

Hållbar uppvärmning i kyrkor - för energieffektivisering, bevarande och komfort

Sebastian Rahdevi

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2014
Rapport TVIT--14/5046



Lunds Universitet

Lunds Universitet, med åtta fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 112 000 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 800 anställda och 47 000 studerande som deltar i ett 280 utbildningsprogram och ca 2 200 fristående kurser.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmade hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Hållbar uppvärmning i kyrkor – för energieffektivisering, bevarande och komfort

Sebastian Rahdevi

© Sebastian Rahdevi
ISRN LUTVDG/TVIT--14/5046--SE(106)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 hp och är utfört på avdelningen för Installationsteknik och Byggnadsfysik på Lunds Tekniska Högskola under våren 2013.

Jag vill tacka mina handledare Birgitta Nordquist och Lars-Erik Harderup för stödet och alla synpunkter som möjliggjort arbetet. Jag vill även tacka andra i personalen på avdelningen för all hjälp under arbetets gång.

Dessutom vill jag tacka Strövelstorps församling för att de engagerat sig och ställt upp med en kyrka att studera, samt Lunds stift för att de tagit sig tid att dela med sig av sina kunskaper och erfarenheter inom ämnet.

Sammanfattning

Titel:	Hållbar uppvärmning av kyrkor - för energieffektivisering, bevarande och komfort
Författare:	Sebastian Rahdevi
Handledare:	Birgitta Nordquist, institutionen för Bygg- och miljöteknologi, avdelningen för installationsteknik, Lunds tekniska högskola. Lars-Erik Harderup, institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, avdelningen för byggnadsfysik, Lunds tekniska högskola
Problemställning:	Kyrkor är ofta gamla och helt oisolerade byggnader med kulturhistoriskt värdefulla inventarier. Detta gör uppvärmningen både kostsam och riskfylld. Felaktig styrning kan leda till skadliga temperatur- och fuktillstånd för känsliga föremål och inventarier. Förutom hänsyn till energianvändning och bevarande måste man även ta hänsyn till människorna som ska använda kyrkan, både som arbetsplats och besökare. Starby kyrka ska undersökas och olika metoder för hållbara uppvärmningssystem ska analyseras.
Syfte och mål:	Syftet med rapporten är att ta fram ett genomarbetat underlag och sedan presentera det till Strövelstorps församling. Detta ska omfatta både aspekter kring effektivisering av deras energianvändning och ett bra klimat för bevarande, samtidigt som hänsyn måste tas till komforten för besökarna.
Metod:	En litteraturstudie har gjorts för att undersöka vad olika forskare har kommit fram till inom ämnet . En sammanfattning och fastställande av krav och kriterier för uppvärmningen har gjorts utifrån litteraturstudien. När det gäller statusbedömning och klimatanalys har egna undersökningar och mätningar genomförts, vilka bl a omfattar mätningar med loggrar som mäter temperatur och relativ fuktighet. Klimatet har undersökts både vid användning av kyrkan och då den är tom genom att mätningen skett ca två dagar innan förrättning, under förrättning, samt ca två dagar efter. Slutligen kommer analys och bedömningar leda fram till en sammanfattning.
Slutsatser:	Från litteraturstudien ser man att det inte finns ett givet svar på hur uppvärmningen i kyrkor bör styras. Rekommendationerna från olika

författare skiljer sig ofta åt och är i vissa fall helt motstridiga. Man kan också se att i många fall är kraven även motstridiga mellan de olika aspekterna bevarande, komfort och energi. Därför blir en kompromiss mellan kraven nödvändig.

Från mätningarna kan man konstatera att man i Starby kyrka haft problem med i princip alla aspekter kring uppvärmning av kyrkor, och att åtgärder därför bör vidtas. För närvarande värms kyrkan intermittent med åldersstigna direktverkande bänkvärmare. Om intermittent uppvärmning ska tillämpas framåt kan utifrån ett hållbarhetsperspektiv ett alternativt uppvärmningssystem omfatta installation av ett luftvärmepumpssystem vilken håller en grundvärme då kyrkan inte används och nya strålningsvärmare i bänkarna vilka höjer temperaturen vid förrättningar. Ur energibesparingsynpunkt ger detta en reducerad energianvändning. Övriga antikvariska aspekter får beaktas kring detta.

Nyckelord:

Uppvärmning, bevarande, energieffektivisering, inneklimat, relativ fuktighet, kyrkor, temperatur, hållbart

Abstract

- Title:** Sustainable heating of churches - for energy efficiency, preservation and comfort
- Author:** Sebastian Rahdevi
- Supervisor:** Birgitta Nordquist, Department of Building and Environmental Technology, Division of Building Services, Lund University Faculty of Engineering
Lars-Erik Harderup, Department of Building and Environmental Technology, Division of Building Physics, Lund University Faculty of Engineering
- Question:** Churches are often old and completely uninsulated buildings with cultural-historical valuable items. This makes heating the building both expensive and risky. Incorrect controlling may lead to adverse conditions for some delicate items regarding temperature and relative humidity. Apart from consideration for energy consumption and preservation, you also need to consider human comfort for the visitors and the people working there.

The church in Starby will be examined and different methods for sustainable heating of churches will be analyzed.
- Purpose:** The purpose of this thesis is to present a thorough base for decision-making for the parish. This will include aspects to improve energy efficiency and to create a better climate for preservation, and at the same time taking into account the comfort of the users.
- Method:** A literature study has been done to investigate various recommendations from different authors. Results from the literature study are presented. An evaluation of the condition of the building and the indoor climate has been done through investigations and measurements of the climate, including measurements of temperature and relative humidity with loggers over time. The measurements has been executed about two days before, during, and about two days after a regular church service. Finally analyze and evaluation will lead to summary and conclusion.
- Conclusions:** My conclusion from my literature study is that there is no obvious answer to how to control the heating and indoor climate in churches. The recommendation from different authors varies and sometimes conflict. Furthermore, the recommendations and demands for the

aspects of preservation, comfort and energy conflict with each other. A compromise is therefore necessary.

From my measurements and a historic view of the building I can see that in Starby church they have had troubles with all aspects of heating churches, and that they should take actions. The church is now heated by old electric bench radiators. If intermittent heating is to be used in the future, a more sustainable alternative might be using a heat pump for the base temperature and then new bench radiators to raise the temperature during services. This will reduce the energy consumption. Other Antiquarian aspects must also be considered.

Keywords:

Heating, preservation, energy efficiency, indoor climate, relative humidity, churches, temperature, sustainable

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning	5
Abstract	7
Innehåll	9
1 Inledning.....	11
1.1 Bakgrund.....	11
1.2 Uppgift.....	13
1.3 Avgränsningar	13
1.4 Syfte.....	13
1.5 Rapportens disposition.....	13
1.6 Mål.....	14
1.7 Frågeställning.....	14
1.8 Metodik.....	14
2 Litteraturstudier och teorier.....	15
2.1 Historik kring uppvärmning av kyrkor och dess problematik	15
2.2 Skador på föremål och inventarier.....	16
2.3 Krav på inomhusklimatet i kyrkor.....	21
2.4 Strategier för uppvärmning av kyrkor	32
2.5 Uppvärmningssystem och värmeförsel	35
2.6 Energieffektivisering.....	38
2.7 Hur arbetar man med utbyte av värmesystem i kyrkor?.....	43
3 Byggnadsbeskrivning Starby kyrka.....	47
4 Mätningar i Starby kyrka	59
4.1 Modifiering av skalen	59
4.2 Testmätning	60
4.3 Förutsättningar.....	62
4.4 Resultat.....	64
4.5 Kalibrering.....	67
4.6 Mätningar som utförts av Gunnar Arvidsson (från församlingen)	70
5 Analys.....	77
5.1 Optimalt inneklimat för människor	79
5.2 Bäst inneklimat för bevarande.....	81
5.3 Bäst inneklimat ur energisynpunkt.....	81

5.4	Kompromisser	81
5.5	Analys av strategier och system	83
5.6	Energi- och effektbehov	85
5.7	Ekonomi	92
6	Slutsatser	93
6.1	Slutsatser från litteraturstudien	93
6.2	Slutsatser från mätningarna	93
6.3	Riskbedömning	95
6.4	Möjliga åtgärder	95
6.5	Risker efter åtgärder	97
7	Diskussion	99
8	Litteratur	103

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Energieffektivisering av kyrkor är ett aktuellt och intressant ämne dels för att det finns så många kyrkor och därmed potential för stora besparingar, och dels för att det är en komplex process som kräver kunskap inom flera områden för att inte konsekvenserna ska bli destruktiva, dvs. förstörda inventarier och byggnader. Uppvärmningen leder till stora kostnader eftersom kyrkorna i stort sett är oisolerade, och dessutom kan det leda till skador på kulturhistoriskt värdefulla inventarier om inte klimatvariationer och skadliga fuktillstånd och temperaturer beaktas. Detta genererar både kostnader i form av restaurering, men även så kan oersättliga kulturskatter förstöras permanent. Därmed finns ett stort behov av att beakta uppvärmningen och inomhusklimatet så att de både blir energimässigt och bevarandemässigt hållbara i framtiden.

Skulle man lyckas sänka kostnaderna för uppvärmning av Sveriges kyrkobyggnader med endast 1 % så skulle det innebära en besparing för Svenska kyrkan på hela ca 10 miljoner kronor. Det är nästan överkliga summor och visar vilken stor potential som finns och att man kan göra stor skillnad med endast små förbättringar. Men möjliga åtgärder är begränsade eftersom de flesta byggnaderna är kulturminnes märkta, och därmed skyddade från en del ingrepp. Således finns en utmaning i att hitta energisparande åtgärder utan att inkräkta på detta. Dessutom finns en stor utmaning i att göra besparingar och förändra inomhusklimatet utan att kulturhistoriskt värdefulla inventarier och byggnader tar skada, då de kan vara känsliga för förändringar. Dessa två faktorer skiljer energieffektivisering av kyrkor från energieffektivisering i "vanliga" byggnader, så som bostäder och kontor, och gör hela arbetet lite mer komplext. Lösningarna måste i många fall vara lite mer överlagda och lite mer "skonsamma" för att man inte ska missa något.

Mer komplexa byggnader med mer installationer, isolering osv. kräver mer kunskap för att få dem att fungera på rätt sätt. Detsamma gäller kyrkor. Förr i tiden, exempelvis under medeltiden, värmdes man inte kyrkorna alls och då krävdes inte mycket kunskap för att få dem att fungera önskvärt, men med det inte sagt att det var bra för byggnaden. Nuförtiden när man både vill att kyrkorna ska vara komfortabla för brukare och samtidigt energisnåla krävs mer projektering och genomtänkta lösningar och strategier för att lyckas med detta och samtidigt bevara de svenska kyrkorna och deras inventarier till kommande generationer.

Tidigare har energifrågor inte varit något som man prioriterat inom kyrkan, men på senare tid med ökade kostnader och ökade krav från hela samhället på effektiva och resurssnåla system har det även blivit aktuellt för många församlingar inom Svenska kyrkan att satsa på energieffektivisering. Exempelvis uppgår den totala kostnaden uppvärmning för Svenska kyrkan till drygt en miljard kronor per år (Ny Teknik, 2011). Detta faktum gör att arbetet med energieffektivisering av kyrkor känns väldigt viktigt och aktuellt. Och även om de flesta byggnaderna är kulturminnesmärkta, och därmed de möjliga åtgärderna begränsade, så visar de höga uppvärmningskostnaderna att det finns en stor potential till förbättringar, om man bara kan hitta bra lösningar.

Men mer medvetenhet om energianvändningen och uppvärmningssystemen i kyrkorna ska inte bara leda till minskade energikostnader, utan även till att skapa bättre inomhusklimat för bevarande av inventarier och byggnader, samt för människor. Detta kräver mycket kunskaper både på den tekniska

sidan och på den antikvariska sidan. Bland annat måste man ha kunskap inom byggnadsfysik, installationsteknik, byggnadsvård och bevarande för att lyckas med detta på ett bra sätt.

Det som man då behöver ta fram är en kompromiss mellan vilket klimat som är optimalt för människorna som ska använda byggnaden och vilket klimat som är optimalt för bevarande av inventarierna, och sedan ta fram en uppvärmningsstrategi som kan uppnå detta.

Forskning inom ämnet pågår, bland annat i Sverige genom projektet "Spara och bevara" som drivs av Energimyndigheten och högskolan på Gotland.

I Strövelstorps församling utanför Ängelholm har man höga energikostnader, t.ex. drygt en halv miljon för 2011, och uppvärmningssystem som snart är slutkörda. Dessutom har betydande skador på inventarier förekommit genom åren. Exempelvis renoverades orgeln i en av kyrkorna nyligen för 70 000 kr för skador som orsakats av skadligt inomhusklimat. Därför finns nu ett behov av att se över uppvärmningen och inomhusklimatet och försöka hitta nya lösningar så att både kostnaderna och skadorna minskar.

Kort info om församlingen och de aktuella objekten:

I Strövelstorps församling bor ca 3 000 personer varav 2 400 är medlemmar i församlingen. Här finns tre kyrkor:

- Strövelstorps kyrka, de äldsta delarna av kyrkan uppfördes troligen redan under 1180-1200 talet.
- Ausås kyrka, anor från medeltiden, under mitten av 1850-talet totalrenoverades kyrkan.
- Starby kyrka, en medeltida kyrka som härstammar från 1200-talet.

1.2 Uppgift

Uppgiften till mitt examensarbete har jag fått från Strövelstorps församling via Miljöbron.

Den ursprungliga formuleringen på uppgiften som jag fick från Miljöbron var:

"Strövelstorps församling behöver hjälp med att se över uppvärmningssystemen för att hitta hållbara och effektiva lösningar för framtiden. Målet är att ta fram förslag som är så klimatsmarta som möjligt samtidigt som de ska vara teknisk och ekonomiskt genomförbara. Vilka investeringar behöver göras? Här finns en stor utmaning dels eftersom kyrkorna och prästgården i Ausås är kulturminnesmärkta och kyrkorna är byggda vid en tid då uppvärmning inte förekom. Dels tillämpar man intermitterande uppvärmning i kyrkorna, vilket innebär att man håller en viss skyddsvärme utom vid förrättningar då temperaturen ökas. Arv i form av kyrkomålningar, träskulpturer, altartavlor mm kommer lätt till skada om man hanterar uppvärmningen på fel sätt. En varierande luftfuktighet till följd av varierande innetemperatur kan skada kyrkans interiör, samtidigt som en hög temperatur under lång tid kan orsaka sprickbildning i målningar och trädetaljer. Alltså finns ett behov av att på distans kunna styra temperaturen beroende på hur stor luftfuktigheten är (ingår ej i projektet, men kan vara bra att ha i bakhuvudet då man tar fram lösningar)."

1.3 Avgränsningar

Arbetet avgränsas med hänsyn till tiden för examensarbetet så att endast Starby kyrka undersöks.

Det avgränsas även till att endast undersöka byggnadsfysikaliska och installationstekniska aspekter.

Inga kostnader har studerats.

1.4 Syfte

Syftet med rapporten är att ta fram ett genomarbetat underlag och sedan utifrån det presentera studien till församlingen. Studien syftar till att både effektivisera deras energianvändning och att skapa ett bättre klimat för bevarande, samtidigt som hänsyn måste tas till komforten för besökarna och de som arbetar i kyrkan.

1.5 Rapportens disposition

Först kommer jag att göra en litteraturstudie och se vad som forskats kring ämnet och vilka slutsatser och rekommendationer som man har kommit fram till då. Sedan kommer undersökningar att göras för att fastställa alla förutsättningar och egenskaper på byggnaden. Därefter analyseras all fakta, mätningar, beräkningar etc. Sedan utifrån analysen ska jag dra egna slutsatser och diskutera innehållet. Slutligen sammanfattas studien till ett underlag till församlingen.

- Litteraturstudie
- Undersökningar
- Analys
- Slutsatser och diskussion

Dessutom kommer alla andra obligatoriska delar som förord, inledning, litteratur etc. också att finnas med i rapporten.

1.6 Mål

- Ta fram förslag på åtgärder som kan minska församlingens energianvändning, samtidigt som bra bevarandeklimat och termisk komfort för brukarna kan uppnås
- Göra en statusbedömning av Starby kyrka

1.7 Frågeställning

Preliminära frågeställningar:

- Vilka kriterier och krav bör uppvärmningen styras efter?
- Hur är statusen på Starby kyrka idag, med hänsyn till inneklimat och uppvärmning?
- Vilka åtgärder bör man göra i Starby?

1.8 Metodik

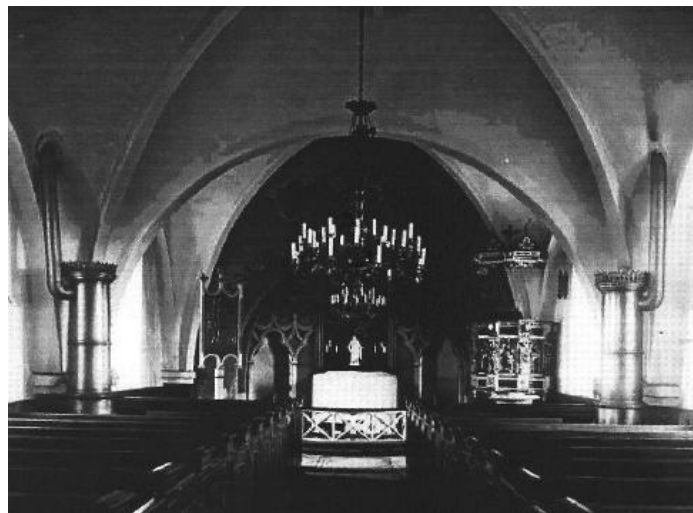
För att undersöka vad olika forskare kommit fram till inom ämnet har en litteraturstudie gjorts. Vid åtgärdsförslagen och fastställande av krav och kriterier för uppvärmningen användes litteraturstudien som underlag. När det gäller statusbedömning och klimatanalys har undersökningar och mätningar genomförts, bl a med loggrar som mätte temperatur och relativ fuktighet över tid. För att undersöka klimatet både vid användning av kyrkan och då den är tom skedde mätningen ca två dagar innan förrättning, under förrättning, samt ca två dagar efter. Slutligen har analys och bedömningar lett fram till sammanställt underlag till församlingen.

