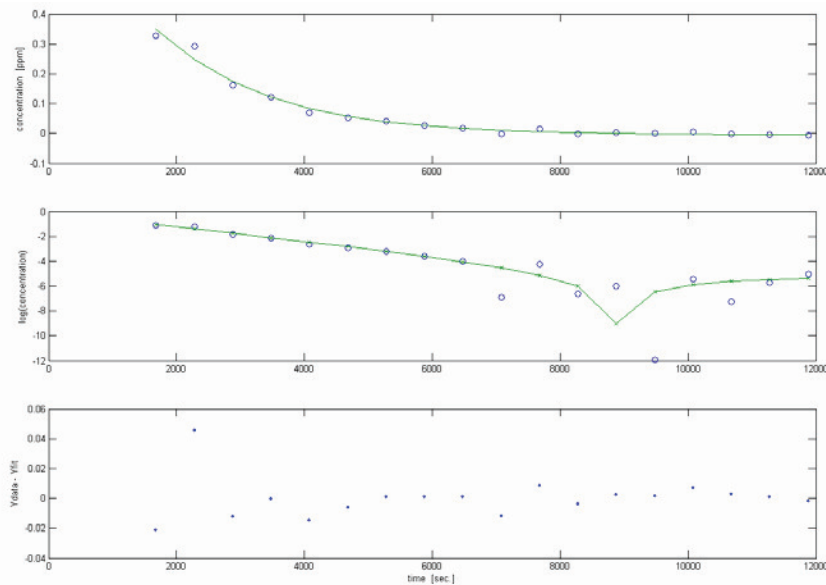
Channel	Location in Church	Air exchange rate [h^{-1}]	Period
1	Ground fl. under organ	6.1	Between 13200 - 15000 sec.
		7.9	Between 12600 – 15000 sec.
2	2nd gallery	4.9	Between 12720 – 15720 sec.
		7.4	Between 12120 – 14520 sec.
3	1st gallery	4.5	Between 12840 – 15240 sec.
		4.7	Between 12240 – 15240 sec.
4	Behind altar	7.5	Between 12960 – 15360 sec.
		6.7	Between 12360 – 15360 sec.
5	Church in front of altar	5.9	Between 13080 – 15480 sec.
		5.3	Between 12480 – 15480 sec.

Berekeningen van meting 1

Channel 1

Using Matlab-file between t1= 1680 and t2= 11880 sec.

Result: $n = 2.06 \text{ h}^{-1}$

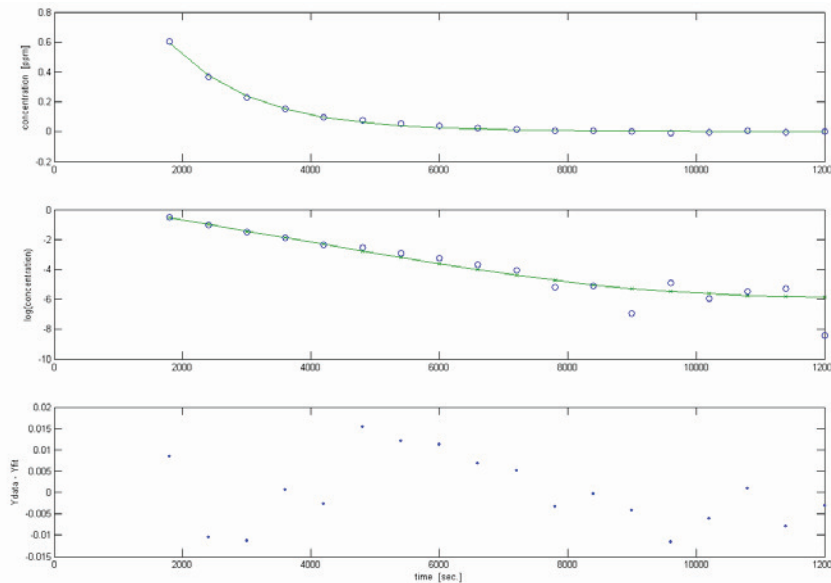


By hand between t1=1680 and t2=10080 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.0043) - \ln(0.3280)}{2 \frac{1}{3}} = 1.86 \text{ h}^{-1}$$

Channel 2

Using Matlab-file between t1= 1800 and t2= 12000 sec.

Result: $n = 2.73 \text{ h}^{-1}$

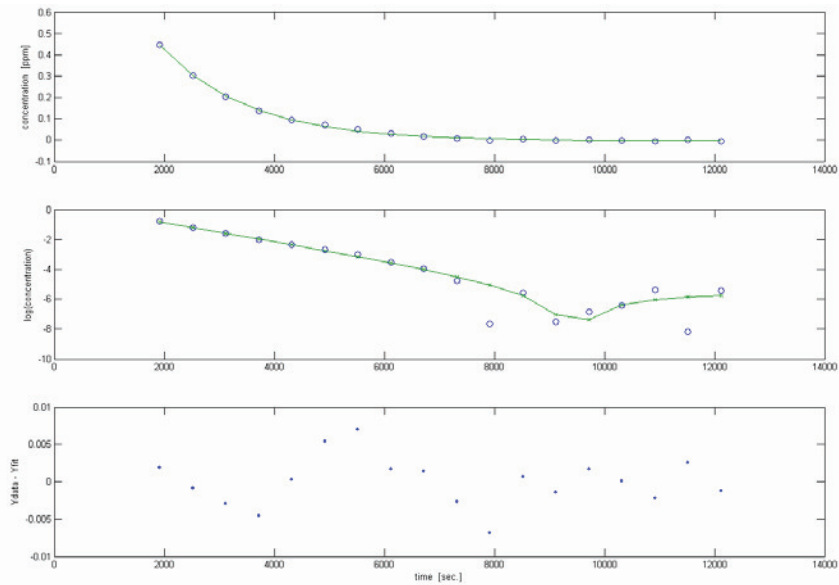


By hand between t1= 1800 and t2= 10800 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.0042) - \ln(0.6020)}{2 \frac{1}{2}} = 1.99 \text{ h}^{-1}$$

Channel 3

Using Matlab-file between t1= 1920 and t2= 12120 sec.

Result: $n = 2.27 \text{ h}^{-1}$

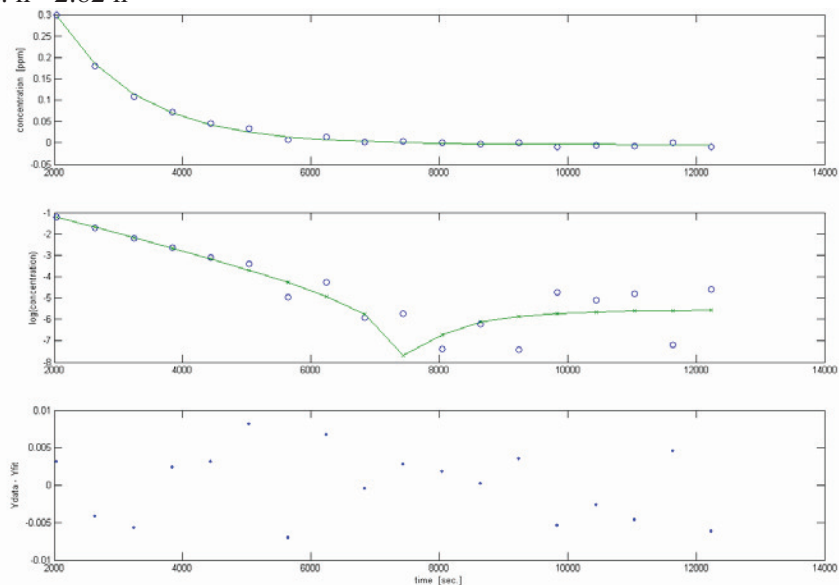


By hand between t1= 1920 and t2= 9720 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.0011) - \ln(0.4470)}{2 \frac{1}{6}} = 2.77 \text{ h}^{-1}$$

Channel 4

Using Matlab-file between t1= 2040 and t2= 12240 sec.

