

**Het functioneren van stralingsbranders  
in de Grote Sint Laurenskerk  
te Alkmaar**

F.A.T.M. Ligthart  
F.G.H. Koene

## Verantwoording

In opdracht van de bestuursdienst Financiën en Informatievoorziening van de gemeente Alkmaar is onderzoek gedaan naar het functioneren van de tijdelijk geïnstalleerde gasstralers in de Grote Sint Laurenskerk te Alkmaar. Het onderzoek is uitgevoerd door ECN in samenwerking met de TUE onder het ECN-projectnummer is 844033.

# INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
1.1 Voorgeschiedenis	7
1.2 Doelstelling en resultaat	7
1.3 Eigenschappen van stralingsbranders	7
2. AANPAK VAN HET ONDERZOEK	8
3. DE METINGEN	9
3.1 Infraroodopnamen	9
3.2 Metingen van luchtvochtigheid en -temperatuur	16
3.3 Infiltratiemetingen (uitgevoerd door Technische Universiteit Eindhoven, TUE)	19
3.3.1 Meetperiode	19
3.3.2 Meetmethode	19
3.3.3 Resultaten	20
3.4 Comfortmetingen	21
3.5 Energiegebruik	22
4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	23
4.1 Infraroodmetingen	23
4.2 Temperatuur en vochtmetingen	23
4.3 Conclusies ten aanzien van condensatie	23
4.3.1 Het opwarmen en afkoelen	24
4.3.2 De ramen	25
4.3.3 De zolders	25
4.4 Geldigheid van de meetresultaten	25
4.5 Comfortmetingen	25
4.6 Aanbevelingen	26
Bijlagen	



## SAMENVATTING

In de winter van 1998/99 zijn in de Grote Sint Laurenskerk te Alkmaar, naast de bestaande vloerverwarming, tijdelijk geïnstalleerde gasstralers gebruikt voor de verwarming tijdens evenementen. Omdat toepassing van gasstralers wordt overwogen als definitieve oplossing voor het comfortprobleem in de kerk heeft de gemeente Alkmaar ECN opgedragen de effecten van het functioneren van de gasstralers te bestuderen. Het gaat hierbij met name om comfort, energiegebruik en eventuele nadelige gevolgen van dit type verwarming voor het gebouw (en het orgel). Door infraroodopnamen met een camera, uurlijkse metingen van luchttemperatuur en –vochtigheid, comfortmetingen en infiltratiemetingen is een gedetailleerd beeld verkregen van het binnenklimaat in de kerk.

De conclusies zijn:

1. Door warmtestraling van de gasstralers in hun huidige opstelling treedt oververhitting op van kunstwerken, houten interieurdelen, pilaren en dergelijke die zich in de straling bevinden. Hoge oppervlaktetemperaturen kunnen leiden tot schade aan delen die hiertegen niet bestand zijn zodat voortijdige restauratie nodig is. Door het juist ontwerpen en instellen van een eventuele permanente installatie kan dit vermeden worden. Maatwerk is daarbij dus een eerste vereiste.
2. Onder bepaalde omstandigheden kan condensatie plaatsvinden van waterdamp, die vrijkomt bij de verbranding van aardgas door de stralingsverwarmingsunits. Indien er condensatie optreedt, zal dit het eerste gebeuren op de koudste oppervlakken, de glas in lood ramen. Echter, tijdens het stoken met de huidige enigszins overgedimensioneerde proefinstallatie is in de afgelopen (zachte) winters geen condensatie geconstateerd. Het is daarom onwaarschijnlijk dat condensatie door de gasstralers een ernstig probleem is. Desondanks wordt voor alle zekerheid aanbevolen het vermogen van de stralers niet hoger in te stellen dan strikt noodzakelijk is. Voorts is het aan te bevelen om een beveiliging aan te brengen die, gerelateerd aan permanente meting van het dauwpunt van de waterdamp en temperaturen van bekende koudste oppervlakken in de kerk, het vermogen van de stralers begrenst.
3. Tijdens de stookuren van de stralers bleef de *relatieve* vochtigheid in de kerk vrijwel constant. De hogere temperaturen enerzijds en de productie van waterdamp anderzijds blijken een vrijwel even groot, maar tegengesteld effect te hebben op de relatieve vochtigheid. Het vermijden van een te lage relatieve luchtvochtigheid zal een positief effect te hebben op de conditie van met name de houten interieurdelen in de kerk zoals het orgel. In die zin heeft het gebruik van gasstralers dus voordelen boven andere soorten verwarming die doorgaans een verlaging van de relatieve luchtvochtigheid teweeg brengen.
4. Het vermogen van de vloerverwarming kan lager worden ingesteld dan tijdens de metingen het geval was omdat de gemeten luchttemperatuur in de kerk hoger bleek dan bij de combinatie met de stralingsverwarming noodzakelijk is.
5. Voor een optimaal comfort moet het vermogen van de stralers niet hoger worden ingesteld dan strikt noodzakelijk is en moeten de units afzonderlijk goed regelbaar zijn.
6. Voor het vermijden van overmatige tocht moeten plaatselijke voorzieningen worden getroffen.



# 1. INLEIDING

## 1.1 Voorgeschiedenis

Mede naar aanleiding van eerder onderzoek van ECN naar mogelijkheden voor verbetering van het binnenklimaat in de Grote St. Laurenskerk in Alkmaar is een proef gedaan met een element van een eventueel toekomstig aan te brengen verlaagd plafond van kunststof folie. De proef indiceerde bezwaren op de punten montage, kosten, akoestiek en esthetische eigenschappen. Daarom werd besloten de tweede mogelijkheid die in het onderzoek werd genoemd verder te onderzoeken met een tijdelijke opstelling van stralingsverwarming.

## 1.2 Doelstelling en resultaat

Doel van de metingen is om een beeld te krijgen van te verwachten comfort, energiegebruik en van eventuele nadelige effecten op het gebouw. Dit rapport geeft het resultaat van de metingen die tijdens het gebruik van de stralingsverwarming in maart en april 1999 door ECN en TUE in opdracht van de gemeente Alkmaar zijn verricht.

## 1.3 Eigenschappen van stralingsbranders

Uit de literatuur is bekend dat met stralingsverwarming bij een lage luchttemperatuur toch een comfortabel binnenklimaat kan worden gecreëerd. De warmtestraling kan bij een minimale luchttemperatuur van 10 graden desondanks een gevoelstemperatuur van 20 graden teweeg brengen. Hierbij is wel van belang dat de straling gelijkmatig en zoveel mogelijk rondom de aanwezigen wordt aangebracht zodat stralingsasymmetrie en een te hoge stralingsintensiteit (die aanleiding kunnen geven tot hoofdpijn) worden vermeden. Ook de omringende steenachtige oppervlakken moeten worden aangestraald om de koudestraling van deze oppervlakken en koudeval te compenseren.

De in de kerk gemonteerde open stralingsbranders die werken op aardgas produceren verbrandingsproducten als CO<sub>2</sub> en waterdamp die in de ruimte van de kerk vrij komt. De verzurende elementen die bij die verbranding ook vrijkomen (voornamelijk door verbranding van stof in de aangezogen lucht) worden in het kader van deze opdracht niet gemeten. Een gesprek met een deskundige van ECN op het gebied van brandstoffen en verbranding (Prof. Dr. J. Slanina) leidt tot het voorlopige oordeel dat het onwaarschijnlijk is dat schade aan het gebouw of de inventaris zou ontstaan door deze stoffen, omdat de hoeveelheid die vrijkomt bij een goede verbranding gering is. Om voldoende zekerheid te krijgen is het wel aan te bevelen de hoeveelheid van deze stoffen te meten in een eventueel aanvullend onderzoek. Het condensgevaar dat voortkomt uit de productie van waterdamp bij de verbranding van aardgas vormt een van de belangrijkste onderwerpen van het nu uitgevoerde onderzoek.

## 2. AANPAK VAN HET ONDERZOEK

Het effect van stralingsverwarming is het beste waar te nemen met behulp van een infraroodcamera. Deze geeft de oppervlaktetemperaturen van het aangestraalde oppervlak weer in de vorm van kleuren. Op die manier is het effect van de (infrarood-)stralers goed te zien en bovendien zijn ook de koude plekken in de kerk goed op te sporen. Terwijl de stralers tijdens een beurs in bedrijf waren, zijn door waarnemingen vanaf de begane grond en vanaf enkele triforia alle delen van het interieur van de kerk bekeken met de infraroodcamera. Van representatieve situaties zijn opnamen gemaakt. Dezelfde opnamen zijn ook met een normale camera gemaakt zodat de infraroodbeelden makkelijk herkenbaar zijn als men beide opnamen tegelijkertijd bekijkt.

Vervolgens zijn op de koude plekken in de kerk die op die koude dag zijn gevonden sensoren aangebracht die de temperatuur en relatieve vochtigheid gedurende het resterende stookseizoen ieder uur registreren. Met behulp van gemeten luchttemperatuur en –vochtigheid wordt het dauwpunt van uur tot uur uitgerekend. Dit is de temperatuur waarbij de waterdamp in de lucht begint te condenseren als men de lucht zou afkoelen. Naarmate de gasbranders langer branden en de lucht vochtiger wordt zal dus het dauwpunt stijgen. Dat wil zeggen dat bij steeds geringere afkoeling waterdamp condenseert. Als men het berekende dauwpunt op een moment vergelijkt met de oppervlaktetemperatuur van de koudste vlakken in de kerk (die met infraroodopnamen zijn opgespoord), kan men concluderen of op die vlakken waterdamp uit de lucht condenseert. Dit is het geval als de oppervlaktetemperatuur gelijk is aan, of lager is dan het berekende dauwpunt.