2 Litteraturstudier och teorier

2.1 Historik kring uppvärmning av kyrkor och dess problematik

Ursprungligen saknade de medeltida kyrkorna helt system för uppvärmning. Inomhustemperaturen följde i stort sett utomhustemperaturen, med en viss fördröjning på grund av värmekapaciteten i de tjocka stenväggarna. Vid förrättningar kunde temperaturen höjas något till följd av ljus, facklor personvärme etc.

Under 1700-talet började man använda järnkaminer för uppvärmning vid förrättningar, och på 1800-talet hade dessa blivit väldigt vanliga i svenska kyrkor. De eldades med ved, kol eller koks som sedan värmdes upp kaminen och rökröret. Men uppvärmningssystemet var ineffektivt eftersom värmen spreds dåligt från kaminen och rökröret till resten av rummet. Därför utvecklades en ny sorts kamin, den så kallade kaloriferen. Då placerade man kaminen under golvet istället och värmen spreds genom luften i kanaler i golv eller väggar med hjälp av endast den termiska drivkraften och kom in i rummet genom öppningar i golvet. Kaloriferer blev vanliga i de större stadskyrkorna och det var det första uppvärmningssystemet som gjorde det möjligt för kontinuerlig uppvärmning (Riksantikvarieämbetet, 1991).



Figur 1 Kaminer i Starby kyrka. Okänt år och fotograf. Bilden tagen från underhållsplanen för Starby

I slutet av 1800-talet kom centralvärmesystem med lågtrycksånga, och lite senare kom de vattenburna systemen. Till en början drevs systemen av självcirkulation och pannan var då tvungen att placeras i eller under kyrkan. När cirkulationspumpar började användas blev placeringen friare och vattnet cirkulerade bättre. I mitten av 1900-talet började man använda centralvärmeanläggningar med oljeeldning och eldningsautomatik. Systemen var lättskötta och eftersom oljan var billig började man värma upp kyrkorna mer än tidigare, ofta med inomhustemperaturer konstant över 20°C (Riksantikvarieämbetet, 1991).

De vanligaste värmeavgivarna med centralvärme är radiatorer eller kamrör som placeras underbänkarna och/eller längs ytterväggarna. Det förekommer även att varmvattenslingor läggs i golvet och ger på så sätt golvvärme.

Från slutet av 1920-talet började man installera eluppvärmda radiatorer. De tidiga modellerna var antingen sandfyllda kamrörselement eller täljstenselement. Till en början användes elradiatorerna

endast för uppvärmning vid förrättningar men när elen blev billig efter andra världskriget började de användas till kontinuerlig uppvärmning (Riksantikvarieämbetet, 1991).

Även olika typer av luftvärme har förekommit i kyrkor. Kalorifererna från 1800-talet var en tidig typ av luftvärme, där man använde sig av skorstenseffekten för att sprida värmen. Modernare versioner av luftvärme utnyttjar fläktar för att sprida värmen och värms oftast antingen med olja eller med el. Både problem med ljud och dåligt inomhusklimat har förekommit vid användning av luftvärme, men även lyckade fall med luftvärme finns. (Broström, 2010)

Skador i kyrkorna till följd av felaktig uppvärmning är inget nytt fenomen. På medeltiden då kyrkorna inte värmdes överhuvudtaget, fick man mycket skador på både inredning, föremål och själva byggnaden till följd av fukt. På vintern var det framförallt frostsprängning som orsakade skador i väggarna, och vid varmare temperaturer fick man ofta problem med mögel och röta. Även insektsangrepp var vanliga, vilket ofta går att se på gamla träföremål i kyrkorna (Riksantikvarieämbetet, 1991).

Sedan man började värma kyrkorna, från 1700-talet och framåt, har stora skador uppstått, främst på grund av att den relativa fuktigheten på vintern blir väldigt låg. Då kan bland annat trä krympa och spricka och färg flagna och trilla av. De största skadorna har man fått på träföremål som målats på kritgrund. Enligt inventeringar har 80-90% av de målade föremålen i kyrkor från medeltiden fått skador (Riksantikvarieämbetet, 1991).

Även mörka fläckar och svärtningar i tak och på väggar är ett problem i kyrkor. Detta eftersom uppvärmningen ger upphov till luft rörelser som drar med sig varma partiklar som sedan attraheras av kalla ytor.

Mer detaljerade beskrivningar av skadorna som kan härledas till uppvärmningsstrategier och uppvärmningssystemen kommer i nästa kapitel.

2.2 Skador på föremål och inventarier

Bristfällig kunskap och oförsiktighet kan leda till att uppvärmning av kyrkor skapar ett inomhusklimat som rentav är skadligt för kulturhistoriskt värdefulla föremål och inventarier. Här kommer jag att beskriva olika typer av skador och nedbrytningsprocesser, samt vilka grundläggande förutsättningar som krävs för att de ska uppstå.

När det gäller att hantera känsliga material finns det vissa parametrar i dess omgivande miljö som påverkar mer än andra. De två viktigaste parametrarna är temperatur och relativ fuktighet. De styr både om en viss nedbrytning eller skada kan uppstå samt i vilken hastighet och omfattning det kommer att ske. Material har generellt sett tre olika sätt att brytas ner eller förstöras på som kan härledas till hur de förvaras, och är därmed är det de mekanismerna som man vill undvika. De är:

- Biologisk nedbrytning
- Kemisk nedbrytning
- Mekaniska skador
- Fysikalisk nedbrytning

2.2.1 Biologisk nedbrytning

Med biologisk nedbrytning menas nedbrytning eller förstörelse som orsakas av mögel, bakterier, svampar, djur och insekter.

Djurangrepp kan inte direkt härledas till klimatet som föremålen förvaras i. Istället gäller det att förhindra att djur kan ta sig in i byggnaden, förvaringsskåp etc. genom att ha täta konstruktioner.

Insekter är ett större problem på grund av att de är små och har därmed lättare att ta sig in i små utrymmen. Bästa sättet att skydda föremålen från insekter är att rengöra dem så att inga ägg sitter kvar samt att noggrant övervaka förvaringen av föremålen så att eventuella angrepp snabbt kan upptäckas (Christoffersen, 1995). Majoriteten av de trägnagande insekterna kräver en hög fuktighet för att leva, med undantag för husbocken (Nevander & Elmarsson, 2006).

Varken djur- eller insektsangrepp går helt att undvika endast genom att hålla ett visst inomhusklimat och undvika vissa förhållanden. Med andra ord så kan djur- och insektsangrepp ske oavsett vilket klimat ett föremål förvaras i, fränsett extrema klimat som då även skulle vara skadligt för föremålen. Däremot kan bakterier, svampar och mögel undvikas genom att kontrollera klimatet och undvika vissa kritiska förhållanden som krävs för att de ska växa och gro (Christoffersen, 1995)

För att det ska ske en bakterietillväxt krävs ett högt fuktinnehåll i materialet. Övriga faktorer har mindre betydelse (Christoffersen, 1995).

När det gäller mögeltillväxt är det fler parametrar som spelar in. Viktigast är att det finns mögelsporer tillgängligt i luften eller på materialet. Men eftersom mögelsporer finns i princip överallt är det på det hela taget omöjligt att undvika och därmed kan man ta för givet att det finns tillgängligt. De parametrar som då påverkas tillväxten mest är relativfuktighet, temperatur samt tillgång till näring i form av organiska material (Snow et al., 1944). Mögel kan leda till missfärgning, lukt och allergiska reaktioner.

Den relativa fuktigheten bör ligga under 65 % om man vill vara säker på att inte få någon mögeltillväxt. I intervallet 65-75 % kan det växa långsamt och mellan 75-100 % kan det växa väldigt snabbt. Exakt hur tillväxten sker och vad det kritiska fuktillståndet är beror på vilken typ av mögel det handlar om samt vilket material det växer på (Christoffersen, 1995).

Mer om kritiska fuktillstånd tas upp senare i stycket om optimalt klimat för inventarier och byggnad.

Den optimala temperaturen för mögelpåväxt är 18-35°C (Nevander & Elmarsson, 1994), men det finns en risk för påväxt i hela temperaturintervallet mellan -7 till 55°C (Neuhauser & Schata, 1994). Vid låga temperaturer minskar risken, vilket medför att det är vanligare med mögelpåväxt på sensommaren än på vintern, även om den relativa fuktigheten kan vara densamma (Broström et al., 2008).

Det krävs också tillgång till näring för att mögel ska växa, både typen av näringsämnen och mängden spelar roll. Olika typer av mögel kräver olika typer och sammansättningar av näringsämnen, men oftast så finns det tillräckligt med näring tillgängligt för att de vanligaste mögelsorterna ska kunna växa (Christoffersen, 1995).

Eftersom temperaturen i byggnader oftast ligger inom intervallet där mögel kan växa samt att det i stort sett alltid finns tillgång till mögelsporer och näring, så kan jag konstatera att det absolut

enklaste sättet att förhindra mögeltillväxt är att kontrollera den relativa fuktigheten. Genom att se till så att de kritiska fukttillstånden understigs kan man då undvika tillväxt.

Ny forskning har visat att vid cykliska variationer ackumuleras fukt. (Johansson, 2012). De gamla studier som visar samband mellan exponeringstid och temperatur, RH gäller inte vid cykliska variationer.

2.2.2 Kemisk nedbrytning

Precis som biologisk nedbrytning styrs även kemisk nedbrytning främst av temperatur och fukt. Skillnaden är att kemisk nedbrytning kan ske även vid mycket låga relativa fuktigheter. I princip kan nedbrytning ske i hela intervallet från 0 till 100 % (Erhardt & Mecklenburg, 1994), men risken ökar med stigande fuktighet. När det gäller temperatur så ska den hållas så låg som möjligt för att undvika kemisk nedbrytning (Christoffersen, 1995). En tumregel som kan användas är att reaktionshastigheten fördubblas då temperaturen ökar med 10 °C (Burström, 2007).

Enklaste typerna av kemiska skador är då någon vätska löser upp vissa ämnen från ett material. Vätskans innehåll och uppbyggnad styr omfattningen av upplösningen. Vanligt vatten kan orsaka problem, men riskerna ökar betydligt om vattnet innehåller lösta salter eller andra föroreningar. (Burström, 2007)

Förekomsten av föroreningar i luften har också betydelse för kemiska skador. Framförallt tillgången på kemikalier som formaldehyd, myrsyra, acetaldehyd och ättiksyra i luften kan öka nedbrytningen (Grzywacz & Tennent, 1994). Exempel på skador kan vara syror som angriper cementbundna material, svaveldioxid som angriper kalksten, sandsten och puts (Burström, 2007) samt att silfverföremål kan bli svarta då det finns svavel i luften (Riksantikvarieämbetet, 2004).

2.2.3 Mekaniska skador

Den mest uppenbara mekaniska skadan är om ett föremål hanteras oförsiktigt och utsätts för exempelvis stötar och vibrationer. Men skador kan också uppkomma genom ogynnsamma temperatur- och fukttillstånd, samt genom variationer i temperatur och relativ fuktighet.

De flesta material påverkas av förändrad temperatur genom att storleken och formen på materialet förändras. Hur stor storleksförändringen blir beror på materialets egenskaper och är olika för olika material, och således kan det uppstå stora spänningar i ett föremål bestående av två olika material som sitter ihop. Ett exempel på detta är målade träföremål där träet och färgen inte förändras lika mycket, och därmed uppstår sprickor i målningen. Även i homogena material kan det uppstå spänningar då ytan utsätts för varierande temperatur medan temperaturen är stabil längre in i materialet. Temperaturgradienten leder då till att dimensionsändringarna blir olika på olika nivåer i

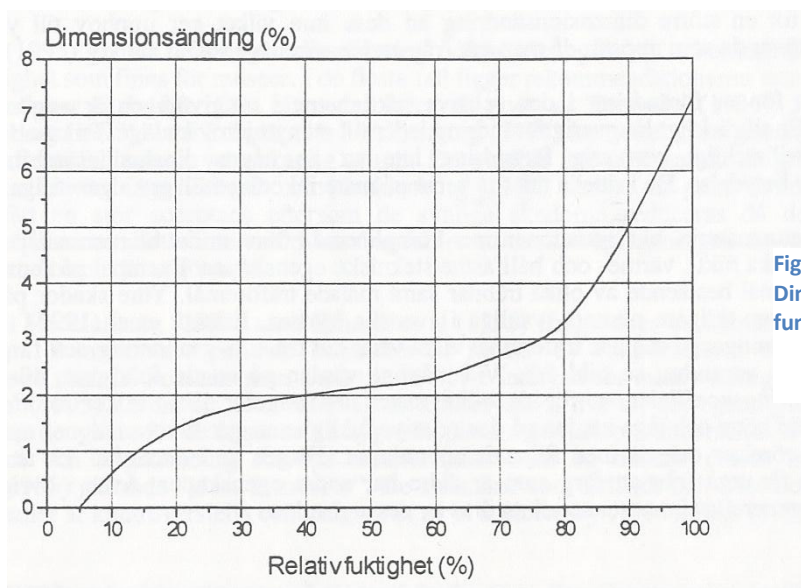


Figur 2 Flagnande färg på trä, predikstolen i Starby. Samt mekaniska skador på murverket i Starby

materialet och därmed uppstår spänningar mellan ytan och materialet innanför.

Mekaniska skador kan också ske på grund av ogynnsamma fuktillstånd och förändringar i relativ fuktighet i hygroskopiska material. Precis som för temperaturförändringar påverkar även förändringar i relativ fuktighet materialens dimensioner, och på liknande sätt kan då spänningar uppstå mellan material med olika hygroskopiska egenskaper samt mellan ytan på ett föremål och materialet längre in.

Trä har stora fuktbedingade rörelser, och därmed uppstår lätt spänningar i träföremål. I synnerhet blir fuktrörelserna stora vinkelrätt mot fiberriktningen (Nevander & Elmarsson, 2006). Enligt en undersökning som gjorts av Buck (1978) visar att de hygroskopiska egenskaperna är ungefär desamma för gammalt och nytt trä.



Figur 3 (Broström, 1996)
Dimensionsförändring för trä som funktion av relativ fuktighet

De flesta föremål påverkas negativt på ett eller annat sätt av varierande temperatur och/eller relativ fuktighet. Beroende på hur pass stora variationerna är och hur länge de varar kan de mycket väl leda till skador på föremålen i form av sprickor och brott. Låg temperatur och/eller låg fuktighet gör många material hårda och spröda och därmed mer känsliga vid användning och hantering. Föremål som består av flera olika material med olika egenskaper kan få sprickor eller flagnande färg. Hög temperatur och/eller hög fuktighet gör däremot material mjuka och det kan i sin tur leda till permanenta deformationer av ett föremål. (Nevander & Elmarsson, 2006)

2.2.4 Övriga effekter av uppvärmning och fukt i kyrkor

Förutom de beskrivna mekanismerna ovan finns det andra negativa följder av uppvärmning och fukt i kyrkor som inte riktigt går att placera i något av de nämnda facken.

2.2.4.1 Saltutfällning

Då vatten från nederbörd eller från marken kommer in i en murverkskonstruktion löser det upp salter som finns inne i materialen. Vattnet med det lösta saltet kan sedan vandra och avdunsta antingen på ytan eller inuti konstruktionen. När den sker på ytan bildas ett ludd av saltkristaller som kan förstöra vägg- och takmålningar, framförallt vid rengöring. Om både kristalliseringen och följande rengöring sker kontinuerligt går det relativt snabbt för målningarna att försvinna. Saltutfällningen är också ett estetiskt problem i sig själv även utan att det förstör någon målning. Om kristalliseringen

sker inuti konstruktionen kan porösa material sprängas sönder och på så sätt förstöra ytskikten samt hota bärigheten.

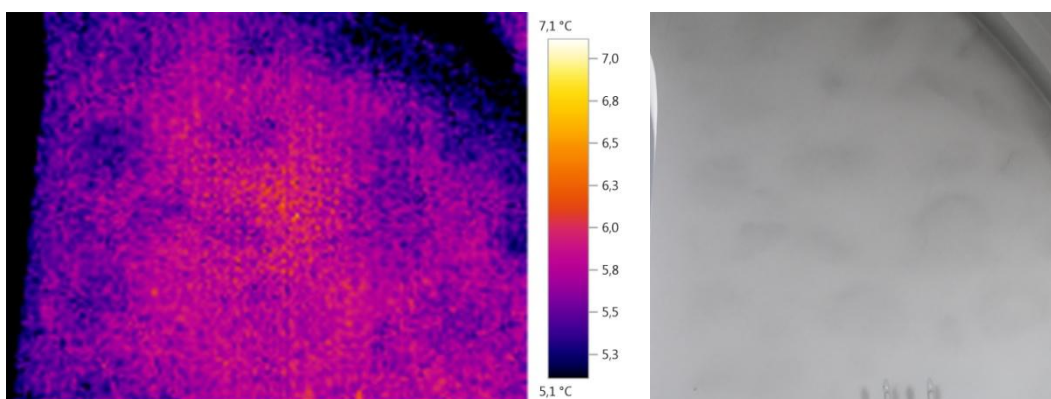
Salter finns i de flesta konstruktioner och kommer från bland annat marken, havsvatten i vindar eller från de ingående byggnadsmaterialen. Salterna kan ta upp vatten från luft, och när den relativa fuktigheten i materialet kommer upp till en viss nivå löses saltet upp. Om RF sedan sänks igen torkar lösningen och kristallisering sker. Då stora dygnsvariationer sker runt saltets kritiska relativa fuktighet (presenteras senare) kan processen gå fram och tillbaka ett antal gånger under kort tid, och därmed kan skador inträffa förhållandevis snabbt (Broström et al., 2008).