Result: $n = 2.82 \text{ h}^{-1}$

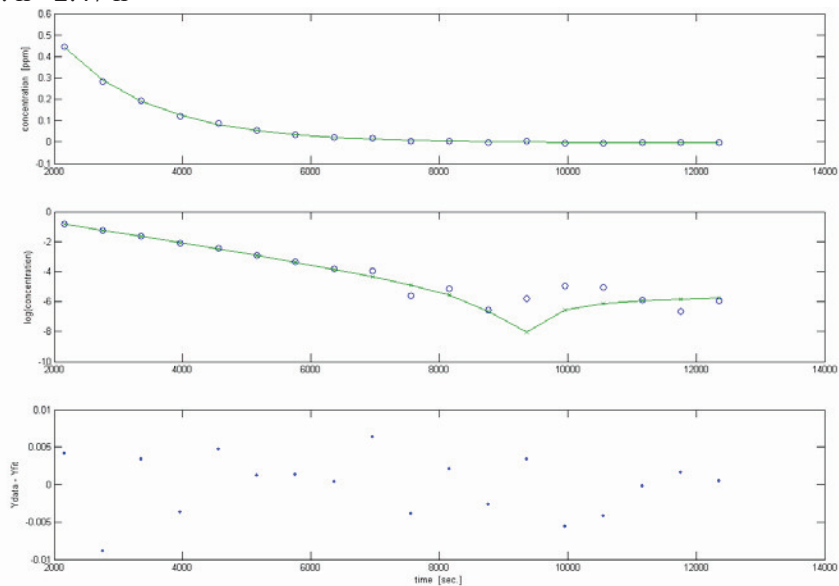


By hand between t1= 2040 and t2= 11640 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.00076) - \ln(0.30000)}{2 \frac{2}{3}} = 2.24 \text{ h}^{-1}$$

Channel 5

Using Matlab-file between t1= 2160 and t2= 12360 sec.

Result: $n = 2.47 \text{ h}^{-1}$



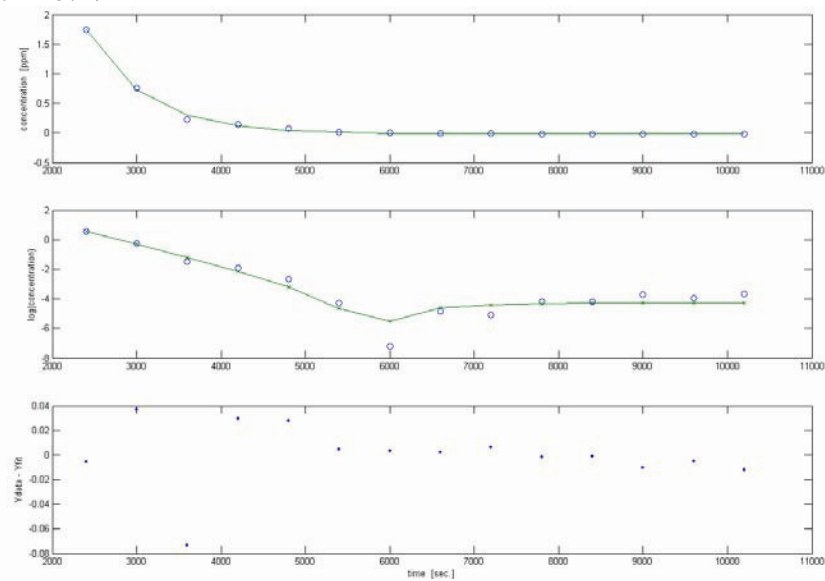
By hand between t1= 2160 and t2= 9360 sec.: $n = \frac{\ln(0.003) - \ln(0.445)}{2} = 2.50 \text{ h}^{-1}$

Berekeningen van meting 2

Channel 1

Using Matlab-file between t1= 2400 and t2= 10200 sec.

Result: $n = 5.17 \text{ h}^{-1}$

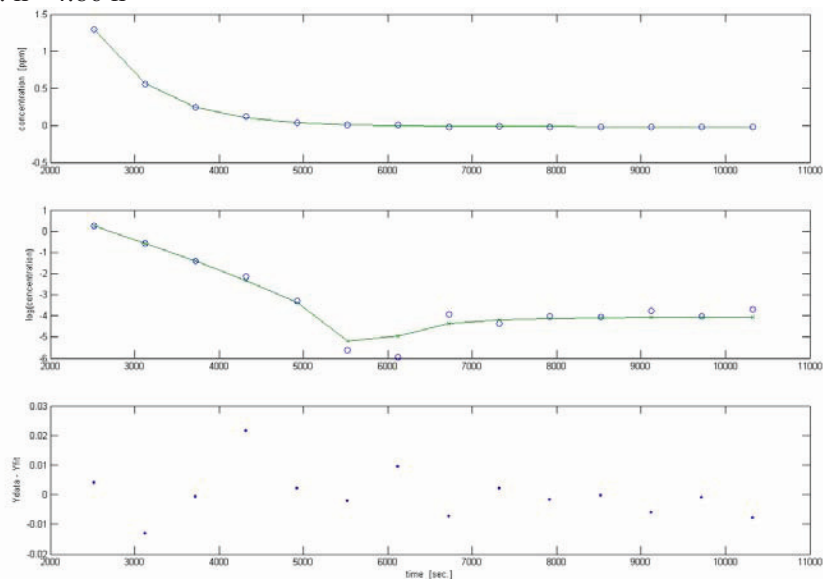


By hand between t1=2400 and t2=5400 sec.: $n = \frac{\ln(0.0139) - \ln(1.7400)}{\frac{5}{6}} = 5.80 \text{ h}^{-1}$

Channel 2

Using Matlab-file between t1= 2520 and t2= 10320 sec.

Result: $n = 4.86 \text{ h}^{-1}$

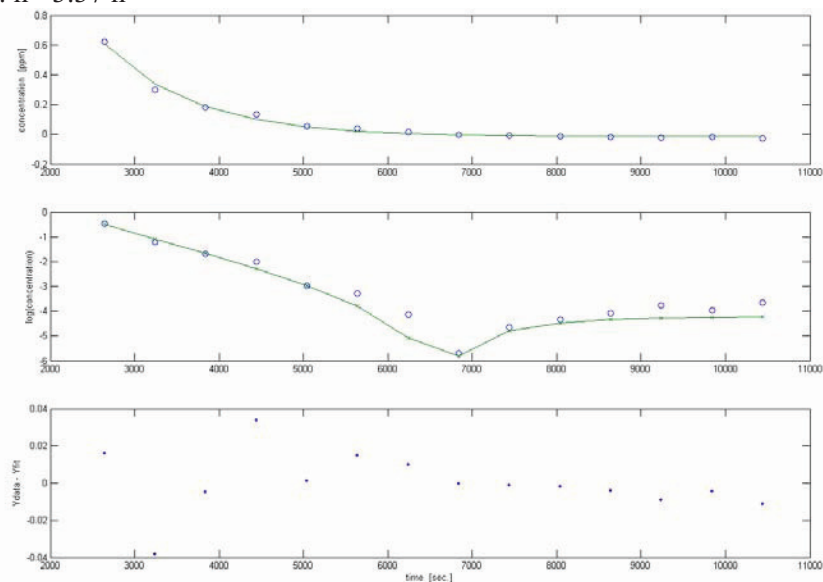


By hand between t1= 2520 and t2= 6120 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.0026) - \ln(1.3000)}{1} = 6.21 \text{ h}^{-1}$$

Channel 3

Using Matlab-file between t1= 2640 and t2= 10440 sec.

Result: $n = 3.37 \text{ h}^{-1}$

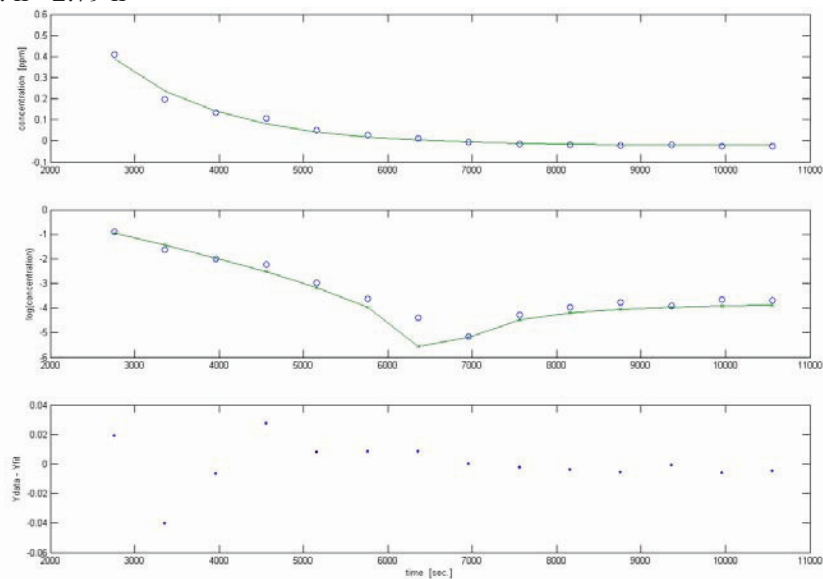


By hand between t1= 2640 and t2= 6240 sec.:
$$n = \frac{\ln(0.0161) - \ln(0.6220)}{1} = 3.65 \text{ h}^{-1}$$

Channel 4

Using Matlab-file between t1= 2760 and t2= 10560 sec.