De toename van de relatieve vochtigheid door de verbranding van aardgas in de stralers kan nog op een andere manier worden bepaald. De hoeveelheid waterdamp die bij het op dat moment gemeten aardgasverbruik wordt geproduceerd wordt uitgerekend aan de hand van de chemische vergelijking van de verbranding van aardgas. Door de totale hoeveelheid aanwezige waterdamp te delen door het volume van de kerk kan een vochtigheid van de lucht worden bepaald. Er vindt echter een verversing van de lucht plaats door infiltratie van buitenlucht. De mate van verversing wordt bepaald door een infiltratiemeting. Met het resultaat van de infiltratiemeting kan worden berekend hoe hoog de uiteindelijke vochtigheid van de lucht wordt. Zo kunnen de eerder gemeten waarden worden geverifieerd.

Het te verwachten comfort dat door de stralers ontstaat is met een zogenaamde comfortmeter gemeten. Dit apparaat bestaat uit een statief met vier opnemers (luchttemperatuur, -vochtigheid, -snelheid en stralingsasymetrie) en een verwerkingseenheid die de signalen registreert. Om een goed beeld te krijgen van het comfort op verschillende plaatsen in de kerk moet de apparatuur meerdere malen worden verplaatst. Tijdens een concert zou dit onaanvaardbaar storend zijn. Bij tentoonstellingen worden de metingen sterk beïnvloed door spots en panelen die vanuit de meting gezien willekeurig in de kerk zijn opgesteld. Om deze redenen is gekozen voor een dag zonder activiteiten in de kerk waarbij in een aantal denkbeeldige vakken van de kerk de comfortmeetwaarden vrijelijk in kaart kon worden gebracht.

Het energiegebruik van de stralers is in kaart gebracht door registraties van de beheerders van de kerk.



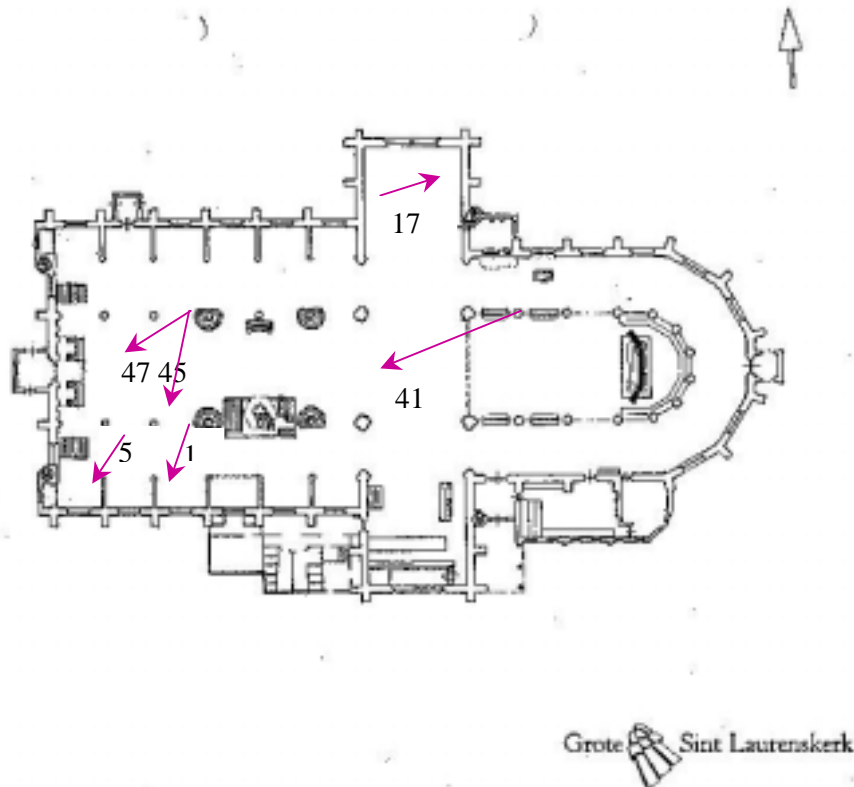
### 3. DE METINGEN

#### 3.1 Infraroodopnamen

De infraroodopnamen zijn gemaakt met de Thermacam van Inframetrics (IR focal plane array radiometer; gevoeligheid  $<0,1^{\circ}\text{C}$ )

Tijdens een evenement op 5 maart 1999 waarbij de infraroodverwarming van 's middags 14.00 uur tot 's avonds 22.00 uur heeft gebrand zijn tussen 18.00 en 22.00 uur opnamen gemaakt met de infraroodcamera. De buitentemperatuur ten tijde van de metingen bedroeg 6 graden en de wind kwam uit het noordwesten met een snelheid van ongeveer 2 m/s gemeten op maaiveldniveau. Er was bewolking, geen neerslag.

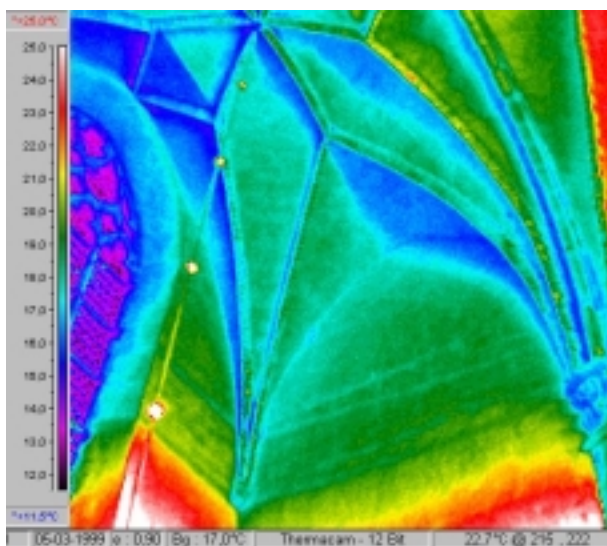
De meetresultaten zijn weergegeven in hierna volgende figuren. Steeds is de bovenste van elk paar kleurenafbeldingen een normale foto van ongeveer dezelfde omgeving als de infraroodopname, die eronder is weergegeven. De kleurenschaal waarop de oppervlakte-temperaturen worden weergegeven is voor de meeste opnamen hetzelfde gekozen zodat de kleuren op de afbeeldingen onderling vergeleken kunnen worden. Van de 48 gemaakte opnamen zijn alleen die opnamen, die opmerkelijke informatie bevatten, opgenomen in dit rapport.



*figuur 1: plaats infraroodopnamen*

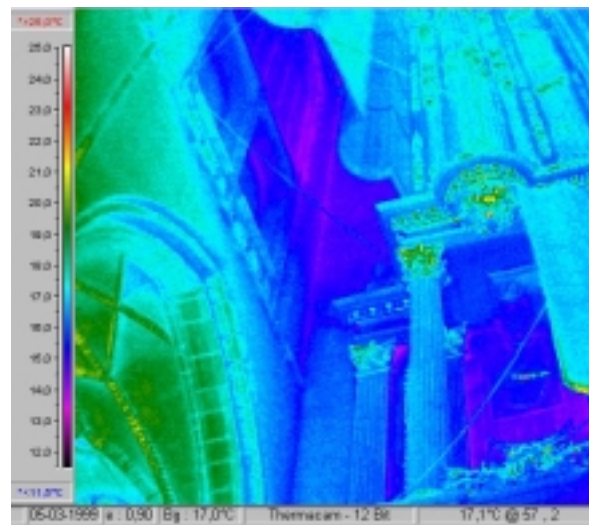
Opname 1:

Het gewelf en de raampartij van deze nis (ten zuidoosten van het schip) worden niet direct aangestraald door de infraroodarmaturen en zijn daardoor relatief koud. Vooral die delen van het gewelf die naar het koude glasvlak zijn gericht (dus als het ware “naar buiten kijken”) zijn koud (rond 15°C). Het onderste deel van de muren en het gewelf van de zijbeuk (aan de onderrand van de opname) worden wel direct aangestraald en zijn beduidend warmer (20-25°C).



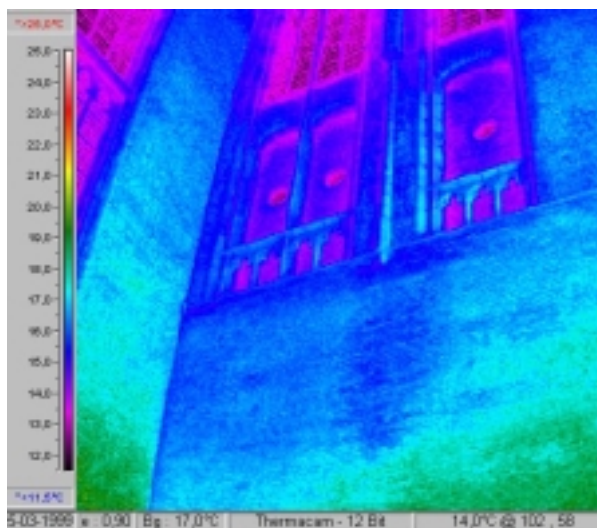
Opname 5:

Boven in het schip achter de orgeldeuren zijn de koudste plaatsen te vinden (13-14°C). De hoeken die sowieso koud zijn worden door de orgeldeuren afgeschermd voor warmtestraling vanuit het interieur van de kerk. Op deze plaats is een temperatuur- en vochtigheidssensor opgehangen in de ruimte omdat hier het condensatiegevaar groot is.