Problem med saltutfällning och saltsprängning är speciellt vanligt i tegelkonstruktioner. Riskerna blir större då man kombinerar material, exempelvis tegelmur med puts. (Burström, 2007)

2.2.4.2 Svärtning

Partiklar och smuts i luften kombinerat med luftrörelser kan ge nedsmutsning och svärtning av väggar och tak. Partiklarna kommer bland annat från människor, inredning, uteluften osv. I kyrkor har man dessutom ofta ytterligare nedsmutsning på grund av eldning med stearinljus. Vid uppvärmning uppstår termiska luftrörelser som drar med sig partiklarna, vilka sedan dras till och fastnar på kalla ytor. Svärtningen blir värre ju sämre värmeisoleringen i byggnaden är, dels eftersom det då krävs mer uppvärmning, vilket leder till luftrörelser, och dels för att väggar och tak blir kallare och då attraherar partiklarna mer. Lokala fläckar uppstår ofta vid köldbryggor, vilket förklarar varför det ibland förekommer fläckvis svärtning på väggarna i många stenkyrkor. Även precis ovanför radiatorer längs väggarna kan kraftig svärtning förekomma.

Svärtningen är en estetisk försämring i sig själv, men precis som för saltutfällningen så är det största problemet är att tak- och väggmålningar kan förstöras vid regelbunden rengöring. Varje gång fläckarna torskas bort tar man med lite av målningen och efter ett visst antal rengöringar kan målningen ha "suddats ut".



Figur 4 Svärtning i Ausås kyrka. Svärtningen på väggen sammanfaller med de kalla fläckarna i värmekameran, troligtvis orsakat av stora genomgående stenar i muren

2.2.4.3 Hälsorisker

Hög relativ fuktighet kan leda till bland annat emissioner och mögel. Detta kan i sin tur leda till att människor upplever illamående, allergi, rinnande ögon och näsa, klåda, huvudvärk, etcetera. Dålig ventilation ökar riskerna. För besökarna i en kyrka är hälsoriskerna inte särskilt stora eftersom man

vistas så kort tid i byggnaden. Problemen kan däremot uppstå för präster och kantorn som befinner sig i kyrkan under längre tid.

2.2.4.4 Orgel

Orglar i kyrkor är väldigt svåra att hantera. De påverkas mycket av varierande temperatur och relativ fuktighet, vilket ofta förkommer i kyrkobyggnader. Och även om det inte uppstår någon direkt nedbrytningsprocess vid ett visst klimatförhållande så kan de ändå ta skada genom att de blir ostämnda på grund av de varierande temperatur- och fuktförhållandena. Generellt sett så trivs orglar bäst vid ganska låga temperaturer och klimat som följer årstiderna. (Riksantikvarieämbetet, 2004)

Schellen (2002) har visat att träpipor kan spricka vid låg relativ fuktighet. Orglarna sitter ofta högt upp i kyrkorna och utsätts därmed ofta för högre temperaturer och lägre relativ fuktighet än resten av byggnaden, och således ökar risken för sprickor. Även mögel i piporna förekommer, men då istället när den relativa fuktigheten är hög.

2.3 Krav på inomhusklimatet i kyrkor

Nedan kommer jag att presentera krav och kriterier från olika källor som jag hittat i litteraturen för att uppnå bra klimat för både brukare och bevarande.

2.3.1 Optimalt inneklimate för brukare

Hur man som människa upplever inomhusklimatet kan bero på många olika faktorer. Det som kan kopplas direkt till klimatsystemen och andra installationer i byggnaden är termiskt klimat, luftkvaliteten och luftrenhet. Sedan kan också olika personer uppleva ett visst klimat på olika sätt, t.ex. kan en person frysa medan en annan är varm. Ålder och kön är också två faktorer som kan påverka hur man upplever det termiska klimatet, men som är svåra att ta hänsyn till vid projektering av värmesystem. Kort sagt är det omöjligt att få alla nöjda med inomhusklimatet, det kommer alltid att finnas de som känner obehag oavsett.

Det termiska klimatet påverkar människors termiska komfort och välbehag, och det bestäms utav luftens temperatur, omgivande ytors temperatur, luftens fuktighet, luftens rörelse samt den vertikala temperaturgradienten (Warfvinge, 2008).

Generellt sett bör luftens temperatur ligga mellan 18-24°C, vintertid 18-22°C och sommartid 22-24°C, för att människor inte ska känna obehag (Warfvinge, 2008). Men egentligen är lufttemperaturen ett dåligt mått på inneklimate eftersom man inte får med alla andra parametrar. Därför kan det vara dålig termisk komfort även om lufttemperaturen ligger inom rätt intervall.

Tar man hänsyn till även de omgivande ytornas temperatur får man ett mått som bättre kan beskriva hur man upplever inomhusklimatet. Denna temperatur kallas operativ temperatur och är ett medelvärde av luftens temperatur, t_a , och den så kallade medelstrålningstemperaturen, \bar{t}_r . Medelstrålningstemperaturen beräknas enligt:

$$\bar{t}_r = F_1 \cdot t_1 + F_2 \cdot t_2 + \dots + F_n \cdot t_n \quad (^\circ\text{C})$$

där F_n är vinkelförhållandet mellan aktuell beräkningspunkt till ytan n i rummet, och t_n är yttemperaturen. Den operativa temperaturen beräknas sedan som ett medelvärde av lufttemperaturen och medelstrålningstemperaturen enligt:

$$t_o = (t_a + \bar{t}_r)/2 \quad (^\circ\text{C})$$

Speciellt i en kyrka med dålig isolering är det viktigt att titta på den operativa temperaturen eftersom den kan skilja sig mycket från luftens temperatur, då väggar, golv och tak kan bli kalla. Är alla ytor runtomkring kalla kan man känna obehag även om lufttemperaturen är lagom hög. På samma sätt kan man uppleva termisk komfort om ytorna runtomkring är varma även om lufttemperaturen är kall.

Den operativa temperaturen går också att mäta med instrument som tar hänsyn till temperaturen på alla ytor omkring sig.

Går man ett steg längre kan man inkludera luftrörelsernas inverkan på det termiska klimatet. Luftrörelserna gör så att den konvektiva värmeavgivningen från kroppen ökar och därmed kyls kroppen av. Exempel på luftrörelser är kallras från fönster eller varma luftströmmar från radiatorer, och detta kan leda till bl.a. nedkylning, obehag och diskomfort, beroende på typ av luftrörelse. Temperaturen där man även tar hänsyn till luftrörelser kallas ekvivalent temperatur och är ett väldigt bra mått på upplevelsen av det termiska klimatet. Generellt sett säger man att lufthastigheter under ca 0,15–0,20 m/s inte upplevs som störande drag och behöver därför inte tas hänsyn till (Abel & Elmroth, 2008).

Luftens fuktighet påverkar inte upplevelsen av inomhusklimatet vid normala förhållanden, men vid höga temperaturer och hög relativ fuktighet kan svettning försvåras och det blir därmed svårt för kroppen att hålla rätt temperatur.

Den vertikala temperaturgradienten, dvs. skillnaden i temperatur i höjddled, bör inte vara för stor eftersom man då kan känna obehag, och därmed inte uppleva termisk komfort. Skillnaden i lufttemperatur vid huvud och fötter bör inte vara mer än 3°C. (Warfvinge, 2008)

Vilket termiskt klimat man vill skapa i en byggnad beror på vilken verksamhet som ska bedrivas och vilken klädsel personerna kommer att bära. Verksamheten styr metabolismen, eller energiomsättning i kroppen, på de som ska använda byggnaden. Desto tyngre aktivitet desto större blir metabolismen, och därav värmealstringen. En person i vila har en energiomsättning på ca 1 met, medan för en person som utför medeltungt arbete är den ca 4,5 met (Abel & Elmroth, 2008).

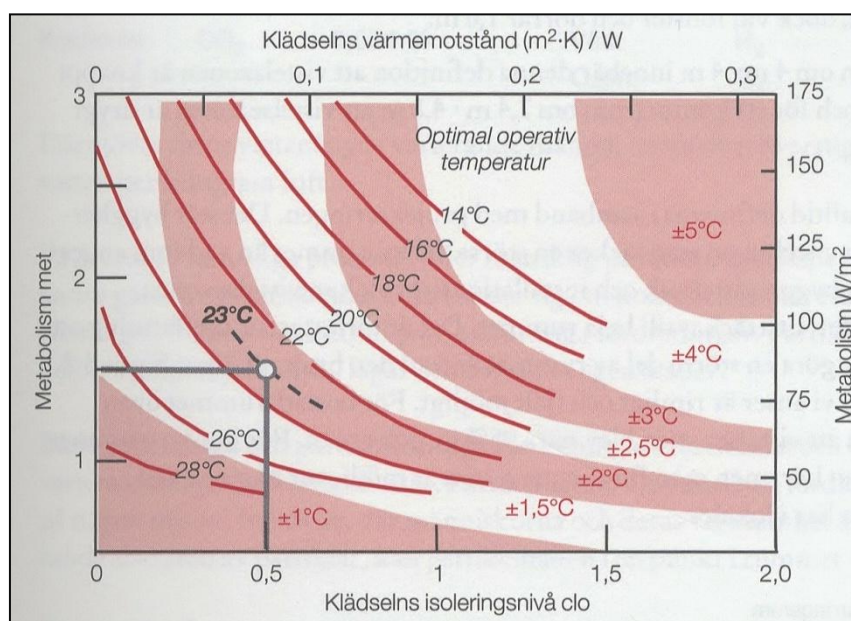
Tabell 1 Värmealstring beroende av aktivitet (Warfvinge, 2008)

Aktivitet	Värmealstring i met
Sömn	1
Vila, sittandes	1,2
Skrivbordsarbete	1,4
Bilkörning	2
Dansa vals	4,2
Löpning (8,5 km/h)	8,7
Gång uppför trappa	16,5

Människors klädsel fungerar som ett värmeisolerande lager på kroppen och påverkar således vilken temperatur man vill ha omkring sig. Isoleringsförmågan mäts i enheten clothing units (clo).

Tabell 2 Clo-värde för olika klädselar (Warfvinge, 2008)

Klädsel	clo-värde
Naken	0
Lätt sommarklädsel	0,5
Normal inomhusklädsel	1,0
Kraftig inomhusklädsel	1,5
Polarklädsel	4



Figur 5 Exempel på Fangers klimatsamband (Abel & Elmroth, 2008). I detta fall med klädsel på 0,5 clo och en aktivitet på 1,5 met blir den optimala operativa temperaturen 23°C

Efter att man analyserat byggnaden och användning kan man ta fram det optimala inomhusklimatet för människorna som ska vistas i byggnaden. Det är i princip omöjligt att göra alla nöjda och därför kan man använda sig av bl.a. PMV-, PPD- och DR-index för att se hur stor andel av brukarna som är nöjda med klimatet, och således upplever termisk komfort. Förutom faktorerna som påverkar det termiska klimatet så är det även viktigt att tänka på luftkvaliteten och luftrenheten vid dimensionering av installationer för inneklimat. Det som påverkar mest där är ventilationen och val av ingående material, vilket innebär att det blir svårt att göra något åt i gamla kyrkor utan mekanisk ventilation och med givna material.

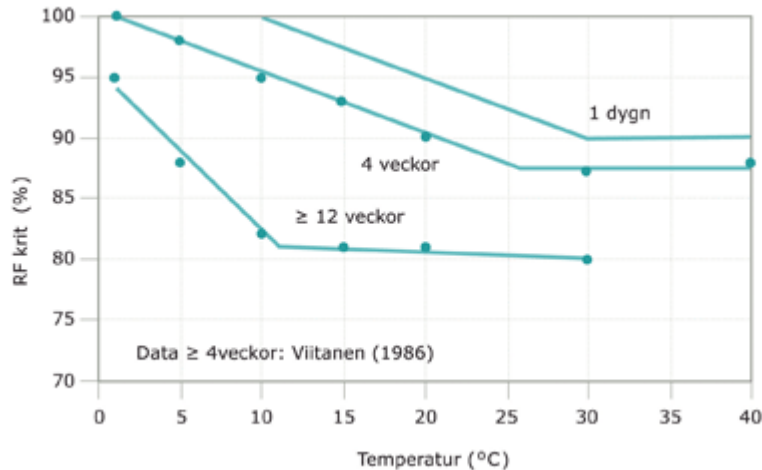
2.3.2 Optimalt klimat för byggnaden och dess inventarier

Bestämda värden på vilket klimat som är bäst för att bevara föremål finns inte. Rekommendationer på vilken temperatur och relativ fuktighet som är lämpligast för ett visst material skiljer sig mellan olika forskare och författare, och även rekommendationer på uppvärmningstider och tillåtna variationer skiljer sig. Vad som är bäst och mest lämpligt för en hel byggnad beror på många faktorer, bland annat vilken typ av föremål som förvaras i byggnaden samt byggnadens specifika egenskaper. Detta innebär att man måste kompromissa och skapa individuella bevarandeklimat i varje byggnad efter deras individuella förutsättningar. Sedan måste man beakta att kyrkobyggnader inte är byggda

ursprungligen för att skapa skonsamma inomhusklimat och bevara inventarier, och således blir det väldigt svårt att kunna skapa lika bra klimat där som man kan göra i exempelvis museer och arkiv.

Länge har Thomsons (1994) rekommendationer på 20°C och 50 ± 5 % relativ fuktighet varit ett standardklimat att dimensionera efter för bevarande av inventarier. Dessa rekommendationen grundar sig på en gammal handbok från 1967 (skriven av samma författare) och gränsen på 50 ± 5 % relativ fuktighet angavs därför att luftkonditioneringsindustrin på den tiden angav att man kontinuerligt kunde hålla sig inom det intervallet. I appendix till boken skriver Thomson att RF egentligen kan variera från 45 – 60 % för blandade samlingar. Denna extra förklaring har de flesta missat och således har 50 ± 5 % RF antagits som standard. Davis (2006) har senare visat att en sänkning av både omgivande temperatur och relativ fuktighet till 18°C och 45 % tydligt kan förlänga föremåls förväntade livslängd. Därmed går han lite emot vad som i många fall har rekommenderats. Beräkningsprogrammet Preservation Calculator, som bedömer förväntad livslängd för organiska material, visar att livslängder ökar med 64 % om man sänker temperatur från 20 till 18 °C och RF från 50 till 45 %. Även Kerschner (2008) har genom sina erfarenheter från som konservator och direktör vid museer upptäckt att Thomsons rekommendationer inte är ultimata, varken för byggnader, för bevarande eller för energianvändningen. Han har undersökt hur föremål påverkats av olika förvaringsklimat och dragit sina slutsatser utifrån det. Han menar att det bästa är att låta inomhusklimatet följa årstiderna, men under kontrollerade former. Under sommaren måste man hålla den relativa fuktigheten under 65 % och under vintern måste man hålla den över 35 %. Detta bör ske genom avfuktning och ökad uppvärmning med värmesystemet på sommaren, och på vintern genom att låta temperaturen sjunka till låga temperaturer så att RF stiger. Detta ska enligt honom vara skonsamt för både byggnad, inventarier och plånbok. Men givetvis måste hänsyn även tas till vilken typ av inventarier som förvaras och vilken verksamhet som ska bedrivas i byggnaden. Kerschner menar att om man låter temperaturen sjunka allt för lågt på vintern kan komforten för brukare försämrats och vissa föremål blir känsligare och sprödare vid användning och hantering vid låga temperaturer. Därför kan det bli aktuellt att "stänga" verksamheten på vintern och eventuellt flytta vissa föremål till museum eller arkiv över vintern om inte andra lösningar hittas. Mandahl (2009) rekommendera däremot att den relativa fuktigheten ska vara så jämn som möjligt, med en medelnivå någonstans mellan 50 - 70 %. Vad detta grundar sig på är dock oklart.

Även vilka fukttillstånd som inte får överskridas finns det delade meningar om. Kritiska fukttillstånd definieras enligt Nevander och Elmarsson (2006) som "gränsen för att materialet bibehåller godtagbar funktion under hela den tid som materialet kan exponeras för fukttillståndet". Fukttillståndet mäts i relativ fuktighet eller i fukthalt. Det som gör det svårt att sätta ett kritiskt fukttillstånd på ett material är att även temperatur och tid för exponering spelar in och gör det svårbedömt. Även lufthastighet och ljusförhållanden kan ha betydelse. Ett fukttillstånd kan exempelvis vara kritiskt vid en temperatur och exponeringstid, men vara helt ofarligt vid andra förhållanden. Se t.ex. figur nedan. Där ser man att RF_{krit} vid 20 °C och 4 veckor exponering är ca 90 %, men vid över 12 veckor är det ca 80 %.



Figur 6 (Lars-Olof Nilsson, 2009) Bilden tagen från hand-outs från kursen "Fuktsäkerhet i byggprocessen". Kritisk relativ fuktighet beroende på tiden som materialet utsätts samt temperatur

Det som kan konstateras är att mögel inte kan växa på något föremål vid någon temperatur då den relativa fuktigheten understiger 60 % (Broström & Holmberg, 2009). För att blommande mögel ska växa under sommarsäsongen krävs att den relativa fuktigheten överstiger 70 % under en längre period, och ska det börja växa på mindre än en vecka krävs att RF överstiger 85 % hela den perioden (Broström & Holmberg, 2009).