Result: $n = 2.79 \text{ h}^{-1}$

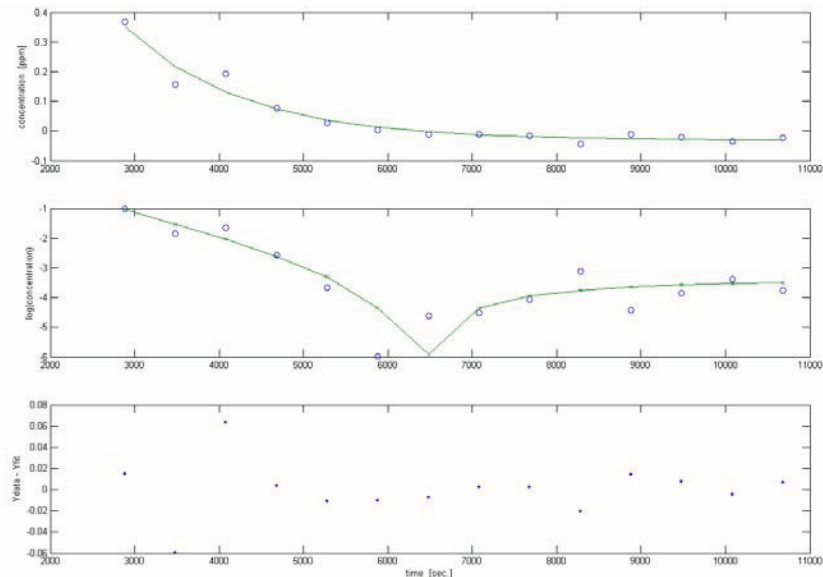


By hand between t1= 2760 and t2= 5760 sec.: $n = \frac{\ln(0.0270) - \ln(0.4080)}{1} = 3.49 \text{ h}^{-1}$

Channel 5

Using Matlab-file between t1= 2880 and t2= 10680 sec.

Result: $n = 2.60 \text{ h}^{-1}$



By hand between t1= 2880 and t2= 5280 sec.: $n = \frac{\ln(0.0256) - \ln(0.3670)}{\frac{2}{3}} = 3.99 \text{ h}^{-1}$

Berekeningen van meting 3

Channel 1

$$\text{By hand between } t_1=13200 \text{ and } t_2=15000 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0072) - \ln(0.1540)}{\frac{1}{2}} = 6.13 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{By hand between } t_1=12600 \text{ and } t_2=15000 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0072) - \ln(1.4300)}{\frac{2}{3}} = 7.93 \text{ h}^{-1}$$

Channel 2

$$\text{By hand between } t_1=12720 \text{ and } t_2=15720 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0142) - \ln(0.4680)}{\frac{5}{6}} = 4.91 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{By hand between } t_1=12120 \text{ and } t_2=14520 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0109) - \ln(1.4800)}{\frac{2}{3}} = 7.37 \text{ h}^{-1}$$

Channel 3

$$\text{By hand between } t_1=12840 \text{ and } t_2=15240 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0283) - \ln(0.5820)}{\frac{2}{3}} = 4.54 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{By hand between } t_1=12240 \text{ and } t_2=15240 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0283) - \ln(1.4500)}{\frac{5}{6}} = 4.72 \text{ h}^{-1}$$

Channel 4

$$\text{By hand between } t_1=12960 \text{ and } t_2=15360 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0040) - \ln(0.5810)}{\frac{2}{3}} = 7.47 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{By hand between } t_1=12360 \text{ and } t_2=15360 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0040) - \ln(1.0700)}{\frac{5}{6}} = 6.70 \text{ h}^{-1}$$

Channel 5

$$\text{By hand between } t_1=13080 \text{ and } t_2=15480 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0070) - \ln(0.3600)}{\frac{2}{3}} = 5.90 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{By hand between } t_1=12480 \text{ and } t_2=15480 \text{ sec.: } n = \frac{\ln(0.0070) - \ln(0.5630)}{\frac{5}{6}} = 5.26 \text{ h}^{-1}$$

Bijlage E

Invoertext HAMBASE-model museum Amstelkring.

```
%      HAMBASE
%
% HEAT And Moisture Building And Systems Evaluation
% -----
%
% Kerk Amstelkring
% E.Neuhaus
% jun 2006

global InClimate Output
clear all
a=findobj('name',figure);
delete (a)

% -----
% PART 1 : THE CALCULATION PERIOD
% -----

BASE.Period=[2005,12,1,31];
BASE.DSTime=1;

% -----
% PART 2 : THE BUILDING
% -----

% ZONES NUMBERS [-] & VOLUMES [m3]

BASE.Vol{1}= 900;
BASE.Vol{2}= 200;

% ** CONSTRUCTION COMPONENTS DATA **

% BASE.Con{conID}=[Ri, d1,matID,... , dn,matID, Re, ab, eb ]

BASE.Con{1} = [0.13, 0.4,232, 0.04, 0.5, 0.9 ]; %buitenwand kerk
BASE.Con{2} = [0.13, 0.5,232, 0.13, 0.5, 0.9 ]; %binnenwand zuid-west
BASE.Con{3} = [0.13, 0.08,502, 0.13, 0.5, 0.9 ]; %binnenwand noord-west
BASE.Con{4} = [0.13, 0.04,502, 0.13, 0.5, 0.9 ]; %vloer kerk
BASE.Con{5} = [0.13, 0.05,502, 0.13, 0.5, 0.9 ]; %plafond kerk
BASE.Con{6} = [0.13, 0.04,502 0.05,527 0.13, 0.5, 0.9 ]; %dak algemeen (dakbeschot, dakpan)
BASE.Con{7} = [0.13, 0.35,232, 0.13, 0.5, 0.9 ]; %dak zuid-oost

% ** GLAZING SYSTEMS DATA**
%
%BASE.Glas{glaID}= [Uglas, CFr, ZTA, ZTAw, CFrw, Uglasw ]
BASE.Glas{1}= [1.6, 0.047, 0.65, 0.072, 0.116, 3.6 ];
BASE.Glas{2}= [3., 0.11, 0.26, 0.31, 0.34, 2.8 ];
BASE.Glas{4}= [3.2, 0.03, 0.8, 0.36, 0.36, 3.6 ]; %enkel glas

% ** ORIENTATIONS **
% gamma = azimuth (east=-90, west=90, south=0, north=180)
%BASE.Or{orID}=[beta, gamma ];
BASE.Or{1}= [90.0, -135.0 ]; %wand noord-oost
BASE.Or{2}= [90.0, -45.0 ]; %wand zuid-oost
BASE.Or{3}= [90.0, 45.0 ]; %wand zuid-west
BASE.Or{4}= [90.0, 135.0 ]; %wand noord-west
BASE.Or{5}= [60.0, -135.0 ]; %dak noord-oost
BASE.Or{6}= [60.0, -45.0 ]; %dak zuid-oost
BASE.Or{7}= [90.0, 45.0 ]; %dak zuid-west
BASE.Or{8}= [60.0, 135.0 ]; %dak noord-west
BASE.Or{9}= [0.0, 0.0 ]; %vloer-plafond

% **SHADOW DATA**
% Example input
BASE.shad{1}=[
1 0.07 5 1.6 0 0.5000 0.7 3;...
2 0.1 5.1 3.0000 17.00 0.0000 0 0;...
```

```

2 17.00 0.1      3.0000  0    5.1000  0 0;...
2 17.00 0.1      2.0000  0    0.0000  0 0;...
2 0.5  24.00     9.2000  34.10 -9.0000  0 0;...
3 1.25  1.25/7    2.75   15.50 0.0    0 0;...
3 1.50  1.50/7    1.50   12.70 1.50    0 0;...
4 0     10        20     30    50      60 90;...
5 1     0.9       0.8    0.7   0.6    0.5 0.4];

BASE.shad{2}=[ 4 0  0 00 00 00 00 00 ;...
              5 0  0 0  0  0  0  0 ];

% Changing '0' into '1' below, gives for one shadow ID-number a drawing of the
% obstacle geometry.
if 1==0
    shaID=2;
    figure(1)
    shaddrawf1 101(BASE.shad,shaID);
end

% I. EXTERNAL WALLS

%BASE.wallex{exID}=[zonenr, surf, conID,  orID, bridge]

BASE.wallex{1}= [1, 166, 1, 1, 0]; %buitenwand noord-oost
BASE.wallex{2}= [1, 49, 1, 2, 0]; %buitenwand zuid-oost
BASE.wallex{3}= [1, 34, 1, 3, 0]; %buitenwand zuid-west1
BASE.wallex{4}= [2, 89, 6, 5, 0]; %dak noord/oost
BASE.wallex{5}= [2, 10, 7, 6, 0]; %dak zuid-oost
BASE.wallex{6}= [2, 89, 6, 7, 0]; %dak zuid-west
BASE.wallex{7}= [2, 10, 6, 8, 0]; %dak noord-west

% II. WINDOWS IN EXTERNAL WALLS

%BASE.window{winID}=[exID, surf, glaID, shaID]

BASE.window{1}= [1, 10, 4, 0]; %ramen noord-oost
BASE.window{2}= [2, 14, 4, 0]; %ramen zuid-oost
BASE.window{3}= [3, 2, 4, 0]; %ramen zuid-west1

% III. CONSTANT TEMPERATURE WALLS

%BASE.walli0{i0ID}= [zonenr, surf, conID, temp, bridge]

%BASE.walli0{1}= [1, 132, 3, 10, 0]; %kerk noord-west wand
%BASE.walli0{2}= [1, 35, 2, 10, 0]; %kerk zuid-west wand2
%BASE.walli0{3}= [1, 35, 4, 10, 0]; %vloer kerk

% IV ADIABATIC EXTERNAL WALLS

%BASE.wallia{iaID}= [zonenr, surf, conID]
BASE.wallia{1}= [1, 132, 2 ]; %kerk zuid-west wand
BASE.wallia{2}= [1, 49, 3 ]; %kerk noord-west wand
BASE.wallia{3}= [1, 111, 4 ]; %vloer kerk

% V. INTERNAL WALLS BETWEEN AND IN ZONES

%BASE.wallin{inID}= [zonenr1,zonenr2, surf, conID]
BASE.wallin{1}= [1, 2, 111, 5]; %plafond kerk

%-----
% PART 3 : profiles for internal sources, ventilation, sunblinds and free
% cooling
%-----

%kerk
BASE.Ers{1}=300;
BASE.dayper{1}= [ 0, 8, 10, 17, ];
BASE.vvmin{1}= [ 1.5 1.6, 2, 1.5 ];
BASE.vvmax{1}= [ 1.5 1.6, 2, 1.5 ];
BASE.Tfc{1}= [ 30, 30, 30, 30 ];
BASE.Qint{1}= [ 0, 600, 1800, 0 ]; %int. Q bel. o.b.v. verl.+bev./25 pers 450+150 + 1250
BASE.Gint{1}= [ 0, 0, 0.0008, 0 ]; %vochtproductie o.b.v. 25 personen
BASE.Tsetmin{1}= [ 18.5, 19.5, 19.5, 18.5 ];
BASE.Tsetmax{1}= [ 100, 100, 100, 100 ];
BASE.RVmin{1}= [ 44, 44, 44, 44 ];
BASE.RVmax{1}= [ 101, 101, 101, 101 ];