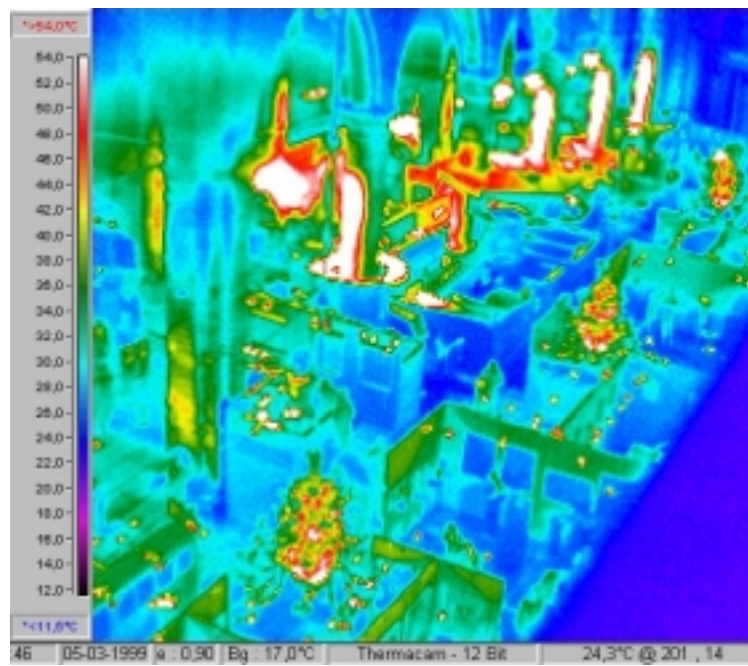
Opname 17:

Deze opname is gemaakt in het noordelijk transept kijkend naar de oostmuur en een stukje van de noordmuur. De oost- en westmuren van het transept zijn kouder dan de noordmuur. Die wordt immers aangestraald door het warme interieur van de kerk terwijl de oost- en westmuur slechts *elkaar* “zien”. De terugvallende muren in de schijntreforia zijn de koudste plekken (rond 13°C). Op deze plaats zijn aanvullende vocht- en temperatuurmetingen gedaan. De blauwe (relatief koude) vlek op de muur geeft de plaats aan waar witte uitslag te zien is, die waarschijnlijk vanwege vochtdoorslag is ontstaan.



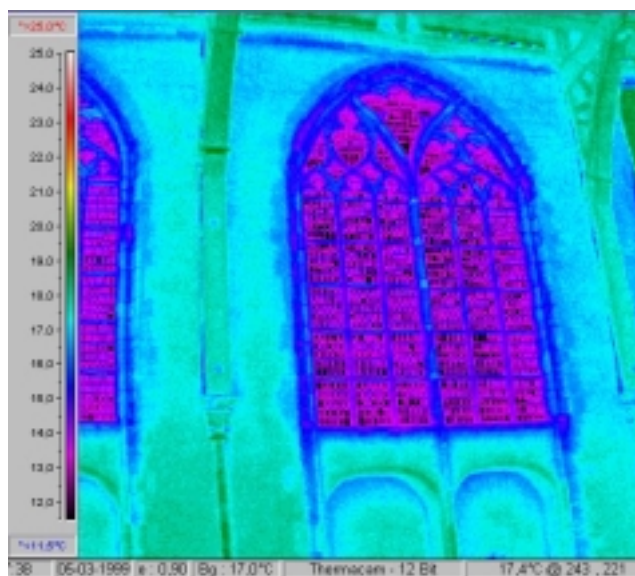
Opname 41:

Deze opname geeft een overzicht van de opstellingen in de kerk ten behoeve van de tentoonstelling die op dat moment aan de gang was en is genomen vanuit het triforium boven de viering. Op de infraroodafbeelding is duidelijk te zien dat het dak van de preekstoel en de zijkant van pilaren oververhit zijn (meer dan 50°C).



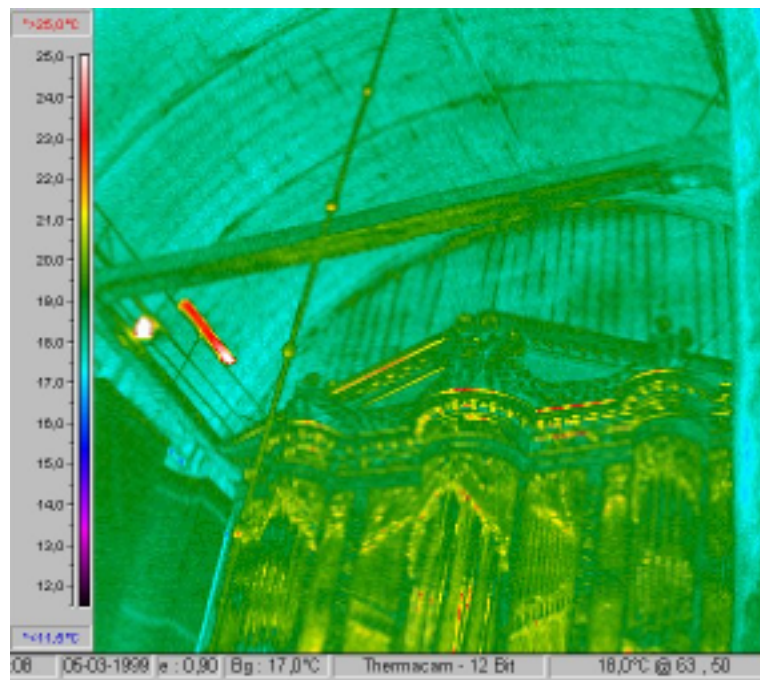
Opname 45:

Deze opname laat een raam bovenin het schip zien. Er zijn zwarte ruitjes en paarse. De temperatuur aanduiding van het glasoppervlak kan sterk afwijken van de hier gegeven waarden. Glas heeft een hoge reflectiewaarde en weerspiegelt als het ware de temperatuur van het interieur. Vanwege de hoge reflectie vereist het meten van de oppervlaktetemperatuur van spiegelende oppervlakken zoals glas en metaal door infraroodmeting speciale maatregelen, die bij deze meting niet genomen zijn. Hoogstwaarschijnlijk is de werkelijke oppervlakte-temperatuur van het glas op de opname enkele graden lager dan uit de figuur kan worden opgemaakt. De zwarte kleur kan duiden op een minder goede afdichting van de kit waarmee de ruitjes zijn gemonteerd waardoor het glas inderdaad kouder is of een andere oppervlakte-structuur waardoor de reflectie van warmte minder is.



Opname 47:

Het houten gewelf van het schip is in zijn geheel groen-blauw gekleurd en is dus minder koud (ongeveer 19°C ) dan sommige stenen interieur delen van de kerk.



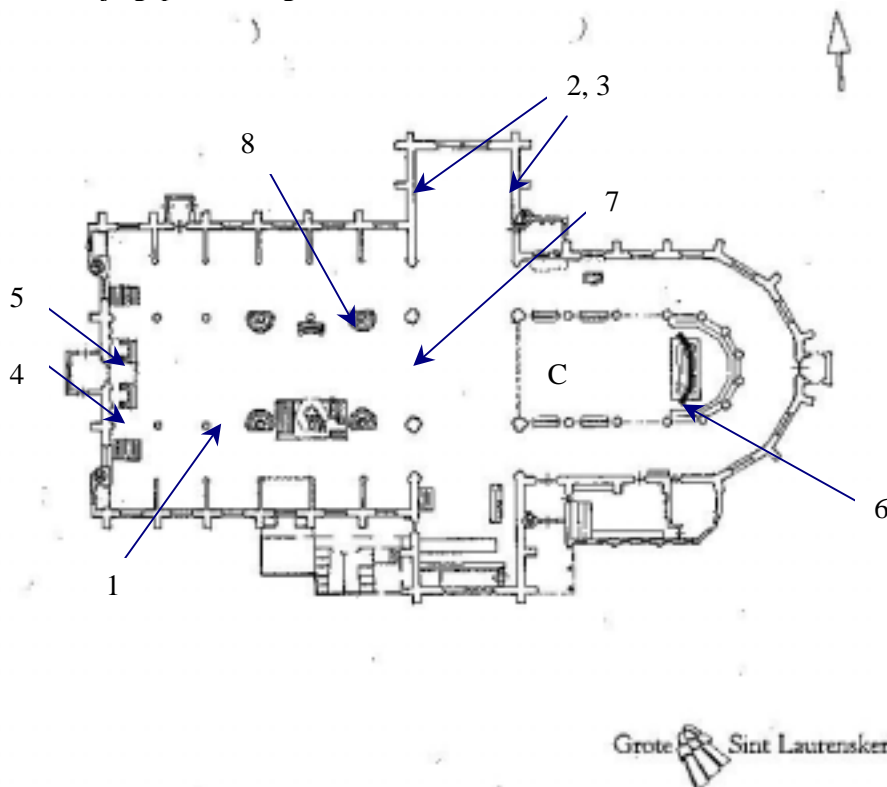
### 3.2 Metingen van luchtvochtigheid en -temperatuur

De metingen van luchtvochtigheid en -temperatuur worden gedaan met behulp van sensoren die zijn ondergebracht in een behuizing (afmetingen ongeveer 10 cm) waarin zijn opgenomen:

- opnemers voor vochtigheid en temperatuur,
- een geheugen voor ongeveer 8000 metingen,
- een processor voor het uitvoeren van de metingen op voorgeprogrammeerde tijden
- een batterij.