Mögel kräver lägre fuktkvoter än svampar och röta för att växa, och således blir det ofta det kritiska fukttillståndet för mögel som blir det dimensionerande tillståndet för organiska material. Nevander och Elmarsson (2006) har sammanställt en tabell över riskerna för mögel och röta vid olika fukttillstånd. Se tabell 3 nedan.

Tabell 3 Risker för mögel vid olika fukttillstånd (Nevander & Elmarsson, 2006)

		Risk		
		Ingen	Liten - måttlig	Stor
Röta (hussvamp)	Fk %	< 16	16-25	> 25
	RF %	< 75	75-95	> 95
Mögel	Fk %	< 15	15-20	> 20
	RF %	< 70	70-85	> 85

Risken för mögeltillväxt i tabellen ovan gäller för förhållandena i mörka utrymmen vid gynnsam temperatur för tillväxt. Som nämnts innan är det fler faktorer än bara fukttillståndet som påverkar risken för påväxt och därför går det inte att endast utgå ifrån en sådan här tabell vid bedömning av risker, utan alla faktorer måste tas under beaktning och sedan kan riskerna analyseras. Tabellen och värdena däri kan endast användas som riktvärden. Generellt sett så anser Nevander och Elmarsson (2006) att ett kritiskt fukttillstånd på 80 % relativ fuktighet, med 5 % säkerhetsmarginal, går att använda för trä och många andra organiska material vid dimensionering i inomhusmiljö.

I Boverkets byggregler, BBR, står att om inte kritiska fukttillståndet för ett material är väl undersökt och dokumenterat ska 75 % RF användas som gräns.

Textilier är ett annat material som är känsligt för hög fuktighet. Att präster reagerar och mår dåligt av att bära skrudar som förvarats i kyrkor har förekommit. Enligt Riksantikvarieämbetet (2004) bör

textilier förvaras svalt, torrt och mörkt. Redan vid 60 % RF finns risk för mögelpåväxt. De rekommenderar att textilier förvaras vid maximalt 50 % relativ fuktighet.

Enligt Broström et al. (2008) är risken för biologiska skador i kyrkor stor om RF överstiger 80 % under lång tid. Han rekommenderar att RF inte bör överstiga 70 % under sommarhalvåret eftersom risken för mögel då är högre. Kritiska punkter kan vara i grunden, på vind, förvaringsskåp, bakom tavlor m.m. eftersom där ofta är ett annat klimat än i resten av kyrkan.

För att undvika mekaniska skador på inventarier rekommenderar många museer och arkiv att endast väldigt små variationer i temperatur och relativ fuktighet får förekomma, exempelvis ett klimat på $21 \pm 1^\circ\text{C}$ och $50 \pm 3\%$ (LaFontaine, 1979). Dessa rekommendationerna baseras endast på extrapoleringar av hur *stora* variationer i klimatet påverkar föremål, inte på undersökningar på hur *små* variationer påverkar. Detta har senare gjorts, och slutsatsen är att föremål tål större variationer i både temperatur och relativ fuktighet än vad som tidigare har rekommenderats. Forskningen visade att variationer på $\pm 10\%$ RF och $\pm 10^\circ\text{C}$ innebär obetydliga risker för mekaniska skador. Vid variationer på $\pm 20\%$ RF och $\pm 20^\circ\text{C}$, eller större, börjar däremot risken för skador bli betydande (Erhardt & Mecklenburg 1994, Erhardt et al. 1996, Erlebacher et al. 1992, Mecklenburg och Tumosa 1991, Mecklenburg et al. 1998, 2005, Michalski 1991, 1993, Oreszczyn et al. 1994).

van Schijndel et al. (2008) undersökte genom modelleringar, simuleringar och mätningar hur hastigheten på temperaturförändringar och hastigheten på förändringar av relativ fuktighet påverkar spänningarna i träföremål vid uppvärmning. De gjorde tester både med begränsad temperaturförändring och med begränsad förändring av relativ fuktighet. Deras undersökning visar att påfrestningarna i föremål kan minskas betydligt om man begränsar de nämnda förändringshastigheterna, vilket med andra ord innebär att de rekommenderar att uppvärmningshastigheten bör kontrolleras och styras noga. En begränsning av förändringen på relativ fuktighet, exempelvis $2\% \text{RF/h}$, innebär att tiden att värma upp till en viss temperatur tar olika lång tid beroende på förutsättningarna vid just den tidpunkten. Därför blir det svårt och mer komplext att styra uppvärmningen efter de kriterierna jämfört med att styra efter temperaturförändringen, där man endast behöver ta hänsyn till start- och sluttemperatur. Deras rekommendation är därför istället att man begränsar uppvärmningshastigheten till ca $1,5 - 2,5 \text{ K/h}$. Båda strategierna minskar de mekaniska påfrestningarna i föremål, något mer om man styr efter RF, men nackdelen där är att uppvärmningstiden inte blir konstant och således mer komplex att styra. Schellen och van Schijndel (2011) presenterade liknande simuleringar och undersökningar i en annan artikel, och även där analyseras hur förändringar i inomhusklimatet orsakar mekaniska påfrestningar i träföremålen. Deras slutsats var att det bästa ur den synvinkeln var att inte värma kyrkorna alls. Men eftersom man oftast vill värma kyrkorna ändå ur komfortsynpunkt, rekommenderar de att man ska begränsa förändringen i relativ fuktighet till $2 - 5\% \text{RF/h}$. De menar att detta kan minska de mekaniska påfrestningarna i träföremål avsevärt. De menar också att det sämsta man kan göra är att värma med full effekt, eftersom de plötsliga och snabba förändringarna skapar stora belastningar.

Om det är temperaturvariationer eller variationer i relativ fuktighet som har störst påverkan på föremål beror på vilket material det är. Vissa påverkas mycket av variationer i relativ fuktighet men nästan inget alls av temperaturvariationer, och för andra är det tvärtom. Exempelvis oljefärger och akrylfärger påverkas mycket av låg temperatur, men får knappt någon dimensionsförändring alls vid sänkning av RF från 60 % till 10 % (Mecklenburg et al. 2005).

Även Kaeferhaus (2010) menar att det är förändringshastigheten på den relativa fuktigheten som är viktig, vad medelvärdet ligger på är mindre viktigt. Hans rekommendation är att förändringen får ske med maximalt 5 %RF/h, samt maximalt 10 %RF/dygn.

Före detta stiftsantikvarien i Lunds stift, Mandahl (2009), rekommenderar att uppvärmningen bör ske så fort som möjligt med full effekt. Vid vattenburen värme bör uppvärmningstiden vara ca 6 timmar och något längre vid elvärme. Vad hon grundar detta på är osäkert.

Broström et al. (2008) har satt upp några allmänna rekommendationer för att undvika mekaniska skador. Uppvärmningstiden vid intermitterent uppvärmning bör vara 6 - 12 timmar. Jämn RF bör eftersträvas. RF bör ligga mellan 50 - 70 %. Avvikelse från medelvärdet bör inte vara större än 10 procentenheter. Under uppvärmningstiden på 6-12 timmar kan RF under 50 % accepteras. Undvik extremt höga temperaturer i någon del av byggnaden. Mellan förrättningar bör temperaturen vara så låg som möjligt men inte under 0 °C. Minimera luftrörelser och partiklar i luften. Undvik kondens.

Enligt Broström & Holmberg (2009) påverkar väldigt korta variationer (minuter) i relativ fuktighet inte föremål nämnvärt, såvida variationerna inte är så stora att de orsakar kondens. De flesta föremål påverkas inte förrän efter några dagar.

Leijendeckers (1995) har gjort undersökningar som visar hur tonerna i orglar påverkas av varierande temperatur. Testerna gjordes på metallpipor och det han undersökte var hur temperaturens inverkan på ljudhastigheten samt pipornas dimensionsändring på grund av temperaturskillnaden, påverkar tonerna som kommer ut. I undersökningen varierades temperaturen från -10 till 20°C och resultaten visade att dimensionsändringen hade en försumbar påverkan, medan temperaturens inverkan på ljudhastigheten var betydande, och gjorde således orglarna ostämnda vid vissa temperaturer. Slutsatsen är att orglar ska stämmas vid samma temperatur som de sedan ska användas vid, dvs. temperaturen som hålls vid förrättningar. Dessutom bör temperaturskillnaden över pipornas höjd inte vara mer än 1°C för att inte påverka kvaliteten på ljudet.

Vägg- och takmålningar är vanligt i kyrkor och har speciella förutsättningar för bevarande. Eftersom yttemperaturen på väggen eller taket ofta skiljer sig från temperaturen i rummet blir där ett annat klimat. Undersökningar av Padfield et al. (1993), Klens Larsen (1999, 2002a, 2002b) och Sawdy & Heitage (2007) visar att den relativa fuktigheten precis vid väggen kan hållas relativt konstant tack vare väggens tröghet, men att varierande fuktighet i inomhusluften kan leda till fuktvandring inåt och därmed avdunstning på ytan. Detta fenomen kan leda till skador på målningarna och ytskikten i form av saltutfällning och vittring. Sådana variationer i relativ fuktighet som kan skapa kristallationscykler orsakas ofta av uppvärmning (Haugen, 1997).

Saltutfällningen sker alltså om man har hög relativ fuktighet (över saltets kritiska) och sedan sänks den och underskrider saltets individuella gräns för kristallisering. Tabell 4 visar den gränsen för vanligt förekommande salter i murverk vid olika temperaturer, framtagna experimentellt.

Tabell 4 Jämviktsfuktighet (RF, %) för salter som kan förekomma i murverk (Haugen, 1997)

Salt	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
CaCl ₂ · 6H ₂ O	41	37,7	33,7		30,8	28,6	22,4
MgCl ₂ · 6H ₂ O	33,7	33,6	33,5	33,3	33,1	32,8	32,4
K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O	43,1	43,1	43,1	43,2	43,2	43,2	43,2
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	59	59,6	56,5	54	53,6	50,5	46,8
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	60,4	58,9	57,4	55,9	54,4	52,9	51,4
NH ₄ NO ₃						61,8	
NaNO ₃		78,6	77,5	76,5	75,4	74,3	73,1
NaCl	75,5	75,7	75,7	75,6	75,5	75,3	75,1
Na ₂ SO ₄					82	82,8	84,3
KCl	88,6	87,7	86,8	85,9	85,1	84,3	83,6
MgSO ₄ · 7H ₂ O			86,9		90,1	88,3	88
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O				96,5	97,9	88,2	83,2
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O				95,2	93,6	91,4	87,9
KNO ₃	96,3	96,3	96	95,4	94,6	93,6	92,3
K ₂ SO ₄	98,8	98,5	98,2	97,9	97,6	97,3	97

Annika Haugen (1997) har gjort undersökningar i medeltida naturstenskyrkor för att komma fram till vilket inomhusklimat som är skonsammast för murverken. Undersökningarna har gjorts med hjälp av datorsimuleringar, med randvillkor som baseras på verkliga klimatmätningar i kyrkorna. Hennes slutsatser kan sammanfattas: "Temperaturen bör ligga över 0°C och den relativa fuktigheten under 85 %. Såvida inte saltvittring ökar kan byggnaderna värmas upp kontinuerligt under året. Intermittent uppvärmning kan emellertid ge extra rörelser och därmed påfrestningar i de inre skikten av murarna och bör därför minimeras". Undersökningarna visar att snabba och stora variationer i relativ fuktighet ger större skador än små och långsamma variationer. Det hon säger är alltså att intermittent uppvärmning bör undvikas men att säsongsvariationer i klimatet kan tillåtas.

I ASHRAE Applications 2007 kapitel 21 presenteras olika klassificeringar på inomhusklimat som lämpar sig i museer och arkiv för bevarande av inventarier. Klasserna visar olika variationer och gradienter i relativfuktighet och temperatur och beskriver sedan vilka risker och fördelar som finns med varje klassificering. Vilken klass som lämpar sig bäst beror på vilken typ av byggnad, vilka inventarier som finns samt hur väl man kan kontrollera klimatet. Klasserna presenteras i tabell 5 nedan.

Tabell 5 Klimatklasser för bevarande enligt ASHRAE (Broström & Holmberg, 2009)

Börvärde eller årsmedeltal	Klass	Korta fluktuationer & gradienter	Säsongsvariation av börvärde	Risker och fördelar
50 % RF (Alternativt historiskt årligt medeltal för permanenta samlingar) Börvärdes-temperatur mellan 15 och 25 °C	AA Noggrann kontroll, inga säsongsvariationer	± 5 % RF ± 2 K	Ingen ändring av RF ± 5 K	Ingen risk för mekaniska skador på de flesta föremål och konstverk.
	A Noggrann kontroll, säsongsvariationer eller gradienter men ej båda samtidigt	± 5 % RF ± 2 K	± 10 % RF 5 K upp 10 K ner	Något ökad risk för mekaniska skador på mycket ömtåliga föremål och konstverk. Ingen mekanisk risk för övriga.
		± 10 % RF ± 5 K	Ingen förändring i RF 5 K upp 10 K ner	
	B Noggrann kontroll, större gradienter samt börvärdes-sänkning vintertid	± 10 % RF ± 5 K	± 10 % RF 10 K upp men inte över 30 °C	Moderat risk för mekaniska skador på mycket ömtåliga föremål, liten risk för de flesta målningar och fotografier, en del föremål och böcker, ingen risk för många föremål och de flesta böcker.
	C Förebygger alla högriskextremer	Mellan 25 -- 75 % RF året om Temperaturen sällan över 30 °C, normalt under 25 °C		Hög risk för mekaniska skador på mycket känsliga föremål, moderat risk för en del målningar och fotografier samt en del föremål och böcker, liten risk för de flesta föremål och böcker.
	D Förebygger hög fukt	Alltid under 75 % RF		Hög risk för plötsliga eller ackumulerade mekaniska skador på de flesta föremål och målningar på grund av frakturer vid låga RF-nivåer, förhindrar spjälkning och deformation i faner och inläggningar, målningar, papper och fotografier.

Sammanställningen nedan av rekommenderade klimat för bevarande av papper och pergament visar tydligt vilken osäkerhet som finns när det gäller kritiska tillstånd och lämpliga bevarandeklimat.

Tabell 6 Optimalt bevarandeklimat för papper och pergament enligt olika källor (Christoffersen, 1995)

Källa	Temperatur °C	Relativ fuktighet %
Thomson, G. 1978	Låg	45 - 65
Baynes-Cope, A.D. 1981	13 - 18	55 - 65
Wilson, W.K. och Wessel, C.J. 1984	20 - 21	25 - 30
Alkær sig et al., 1986	15 - 20	45 - 55
British Standards Institution, 1989	13 - 18	55 - 65
Riksarkivet författningssamling, 1994	16 - 20	30 - 50
ISO, 1995	14 - 20	45 - 55

2.3.3 Sammanställningar av krav och rekommendationer

För att få en mer lättöverskådlig bild över vilka rekommendationer som finns har jag sammanställt tidigare refererade källor i tabellform nedan. Här har deras rekommendationer sammanfattats och kortats ner för att få en klarare bild över vad de menar och för att lättare kunna jämföra dem mellan varandra.