```

```

%zolder
BASE.Ers{2}=300;
BASE.dayper{2} = [ 0, 8, 10, 17, ];
BASE.vvmin{2} = [ 1.5, 1.6, 2, 1.5 ];
BASE.vvmax{2} = [ 1.5, 1.6, 2, 1.5 ];
BASE.Tfc{2} = [ 30, 30, 30, 30 ];
BASE.Qint{2} = [ 0, 0, 0, 0 ];
BASE.Gint{2} = [ 0, 0, 0.00, 0 ];
BASE.Tsetmin{2} = [ -100, -100, -100, -100 ];
BASE.Tsetmax{2} = [ 100, 100, 100, 100 ];
BASE.RVmin{2} = [ -1, -1, -1, -1 ];
BASE.RVmax{2} = [ 101, 101, 101, 101 ];

% THE PROFILES OF THE BUILDING
% BASE.weekfun{zonenr} = [upnrmon, upnrtue, upnrwed, upnrthu, upnrfri, upnrsat, upnrsun ]
BASE.weekfun{1}= [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 ];
BASE.weekfun{2}= [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2 ];

%-----
% PART 4 : Heating, cooling, humidification, dehumidification
%-----
% FORMAT BASE.Plant{zonenr}=[heating capacity [W], cooling capacity [W],
% humidification capacity [kg/s],dehumidification capacity [kg/s]];

%BASE.Plant{1}=[2800, 0.0, 0.0001, -0.0001 ];
BASE.Plant{1}= [19000, 0.0, 0.0012, -0.000 ]; %cap. per bevochtiger= 0,55 l/h , 8 stuks = 0.0012 kg/s
BASE.Plant{2}= [000, 0.0, 0.000, -0.000 ];

% FORMAT BASE.convfac{zonenr}=[CFh CFset CFint ];

BASE.convfac{1}= [0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{2}= [0.9, 1, 0.5 ];

% FORMAT BASE.heatexch{zonenr}=[etaww, Twws];

BASE.heatexch{1}=[0 22];
BASE.heatexch{2}=[0 22];

% FORMAT BASE.furnishings{zonenr}=[fbv CFfbi];
% fbv = Moisture storage factor
% CFfbi= The convection factor for the solar radiation due to furnishings.

BASE.furnishings{1}=[3, 0.2];
BASE.furnishings{2}=[3, 0.2];

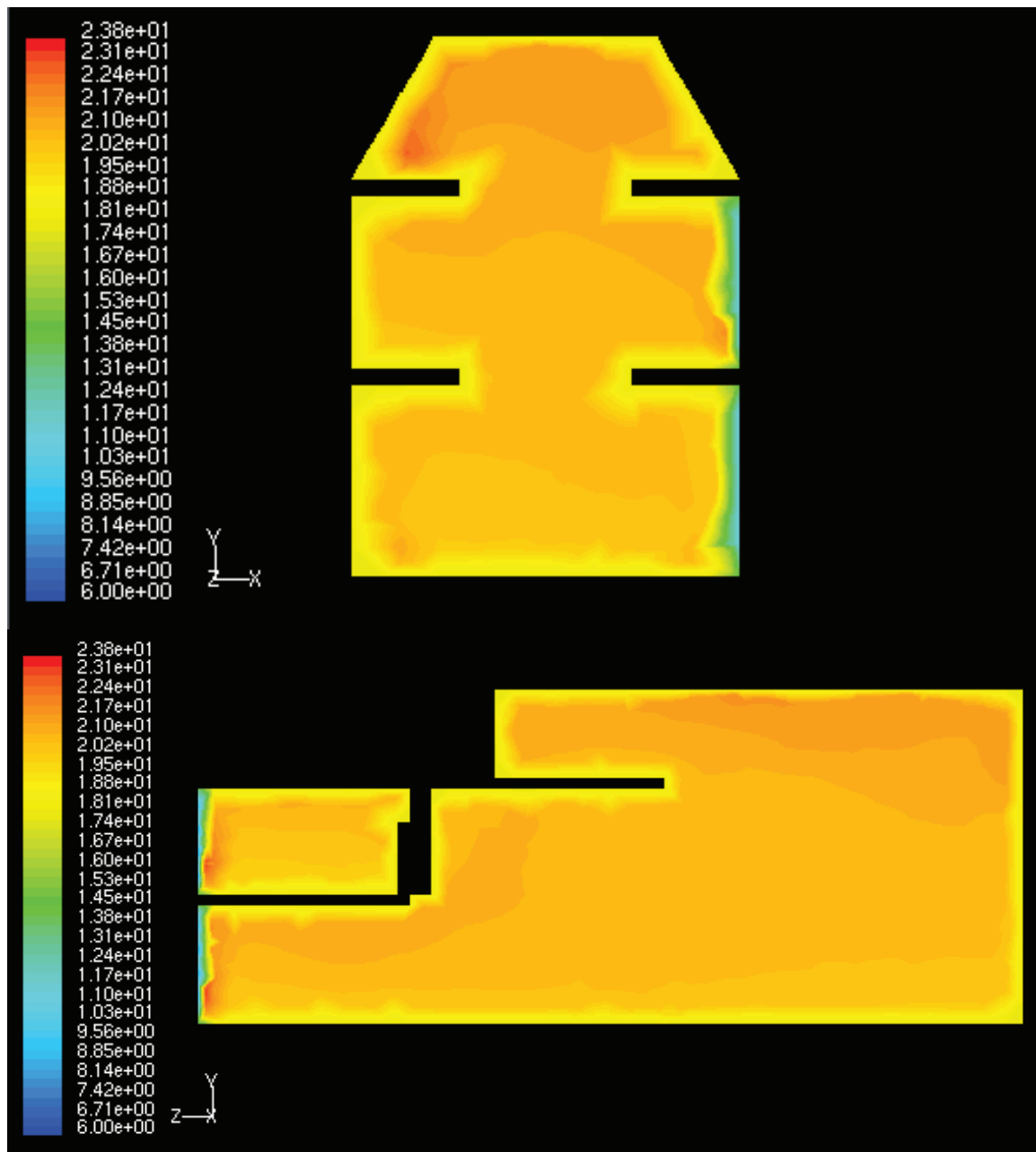
%***** END OF INPUT*****

[Control,Profiles,InClimate,InBuil]=Hambasefun(BASE);
Xwavoextra1
[Output]=Xwavox1104(Profiles,InClimate,InBuil,Control);
xwavouitvoer0404
end