De sensoren zijn van het type Escort EJ-IN en EJ-HS (onnauwkeurigheid temperatuur  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ , onnauwkeurigheid relatieve vochtigheid  $\pm 3\%$ )

De sensoren zijn geplaatst volgens onderstaand schema.



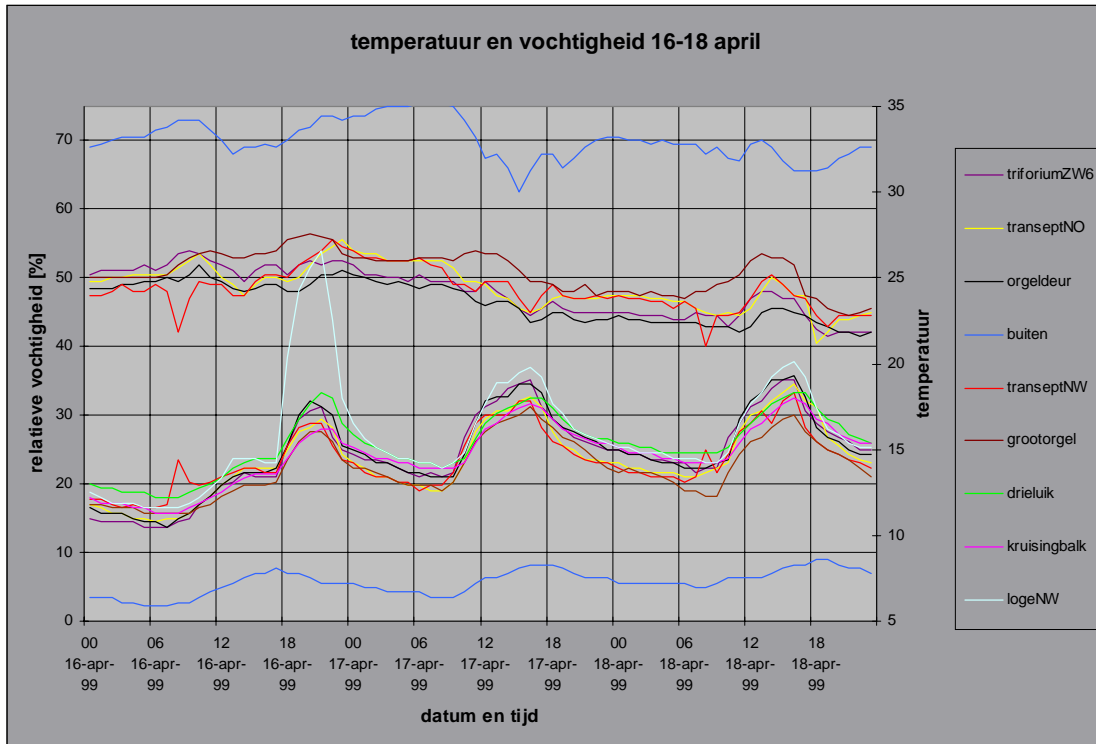
figuur 2: plaats luchttemperatuur en -vochtigheidsmetingen

De meetplaatsen en de motivatie van die meetplaatsen zijn:

1. Triforium ZW6: op de balustrade van het triforium boven een infraroodstraler. Deze opnemer bevindt zich dus in de omgeving van de rookgassen van de straler.
2. Transept NW: een van de koudste plaatsen in de kerk. De sensor bevindt zich op de balustrade
3. Transept NO: idem
4. Orgeldeur: de sensor bevindt zich achter de orgeldeur in de hoek van de kerk op een van de koudste plaatsen van de kerk volgens de infraroodopnamen.
5. Grootorgel: deze sensor is geplaatst binnen de behuizing van het grote orgel.
6. Drieluik: deze sensor is geplaatst op de constructie op het priesterkoor (viering) waarop de drieluik-reproductie is tentoongesteld.
7. Kruisingbalk: deze sensor meet alleen de luchttemperatuur en bevindt zich op een van de balken bij het gewelf boven in de kruising. De gegevens van deze sensor geven informatie over de mate van temperatuurstratificatie (-stapeling) van de lucht.

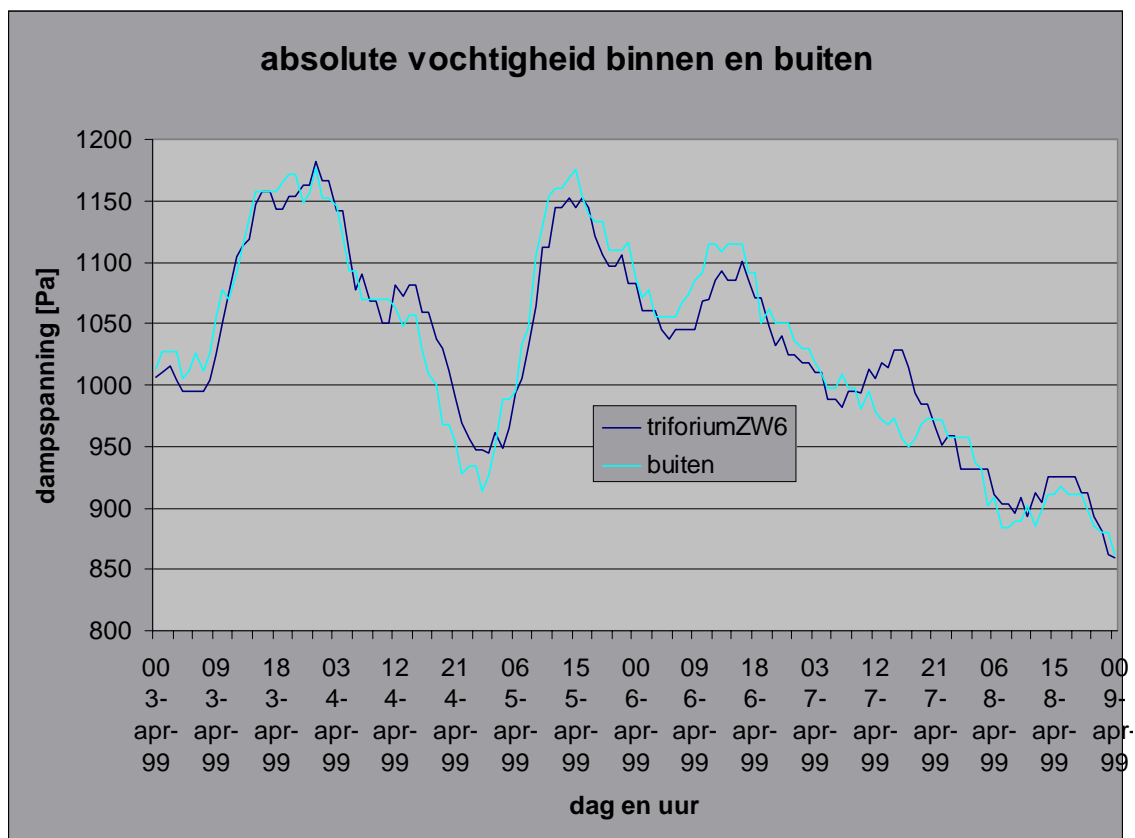


8. LogeNW: deze sensor meet alleen de temperatuur en bevindt zich op de luifel van een van de houten banken die rond de pilaren in het schip zijn aangebracht. De sensor bevindt zich in de directe straling en op korte afstand van een van de infraroodstralers.



figuur 3: De plaatsaanduidingen corresponderen met de voorgaande tekst. Het bovenste deel van de grafiek geeft de relatieve vochtigheidsmetingen weer (linker schaal), het onderste deel van de grafiek de luchttemperaturen (rechter schaal).