Tabell 7 Allmänna råd och rekommendationer för bevarande, enligt olika källor

Allmänna råd och rekommendationer för bevarande		
Källa	Rekommendationer	Baseras på
Thomson (1994)	20°C och 50 ± 5 % RF 45 – 60 % RF	Den första rekommendationen baseras på vad som går att uppfylla. Den andra vad som är lämpligt för föremål
Davies (2006)	18°C och 45 % RF	Oklart
Kerschner (2008)	Låta både T och RF variera med årstiderna, men hålla RF mellan 35 - 65 %	Erfarenheter. Undersökt hur föremål påverkas av olika klimat
Mandahl (2009)	Jämn RF, med medelnivå mellan 50 - 70 %	Oklart

Tabell 8 Råd och rekommendationer för att undvika biologiska skador, enligt olika källor

Råd och rekommendationer för att undvika biologiska skador		
Källa	Rekommendationer	Baseras på
Broström & Holmberg (2009)	RF över 85 % kan endast tillåtas enstaka dagar. På sommaren bör RF inte överstiga 70 % under längre perioder. Bäst om RF < 60 %.	Forskning utförd av andra författare
Nevander & Elmarsson (2006)	RF _{krit} = 75 %, dvs. RF bör hållas under 75 %.	Forskning utförd av andra forskare
Riksantikvarieämbetet (2004)	Textilier bör förvaras vid 50 % RF. Redan vid 60 % finns risk för mögel.	Oklart
Broström et al. (2008)	Risken för mögel stor om RF överstiger 80 % under längre period. Under sommarhalvåret bör RF inte överstiga 70 %.	Oklart, möjligen från annan litteratur

Tabell 9 Råd och rekommendationer för att undvika mekaniska skador, enligt olika källor

Råd och rekommendationer för att undvika mekaniska skador		
Källa	Rekommendationer	Baseras på
LaFontaine (1979)	Rekommenderat förvaringsklimat på $21 \pm 1^\circ\text{C}$ och $50 \pm 3\%$	Extrapolering från observationer att stora variationer skadar en del föremål.
Erhardt & Mecklenburg(1994), Erhardt et al. (1996), Erlebacher et al. (1992), Mecklenburg & Tumosa (1991), Mecklenburg et al. (1998, 2005), Michalski (1991, 1993)	Obetydliga risker för mekaniska skador vid variationer på $\pm 10\%$ RF och $\pm 10^\circ\text{C}$. Vid variationer på $\pm 20\%$ RF och $\pm 20^\circ\text{C}$, eller större, börjar riskerna bli betydande.	Forskning på museiföremål och jämförelse av historiska byggnader med och utan klimat-anläggningar
Mecklenburg et al. (2005)	Olje- och akrylfärger blir känsliga vid låga temperaturer, men påverkas knappt av förändringar i RF.	Forskning
van Schijndel et al. (2008)	Begränsa uppvärmningshastigheten till 1,5 – 2,5 K/h vid intermittent uppvärmning.	Forskning, simuleringar
Schellen & van Schijndel (2011)	Begränsa förändringen i RF till 2 - 5%RF/h vid intermittent uppvärmning. Det sämsta man kan göra är att värma med full effekt. Det bästa vore att inte värma alls.	Forskning, simuleringar
Kaferhaus (2010)	Förändringshastigheten på RF bör vara maximalt 5 %RF/h, samt maximalt 10%RF/dygn.	Erfarenheter från museum, samt litteraturstudier
Mandahl (2009)	Uppvärmning bör ske så snabbt som möjligt med full effekt. Uppvärmningstiden vid intermittent uppvärmning bör vara ca 6 timmar.	Oklart
Broström et al. (2008)	Uppvärmningstiden vid intermittent uppvärmning bör vara 6 - 12 timmar. RF bör ligga mellan 50 - 70 %, med avvikelser från medelnivån på max 10 procentenheter. RF under 50 % kan accepteras under uppvärmningen. Håll låg grundtemperatur.	Andra rekommendationer och standarder
Haugen (1997)	För att undvika skador på murarna bör $T > 0^\circ\text{C}$ och $\text{RF} < 85\%$, samt bör man undvika intermittent uppvärmning.	Forskning, datorsimuleringar och mätningar
Leijendeckers (1995)	Orglar bör stämmas vid samma temperatur som de ska användas. Temperaturskillnaden över pipornas höjd bör inte vara mer än 1°C .	Forskning, beräkningar

Tabell 10 Råd och rekommendationer för att undvika kemiska skador

Råd och rekommendationer för att undvika kemiska skador		
Källa	Rekommendationer	Baseras på
Christoffersen (1995)	Håll både låg temperatur och låg RF.	Litteraturstudie

Sammanställningen visar tydligt att det inte finns några fastställda krav och rekommendationer, utan att det skiljer sig ganska stort mellan olika källor. Kraven på inneklimatet skiljer sig mycket mellan vad som är bäst och mest komfortabelt för människor och vad som lämpar bäst för bevaring av inventarier. I många fall är de till och med helt motstridiga. Därför måste man kompromissa och noga avväga behoven och utifrån det besluta vilka krav som man ska ställa på inneklimatet i varje enskild byggnad. Det är i princip omöjligt att uppfylla alla behov till hundra procent, men målet är att skapa ett klimat som är bekvämt för brukarna, energisnålt och utan att det ger upphov till skador på inventarierna.

2.4 Strategier för uppvärmning av kyrkor

Strategin som man använder vid uppvärmning av kyrkor påverkar både energiförbrukningen och inomhusklimatet. Beroende på vad man är ute efter samt kyrkans individuella egenskaper så lämpar sig olika strategier i olika fall. I styckena nedan refereras till litteratur inom detta.

2.4.1 Kontinuerlig uppvärmning

Kontinuerlig uppvärmning innebär att kyrkan alltid är uppvärmd så att människor kan uppleva termisk komfort. Denna strategi är ofta lämplig i stora kyrkor i städer som används dagligen. Följderna är höga energikostnader och problematiskt inomhusklimat för bevarande.

2.4.2 Intermittent uppvärmning

Intermittent uppvärmning betyder att en kyrka endast värms upp under en kort begränsad period i samband med förrättningar. Övrig tid står kyrkan ouppvärmad eller med låg skyddsvärme. Denna korta uppvärmning skapar en störning i det generella inomhusklimatet, men om värmesystemet och uppvärmningsstrategin utformats och sköts på rätt sätt kan det långsiktiga inomhusklimatet fungera bra och skapa goda förutsättningar för bevaring (European committee for standardization, 2012).

Anledningen till att använda intermittent uppvärmning är dels för att spara energi och dels för att skapa ett inomhusklimat som är skonsamt och behagligt för byggnaden, dess besökare och dess inventarier. Således kan denna strategi, om den utförs på rätt sätt, bidra till att skapa en rimlig kompromiss i inomhusklimatet mellan bevarande, komfort och energi (Broström et al., 2012).

Bevarandemässigt är meningen att man ska undvika långa perioder med torrt inomhusklimat som ofta förekommer vintertid vid permanent uppvärmning, vilket kan vara skadligt för många inventarier. Skyddsvärmen som används mellan förrättningarna ligger ofta i intervallet 8 - 15 °C, och används för att kontrollera den relativa fuktigheten snarare än för komfort. Men motiveringen till just denna temperatur är ofta otydligt utan grundar sig istället oftast på tradition (Broström, 2010). Det finns framförallt två sätt att styra skyddsvärmen på; antingen ställer man in en grundtemperatur som systemet ska hålla eller så styr man efter relativ fuktighet där värmen slås på då RF överstiger en viss nivå. Rent tekniskt är skillnaden att systemet antingen styrs av en termostat eller en hygroskop. Fördelen med att styra efter relativ fuktighet är att inomhusklimatet kan bli skonsammare mot

inventarier och byggnad samt att energikostnaderna oftast blir lägre. Nackdelen är att även temperaturförändringarna som då uppstår kan orsaka mekaniska skador.

Det finns också en del avigsidor med intermitterent uppvärmning. Det kan bland annat ge upphov till spänningar i material på grund av temperaturgradienten som uppstår då endast de yttre skikten av ett föremål värms upp, medan det längre in i är samma temperatur som tidigare. Andra nackdelar är att risken för upprepad saltutfällning ökar, ytor som inte värms upp lika snabbt som luften kan orsaka kondens, kallras samt ökad svärtning (European committee for standardization, 2012). Haugen (2007) har också visat att intermitterent uppvärmning kan vara skadligt för murverken i kyrkan.

Överlag är erfarenheterna med intermitterent uppvärmning positiva. Emellertid krävs ytterligare forskning kring hur föremål påverkas på lång sikt, samt vilka gränsvärden som man ska styra efter för att få ett så skonsamt klimat som möjligt (Broström et al., 2012).

För att spara energi bör uppvärmningen ske så snabbt som möjligt, alltså med full effekt. Desto högre effekt värmesystemet har desto snabbare kan uppvärmningen ske, och därmed får man en lägre energiåtgång. Däremot blir de fasta kostnaderna för elabonnemanget högre med högre värmeeffekt. Om så snabb uppvärmning som möjligt är den bästa strategin ur bevarandesynpunkt eller om uppvärmningen bör begränsas råder det delade meningar om. Künzle & Holz (1991) föreslog att uppvärmningen och sedan nedkylningen ska ske så snabbt som möjligt för att skydda träföremål. Tanken är då att föremålen inte utsätts för de skadliga klimaterna tillräckligt länge för att uttorkningsskador ska uppstå, och att det då endast är de yttre skikten av materialen som värms. Även Mandahl (2009) menar att uppvärmningen bör ske snabbt. Andra studier, av bland annat Schellen och van Schijndel, menar att uppvärmningen bör begränsas med hänsyn till förändringstakten på antingen temperatur eller relativ fuktighet. Detta för att minska de mekaniska påfrestningarna som uppkommer vid snabba förändringar.

Intermitterent uppvärmning kan ske med luftvärme. Detta har visat sig kunna vara skadligt för bland annat takmålningar eftersom det ofta ger upphov till höga temperaturer högt upp i rummen, samt att de varma luftströmmar som genereras kan torka ut känsliga material och föremål. Dock betyder det inte att man alltid får skador bara för att man använder luftvärme, men extra försiktighet bör vidtas. Mer om detta tas upp senare.

2.4.3 Ingen värme alls

Att helt sluta värma kyrkor innebär att man går tillbaka till hur det såg ut vid tiden då många av kyrkorna byggdes. Inomhusklimatet kommer då att följa utomhusklimatet, med en viss fördröjning på grund av trögheten i byggnaden. Detta innebär att på vinter blir det väldigt kallt och därmed blir det mycket svårt att då uppnå termisk komfort för människor. Ett annat problem är att den relativa fuktigheten kan bli väldigt hög och orsaka kondens, mögel osv. Detta problem uppstår framförallt på sensommaren då det både är varmt och fuktigt utomhus.

Det positiva med att inte värma är så klart att energianvändningen minskar drastiskt. En del menar också att inomhusklimatet skulle bli skonsammare mot både byggnad och inventarier, exempelvis visade Schellen och van Schijndel (2011) att mekaniska påfrestningar i träföremål kunde minskas genom att inte värma kyrkorna. Men att inomhusklimatet generellt sett skulle bli bättre går inte att säga utan att noggrant undersöka varje kyrka individuellt. Troligtvis skulle de flesta kyrkor få någon

form av fuktskador om man slutade att värma dem, vilket man se på skador som uppkommit genom historien, där bl.a. röta, insektsangrepp och frostsprängning har förekommit.

2.4.4 Endast skyddsvärme

Detta innebär att kyrkan värms endast för att kontrollera så att inte den relativa fuktigheten blir för hög, samt för att eventuella vattenledningar inte ska frysa. Denna strategi medför att man kan skapa ett skonsamt klimat ur bevarandesynpunkt men att det blir svårt att uppnå termisk komfort, framförallt i kalla klimatzoner på vintern.

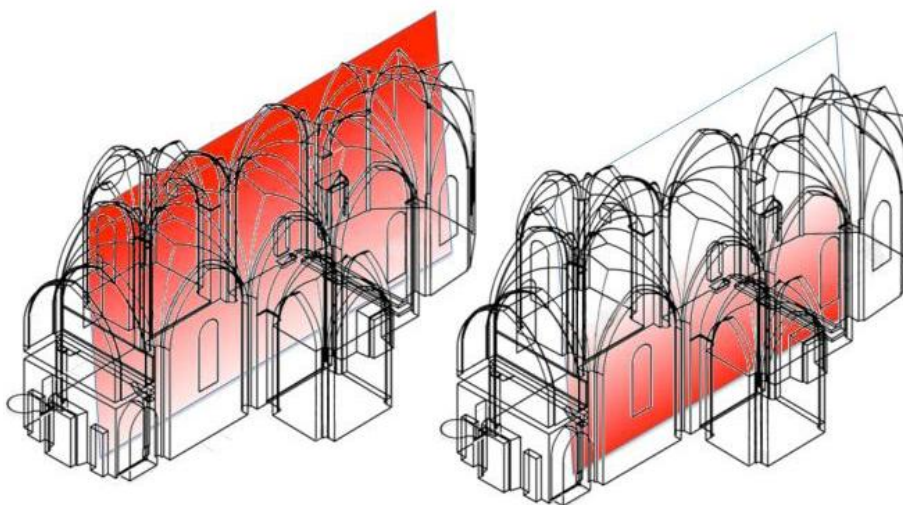
Strategin genererar högre energikostnader än att inte värma alls, men problemen med inomhusklimatet som man då har bör elimineras med skyddsvärmen. Jämfört med intermitternt uppvärmning sparar man energi eftersom man inte värmer vid förrättningar samtidigt som bevarandeklimatet blir skonsammare, men nackdelen är att man inte kan uppnå samma termiska komfort.

2.4.5 Zonindeldad uppvärmning

Syftet med att zonindela uppvärmningen är att de delar av kyrkan där känsliga föremål finns inte ska utsättas för varierande och skadliga klimat, samtidigt som man kan sänka energianvändningen genom att värma så lite som möjligt. Man värmer då endast lokalt där människor vistas och behöver värme för komfortens skull. Zonindeldad uppvärmning är oftast intermitternt. Det kan uppnås bland annat genom bänkvärmare som endast värmer området där besökarna vistas.

Ett problem med zonindeldad uppvärmning är att de flesta ytor förblir kalla och om man då har ett fukttillskott, t.ex. på grund av personbelastningen, kan hög RF eller till och med kondens uppstå. Andra problem är att stora luftrörelser kan förekomma samt att man inte får komfort i de delar som inte är uppvärmda, eller att de kalla ytorna kan orsakar obehag. Att man inte kan uppleva komfort i de zonerna som inte är uppvärmda är inget problem så länge ingen vistas där, men det kan vara svårt värma exakt alla zoner där man vistas.

Camuffo (2010) illustrerar den tänkta skillnaden mellan zonindeldad och central uppvärmning i figur 7 nedan. Vid den zonindelade uppvärmningen ska värmen hållas kvar i bänkkvarteren där den behövs, medan den i annat fall stiger upp till taket.



Figur 7 Zonindeldad uppvärmning (t. h.) och central uppvärmning (t. v.) (Camuffo, 2010)

2.5 Uppvärmningssystem och värmeförsörjning

Distributionen av värme till en byggnad kan ske antingen via vatten eller via luft. Vattenburna system använder oftast radiatorer och luftburna använder tilluftsdon som tillför övertempererad luft. Byggnader som värms med direktverkande el har inget distributionssystem utan värms direkt av elradiatorerna.

Värmeförsörjning kan ske på många olika sätt. Några exempel är:

- Förbränning av bränslen så som kol, olja, gas, ved, pellets
- Elektrisk energi genom direktverkande el, elpanna, värmepump
- Central värmearläggning för flera byggnader, så som fjärrvärme
- Solvärme genom solfångare

Värmen kan sedan avges via exempelvis:

- Varmvattenradiatorer
- Elradiatorer
- Golvvärme
- Konvektorer
- Värmefläktar
- Strålningsvärmare

Vid byte av värmesystem i befintliga byggnader bör man för titta på vilka åtgärder man kan göra för att minska värmebehovet innan man börjar bestämma och dimensionera för nytt. På så sätt kan man spara pengar både genom minskade energikostnader och genom att inte överdimensionera systemet.

Enligt Abel & Elmroth (2008) finns det fyra punkter som styr val av uppvärmningssystem:

- **Läge:** möjlighet till fjärrvärme, tillgång till biobränsle, tillgång till berggrund för borrhål etc.
- **Byggnadstyp:** ny eller befintlig byggnad, flerfamiljshus, lokalbyggnad, kulturminnesmärkt etc.
- **Miljöhänsyn:** energislag, bränsleslag etc.
- **Ekonomi:** kapitalkostnader, driftkostnader etc.

När det gäller ekonomin menar de att ju lägre värmebehov man har desto enklare och billigare bör värmesystemet vara.

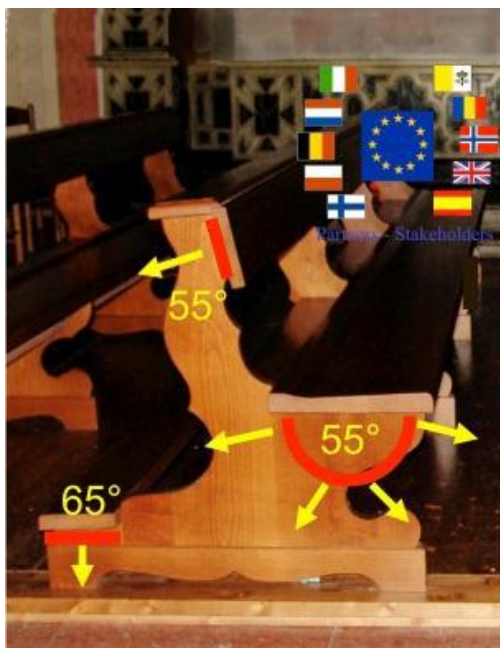
2.5.1 Strålningsvärmare

Vanligaste typer av strålningsvärmare i kyrkor är så kallade bänkvärmare, där strålningsvärmarna placeras under kyrkobänkarna. Meningen med dessa värmare är att man ska ge komfort för besökarna i bänkarna utan att påverka övriga byggnaden allt för mycket. Problem kan vara att besökarnas huvuden inte blir tillräckligt varma, samt att övriga personer som inte sitter i bänkarna inte uppnår komfort (European committee for standardization, 2012). Dessa problem kan undvikas genom att sätta igång system i förväg och således värma upp byggnaden innan man värmer upp besökarna. Givetvis blir då energiåtgången högre.

Enligt Madsen (1986) uppnår man bäst termisk komfort i en kyrka med elektriska strålningsvärmare placerade under bänkarna.

Andra typer av strålvärmare kan placeras i tak och på så sätt stråla ner på människorna. Problemet med dessa är estetiken försämras och kyrkans arkitektoniska drag kan förstöras om man sätter upp stora strålvärmare, vilket oftast inte är särskilt populärt.

I det EU-finansierade projektet Friendly-Heating undersöktes uppvärmning av kyrkor och slutsatserna därifrån var att bäst resultat åstadkoms med lokal IR-strålning från strålare med låg temperatur (Camuffo, 2010). Detta uppnås på ett bra sätt med hjälp av värmefolier som monteras i bänkarna, enligt figur 9. Folien består av ett eluppvärmt lager av grafit som sitter på ett stöd av glasfibrer, och sedan förseglat i plastfolie. Den är flexibel och kan därmed anpassas till specifika bänkar osv. Folien kan aldrig komma upp i riktigt höga temperaturer och därför finns det heller ingen risk för att man ska bränna sig på den. (Camuffo, 2010)



Figur 9 Placering av värmefolien i bänkarna (Camuffo, 2010)



Figur 8 Värmefolien innan montering (Camuffo, 2010)

2.5.2 Luftvärme

Luft-luftvärmepumpar är populära i småhus eftersom det är en relativt billig investering men har potential till att spara stora summor i uppvärmningskostnad. Användning i kyrkor är tämligen obeprövat, men det finns önskemål om utökad användning med anledning av de potentiella besparingarna, samtidigt som misstro finns kring dess negativa effekter.