```

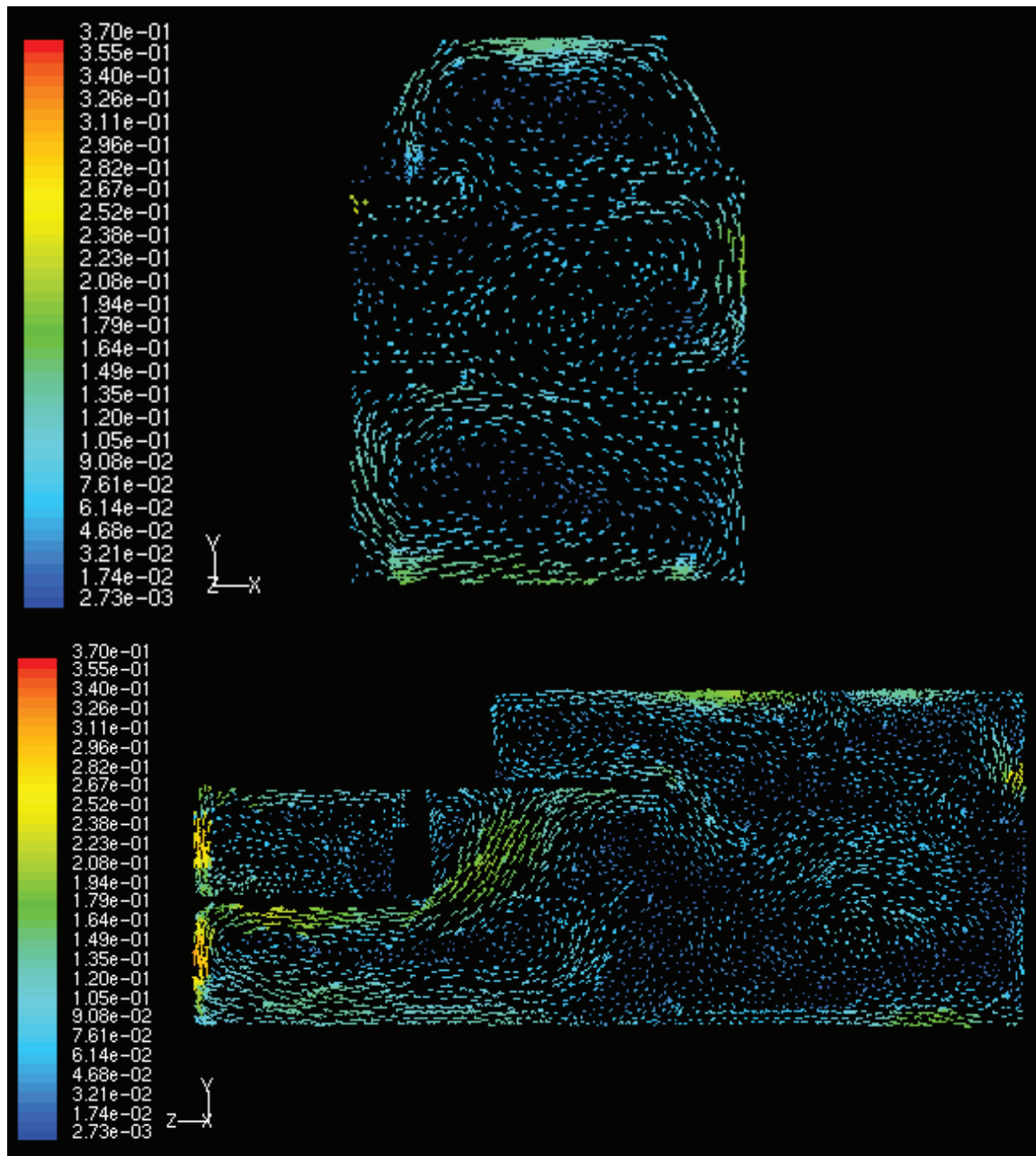

Bijlage F

Resultaten CFD-analyse museum Amstelkring. In onderstaande afbeeldingen is het temperatuurprofiel weergegeven van respectievelijk een dwars- en een lengtedoorsnede van de kerk in de wintersituatie. Over de kerkhoogte treedt slechts een geringe thermische stratificatie op van enkele graden.



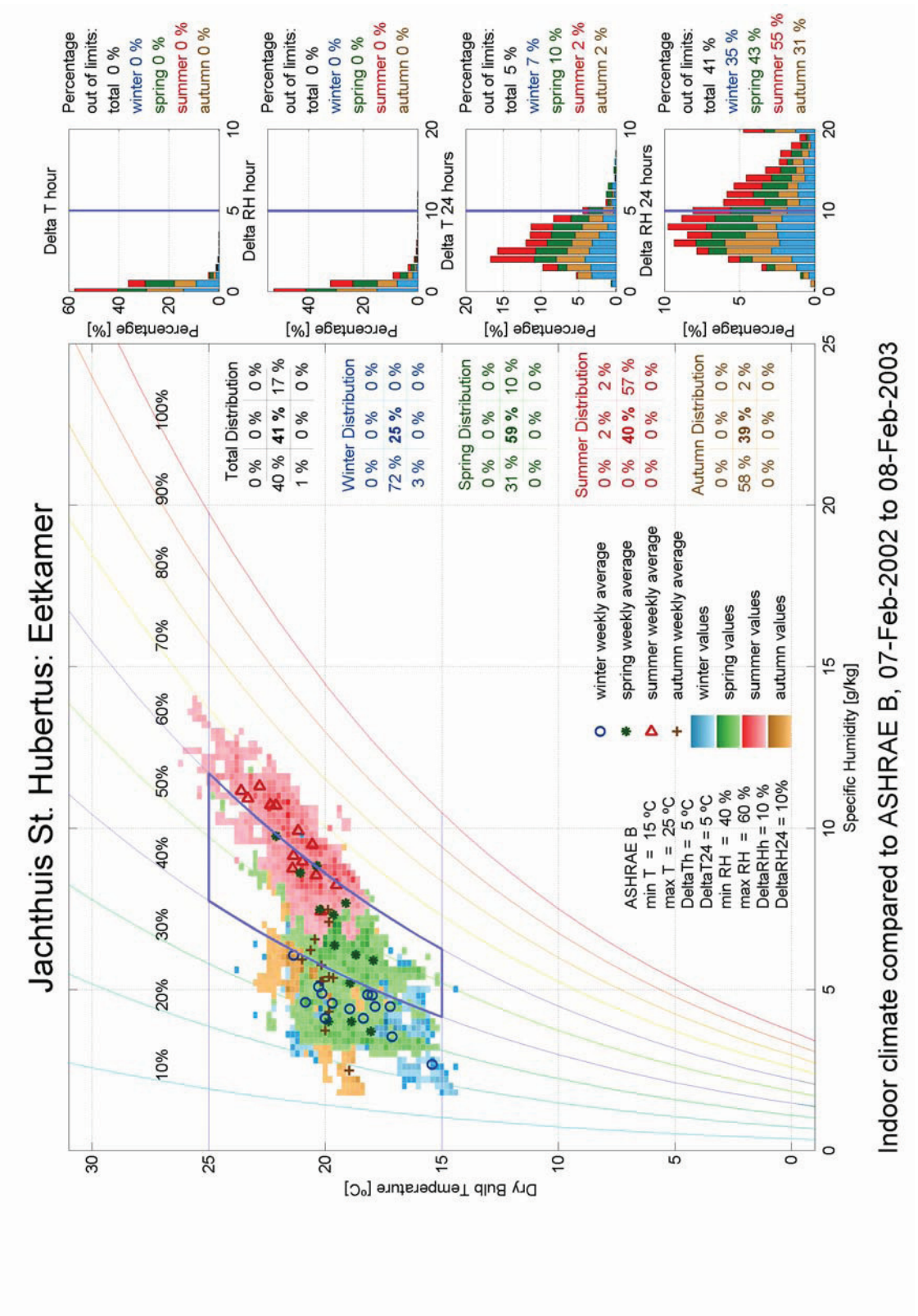
Bijlage G

Resultaten CFD-analyse museum Amstelkring. In onderstaande afbeeldingen is het luchtsnelheidsprofiel weergegeven van respectievelijk een dwars- en een lengtedoorsnede van de kerk in wintersituatie. Ten gevolge van de verwarmingslichamen treedt er een convectieve luchtstroming op in de kerk.