Aan de luchttemperaturen is goed te zien in welke periode de stralers gebrand hebben (vooral de logeNW (lichtblauw) wordt erg warm). Tijdens het branden van de stralers is een duidelijke toename van de totale hoeveelheid vocht in de lucht te zien (temperatuur stijgt terwijl relatieve vochtigheid gelijk blijft of zelfs stijgt). Ook is te zien dat de luchtvochtigheid buiten (donkerblauw) invloed heeft op de luchtvochtigheid binnen. Dat is de reden dat de piek in de luchtvochtigheid op 17 april ontbreekt en op 18 april wel optreedt. Veel duidelijker is het verband tussen de vochtigheid van buiten en binnen te onderkennen in figuur 4, waarin de dampspanning (een maat voor de absolute vochtigheid) gedurende enkele dagen, waarbij de stralers niet gebrand hebben wordt weergegeven. De waargenomen sterke samenhang tussen de vochtigheid binnen en buiten de kerk duidt op een sterke infiltratie van buitenlucht. Opmerkelijk is de discontinuïteit in de meetwaarden op 16 april bij transeptNW (fig. 3 rood). Dit is zeer waarschijnlijk te verklaren uit directe zoninstraling op of in de buurt van de sensor. Hierdoor stijgt de temperatuur plaatselijk waarmee ook de relatieve vochtigheid daalt.



figuur 4: absolute luchtvochtigheid binnen volgt de luchtvochtigheid buiten (met enkele uren vertraging) ten gevolgen van de sterke infiltratie

De bovenstaande grafieken zijn een bewust gekozen steekproef uit het totale aantal meetresultaten (in de bijlage zijn grafieken te vinden van andere meetdagen). Het weergeven van alle meetresultaten in grafiekvorm draagt niet bij aan de overzichtelijkheid van de gegevens. Daarom is gekozen voor een weergave van de belangrijkste uitkomsten in een tabel. In die tabel zijn de gemeten, en de uit die meetwaarden berekende getallen opgenomen. De dauwpunten zijn berekend uit de temperatuur en de relatieve vochtigheid. De vochtinhouden zijn berekend uit het gasverbruik en uit de temperatuur en relatieve vochtigheid. De hersteltijd is geschat uit het verloop van temperatuur en vochtigheid in de grafieken.

tabel 1: Metingen tijdens evenementen met infraroodverwarming

	buiten		binnen				rookgas	gemeten	hersteltijd vochtig.	
	T	Td	Td start	Td eind	T start	T eind				laagste opp.temp.
5/7-mrt-99	6	1,5	3	10	12	19,5	13	6	2,2	7
21-mrt-99	7	4	3,5	9	12	18		2,7	2,4	12
16-apr-99	6,5	2	4	7	14	17		1,8	1,7	9
18-apr-99	7,5	1	1	8	14	18		2,3	1,7	7

Td is dauwpunt (de temperatuur waarbij waterdamp uit de lucht met de gegeven vochtigheid condenseert)

nauwkeurigheid dauwpunt: 1,0 graad  
nauwkeurigheid temperaturen: 0,5 graad  
nauwkeurigheid vochtinhoud: 0,5 gram

Uit de tabel blijkt dat de verhoging van het dauwpunt maximaal 7 graden is geweest en dat de hersteltijd van de vochtigheid 7 tot 12 uur bedroeg (verdere conclusies staan in hoofdstuk 4).

### 3.3 Infiltratiemetingen (uitgevoerd door Technische Universiteit Eindhoven, TUE)

#### 3.3.1 Meetperiode

De meetperiode ving aan op 13 januari om 13:30 uur, net voor het in bedrijf stellen van de 43 gas-infrarood stralers. De stralers waren vervolgens gedurende ca 3 uur in bedrijf. De metingen werden de volgende dag om 12 uur 's middags afgerond. Gedurende de meetperiode werden de gemeten data iedere 5 minuten gelogd en na afronding uitgelezen.

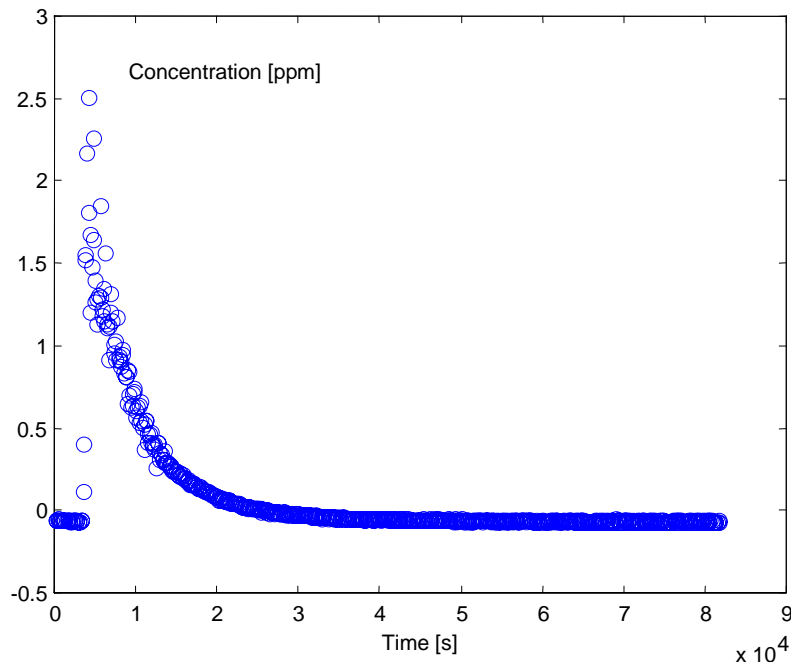
Voorafgaande aan de metingen werden buiten en binnen luchttemperaturen en relatieve vochtigheden gemeten. De buitenluchttemperatuur bedroeg 3,8 °C met een relatieve vochtigheid (RV) van 75 % en de binnenluchttemperatuur bedroeg bij aanvang van de metingen 11,1 °C ter plaatse van de viering, bij een RV van 48 %.

#### 3.3.2 Meetmethode

Het infiltratiegedrag van een grote kerk als de Sint Laurenskerk is door haar grote hoogte, omvang en volume moeilijk te bepalen. Metingen hiernaar zullen daarom slechts een indicatief karakter hebben. Indien in de kerk volledige, homogene menging op zou treden, dan kan het infiltratievoud bepaald worden uit de exponentiële afname van de concentratie van een in de kerk door meting te traceren gas, een tracergas. Controle op redelijke menging van het gas is echter een voorwaarde. In de Grote kerk is daarom op een enkele plaats, het hoogkoor, een tracergas SF<sub>6</sub> ingebracht. De concentratie van het tracergas is geanalyseerd met een Brüel & Kjaer gasanalyser, type multigas monitor 1302. Om de concentratie op verschillende plaatsen in de kerk te kunnen meten is een multiplexer gebruikt, die via een ventielsysteem met slangetjes een monstername van het gas op 6 ver uit elkaar gelegen plaatsen sequentieel toevoert aan de gasanalyser. Op deze wijze zijn monsternamen op maximaal 25 meter afstand van de B&K genomen. De monsternamen vonden plaats op ca 2,5 m hoogte op meetstatieven in het west-schip, het zuid-transcept, het noord-transcept, het hoogkoor (oost), op ca 4 m hoogte aan een kroonluchter in de viering en op ca 1,5 meter hoogte ter plaatse van de multiplexer, opgesteld in de viering.

### 3.3.3 Resultaten

In onderstaande grafiek zijn de resultaten van de metingen weergegeven. Het gemiddelde infiltratievoud van de Laurenskerk bedraagt  $0,75 \pm 0,05$  l/h\*. Deze relatief grote infiltratie bij het grote volume van de kerk is met grote waarschijnlijkheid te wijten aan het houten gewelf van de kerk, dat door kieren en naden behoorlijk lek is.



*Figuur 5: Gemeten concentratieverloop SF<sub>6</sub> op de 6 verschillende meetplaatsen. Na 30000 seconden (ruime 8 uur) is de concentratie vrijwel tot nul genaderd.*

Verdere gegevens over de metingen door TUE zijn op te vragen bij de heer ir. H.L. Schellen Capaciteitsgroep FAGO, TUE.

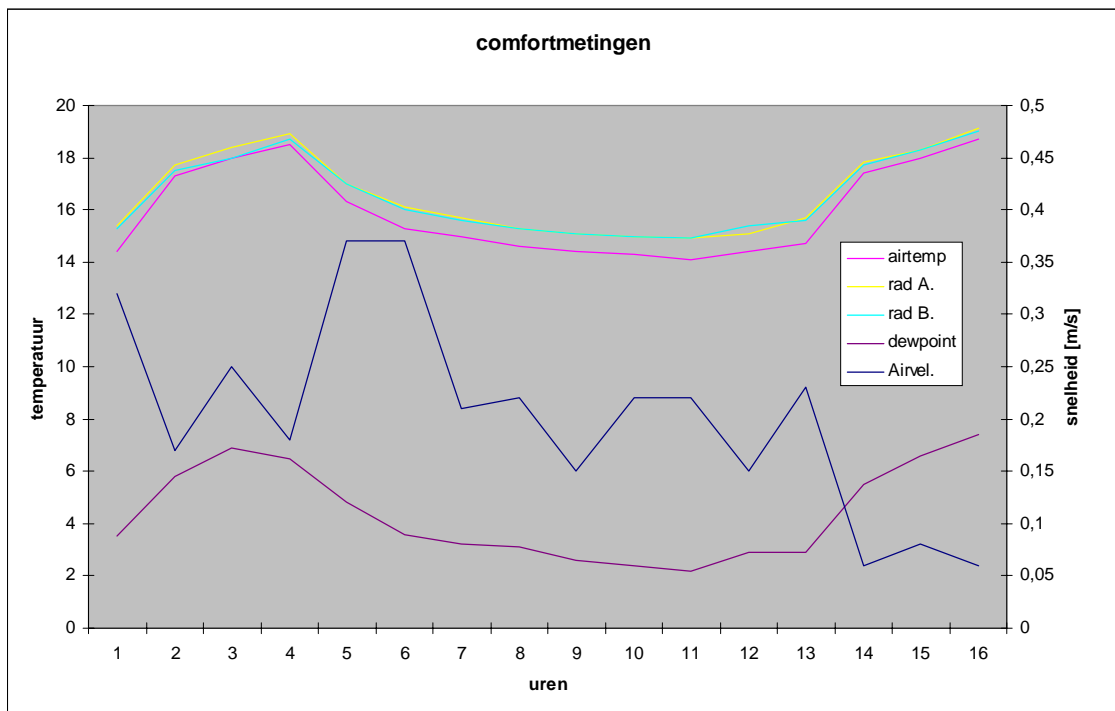
Naschrift ECN bij de resultaten:

Het verloop van de concentratie van het tracergas komt in orde van grootte overeen met het verloop van de concentratie van de waterdamp in de kerk. De absolute vochtigheid in de kerk komt na het uitschakelen van de warmtestralers in 7 tot 12 uur terug op de waarde van voor de aanvang van de verwarming. Deze basisvochtigheid is sterk gerelateerd is aan de absolute vochtigheid buiten de kerk (zie vorige paragraaf).