Riskerna med luft-luftvärmepumpar, och även andra typer av luftvärme, i kyrkor är många. De kan bl.a. orsaka luftrörelser som ger upphov till svärtning och drag, temperaturfördelningen i kyrkorummet kan bli ojämn, installation kräver oftast håltagning i väggen, oljud från fläkten, samt att själva värmepumpen en estetisk försämring i sig.

Luftvärme med hög lufttemperatur har stor sannolikhet att ge upphov till mekaniska skador på föremål, framförallt högt upp i kyrkan. Den höga temperaturen ger en låg relativ fuktighet som kan orsaka spänningar och sprickor i träföremål och orglar (Schellen, 1998). Hur passa stora luftrörelser och skador som luftvärme ger upphov till är osäkert och forskning inom detta pågår (Brostöm, 2010). Det finns exempel på när det både har fungerat bra och när det har fungerat dåligt, vilket innebär att man måste vara försiktig. Det finns även fall där radiatorer och konvektorer har gett upphov till

skadliga luftrörelser (Brostöm, 2010) och således kan man inte helt enkelt säga att luftvärme är sämre ur det perspektivet bara för att deras själva funktion bygger på luftrörelser.

Användning av luftvärme för skyddsvärme vid intermittent uppvärmning är ett intressant alternativ för att spara energi. Tanken är då att luft-luftvärmepumpen endast dimensioneras för att täcka effektbehovet för skyddsvärmen. Detta bör passa värmepumpar bra eftersom de kräver en ganska jämn och låg effekt med låg lufttemperatur (Broström, 2010). Vid förrättningar när temperaturen ska höjas krävs då ytterligare värme, exempelvis från strålvärmare. När effektbehovet är lågt uppstår inte heller lika mycket luftrörelser och således kan man reducera problemet genom att inte använda luftvärme vid höga effektbehov.

Efter en undersökning som gjorts av Broström och Högskolan på Gotland (2010) där man installerade två luft-luftvärmepumpar för skyddsvärme istället för direktverkande elektriska bänkvärmare i Ludgo kyrka (vilken på många sätt påminner om Starby kyrka) i Rönö församling kom man fram till en del slutsatser angående effekterna. Följderna av de installerade värmepumparna var i stort sett endast positiva. Den förväntade positiva effekten med minskad energiförbrukning uppnåddes med stor marginal, 22 000 kWh per år. De negativa effekterna som man misstänkte var ökade luftrörelser, ökad svärtning, sämre komfort och ojämn temperaturfördelning, men ingen av de påföljderna kunde upptäckas. Däremot fick man självklart en estetisk försämring på grund av själva installationen av värmepumparna.

I en annan undersökning som gjorts av Broström et al. (2012) i Södra Kedum kyrka testade man att använda ett stort provisoriskt och portabelt värmeaggregat för att snabbt värma kyrkan vid förrättningar. Resultaten därifrån var inte riktigt lika positiva som resultaten från Ludgo kyrka. Problemet var att man fick en stor vertikal temperaturgradient, vilket varken är bra ur bevarande- eller energisynpunkt. De positiva resultaten var att genom att använda en sådan uppvärmningsstrategi kan man snabbt få upp värmen och sänka energiåtgången. Man fick också en bra horisontell temperaturfördelning. Inte heller i denna undersökning kunde man upptäcka skadliga eller diskomfortabla luftrörelser.

Det som man inte har undersökt är övriga effekter på bland annat byggnaden, inventarier, målningar etcetera. Men om värmepumparna placeras så att luftströmmarna inte riktas direkt mot känsliga material bör det inte uppstå några problem. En slutsats man kan dra av undersökningarna i Ludgo och Södra Kedum kyrka är att luftvärme lämpar sig bättre för att hålla skyddsvärmen än för att värma upp för komfort vid förrättningar.

Luft-luftvärmepumpar är kanske inte en optimal och långsiktig lösning för uppvärmning av kyrkor pga. de risker och nackdelar som finns, men i många fall är det bättre än flera andra lösningar tack vare ganska billig och enkel installation och stora uppvärmningskostnader kan relativt enkelt minskas. Även om värmepumpen drivs av el så är den effektivare än vanliga direktverkande elradiatorer. Detta eftersom man så att säga kan få ut mer energi än man stoppar in. Hur pass effektiv en luftvärmepump är beror på utomhustemperaturen samt värmepumpens egenskaper. Förhållandet mellan tillförd energi och hur mycket värme man får ut kallas COP-värde. Om $COP = 3$ innebär det att man får ut 3 kWh värme då man stoppar in 1 kWh el. På så sätt kan elanvändningen minskas vid byte från direktverkande el till luftvärmepump även om energibehovet är samma som tidigare.

2.5.3 Övriga

Varmvattenradiatorer är de vanligaste värmarna i stora delar av världen, och helt dominerande i Sverige. Det negativa med varmvattenradiatorer är att vattenledningssystem krävs i byggnaden samt att systemet kan frysa sönder om temperaturen understiger 0 °C.

Golvvärme är relativt vanligt i småhus. I kyrkor förekom en typ av golvvärme förr på 1800-talet i form av kalorifererna. Men sen dess har det inte använts i någon stor omsträckning. Eftersom de gamla kyrkorna ofta har helt oisolerade grunder lämpar sig inte modern golvvärme särskilt väl.

Andra vanliga värmare är konvektorer. Jämfört med andra radiatorer bygger de mer på luft rörelser än på strålning. Detta gör att de kan användas för att exempelvis motverka kallras från fönster, men i kyrkor där varma luftströmmar kan orsaka skador är de inte alltid lämpliga.

2.5.4 Styrning

Hur uppvärmningssystem i kyrkor styrs är av stor vikt eftersom det är där man kan se till så att de gör som man vill. Om styrningen är väldigt enkel, exempelvis med en termostat, kan det bli svårt att uppfylla alla kriterier på inomhusklimatet som man vill skapa, och om det är allt för komplicerat kan det leda till att man inte klarar av att hantera det på rätt sätt och därmed uppnår man inte heller önskad effekt. Således bör styrningen vara tillräckligt avancerad för att kunna hantera och styra efter kriterierna som önskas samtidigt som det är lättanvänt för alla inblandade.

De enklaste systemen för styrning är vanliga termostater eller hygrostater, som styr enbart efter temperatur respektive relativ fuktighet. Det har även utvecklats system speciellt för styrning av uppvärmning i kyrkor. De inriktar sig på att uppfylla kraven på just noggrann styrning och enkel användning.

JEFF Electronics har utvecklat ett system som de kallar CC Kyrka och kan användas för styrning av alla typer av uppvärmningssystem. Det styr efter både inne- och utetemperatur, samt efter den relativa fuktigheten. CC Kyrka går att koppla samman med deras CC Web, vilket gör det möjligt att styra och övervaka på distans.

Även ROWS har utvecklat liknande styrsystem anpassat för kyrkor, som de kallar Webbkontroll, och hanteras på distans genom deras WebOS. Liknande systemlösningar som de från JEFF och ROWS finns även från andra tillverkare, exempelvis Siemens.

2.6 Energieffektivisering

För att sänka energianvändningen för Sveriges byggnadsbestånd räcker det inte med att nya byggnader är energisnåla, utan det gör bara så att energibehovet inte ökar lika mycket som det hade gjort annars. Den största mängden energi går åt till att värma befintliga byggnader och därmed är det också där den största potentialen för energieffektivisering finns. De flesta kyrkobyggnader är gamla och är således inte byggda enligt moderna tekniker. Detta innebär att de är relativt oisolerade, otäta och saknar andra moderna system som exempelvis värmeväxlare. Allt detta betyder att byggnaderna ofta är riktiga energibovar och att det finns mycket att jobba med.

Viktigt att tänka på vid energieffektivisering av befintliga byggnader är att inte funktionen och inomhusklimat försämras, samt att kostnaderna inte blir för stora i förhållande till besparingarna.

2.6.1 Energieffektiviserande åtgärder (förutom byte till effektivare uppvärmningssystem)

I byggnader som är skyddade enligt Kulturminneslagen är det inte möjligt att göra samma och lika omfattande åtgärder som man kan göra i andra byggnader. Således kan man utesluta vissa ingrepp, så som tilläggsisolering av fasaden. Därmed är det viktigt att ha innehållet från kapitlet om regler för åtgärder i kyrkor (kommer senare) i åtanke när man ska göra energibesparande åtgärder.

Kyotopyramiden i figur 10 visar generell tankegång för energibesparande och hållbara åtgärder i byggnader. Den är framförallt anpassad för moderna byggnader, men det som kan vara viktigt att ta med sig från den, även för kyrkor, är att man först ska minska behoven innan man investerar i nya system. Detta kan göras bl.a. genom effektivare strategi för uppvärmning och tätning.

Lufttäta byggnader är viktigt ur både energi- och fuktsynpunkt. Tryckförhållandena vintertid ser oftast

ut så att man har ett övertryck vid taket och ett undertryck vid golvet. Luftläckage medför att man får infiltration av uteluft, vilket ger högre värmeförluster, och därmed högre energikostnader, samt kan det ge upphov till drag och diskomfort. Läckage av inomhusluft kan ge fuktproblem genom fuktkonvektion då varm och fuktig luft träffar kalla ytor. På grund av tryckförhållandena blir resultaten ofta kalla golv och fuktiga vindar. I en gammal kyrka utan mekanisk ventilation kan det bli problem om byggnaden är allt för tät eftersom luftomsättningen inte blir tillräcklig.



2.6.2 Värmebalans och allmän energiteori

För att uppnås önskad inomhustemperatur måste energi tillföras byggnaden. Den tillförda energin ska täcka energiförlusterna som sker genom klimatskalet och genom luftläckage. Förutom från uppvärmningssystemet kan energin komma från solinstrålning, personvärme, belysning, apparater etc. Dessutom påverkar byggnaden energibalansen genom att motverka förändringar och således kyla luften när temperaturen höjs, samt värma då temperaturen sänks. (Abel & Elmroth, 2008)

Totala energibehovet för en kyrka utan ventilationssystem kan summeras enligt:

$$Q = Q_{tr} + Q_i - Q_{int}$$

- Q_{tr} = Transmissionsförluster
 Q_i = Värmeförluster genom luftläckage
 Q_{int} = Intern värmeutveckling, inkl. solstrålning

Transmissionsförlusterna beror på byggnadens egenskaper, dvs. värmeledningsförmågan genom klimatskalet. Dessutom spelar temperaturdifferensen mellan inne och ute roll. Utomhustemperaturen kan man såklart inte göra något åt, men genom att sänka innetemperaturen sänker man även energibehovet. Värmeförlusterna genom luftläckage beror på tätheten samt tryckskillnaden över klimatskalet.

2.6.3 Effektbehov

Effektbehovet för en kyrka blir stort eftersom luftvolymen är så pass stor och man vill uppnå relativt snabb uppvärmning vid intermittent värmning. Desto snabbare man vill att uppvärmningen ska ske desto större effektbehov får man. För att energikostnaden ska bli så låg som möjlig vill man värma så snabbt som möjligt, dvs. ha hög effekt på värmesystemet. Men ett system med hög effekt är oftast dyrare och fasta avgifter på abonnemanget blir högre, och därför måste man hitta en balans mellan effektkostnad och energikostnad. Dessutom måste man ta hänsyn till bevarande och således kontrollera så att förändringshastigheten på temperatur in blir skadlig.

Högt effektbehov inträffar endast ett fåtal gånger på ett år och därför kan man välja att dimensionera uppvärmningssystemet efter energibehovet istället för att hålla nere investeringskostnaden. Uppvärmningssystemet kan då exempelvis täcka ca 90 – 95 % av energibehovet, men endast ca 80 % av effektbehovet. För att täcka det allra högsta effektbehovet kan man installera ett billigare alternativ, men med dyrare kWh-pris, som bara används just vid effekttopparna, t.ex. direktverkande el.

Effektbehovet kan beräknas på vanligt vis, dvs. genom att beräkna transmissions- och ventilationsförlusterna, enligt:

$$P = Q_{tot} \cdot (T_i - T_u) - P_{gratis}$$

Denna formel är anpassad efter konstant inomhustemperatur och därför svårt att applicera vid intermittent uppvärmning. Däremot passar den bättre till att beräkna effektbehovet för att hålla grundtemperaturen. I så fall får ytterligare beräkningar göras för att få fram den effekt som behövs för den tillfälliga uppvärmningen.

Broström (1996) beskriver en metod för att beräkna effektbehovet vid intermittent uppvärmning, alltså effekten som krävs vid den tillfälliga uppvärmningen vid förrättningar. Där delas det totala effektbehovet in i sju delar; transmissionsförlust, ventilationsförlust, effekt tillförd luften, effekt tillförd väggen, effekt tillförd värmesystemet, solinstrålning samt internt värmetillskott. Formeln kan skrivas:

$$P(t) = P_{tr}(t) + P_{vf}(t) + P_l(t) + P_s(t) + P_v(t) - P_{sol}(t) - P_{int}(t)$$

P_{tr} =	transmissionsförlust (W)
P_{vf} =	ventilationsförlust (W)
P_l =	effekt tillförd luften (W)
P_s =	effekt tillförd systemet (W)
P_v =	effekt tillförd väggen (W)
P_{sol} =	solinstrålning (W)
P_{int} =	internt värmetillskott (W)
t =	Uppvärmningstiden (s)

$$P_{tr} = (\sum U_j \cdot A_j) \cdot (T_i - T_u)$$

U_j =	U-värde för aktuell byggnadsdel (W/m ² K)
A_j =	Area för aktuell byggnadsdel (m ²)

$$P_{vf} = (n \cdot \rho_l \cdot c_l \cdot V) \cdot (T_i - T_u)$$

- $n =$ luftomsättningar (s^{-1})
 $C_l =$ värmekapacitet för luften (J/kgK)
 $\rho_l =$ luftens densitet (kg/m^3)
 $V =$ rummets volym (m^3)

$$P_l = \frac{\rho_l \cdot c_l \cdot V \cdot (T_i - T_{i0})}{t}$$

- $T_i =$ inomhustemperatur vid tiden t ($^{\circ}C$)
 $T_{i0} =$ begynnelsestemperatur ($^{\circ}C$)

$$P_s = M_s \cdot c_s \cdot \frac{T_s - T_{s0}}{t}$$

- $M_s =$ värmelagrande massa i värmesystemet (kg)
 $C_s =$ värmekapacitet för M_s (J/kgK)
 $T_s =$ värmesystemets temperatur vid tiden t ($^{\circ}C$)
 $T_{s0} =$ värmesystemets begynnelsestemperatur ($^{\circ}C$)

$$P_v = \frac{\Delta T_i}{\frac{u}{A} \sqrt{t} + \frac{1}{\alpha \cdot A}}$$

- $\Delta T_i =$ önskad temperaturökning på inomhusluften (K)
 $u =$ väggens värmetröghet
 $\alpha =$ värmeövergångskoefficient mellan vägg och luft (W/m^2K)
 $A =$ area (m^2)

Där
$$u = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \lambda_v \cdot C_v \cdot \rho_v}}$$

- $\lambda_v =$ Värmekonduktivitet för väggen (W/mK)
 $C_v =$ Värmekapacitet för väggen (J/kgK)
 $\rho_v =$ Väggens densitet (kg/m^3)

Innan man då kan beräkna effektbehovet på systemet måste man bestämma temperaturhöjningen, dvs. grund temperatur och önskad "komforttemperatur", samt uppvärmningstiden.

Dessutom måste man veta luftläckaget i byggnaden. Detta är väldigt svårt att mäta i en kyrka på grund av dess stora volym och ofta otäta klimatskal. Därtill varierar den med avseende på vindförhållande och ute- och innetemperatur. Den termiska drivkraften i självdrag beror på temperaturdifferensen mellan inne och ute, och därmed blir läckages större ju kallare det är ute och när kyrkan värms för förrättningar. Enligt tidigare studier i Sverige har omsättningen uppskattats till 0,1 – 0,3 oms/h (Lagerstedt, 1971). I Tyskland använder man däremot 1 – 2 oms/h som schablonvärde (Pfeil, 1975).

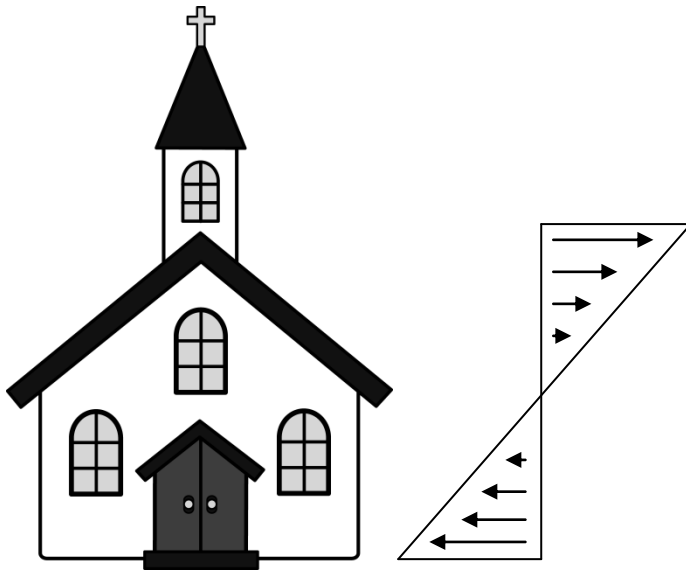
2.6.4 Fukt och värme

Konstruktioner kan lagra värme och fukt och på så sätt motverka förändringar och svängningar. Hur passa mycket konstruktionen kan lagra beror på fukt- värmekapaciteten i materialen. Tunga konstruktioner som tjocka sten- och betongväggar har större kapacitet än lätta träregelväggar och kan därmed bättre jämna ut variationerna.