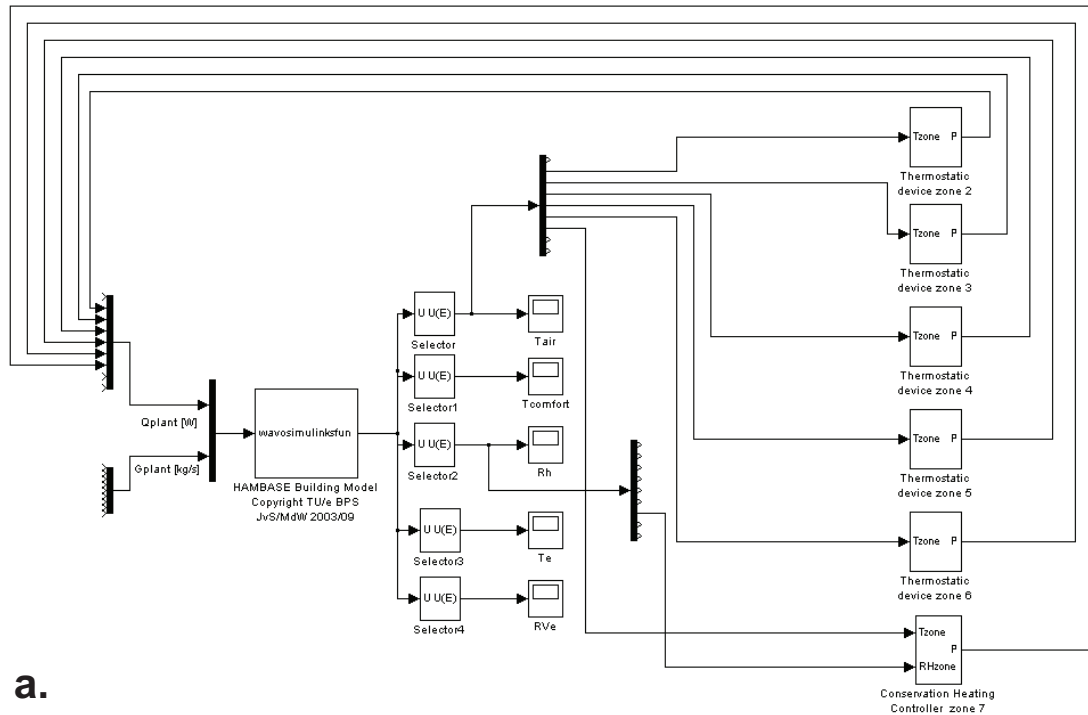


Bijlage H

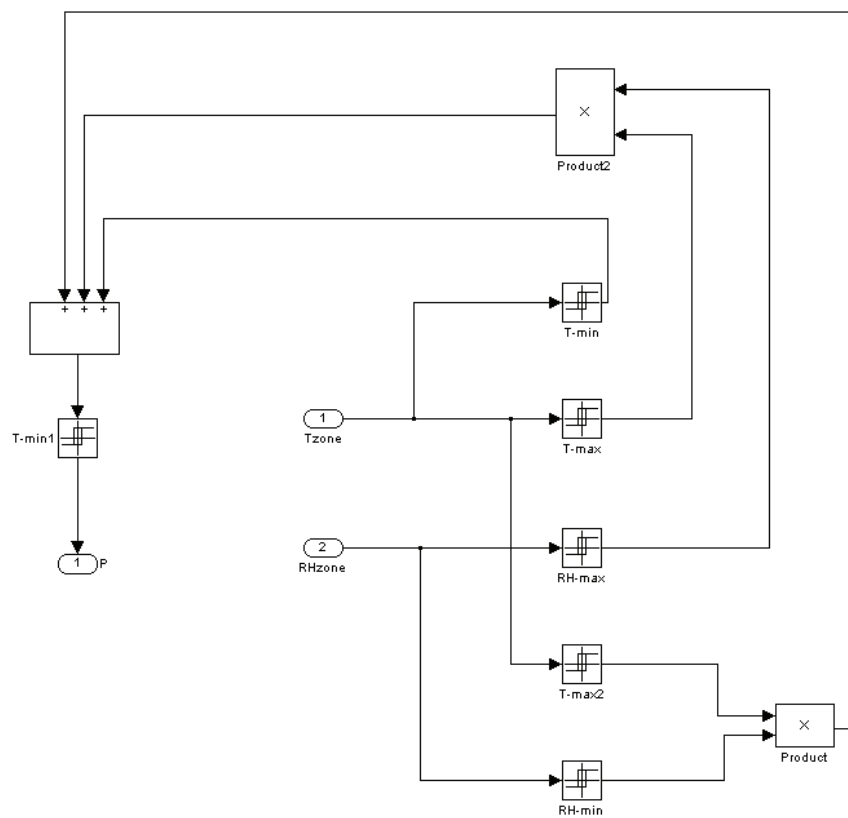
Weergave meetresultaten eetkamer jachthuis St. Hubertus weergegeven in het Mollier-diagram.



Afbeelding van het complete Simulinkmodel (a) en een afbeelding van de structuur van de conservation heating regelaar (b).



a.



b.

Bijlage J

Invoertext HAMBASE-model jachthuis St. Hubertus.

```
%      HAMBASE
%
% HEAT And Moisture Building And Systems Evaluation
% -----
% Jachthuis St.Hubertus: Oostvleugel
% E.Neuhaus
% januari 2006
%
% Note: kelder is aparte zone met buitenwanden
%
% -----
% PART 1 : THE CALCULATION PERIOD
% -----

BASE.Period=[2005,1,1,365];
BASE.DSTime=1;

% -----
% PART 2 : THE BUILDING
% -----

% ZONES NUMBERS [-] & VOLUMES [m3]
% FORMAT BASE.Vol{zonenumber}=volume (m3);

BASE.Vol{1}= 507; % kelder
BASE.Vol{2}= 70; % zitkamer meneer
BASE.Vol{3}= 25; % badkamer bg
BASE.Vol{4}= 50; % slaapkamer bg
BASE.Vol{5}= 70; % kinderspeelkamer
BASE.Vol{6}= 35; % badkamer 1ste
BASE.Vol{7}= 45; % slaapkamer 1ste
BASE.Vol{8}= 25; % vliering boven kinderspl.k. en badkr.
BASE.Vol{9}= 15; % vliering boven slaapkamer

% ** CONSTRUCTION COMPONENTS DATA **

% BASE.Con{conID}=[Ri, d1,matID,... ,dn,matID, Re, ab, eb].
BASE.Con{1} = [0.13, 0.22,234, 0.11,002, 0.22,234, 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand met spouw 55-11
BASE.Con{2} = [0.13, 0.11,234, 0.11,002, 0.22,234, 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand met spouw 44-11
BASE.Con{3} = [0.13, 0.055,234, 0.055,002, 0.22,234, 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand met spouw 33-5.5
BASE.Con{4} = [0.13, 0.11,234, 0.11,002, 0.11,234, 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand met spouw 33-11
BASE.Con{5} = [0.13, 0.33,234, , , , 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand 33
BASE.Con{6} = [0.13, 0.11,234, , , , 0.13,0.5,0.9]; %binnenwand 11
BASE.Con{7} = [0.13, 0.44,234, , , , 0.04,0.5,0.9]; %buitenwand 44
BASE.Con{8} = [0.13, 0.11,234, 0.11,002, 0.11,234, 0.13,0.5,0.9]; %binnenwand met spouw 33-11
BASE.Con{9} = [0.10, 0.30,313, , , , 0.10,0.5,0.9]; %tussenvloeren 30 cm beton
BASE.Con{10} = [0.10, 0.025,502, , , , 0.10,0.5,0.9]; %plafond 1ste: 2,5 cm naaldhout
BASE.Con{11} = [0.10, 0.025,502, 0.01,002 0.01,632 0.10,0.5,0.9]; %dak
BASE.Con{12} = [0.13, 0.04,501, , , , 0.13,0.8,0.9]; %houten deur
BASE.Con{13} = [0.13, 0.50,313, , , , 0.13,0.5,0.9]; %keldervloer

% ** GLAZING SYSTEMS DATA**

% FORMAT BASE.Glas{glaID}=[Uglas,CFr,ZTA,ZTAw,CFrw,Uglasw]
%
% Uglas = U-value without sunblinds [W/m2K]
% CFr = convection factor without sunblinds [-]
% ZTA = Solar gain factor [-] without sunblinds
% ZTAw = Solar gain factor [-] with sunblinds
% CFrw = convection factor with sun blinds [-]
% Uglasw = U-value with sunblinds [W/m2K]
%
%BASE.Glas{glaID}=[Uglas, CFr, ZTA, ZTAw, CFrw, Uglasw]
BASE.Glas{1}= [5, 0.01, 0.15, 0.31, 0.34, 2.8]; %enkel glas met zonwering
BASE.Glas{2}= [1.309, 0.047, 0.308, 0.072, 0.116, 1.253];
BASE.Glas{3}= [5, 0.01, 0.15, 0.31, 0.34, 2.8]; %
BASE.Glas{4}= [1.4, 0.03, 0.65, 0.3, 0.4, 1.4];

% ** ORIENTATIONS **
```

```
%BASE.Or{orID}=[beta, gamma ];
BASE.Or{1}=[90.0, 0 ]; % wand op zuid
BASE.Or{2}=[90.0, 90 ]; % wand op west
BASE.Or{3}=[90.0, 135 ]; % wand op noord/west
BASE.Or{4}=[90.0, 180 ]; % wand op noord
BASE.Or{5}=[90.0, -90 ]; % wand op oost
BASE.Or{6}=[90.0, -45 ]; % wand op zuid/oost
BASE.Or{7}=[0, 0 ]; % plafond / vloer / plat dak
BASE.Or{8}=[60, 0 ]; % schuin dak zuid
BASE.Or{9}=[60, 180 ]; % schuin dak noord
BASE.Or{10}=[60, -45 ]; % schuin dak zuid-oost
BASE.Or{11}=[60, 135 ]; % schuin dak noord-west
```

```
% **SHADOW DATA**
```

```
% Example input
```

```
BASE.shad{1}=[
1 0.07 5 1.6 0 0.5000 0.7 3;...
2 0.1 5.1 3.0000 17.00 0.0000 0 0;...
2 17.00 0.1 3.0000 0 5.1000 0 0;...
2 17.00 0.1 2.0000 0 0.0000 0 0;...
2 0.5 24.00 9.2000 34.10 -9.0000 0 0;...
3 1.25 1.25/7 2.75 15.50 0.0 0 0;...
3 1.50 1.50/7 1.50 12.70 1.50 0 0;...
4 0 10 20 30 50 60 90;...
5 1 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4];

BASE.shad{2}=[4 20 30 40 50 60 70 80;...
5 787/789 784/789 775/789 754/789 700/789 563/789 302/789];
```

```
% Changing '0' into '1' below, gives for one shadow ID-number a drawing of the
```

```
% obstacle geometry.
```

```
if l==0
```

```
shaID=1;
```

```
figure(1)
```

```
shaddrawf1101(BASE.shad,shaID);
```

```
end
```