\*een hoeveelheid lucht met een volume van  $0,75 \pm 0,05$  maal de inhoud van de kerk lekt per uur uit de kerk door kieren en openingen en eenzelfde hoeveelheid infiltreert dus ook naar binnen.

### 3.4 Comfortmetingen

De comfortmetingen zijn gedaan met de Brüel & Kjaer Indoor Climate Analyser Type 1213. Een comfortmeting bestaat uit metingen van luchttemperatuur, luchtvochtigheid, stralingsasymmetrie en luchtsnelheid. De comfortmetingen zijn gedaan op 18 april. De stralers zijn ontstoken en er zijn metingen gedaan op het priesterkoor ("C" in figuur 2). Later zijn ook nog op andere plaatsen in de kerk vergelijkende metingen gedaan.



figuur 6: Luchttemperatuur, stralingstemperaturen, dauwpunt (linkerschaal) en luchtsnelheid (rechtterschaal) tijdens 16 uren gemeten (vanaf 's avonds 7 uur de volgende dag 12 uur)

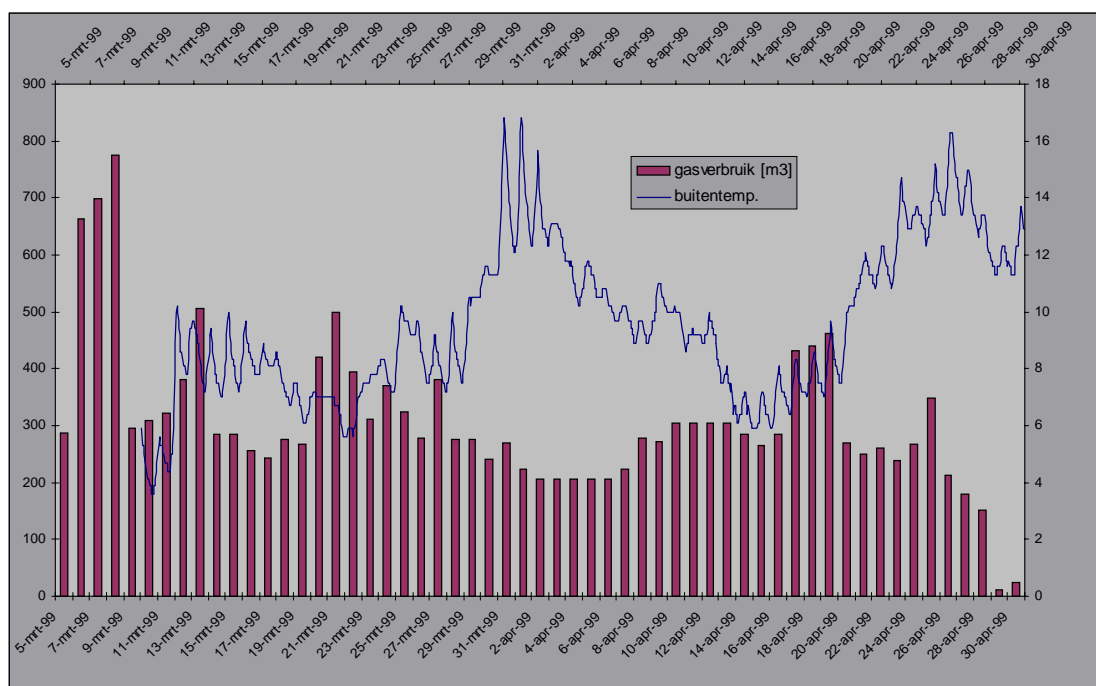
In de grafiek is het opwarmen te zien van de lucht en de toename van de stralingswarmte (uren 1 tot en met 4). Daarna is de verwarming uitgezet (nacht). De volgende morgen rond uur 13 van de meting is de stralingsverwarming weer opgestart. We zien dat de stralingsasymmetrie bijzonder laag is (er is gemeten midden tussen de stralers). Ook is te zien dat de luchtsnelheid tijdens het verwarmen op de meetplaats afneemt.

Uit andere metingen blijkt dat de luchtsnelheid op de meeste plaatsen afneemt maar op sommige plaatsen toeneemt tijdens het stralen. Tussen de stralers is de stralingssymmetrie meestal goed te noemen.

De luchttemperatuur en de stralingstemperaturen liggen binnen het behaaglijkheidsgebied. De luchtsnelheid ligt gedeeltelijk buiten het behaaglijkheidsgebied. De bovengrens voor behaaglijkheid wordt bij luchtsnelheden gesteld op 0,15 m/s.

### 3.5 Energiegebruik

In figuur 7 is te zien dat de vloerverwarming constant heeft gebrand en dat de stralingsverwarming af en toe is gebruikt op vol- of op deelvermogen (de vloerverwarming gebruikt gemiddeld 250 m<sup>3</sup> aardgas per dag; het meerdere kan aan de stralingsverwarming worden toegeschreven). Bij toepassing van infraroodverwarming zou men een stookstrategie kunnen hanteren waarbij een basisluchttemperatuur van ongeveer 10 graden in principe zonodig door middel van de vloerverwarming wordt gehandhaafd en waarbij de resterende warmtevraag door infrarood wordt geleverd. In dat geval zou de vloerverwarming tussen 29 maart en 11 april en na 22 april tijdens bovenstaande meetperiode kunnen worden uitgeschakeld. De gasbesparing die daarmee wordt bereikt is aanzienlijk zoals uit de grafiek blijkt.



figuur 7: gasverbruik en buitentemperatuur in maart en april 1999

## 4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 4.1 Infraroodmetingen

In de directe omgeving van de stralers worden gedeelten van de aangestraalde oppervlakken van bijvoorbeeld de zuilen meer dan 50 °C! Het gevaar voor materiaalbeschadiging door thermische spanningen is hierdoor groot. De houten luifels worden ook plaatselijk te warm zoals op de infraroodfoto's te zien is. In de toekomst moeten deze situaties voorkomen worden. Hetzelfde geldt voor de historische tekstpanelen en het scheepsmodel.

De koudste vlakken -met het grootste condensgevaar tijdens het verwarmen met gasstralers- in de kerk zijn:

- de raamvlakken,
- de gewelddelen in de zijkapellen van het schip die gericht zijn naar het raam,
- de muurvlakken achter de deuren van het orgel,
- de meest noordelijke triforia van het noordelijk transept,
- de oostelijke gewelven van de omgang in de viering (waar geen stralers in de buurt zijn).

Het is aan te bevelen op deze plaatsen permanente oppervlaktetemperatuurmetingen uit te voeren tijdens het stoken met gasstralers. De meetwaarden kunnen samen met een dauwpuntsmeting als input voor de regeling ter begrenzing van het vermogen dienen, waardoor condensatie op deze vlakken kan worden voorkomen.

De terugliggende vlakken in de triforia van het schip zijn koud ten opzichte van de omgeving maar minder koud dan de bovengenoemde delen. Langs de dakrand zijn ook relatief koude steenvlakken te vinden. Het houten gewelf is relatief minder koud.

### 4.2 Temperatuur en vochtmetingen

Op de grafiek van de vochtmetingen gedurende het weekend van 16-18 april (en 19-22 maart zie bijlage) is duidelijk de toename van de absolute vochtigheid door de stralers te zien. Daarbij moet opgemerkt worden dat de vochtigheid op verschillende plaatsen in de kerk op hetzelfde tijdstip niet meer dan 1 g/kg droge lucht verschilt. Dat betekent dat de waterdamp zich gelijkmatig over de inhoud van de kerk verspreidt. Uit figuur 4 blijkt dat de absolute vochtigheid en dus het dauwpunt van de lucht in de kerk het dauwpunt buiten de kerk met enige vertraging volgt als niet met de stralers verwarmd wordt. Tijdens de stralingsverwarming heeft de vochtigheid buiten dus ook invloed op de hoogte van de vochtigheid die binnen wordt bereikt. De absolute vochtigheid van de buitenlucht beweegt zich tijdens de metingen rond de 4 gram per kg droge lucht en lager. Dit is een normale waarde als we kijken naar het Verkort Referentie Jaar van het KNMI. Na het doven van de stralers zakt de vochtigheid weer snel naar een waarde die dicht bij de vochtigheid van buiten ligt (binnen 7 tot 12 uur). Dat wijst erop dat de infiltratie van buitenlucht (en de lekkage van damp naar buiten) tijdens de metingen hoog was.