Eftersom kyrkorna är gamla finns det ingen byggfukt att ta hänsyn till. Fukttillskottet kommer istället från människor, marken, utomhusluften mm. Fukttillskottet är skillnaden i ånghalt inomhus och utomhus, och mäts i g/m^3 . Det är ventilationens uppgift att se till så att fukttillskotten inte blir för stort, då det kan leda till kondens eller andra fuktproblem. Kyrkor är lite annorlunda jämfört med vanliga bostäder och lokaler i detta avseende, dels eftersom där relativt sällan vistas människor och dels för att man varken diskar, duschar, tvättar osv., och således har man generellt sett ett mindre fukttillskott. Det som däremot kan förekomma är bristfällig dränering eller andra brister i konstruktionen som leder till fukttillskott från mark, luft etc. Fukttillskottet kan ske genom olika transportmekanismer.

Ångdiffusion är en form av fukttransport som sker då man har en skillnad i ånghalt mellan ute och inne, och således får en potentialskillnad. Tegelmurverk (som finns i kyrkan) har en viss möjlighet att buffra fukt som transporteras via diffusion, oftast utan att skador uppkommer. Problemen kan istället bli att vid uttorkningen av fukten sker en saltutfällning på murverket. I många kyrkors fall där byggnaden står direkt på marken utan ordentlig grundläggning kan diffusion även ske från marken in i byggnaden, speciellt när grunden inte är isolerad och tät. Då uppstår en värmekudde under byggnaden som ökar skillnaden i ånghalt, och därmed potentialskillnaden, och bidrar till ökad fuktdiffusion. Dessutom så är ofta de kapillärbrytande skikten under gamla byggnader i dåligt skick, eller saknas helt, och fukt kan då transportera kapillärt från marken upp till byggnaden.

Fukttransport kan också ske genom fuktkonvektion, vilket innebär fukten transporteras med luften genom otätheter i konstruktionen. Hur stort flödet är bestäms av skillnaden i lufttryck över konstruktionen samt otäthetens storlek. Problem uppstår då lufttrycket är större inomhus än utomhus, och varm och fuktig luft transporteras utåt och möter då kalla ytor där fukten kan kondensera. Eftersom övertrycket i en byggnad oftast är störst vid taket blir också fuktkonvektionen oftast störst där, vilket kan leda till fuktskador på vindar och yttertak. Tryckskillnaderna orsakas av temperaturskillnader, vindförhållanden samt ventilationssystemet.



Figur 11 Tryckförhållande i en kyrka vintertid utan inverkan av fläkt och vind, samt med jämt fördelade otätheter. Oftast har man då övertryck i taknivå och undertryck vid golvet

Sommartid kan förutsättningarna vara de motsatta, speciellt i stenkyrkor med tung konstruktion. Då har man ofta svalare inomhus än utomhus, och varm och fuktig utomhusluft kan då orsaka hög relativ fuktighet och kondens inne i kyrkan.

2.7 Hur arbetar man med utbyte av värmesystem i kyrkor?

Ändrad uppvärmning i kyrkor är tillståndspliktig. Om en åtgärd är tillståndspliktig enligt kulturminneslagen måste man skicka in en tillståndsansökan till länsstyrelsen. Vid tveksamheter angående tillståndspliktigheten bör alltid Länsstyrelsen rådfrågas.

Krav på dokumentation vid bygg- och anläggningsarbeten generellt enligt Arbetarskyddsstyrelsens författningssamling 1999:3.

Enligt Riksantikvarieämbetets skrift om byggnadsvård "Fem pelare" är det väldigt viktigt att man undersöker byggnaden och dess miljö noggrant för att förstå dess historia och individuella förutsättningar. Detta för att sedan kunna ta bra och genomtänkta beslut om eventuella åtgärder.

Vid utredning om byte av uppvärmningssystem bör man undersöka byggnadens ingående byggmaterial och deras egenskaper, konstruktionsstruktur, fukt- och värmeförhållanden med mera. Det är också viktigt att undersöka byggnadens historia avseende utförda åtgärder, vilka förändringar som gjorts, vilka problem och skador som uppstått etc. (Broström et al., 2008).

Med kyrkor och deras kulturhistoriska värde måste man ha ett visst förhållningssätt när man ska göra förändringar. Det handlar både om varsamhet och om reversibilitet. Med varsamhet menas att man ska vara försiktigt och kanske hellre göra för lite än för mycket. Eventuellt kan inte alla krav uppfyllas på grund av detta men kyrkan tar inte så stor skada. Reversibilitet innebär att åtgärder som man utför inte ska vara permanenta, dvs. man ska kunna gå tillbaka till hur det var tidigare. Detta är ett sätt att skydda byggnaden mot stora förändringar som kan förstöra kulturhistoriska värden. Det kan däremot leda till mindre estetiskt tilltalande lösningar med exempelvis synliga ledningar, samt att vissa lösningar utesluts även om de i övrigt är optimala.

2.7.1 Regler och bidrag

Enligt kulturminneslagen är kyrkobyggnader skyddade om de uppförts före 1940, eller om Riksantikvarieämbetet beslutat att de ska vara skyddade. Detta skydd innebär att om några förändringar ska göras till byggnaden krävs tillstånd från Länsstyrelsen. Kyrkobyggnader och kyrkotomter skyddas också av en allmän hänsynsregel från kulturminneslagen som innebär att de ska "vårdas och underhållas så att deras kulturhistoriska värde inte minskas och deras utseende och karaktär inte förvanskas".

Kyrkoantikvarisk ersättning kan sökas av församlingar i samband med åtgärder som ska främja vårdandet och bevarandet av kyrkliga kulturminnen. Ersättningen utgår som kompensation för kostnader som uppkommer till följd av kulturminneslagens bestämmelser. Det kan exempelvis handla om anpassade lösningar för tekniska installationer samt skadeförebyggande åtgärder.

Stiftet beslutar hur fördelningen av ersättningen ska se ut i deras område. Dessutom har Riksantikvarieämbetet och Länsstyrelsen viss påverkan på fördelningen, både på nationell och på regional nivå, för att statens mål med ersättningen ska uppnås.

För fullständiga villkor angående kyrkoantikvarisk ersättning, se "Villkor för kyrkoantikvarisk ersättning" från Svenska kyrkan.

Kyrkobyggnadsbidrag är en annan ersättning som församlingar kan få för arbeten på själva kyrkobyggnaden. Ersättningen fördelas med hänsyn till församlingarnas ekonomi.

Stiftsstyrelsen i Lund samt Länsstyrelsen har en del krav på underlag och förarbete som måste göras vid byte av värmesystem inför ansökan om kyrkoantikvarisk ersättning och kyrkobyggnadsbidrag:

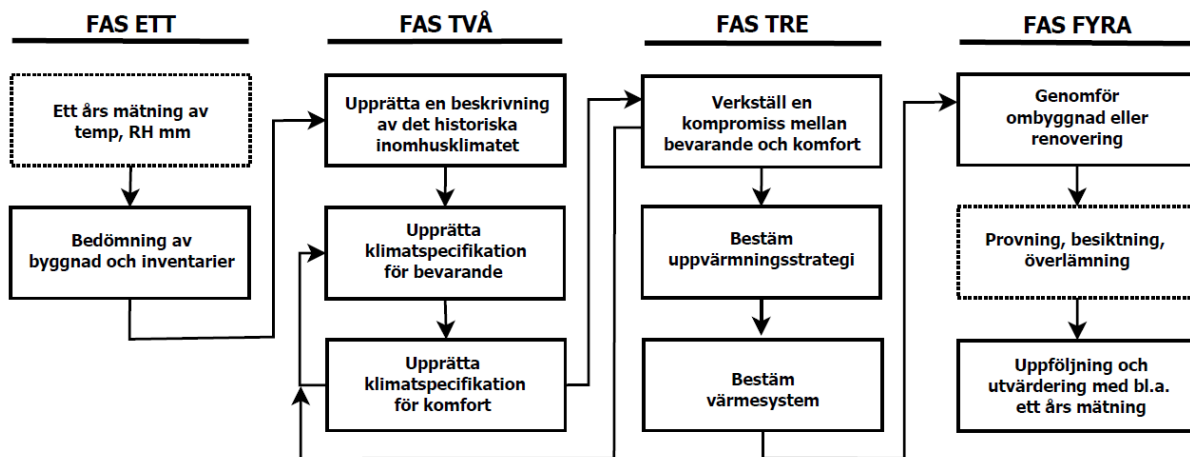
- Mätningar på inomhusklimatet måste göras under årets alla årstider, samt en grundlig efterföljande analys
- Beräkning av effektbehov för intermitterent uppvärmning för nytt värmesystem, samt dimensionering av placering av radiatorer
- Nuvarande system ska vara bevisat skadligt för byggnaden och inventarierna, samt att elinstallationer (vid elvärme) är brandfarligt pga. ålder
- Dimensioneringen för det nya värmesystemet ska vara "skraddarsytt" för varje enskild kyrka, så att klimatet blir lämpligt för både brukare och inventarier

2.7.2 Generell metod för byte av uppvärmningssystem

För att göra ett grundligt arbete finns olika processer, eller arbetsgångar, som ska fungera som ett hjälpmedel i arbetet. Genom att följa dessa ska förhoppningsvis resultatet bli bättre och mer genomarbetat, vilket ökar chanserna till bidrag för åtgärderna.

I "Råd inför renovering eller byte av värmeinstallation i kyrkor i Lunds stift" av Nylander & Hallin (2012) hittar man en illustration av processen för projektering och genomförande av renovering eller byte av värmesystem i skyddade kyrkor i Lunds stift. Processen kommer ursprungligen från den europeiska standarden EN 15759-1:2011 E för konservering kulturhistoriskt värdefulla byggnader, men har anpassats till svenska av Nylander & Hallin.

Utgår man från den när man gör sin undersökning och förarbete ökar möjligheterna för ett väl genomfört och genomtänkt förslag, och därmed ökar också chansen att få ekonomiskt stöd för att utföra åtgärden.



Figur 12 Flödesschema för arbete med utbyte av värmesystem i kyrkor (Nylander & Hallin, 2012)

I fas ett handlar det dels om att ta fram fakta om byggnaden, tekniska egenskaper, historiska åtgärder, individuella förutsättningar etc. Detta är ett viktigt steg eftersom det inte går att använda generella lösningar eller alla metoder och lösningar för projektering av nya byggnader. Man ska också ha utfört klimatomätningar i byggnaden under årets alla årstider så att man kan se hur nuvarande system och strategi fungerar och vilket klimat det skapar.

Därefter ska man i fas två utifrån bedömningen av byggnaden och mätningarna beskriva det historiska inomhusklimatet, vilka skador som uppkommit osv. Man ska också ta fram klimatspecifikation för både bevarande och för komfort för brukarna.

I fas tre ska man hitta en tydlig kompromiss mellan bevarande och komfort för klimatspecifikationen. Klimatspecifikationerna är individuella för varje byggnad och beror bland annat på användning, inventarier och byggnadens egenskaper. Efter det ska man bestämma lämplig uppvärmningsstrategi, där församlingen synpunkter måste beaktas, och sedan väljs samt projekteras för värmesystem och värmekälla.

I fas fyra sker utförandet av själva åtgärden, med allt vad det innebär, samt efterföljande uppföljning.

3 Byggnadsbeskrivning Starby kyrka



Figur 14 Starby kyrka utvändigt



Figur 13 Starby kyrka invändigt

Denna undersökning och beskrivning ska omfatta tillräckligt med informationen och detaljer för att kunna analysera byggnaden och användas som underlag vid vidare analys och senare åtgärdsförslag.

3.1.1 Metod

Mycket av informationen till denna beskrivning tas från underhållsplanen för Starby kyrka (2006). Dock är den tekniska beskrivningen där bristfällig och inte helt uppdaterad. Därför görs även egna undersökningar, besiktningar och analyser för att försöka få en mer korrekt beskrivning. Även samtal med personer från församlingen kommer att vara nödvändigt för att få fram all information om kyrkan.

Det nuvarande inomhusklimatet kommer att mätas och analyseras i ett annat avsnitt.

3.1.2 Beskrivning av byggnaden

Beskrivning av kyrkans arkitektoniska drag samt kort om dess historia, direkt taget från Underhållsplanen för Starby kyrka:

Starby kyrka är ursprungligen en romansk byggnad med långhus i två travéer och rakslutet kor samt ett senare under medeltiden tillfogat kvadratisk torn i väster. Kyrkan utvidgades åt öster 1854-55 med kor och en halvrund absid. Tornet hade byggts om redan 1815. Det kryssvälvda kyrkorummet präglas framförallt av renoveringen från 1911 under ledning av Theodor Wåhlin.

Starby kyrka uppfördes av tegel under medeltiden och dateras till 1200-talet. De äldsta delarna av kyrkan är långhusets västparti vilket motsvarar cirka 2/3 delar av kyrkorummet. De två västra valven dateras till 1400-talet. Tornet uppfördes av gråsten 1818-19. Kyrkans östra del med kor och absid uppfördes 1854-55. Till anläggningen har hört en fristående klockstapel av trä placerad vid kyrkans västra gavel. Vid södra sidan har funnits ett vapenhus som länge var kyrkans enda ingång.

Kyrkan består idag av torn i väster, långhus och kor och halvrund absid i öster. Tornet är smalare än långhuset, koret är jämbrett med långhuset. Det finns inga uppgifter om vem som var kyrkans ursprungliga arkitekt eller byggmästare.

Hela kyrkan är putsad och färgad i vitt och karaktäriseras av den gestaltning som skapades i samband med utvidgningen i öster 1854-55.

För en mer utförlig beskrivning av byggnaden och dess interiör, se underhållsplanen. Beskrivningarna där beskriver framförallt estetiska och arkitektoniska egenskaper, de tekniska beskrivningarna är bristfälliga.

För att kunna göra beräkningar på effekt- och energibehov samt för att kunna analysera skadeorsaker m.m. behöver man veta lite mer om de tekniska egenskaperna på byggnaden och materialen. Därför presenteras nedan lite mer info om detta och status på olika byggnadsdelar. Mycket är osäkert och en del antaganden har behövt göras.

Byggnadens golvarea är ca 159 kvadratmeter.

3.1.2.1 Grundläggning och grundförhållanden

Osäkert. Antagligen bristfällig dränering, ingen isolering mot marken, endast lite "kapillärbrytande" grus och sten, sen golvet direkt på det. Viss lutning på marken mot kyrkans entré. Marken under byggnaden består av glacial lera (enligt SGU).

I byggnadshistorien, som följer nedan, går att läsa att 20 – 25 cm under det nuvarande golvet finns ett gammalt golv bestående av tegel och sten. Där står också att mellan det nya och gamla golvet finns ett lager gammal jord, vilket inte i så fall är kapillärbrytande. Om inte annat kapillärbrytande material finns under det gamla golvet så kan vatten stiga rakt upp i byggnaden.

3.1.2.2 Yttermurar

Ytterväggarna består av tegelmur med utanpåliggande kalkputs. Tjockleken på väggarna varierar något, i långhuset är den ca 900 - 1000 mm och i vapenhuset är den ca 1300 mm.

Ytermuren har utsatts för en hel del mekaniska skador i form av vittring.



Figur 16 Skador på insidan av ytterväggen



Figur 15 Skador på valvpelare

3.1.2.3 Fönster och dörrar

2 stycken tvåglasfönster i koret, 6 stycken enkelglasfönster i långhuset och 2 stycken i vapenhuset. Enkelglasfönstren brukar även ha ett innerfönster, men det har varit nermonterat i år på grund av problem med kondens mellan rutorna. I tornet finns ytterligare 7 fönster.

Area fönster: ca 1200 x 1720 mm + $\pi \cdot 580^2 / 2$ per fönster. De i tornet är mindre.

Stor dubbeldörr vid entrén samt en enkeldörr i koret.

Varken fönster eller dörrar är särskilt täta eller isolerade.

3.1.2.4 Yttertak

Koppertak. Ska renoveras inom snart framtid.

3.1.2.5 Innertak

Puts med takmålningar. Tegelvalven har tilläggsisolerats med 300 mm mineralull år 1984.

Takmålningarna som finns idag målades 1912.

3.1.2.6 Golv

Kalkstengolv i stora delar av kyrkan, lagt 1912. Vid bänkarna är det trägolv. Golvet kan bli väldigt fuktigt och ibland även helt blött, framförallt på sensommaren men även under vår och tidig sommar. Vissa biologiska skador på trägolvet, samt vissa mekaniska skador på stengolvet. Undersidan av trägolvet hade behövt undersökas eftersom sannolikheten att där finns mögel och andra biologiska skador är stor. Kalkstengolven utsätts för varierande temperatur och hög och varierande relativ fuktighet och detta har förmodligen orsakat saltutfällningen och vittringsskadorna. Orsaken till den höga relativa fuktigheten kommer att undersökas vidare i senare kapitel.



Figur 17 Vittringsskador och saltutfällning på golvet



Figur 18 Blött golv i maj 2013 (Arvidsson)

Problemen med fuktigt golv är inget nytt fenomen i Starby, det går t.ex. att läsa i byggnadshistorian nedan att man år 1963 bytte ut rötskadade golvbjälkar.

3.1.2.7 Uppvärmningssystem

Uppvärmningen av kyrkan sker med direktverkande bänkvärmare, som installerades på 1950-talet, samt ett par andra radiatorer placerade i koret och på orgelläktaren. Bänkvärmarna är gamla och kvarvarande livslängd är troligen inte särskilt lång. Enligt elrevision utförd i oktober 2012 fastställdes

att systemet, inklusive radiatorerna och elledningarna, bör bytas ut till nytt system. Huvudsäkringens på fastigheten är på 63 ampere.

Nuvarande effekt:

I långhuset: 53 stycken bänkvärmare á 350 W och 2 stycken á 500W

I koret: En radiator på 500 W och en på 750 W. (Osäkert om och hur de används)

Orgelläktaren: En radiator på 1125 W och en konvektor på 775 W. (Även här osäkert på användning)

Detta ger en total effekt på ca 22 000 W = 22 kW.