% I. EXTERNAL WALLS

```
%BASE.wallex{exID}=[zonenr, surf, conID, orID, bridge]
```

```
BASE.wallex{1}=[1, 150, 7, 4, 0]; % wanden voor en achter kelder
BASE.wallex{2}=[1, 25, 7, 4, 0]; % zij wanden kelder
BASE.wallex{3}=[2, 13.5, 2, 4, 0]; % buitenwand zitkamer bg noord 5x2.7
BASE.wallex{4}=[2, 13.5, 2, 1, 0]; % buitenwand zitkamer bg zuid 5x2.7
BASE.wallex{5}=[3, 6.2, 3, 4, 0]; % buitenwand badkamer bg noord 2.3x2.7
BASE.wallex{6}=[3, 6.2, 2, 1, 0]; % buitenwand badkamer bg zuid 2.3x2.7
BASE.wallex{7}=[4, 5.4, 2, 5, 0]; % buitenwand slaapkamer bg oost 2x2.7
BASE.wallex{8}=[4, 13.5, 2, 6, 0]; % buitenwand slaapkamer bg zuidoost 5x2.7
BASE.wallex{9}=[4, 5.4, 2, 5, 0]; % buitenwand slaapkamer bg zuid 2x2.7
BASE.wallex{10}=[5, 13.5, 7, 4, 0]; % buitenwand kindersplkmr 1ste noord 5x2.7
BASE.wallex{11}=[5, 2.16, 7, 2, 0]; % buitenwand kindersplkmr 1ste west 0.8x2.7
BASE.wallex{12}=[5, 2.16, 7, 5, 0]; % buitenwand kindersplkmr 1ste oost 0.8x2.7
BASE.wallex{13}=[5, 13.5, 7, 1, 0]; % buitenwand kindersplkmr 1ste zuid 5x2.7
BASE.wallex{14}=[6, 5.4, 5, 4, 0]; % buitenwand badkamer 1ste noord 4.5x2.7
BASE.wallex{15}=[6, 5.4, 5, 1, 0]; % buitenwand badkamer 1ste zuid 4.5x2.7
BASE.wallex{16}=[7, 5.4, 5, 3, 0]; % buitenwand slaapkamer 1ste noord-west 2x2.7
BASE.wallex{17}=[7, 5.4, 5, 4, 0]; % buitenwand slaapkamer 1ste noord 2x2.7
BASE.wallex{18}=[7, 5.4, 5, 5, 0]; % buitenwand slaapkamer 1ste oost 2x2.7
BASE.wallex{19}=[7, 13.5, 5, 6, 0]; % buitenwand slaapkamer 1ste zuid-oost 5x2.7
BASE.wallex{20}=[7, 5.4, 5, 1, 0]; % buitenwand slaapkamer 1ste zuid 2x2.7
BASE.wallex{21}=[5, 10, 11, 7, 0]; % plat dak kinderspeelkamer 1x5 maal 2
BASE.wallex{22}=[8, 7.5, 11, 8, 0]; % schuin dak vliering kindersplkmr en badkamer zuid 7.5x1
BASE.wallex{23}=[8, 7.5, 11, 9, 0]; % schuin dak vliering kindersplkmr en badkamer noord 7.5x1
BASE.wallex{24}=[9, 16, 11, 10, 0]; % schuin dak vliering slaapkamer 1ste zuid-oost (vereeenv.) 8x2
BASE.wallex{25}=[9, 16, 11, 11, 0]; % schuin dak vliering slaapkamer 1ste noord-west (vereeenv.) 8x2
```

% II. WINDOWS IN EXTERNAL WALLS

```
%BASE.window{winID}=[exID, surf, glaID, shaID]
```

```
BASE.window{1}=[3, 4.8, 1, 0]; % zitkamer bg glas in wand noord 0.8x1.5 maal 4
BASE.window{2}=[4, 2.4, 1, 0]; % zitkamer bg glas in wand zuid 0.8x1.5 maal 2
BASE.window{3}=[4, 3.4, 1, 0]; % terrasdeuren in wand zuid 1.6x2.1
BASE.window{4}=[5, 1, 1, 0]; % badkamer bg glas in wand noord 1x1
BASE.window{5}=[6, 1.2, 1, 0]; % badkamer bg glas in wand zuid 1x1.2
```

```

BASE.window{6} = [7,      1.4,      1,      0]; % slaapkmr bg glas in wand oost 0.8x1.5
BASE.window{7} = [8,      2.4,      1,      0]; % slaapkmr bg glas in wand zuid-oost 0.8x1.5 maal 2
BASE.window{8} = [9,      1.8,      1,      0]; % slaapkmr bg glas in wand zuid 1.2x1.5
BASE.window{9} = [10,     3.85,     1,      0]; % kindersplkmr 1ste glas in wand noord 0.8x1.2 maal 4
BASE.window{10} = [13,    3.85,     1,      0]; % kindersplkmr 1ste glas in wand zuid 0.8x1.2 maal 4
BASE.window{11} = [14,    0.64,     1,      0]; % badkamer 1ste glas in wand noord 0.8x0.8
BASE.window{12} = [15,    0.4,      1,      0]; % badkamer 1ste glas in wand zuid 0.5x0.8
BASE.window{13} = [18,    1.9,      1,      0]; % slaapkamer 1ste glas in wand oost 0.8x1.5
BASE.window{14} = [19,    2.8,      1,      0]; % slaapkamer 1ste glas in wand zuid-oost 0.8x1.2 maal 2
BASE.window{15} = [20,    1.2,      1,      0]; % slaapkamer 1ste glas in wand zuid 0.8x1.5

```

% III. CONSTANT TEMPERATURE WALLS

```

BASE.walli0{1} = [1,      70,      13,      12,      0]; %keldervloer

```

% IV ADIABATIC EXTERNAL WALLS

```

%BASE.wallia{iaID} = [zonenr, surf, conID]
BASE.wallia{1} = [2,      1.7,      12 ]; % zitkamer bg deur naar gang 2.1x0.8
BASE.wallia{2} = [2,      11.8,      4 ]; % zitkamer bg wand west 5x2.7 min deur
BASE.wallia{3} = [4,      13.5,      3 ]; % slaapkamer bg wand noord
BASE.wallia{4} = [5,      1.7,      12 ]; % kinderspeelkmr 1ste deur naar gang 2.1x0.8
BASE.wallia{5} = [5,      9.65,      6 ]; % kinderspeelkmr 1ste wand west 4.2x2.7 min deur