### 4.3 Conclusies ten aanzien van condensatie

Bij 6 graden buitentemperatuur is de laagste door de camera gemeten oppervlaktetemperatuur (op het glas na), na 4 uur stralerbedrijf, ongeveer 13 graden. De gemiddelde binnentemperatuur was daarbij 18 graden (de nachttemperatuur was 12 graden). Het glas is kouder dan 13 graden. Het dauwpunt stijgt tijdens het bedrijf van de stralers (meestal ongeveer 8 uur) met maximaal 7 graden. Dit brengt ons tot de volgende overwegingen.

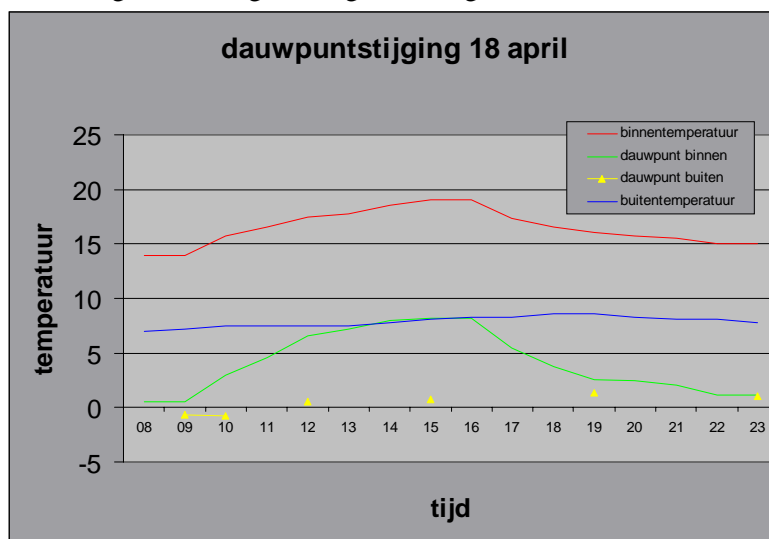
Als de stralers niet branden liggen de dauwpunten binnen en buiten de kerk steeds dicht bij elkaar en beide liggen vrijwel altijd onder de buitentemperatuur (zie figuur 8: de groene en de gele lijn). Omdat de binnentemperatuur door de vloerverwarming eventueel aangevuld met stralingsverwarming meestal meer dan 10 graden hoger is dan de buitentemperatuur is er dus aanvankelijk een marge van minstens 10 graden ten opzichte van condensatie bij het dauwpunt (de rode lijn). Als het dauwpunt ten gevolge van vochttoevoer door de branders met 7 graden stijgt is die marge verkleind tot 3 graden (groene lijn). Uit de metingen blijkt dat de koudste plaatsen in de kerk niet meer dan 5 graden kouder zijn dan de gemiddelde binnentemperatuur (op het glas na, dat is kouder). Zolang het dauwpunt buiten dus enkele graden lager ligt dan de luchttemperatuur (wat bijna altijd het geval is) is er geen condensgevaar in de kerk (de ramen buiten beschouwing gelaten). Tijdens de metingen lag het dauwpunt minstens 3 graden en maximaal 6 graden lager dan de buitentemperatuur. De verhoging van het dauwpunt tijdens het stoken met de stralers varieerde van 3 tot 7 graden. Uit combinatie van cijfers uit tabel 1 kan men concluderen dat de marge ten opzichte van condensatie tijdens de metingen tussen 2 en 9 graden bedroeg.

Extreme situaties kunnen echter roet in het eten gooien, zoals een hoge vochtigheid bij vriezend weer wat overigens zelden voorkomt. Tijdens de metingen is gebleken dat de omstandigheden iedere dag anders zijn en behoorlijk kunnen verschillen. De verversing van de kerk met buitenlucht hangt samen met het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, de windsterkte en -richting en het verwarmingsvermogen. De hersteltijd van de vochtigheid na het stoken met stralers lijkt samen te hangen met de verversing van de lucht in de kerk en het dauwpunt buiten.

#### 4.3.1 Het opwarmen en afkoelen

In de onderstaande figuur wordt de stijging weergegeven van het dauwpunt en de luchttemperatuur in de kerk tijdens stralingsverwarming en de afkoeling na het afschakelen. Bij een te snelle toename van het dauwpunt kan op plaatsen die niet goed worden aangewarmd, zoals de ramen, in sommige gevallen condensatie ontstaan (dauwpunt hoger dan oppervlakte-temperatuur).

Tijdens het afkoelen neemt het dauwpunt sneller af dan de luchttemperatuur. Condensatie door temperaturodaling na het afschakelen van de verwarming is dus niet erg waarschijnlijk (steenachtige oppervlakken koelen langzamer af dan de lucht). De hersteltijd van de oorspronkelijke vochtigheid is volgens de grafiek ongeveer 7 uur.



figuur 8: de figuur geeft de stijging weer van het dauwpunt en de luchttemperatuur in de kerk tijdens stralingsverwarming en de afkoeling erna.



### 4.3.2 De ramen

De oppervlaktetemperatuur van het glas in lood benadert de buitentemperatuur. Op het glas kan dus condens ontstaan. Dit is echter tijdens de metingen niet geconstateerd. Navraag bij het personeel wijst uit dat geen condensatie op de ramen is geconstateerd tijdens de stralingsverwarming in de afgelopen twee stookseizoenen. De constructie van de ramen is zodanig dat eventueel condensvocht adequaat door openingen in de draagconstructie van het glas in lood naar buiten kan worden afgevoerd. Deze openingen veroorzaken bij regen en harde wind waterlekage langs de ramen waardoor sporen van lekkage worden gevormd aan de onderzijde van de ramen. Condensatie kan door deze sporen dus niet worden aangetoond. Omdat de ramen de koudste plaatsen zijn in het interieur van de kerk zal, bij toename van de vochtigheid hier als eerste eventueel condensatie optreden. Condensatie op de ramen is dus een indicatie dat de vochtigheid in de kerk toeneemt en kan als waarschuwingssignaal worden beschouwd voor nadere metingen en eventueel ingrijpen in de regeling van het verwarmingsvermogen voordat gevaar ontstaat voor absoluut te vermijden condensatie op kostbare interieurdelen.

Mensen produceren waterdamp tijdens het uitademen en door verdamping op de huid. Bij grote evenementen zoals bijvoorbeeld tijdens de kerstnacht kan het aantal bezoekers van de kerk zo groot zijn dat de vochtproductie en de warmte-ontwikkeling in dezelfde orde van grootte ligt als door de infraroodstralers. Ook in deze omstandigheden is condensatie met name op ramen niet uit te sluiten.

### 4.3.3 De zolders

De luchttemperaturen op de zolders boven de gewelven zijn in de bijlage weergegeven. Deze temperaturen liggen afhankelijk van de windrichting en zonnestraling vaak dicht bij de buitentemperaturen dan bij de binnentemperaturen. De lage temperaturen op de zolders is gedeeltelijk toe te schrijven aan de hoge verversing met buitenlucht. De luchtverversing op de zolders is zeer groot omdat het dakhout niet kierdicht is. Bovendien bevindt zich langs de dakrand een spleetvormige opening ter grootte van enkele centimeters. De verversing op de zolders is in de meeste gevallen veel hoger dan in de kerk zelf omdat via de zolders de toe- en afvoer van lucht van en naar het inwendige van de kerk maar ook extra dwarsventilatie van en naar buiten plaatsvindt. Het dauwpunt van de lucht op zolder zal tijdens het branden van de stralers dan ook lager zijn dan het dauwpunt in de kerk zelf. Condensatie op de zolders tijdens verwarming in de winter is daarom niet erg waarschijnlijk maar onder bepaalde omstandigheden wel mogelijk. Het is daarom aan te bevelen om ook op de zolders enkele (permanente) metingen te doen.

## 4.4 Geldigheid van de meetresultaten

Door de zachte winter zijn metingen rond nul graden buitentemperatuur en daaronder niet mogelijk geweest. De metingen van 7 maart waarbij de branders op volle capaciteit hebben gebrand wijzen echter uit dat bij hogere input van warmte ook de uitwisseling met buiten sneller gaat (lage vochttoename en korte hersteltijd van de oorspronkelijke vochtigheid). Dit kan echter ook het gevolg zijn van de lagere vochtigheid buiten waarmee lage buitentemperaturen meestal gepaard gaan. Meerdere metingen bij lage temperaturen moeten hierover uitsluitsel geven.

## 4.5 Comfortmetingen

Uit de comfortmetingen blijkt dat alleen *tussen* stralers een comfortabel stralingsniveau mogelijk is bijvoorbeeld in het schip. Echter niet op alle plaatsen in het schip is de straling voldoende symmetrisch.