```

% V. INTERNAL WALLS BETWEEN AND IN ZONES

```

%BASE.wallin{inID} = [zonenr1, zonenr2, surf, conID]
BASE.wallin{1} = [1,      2,      25,      9 ]; % zitkamer bg vloer 5x5
BASE.wallin{2} = [2,      3,      1.7,      12 ]; % zitkamer bg deur naar badkamer
BASE.wallin{3} = [2,      3,      11.8,      8 ]; % zitkamer bg wand badkamer
BASE.wallin{4} = [1,      3,      11.5,      9 ]; % badkamer bg vloer 2.3x5
BASE.wallin{5} = [3,      4,      1.7,      12 ]; % badkamer bg deur slaapkamer
BASE.wallin{6} = [3,      4,      11.8,      8 ]; % badkamer bg wand slaapkamer
BASE.wallin{7} = [1,      4,      20.5,      9 ]; % slaapkamer bg vloer
BASE.wallin{8} = [2,      5,      25,      9 ]; % kinderspeelkmr 1ste vloer
BASE.wallin{9} = [5,      6,      1.7,      12 ]; % kinderspeelkmr 1ste deur naar badkamer
BASE.wallin{10} = [5,      6,      9.65,      6 ]; % kinderspeelkmr 1ste wand badkamer 4.2x2.7 min deur
BASE.wallin{11} = [3,      6,      16.8,      9 ]; % badkamer 1ste vloer 4x4.2
BASE.wallin{12} = [6,      7,      1.7,      12 ]; % badkamer 1ste deur naar slaapkamer
BASE.wallin{13} = [6,      7,      11.8,      6 ]; % badkamer 1ste wand naar slaapkamer 3x2.7 + 2x2.7 min deur
BASE.wallin{14} = [5,      8,      17.5,      10 ]; % plafond kindersplkmr/badkamer 3.5x5
BASE.wallin{15} = [6,      8,      8.75,      10 ]; % plafond badkamer 3.5x2.5
BASE.wallin{16} = [7,      9,      24,      10 ]; % plafond slaapkamer 8x3

```

```

%-----
% PART 3 : profiles for internal sources, ventilation, sunblinds and free
% cooling
%-----

```

```

% kelder
BASE.Ers{1} = 300;
BASE.dayper{1} = [ 0,      8,      22 ];
BASE.vvmin{1} = [ 0.5,    0.5,    0.5 ];
BASE.vvmax{1} = [ 0.5,    0.5,    0.5 ];
BASE.Tfc{1} = [ 30,      30,      30 ];
BASE.Qint{1} = [ 400,    400,    400 ]; %verwarmingsleidingen
BASE.Gint{1} = [ 0,      0,      0 ]; %vochtproductie
BASE.Tsetmin{1} = [ 8,      8,      8 ];
BASE.Tsetmax{1} = [ 100,    100,    100 ];
BASE.RVmin{1} = [ -1,     -1,     -1 ];
BASE.RVmax{1} = [ 101,    101,    101 ];

```

```

%thermostatisch 1
BASE.Ers{2} = 300;
BASE.dayper{2} = [ 0,      8,      22 ];
BASE.vvmin{2} = [ 0.8,    0.8,    0.8 ];
BASE.vvmax{2} = [ 0.8,    0.8,    0.8 ];
BASE.Tfc{2} = [ 40,      40,      40 ];
BASE.Qint{2} = [ 0,      0,      0 ]; %geen warmtebronnen
BASE.Gint{2} = [ 0,      0,      0 ]; %geen vochtbronnen
BASE.Tsetmin{2} = [ 17,     19,     17 ];
BASE.Tsetmax{2} = [ 100,    100,    100 ];
BASE.RVmin{2} = [ -1,     -1,     -1 ];
BASE.RVmax{2} = [ 101,    101,    101 ];

```

```

%thermostatisch 2

```

```

BASE.Ers{3}=300;
BASE.dayper{3}= [ 0, 8, 22 ];
BASE.vvmin{3}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.vvmax{3}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.Tfc{3}= [ 40, 40, 40 ];
BASE.Qint{3}= [ 0, 0, 0 ]; %geen warmtebronnen
BASE.Gint{3}= [ 0, 0, 0 ]; %geen vochtbronnen
BASE.Tsetmin{3}= [ 17, 17, 17 ];
BASE.Tsetmax{3}= [ 100, 100, 100 ];
BASE.RVmin{3}= [ -1, -1, -1 ];
BASE.RVmax{3}= [ 101, 101, 101 ];

```

%hygrostatisch

```

BASE.Ers{4}=300;
BASE.dayper{4}= [ 0, 8, 22 ];
BASE.vvmin{4}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.vvmax{4}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.Tfc{4}= [ 40, 40, 40 ];
BASE.Qint{4}= [ 0, 0, 0 ];
BASE.Gint{4}= [ 0, 0, 0 ];
BASE.Tsetmin{4}= [ 4, 4, 4 ];
BASE.Tsetmax{4}= [ 100, 100, 100 ];
BASE.RVmin{4}= [ 40, 40, 40 ];
BASE.RVmax{4}= [ 60, 60, 60 ];

```

%free floating

```

BASE.Ers{5}=300;
BASE.dayper{5}= [ 0, 8, 22 ];
BASE.vvmin{5}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.vvmax{5}= [ 0.8, 0.8, 0.8 ];
BASE.Tfc{5}= [ 40, 40, 40 ];
BASE.Qint{5}= [ 0, 0, 0 ];
BASE.Gint{5}= [ 0, 0, 0 ];
BASE.Tsetmin{5}= [ -100, -100, -100 ];
BASE.Tsetmax{5}= [ 100, 100, 100 ];
BASE.RVmin{5}= [ -1, -1, -1 ];
BASE.RVmax{5}= [ 101, 101, 101 ];

```

% THE PROFILES OF THE BUILDING

```

% BASE.weekfun{zonenr}= [upnrmon, upnrtue, upnrwed, upnrthu, upnrfri, upnrsat, upnrsun ]
BASE.weekfun{1}= [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];
BASE.weekfun{2}= [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2];
BASE.weekfun{3}= [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2];
BASE.weekfun{4}= [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2];
BASE.weekfun{5}= [3, 3, 3, 3, 3, 3, 3];
BASE.weekfun{6}= [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2];
BASE.weekfun{7}= [4, 4, 4, 4, 4, 4, 4];
BASE.weekfun{8}= [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5];
BASE.weekfun{9}= [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5];

```

%-----

% PART 4 : Heating, cooling, humidification, dehumidification

% -----

% FORMAT BASE.Plant{zonenr}=[heating capacity [W], cooling capacity [W],
% humidification capacity [kg/s],dehumidification capacity [kg/s];

```

BASE.Plant{1}=[400,0,0.000,-0.0000];
BASE.Plant{2}=[4000,0,0.00,-0.00];
BASE.Plant{3}=[1800,0,0.000,-0.0000];
BASE.Plant{4}=[4000,0,0.00,-0.00];
BASE.Plant{5}=[3000,0,0.000,-0.0000];
BASE.Plant{6}=[1800,0,0.00,-0.00];
BASE.Plant{7}=[3000,0,0.000,-0.0000];
BASE.Plant{8}=[00,0,0.000,-0.0000];
BASE.Plant{9}=[00,0,0.000,-0.0000];

```

% CFint= is the convection factor of the casual gains (usually CFint=0.5)

```

BASE.convfac{1}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{2}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{3}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{4}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{5}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{6}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{7}=[0.9, 1, 0.5 ];
BASE.convfac{8}=[0.9, 1, 0.5 ];

```

```

BASE.convfac{9}=[0.9, 1, 0.5 ];

% FORMAT BASE.heatexch{zonenr}=[etaww, Twws];
BASE.heatexch{1}=[0 22];
BASE.heatexch{2}=[0 22];
BASE.heatexch{3}=[0 22];
BASE.heatexch{4}=[0 22];
BASE.heatexch{5}=[0 22];
BASE.heatexch{6}=[0 22];
BASE.heatexch{7}=[0 22];
BASE.heatexch{8}=[0 22];
BASE.heatexch{9}=[0 22];

% CFfbi= The convection factor for the solar radiation due to furnishings.
BASE.furnishings{1}=[1, 0];
BASE.furnishings{2}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{3}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{4}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{5}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{6}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{7}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{8}=[1, 0.2];
BASE.furnishings{9}=[1, 0.2];

%***** END OF INPUT*****

[Control,Profiles,InClimate,InBuil]=Hambasefun4(BASE);
Xwavoextra2
[Output]=Xwavox1205(Profiles,InClimate,InBuil,Control);
xwavoutvoer0404

```