Over het algemeen blijkt het stralingsniveau zeer hoog te zijn afgaande op de grote luchttemperatuurstijging in de kerk en de soms hoge oppervlaktetemperaturen, die worden gemeten. Volgens bronnen in de literatuur kan met infraroodverwarming een gevoels-

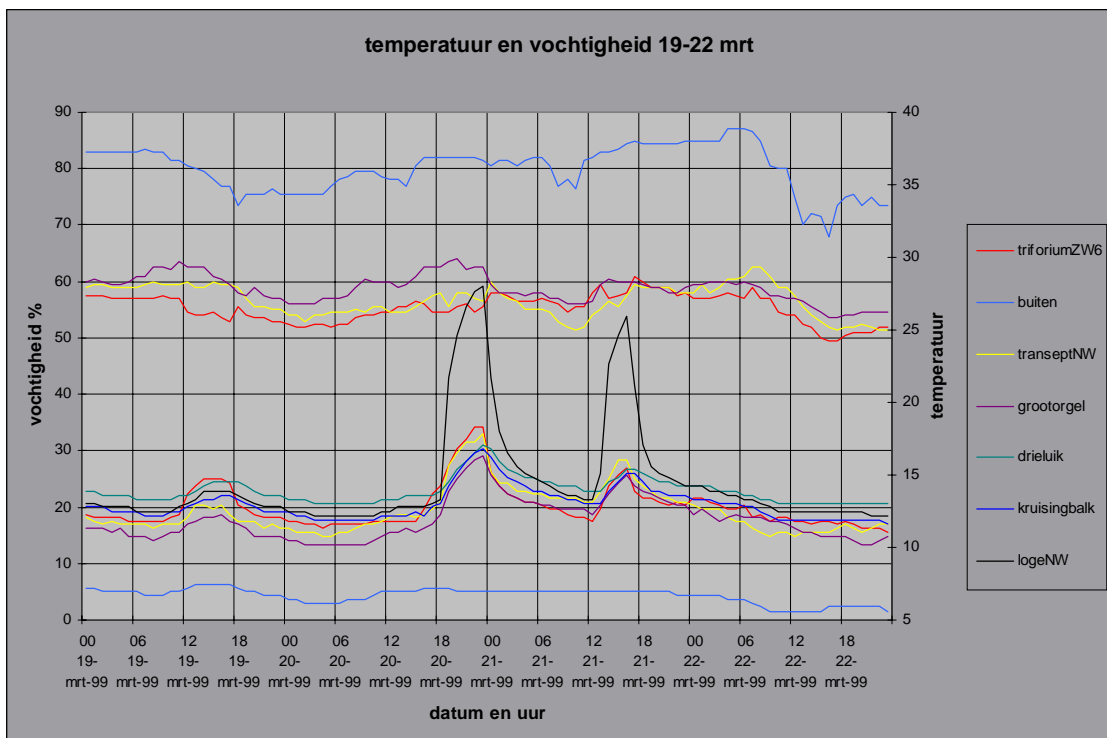
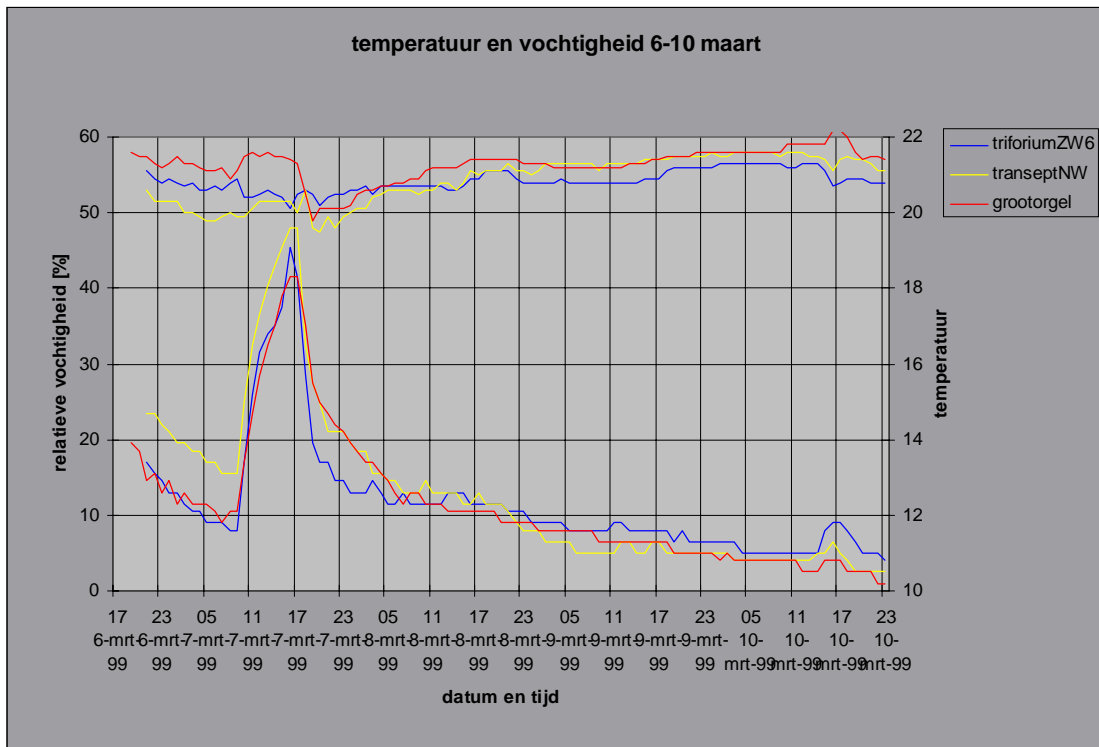
temperatuur van 20 graden worden gecreëerd bij een luchttemperatuur van 10 graden en een vermogen van maximaal 100 Watt per vierkante meter. Het huidige stralingsvermogen ligt te hoog ten opzichte van de luchttemperatuur. De luchttemperatuur in de kerk kwam tijdens de metingen zelfs in de buurt van 18 graden zodat moet worden geconcludeerd dat behalve het stralingsvermogen ook de basistemperatuur in de kerk die met de vloerverwarming wordt gerealiseerd een stuk omlaag kan. Zowel het stralingsvermogen als het vloerverwarmingsvermogen kan dus omlaag. Om dit te kunnen doen is een goede regeling nodig en wat betreft de infraroodstralers een goede, bij voorkeur traploze regeling.

De luchtsnelheden nemen in tegenstelling tot de verwachting uit eerdere theoretische berekeningen veelal niet toe. Op de meeste plaatsen nemen de snelheden zelfs af. Een oorzaak hiervoor kan gezocht worden in de grote opwaartse luchtstroming die ter hoogte van de branders wordt veroorzaakt door de verbrandingsgassen (het rendement van de branders ligt immers rond de 50%, waardoor de helft van de verbrandingswarmte terecht komt in de omgevingslucht die daardoor sterk wordt opgewarmd en snel opstijgt). Deze luchtstroming verstoort de koudeval. Op bepaalde plaatsen echter neemt de luchtsnelheid niet af omdat de koude lucht toch *ergens* omlaag moet komen. De plaatsen waar dit gebeurt zijn niet te voorspellen. Uit ervaring blijkt dat in de kruising aan de kant van het zuidtransept, in het noordtransept, onder de zuidelijke deur van het orgel en in de omgang de tocht het grootst is. Hiervoor moeten specifieke oplossingen worden bedacht. Bij de hoge transeptramen kan voor avondevenementen gedacht worden aan een gordijn dat vanaf de balken wordt neergelaten. Dit zou de koudeval, de koudestraling en de geluidsuitstraling naar buiten toe kunnen beperken. In het schip zou op specifieke, nader te bepalen plaatsen waar de tocht groot is kunnen worden gewerkt met knieschotten die tocht over de grond verstoren (te vergelijken met de boxen bij een tennisevenement).

#### 4.6 Aanbevelingen

Resumerend kan worden gezegd dat (aardgas-)warmtestralers gevaar opleveren voor plaatselijke oververhitting van het interieur van het kerkgebouw zodat goed moet worden gelet op de intensiteit en richting van de straalbundel. Het is aan te bevelen om, na de eventuele installatie van een permanente stralingsverwarming, een controle-infraroodmeting uit te voeren om na te gaan of oververhitting van delen van het interieur optreedt. Condensatie op delen van het interieur (behalve op het glas van de ramen) kan worden voorkomen door de specifieke omstandigheden zoals de duur van het stoken, het vermogen en het dauwpunt van de lucht te bewaken en te beheersen. Aanbevolen wordt om een permanent meet- en regelsysteem in de kerk aan te leggen dat condensgevaar signaleert (aan de hand van het dauwpunt en de oppervlaktetemperaturen) zodat de branders tijdig kunnen worden getemperd als dat nodig mocht zijn. Voor het orgel leveren de stralers geen direct gevaar op: bij het verwarmen wordt de lucht vochtiger en niet droger zoals bij andere verwarmingstechnieken het geval is. Voor het comfort is het van belang de infraroodstralers te kunnen regelen zodat niet méér straling wordt aangewend dan strikt noodzakelijk is. Teveel straling en asymmetrische straling veroorzaakt een oncomfortabel gevoel. Het tochtprobleem blijft bij stralingsverwarming de kop op steken en moet met gerichte maatregelen worden bestreden.

## BIJLAGEN



figuur 9 en 10: Het bovenste deel van de grafiek geeft de relatieve vochtigheidsmetingen weer (linker schaal), het onderste deel van de grafiek de luchttemperaturen (rechter schaal).