Figur 19 Bänkvärmare i Starby kyrka

Innan bänkvärmarna installerades värmdes kyrkan med två ugnar placerade i långhuset.

3.1.2.8 Användning

Kyrkan används för gudstjänster och andra förrättningar så som bröllop, dop etc. Skyddsvärmen som är igång då kyrkan inte används är inställd på 12 °C, och vid förrättningar höjs värmen till ca 19 °C då behov finns. Värmen höjs oftast en till två dagar innan förrättning och sänks igen direkt efter. I snitt används kyrkan 1-2 gånger per månad, med varierande antal besökare beroende på aktivitet. Vid gudstjänster är där ca 5-10, dop ca 30, och bröllop ca 60 stycken i genomsnitt (enligt grundinventeringen i Strövelstorps församling, 2012). Totalt sett är där plats för ca 120 besökare i kyrkan.

3.1.2.9 Ventilation

Ingen mekanisk ventilation, endast självdrag.

3.1.2.10 Luftrörelser

Naturliga luftrörelser, plus små lokala luftrörelser orsakade av fläktarna i avfuktarna som står på orgelläktaren och i koret. Bänkvärmarna ger inte upphov till lika stora luftrörelser som andra radiatorer hade gjort, vilket kan förklara varför man inte har särskilt stora problem med svärtningar.

3.1.2.11 Befuktning

Ingen mekanisk befuktning. Fukttillskott från personer, utomhusluft, marken, muren etc.

3.1.3 Byggnadshistoria

Kyrkans historia över byggnaden och utförda åtgärder och renoveringar. Sammanställningen har gjorts av ITARK Arkitektkontor AB och är tagen från underhållsplanen för Starby kyrka.

1200-tal. Kyrkan byggs av tegel.

1400-tal. Valvslagning i kyrkan.

1600-tal. Kyrkans dekorationsmålningar på valvribbor och predikstol dateras till 1600-talet.

1662. Från detta år finns den äldsta kända beskrivningen av kyrkan i en räkenskapsbok:

”Kyrkan är byggd av tegelsten, utan torn och täckt med bly. Vapenhuset är byggt av tegel och täckt med taksten. För detta finns en ekdörr och inuti är ett furuloft. Klockehuset är av trä, gammalt och förfallet. Däruti hänger en klocka. Kyrkan inuti är välvd och har välvning av sten, putsad och vit. På den södra sidan är två fönster, på den norra sidan är ett och på kortsidan ett ”.

Samma år beskrivs klockstapeln som gammal och förfallen.

1700-tal. Uppgifter om att det finns en orgel i kyrkan.

1737 byggs en ny klockstapel av timmerman Jeppe Tulin. Byggnadsmaterialet hämtades från Halland.

1813. Uppgift finns om en ritning till ett nytt torn upprättad av murarmästare Bergh från Ängelholm.

1815. Ny ritning till tornet upprättad av arkitekt A Almfelt fastställd av Kongl Majt 1815. ÖIÄ hade förordat ett högre torn än det första förslaget.

1818-19 byggdes tornet av gråsten och kyrkan reparerades. Kyrkans ”söndriga” blytak ersätts med ett spåntak. Orgelläktaren byggs.

1821. Kyrkostämman beslutar att uppföra ett torn eftersom klockstapeln var i dåligt skick.

1842. Lagning av fönster.

1843. Reparation av bänkar och fönster.

1844. Takreparationer, rengöring och fernissning av altartavlan, målning av bänkar och altarskrank.

1845. Alla tak tjäras.

1846. Tornet förses med järnband, reparation av bänkarna.

1848. Överintendentämbetet (ÖIÄ) godkänner ritningar till kyrkans utvidgning. Plåtbläggning i fönstersmygarna.

1850. Diverse reparationer av altarskranket.

1851. Diverse reparationer bland annat av bänkarna, en ny bänk till vapenhuset.

1852. Reparation av taket, fönster och ”åtskillige stolar i kyrkan”.

- 1853.** Rappning och vitmening av kyrkan, lagning av fönster.
- 1854-55.** Kyrkan förlängs i öster med kor och halvrund absid.
- 1855.** Tjärstrykning av taken, målning av predikstol.
- 1860.** Inköp av järnportar till kyrkan.
- 1862.** Ny orgel till orgelläktaren byggd av orgelbyggare P Söderling från Göteborg. Orgeln hade sju stämmor och pipor av trä som efter relativt kort tid ersattes av metallpipor. Ny nummertavla, reparation av torndörren.
- 1864.** Tjärstrykning av taken.
- 1865.** Målning av sakristiedörren.
- 1871.** Reparation av torn- och kyrktak. Två tunnor tjära går åt till att tjära taken.
- 1874.** Reparation av taken och orgeltangentbordet.
- 1902.** Lagning av valvet i koret, väggarna målade i "ek".
- 1875.** En trappa till orgelläktaren, en bänk och 20 nya tangenter till orgeln.
- 1878.** Nytt koppartak på tornet. Inköp av två Guerneyska ugnar. Lagning och tjärning av kyrkans spåntak. Stoppning av altarrundeln med nöthår och skinn. Inköp av ett par altarljusstakar.
- 1880.** Inköp av två kommunionkannor från Höganäs.
- 1881.** Större reparation, insättning av kyrkstolar och nya bänkar mm. Inköp av 250 golvsten från Bjuv.
- 1882.** Inköp av en ljuskrona.
- 1885.** Golvläggning och inköp av 42 stolar.
- 1886.** Zinkbeklädnad av tornet, måleri- och snickeriarbete.
- 1887.** Lagning av en ljuskrona, målning och bronsering av ljusbärare.
- 1890.** Nytt koppartak "å en del av kyrkan".
- 1891.** Inköp av en ny ljuskrona med länk.
- 1893.** Vitmening av kyrkan.
- 1894.** Inköp av dopfunt.
- 1899.** O Andersson gör en ritning till kyrkans förändring.
- 1900.** Kyrkokalken lagad och förgylld.
- 1901.** Reparation av orgeln.

1902. Kassaskåpet målat, ändring av de två främsta bänkarna i kyrkan, altarskranket och två pallar omklädda, kyrkan vitmenade in- och utvändigt.

1904. "Panelat 2 portar".

"För verkställt arbete medelst jernband kring Starby kyrkas torn, jemte materialkostnader dertill har jag idag af nemnde kyrkas kassa uppburit kronor 290".

1910. Lagning och vitmening av kyrkan. Inköp av oblatask N:o 18 från A G Dufva, Stockholm. Inköp av kassaskåp.

1911. Förgyllning av korset på tornspiran, förgyllning på läktaren, förgyllning och försilvring av predikstolen, målning av fönster och bänkar samt vapenhusets och läktarens trappa. Räkning från Theodor Wåhlin 210 kr för sju resor till Starby kyrka. Jöns Mårtensson, Lund tillverkar fyra skulpturer till predikstolen i Starby kyrka. Firma A W Tornberg, Urfabrik och Urhandel etablerad 1859, Stockholm, levererar och uppsätter tornur med tillbehör.

1912. Genomgripande restaurering under ledning av domkyrkoarkitekt Theodor Wåhlin. Mittgången görs bredare och på golvet i hela kyrkan läggs kalkstensplattor. Nytt altarskrank, utrymmet framför altaret görs större genom att några bänkrader plockas bort. Valvens takmålningar målas över. Ny, öppen bänkinredning och långhusets nedre delar kläs med panel. Takmålningarna i valvet ovanför altaret målas över. Valven försågs med de målningar som bevarats fram till idag. Kyrkans tornur installeras. Ny dörr med konstsmide sätts upp i vapenhuset och i sakristian.

"Arbetet har utförts efter domkyrkoarkitekt Th Wåhlin i Lund utförda förslagsritningar och omfattar utom en hel del träarbetet mm äfven en synnerligen smakfull dekorerings af den lilla kyrkans inre, hvarigenom den säkerligen nu kan framvisa en af de stämningsfullaste kyrkointeriörer å vår landsbygd.... De gamla från 1819 stammande kyrkdörrarna ha ersatts med ett par vackra ekdörrar, försedda med präktiga beslag i gammal stil. Äfven å tornet ha en hel del arbeten utförts. Sålunda har dess öfversta afdelning erhållit en beklädnad af kopparplåt, för öfvrigt samma varkatiga ämne som använts till täckning av kyrkans tak. Det är meningen att tornet skall förses med ur, hvilket kommer att uppsättas så snart det hinner bli färdigt.... Några egentliga antikviteter äger kyrkan inte. Predikstolen är dock så pass gammal som från år 1681, ett intressant arbete, som pryds af änglar och apostlfigurer. Det är stor synd, att predikstolen vid någon föregående förändring af kyrkan blifvit ramponerad. För att kunna flytta den så långt som möjligt tillbaka in i ett hörn har man inte aktat för rof att såga bort en del af densamma, hvilket man lätt observerar bl a därför, att de å predikstolen anbrakta bibelspråken blifvit stympade samt äfven däraf, att apostlarna ej äro fulltaliga eller åtminstone 11, hvilket de synbarligen från början varit. Äfven predikstolen kommer att restaureras, hvilket arbete hvad snideriernas utförande beträffar kommer att verkställas af artisten J Mårtensson från Lund".

1912. Orgeln från 1862 ersätts med en orgel byggd av orgelbyggare A Magnusson från Göteborg. Orgeln har 12 stämmor.

1926. Inläggning av el i kyrkan. Inläggning av ljus i någon del av kyrkan förkastades av kyrkostämman.

1944. Kyrkoherde Johan Tykesson till Kungliga Byggnadsstyrelsen (KBS):

"Härmed har jag att anmäla att Starby kyrka för närvarande undergår ommålning såväl utvändigt som invändigt i underhållssyfte. Samma färger som förut användas. Dock önskar kyrkorådet slippa att åter placera de figurer över sakristians valv, som varit där förut. De äro nu ej ditsatta men bevarade så att de kunna återsättas där, om

de äro ofrånkomliga. Detta gäller icke ornamenten, som liksom omramar valven, vilka icke röras, utan de stjärnor eller blommor, som äro utströdda över valvet”.

1944. Nanne Carlman till KBS beträffande Starby kyrka:

”Målning inom kyrkan besiktigades den 3 oktober 1944. Därvid konstaterades att målningarna äro av relativt sent datum och enligt min mening ha de icke kulturhistorisk betydelse. De figurer i sakristian vilka föreslås slopade ha en komposition enligt bilagda ritningar. Densamma kunna enligt min mening saklöst slopas då de icke ha betydelse vare sig såsom särskild komposition och utsmyckning eller för målningen i sakristian i dess helhet. Kristianstad å länsarkitektkontoret den 10 oktober 1944”.

1949. Kostnadsförslag på elektrisk uppvärmning från Södra Sveriges Ångpanneförening.

1950-tal. I samband med grävning för avloppsledningar gjordes fynd som tyder på att det funnits gravar under golvet i det gamla vapenhuset söder om kyrkan. El-värme installeras.

1953. KBS godkänner inre ommålning i samma färger som hittills.

1955. Elektrisk klockringningsanläggning, system Voco-Omega för två klockor beställd av AEG Elektriska Aktiebolaget.

1960. Inköp av gångmatta, matta framför altaret och altarrundsbeklädnad. Elektrisk installation i ljuskronorna samt på och under orgelläktaren.

1963. Krister Ström gör på uppdrag av landsantikvarien undersökningar i samband med golvarbeten. Röttskadade golvbjälkar i långhuset har bytts ut.

”På en ca 5 m² stor yta väster om koret framrensades rester av ett äldre stenlagt golv, vilket ligger 20-25 cm under det nuvarande golvet. Det därvid frilagda golvet består delvis av tegel, delvis av 0,1 - 0,2 m stora stenar. I området närmast koret inom ett ca 1,2 m brett parti ligger större stenar, 0,2 - 0,5 m stora. Avschaktning av jord på ett antal ställen längre västerut visade att det av mindre stenar lagda golvet återfinns över hela det södra långhuset. Eventuellt finns en äldre mur bevarad i långhusets sydöstra del; större stenar är där synliga under ett murbrukslager. Efter ritning och fotografering påfördes åter den bortrensade jorden enär golvomläggningen ej berörde de underliggande delarna av den äldre kyrkan. Betonggjutning förekom ej”.

1969. Valvmålningarna renoveras av kyrkomålare Harry Hultgren från Bjuv.

1971. Utvändig målning med vit betongfärg.

1972. Kyrkoårdet beslutar att konsultera arkitekt Torsten Leon-Nilsson angående ”färgsättning och därmed sammanhängande ärenden”.

1982. Juni. Skånes hembygdsförbund meddelar att all puts på kyrkan är borttagen och att nedtagningen skett med tryckluft.

1982. Riksantikvarieämbetet (Raä) angående utvändig fasadrenovering av Starby kyrka. Skånes hembygdsförbund i Kristianstad har meddelat att utvändig fasadrenovering enligt handlingar av A-konsult ”redan är påbörjade”. Raä godkänner reviderat förslag angående putssammansättning. Sista putslagret skall utprovas i samråd med Skånes hembygdsförbund. Raä förordar traditionell kalkavfärgning istället för Keim (silikatfärg) som A-konsult föreslagit. Skälet att använda kalk är enligt A-konsult att ”senast påförda kalklager har försetts med plasttillsats i tro att detta skulle öka

vidhäftningen. Detta medför att underliggande puts har tagit skada av denna plastbinder”.

Minnesanteckning av A-konsult:

”Putsen har tagits bort på hela kyrkan. Man håller på med borttagning av puts längs sockellinjen”. Vidare konstateras att murningen vid tornets södra sida är dålig och måste kompletteras med inläggning av stenar. Tegelstenarna vid västra porten är genomblöta och måste bytas som sten. Tornets runda fönster mot söder är ”helt uppruttet” och måste bytas.

1984. Raä godkänner tilläggsisolering av valven. Arbetsbeskrivning av A-konsult:

”Isoleringen utföres med 2 lager isolering bestående av 100 mm Gullfiber bjälklagsskiva 1260 på tegelvalvet samt därpå 100 mm Gullfiber bjälklagslängd RK 2026. Diffusionsspärr inlägges ej. Ev ventilationsspringor vid takfot får ej täppas till. Om sådana saknas skall tillses att ventilationsöppningar anordnas. Valven rengöres från skräp såsom trä och tegelrester”.

1998. Strövelstorps pastorat ansöker om tillstånd för höjning av läktarbarriären, utbyte av tyg på altarringen, flyttbara stolar.

1999. Länsstyrelsens godkänner förslag till höjning av läktarbarriär enligt handlingar av A-konsult. Arkitekt Olof Meiby ansöker om tillstånd till inre förändringar av altare, dopfunt samt borttagning av bänkar.

2000. Länsstyrelsens beslut om inre förändringar i Starby kyrka.

2003. PM rapport, Starby kyrka - inre förändringar, Regionmuseet i Kristianstad. Följande åtgärder genomfördes:

”Nytt murat altare med täckskiva av röd sandsten. Dopfunten från 1891 flyttas till långhusets västra del och ersätts av den medeltida cuppan som får ny fot av betong och täcks med en glasskiva med nedsänkt mindre cuppa. Altare och dopfuntstillägg ritas av Meiby ark & design, Lund. Två bänkrader på varje sida i långhusets västra sida borttages för att ge plats för informationsmaterial och dopfunten från 1800-talet.”

2003. Antikvarisk rapport över reparation av torntaket på Starby kyrka, Regionmuseet i Kristianstad:

”I samband med hårda vindar skadades torntakets kopparplåtar på norra takfallet. Taket reparerades med kopparplåtar lika befintliga bortsett från avvikelser motiverade av teknisk synpunkt. Plåtarna är något smalare och falarna lägre, ståndfalsen något högre. Takfotsbrädan är utförd med separat skyddsplåt som omsluter takfotsbrädan. Kontrollanten konstaterar att utförandet med nedknäckt språng inte är traditionellt och inte hade godkänts av antikvarisk kontrollant om denne blivit tillfrågad. Avvikelseernas betydelse för det kulturhistoriska värdet är enligt museets bedömning inte så stor att en ändring av utförda arbeten är aktuell.”

2012. Två stycken avfuktare av modellen Echodry SAF-Z80K installerades, en på orgelläktaren och en i koret.

3.1.4 Historisk genomgång av inomhusklimatet och uppkomna skador

Från byggnadens historia kan man dra många lärdomar. Vilka installationer, värmesystem, värmestrategier etc. har använts och vilka följder har de fått för byggnaden och inventarierna? Varje byggnad har sina individuella förutsättningar och en titt på det historiska inomhusklimatet kan ge en snabb bild av vad som fungerar och vad som inte fungerar i just den byggnaden. Givetvis måste mer grundliga undersökningar göras, men det kan vara en bra start och kan ge en fingervisning åt vad som bör och inte bör göras.

Sammanställning av dokumenterade uppkomna skador enligt byggnadshistorien:

- Rötskadade golvbjälkar. Bytades ut på 1960-talet, fuktigt golv har alltså funnits länge.
- I hjälmvalvet finns en spricka i vilken man kan skymta en takstol.
- Altartavla från 1754 blev svårt fuktskadad då kyrkan var ouppvärmad och blev därför utbytt
- Mögel och svampangrepp i orgelns pipor har förekommit
- Rosa missfärgningar på väggarna, troligtvis pga. bakterieangrepp.
- Fler tecken på hög fuktighet i kyrkan
- Skador på textilier

Skador som jag noterat själv (en del finns även dokumenterade i byggnadshistorien):

- Vittringsskador i kalkstensgolvet. Saltutfällning förekommer.
- Sprickor i valven ovanför fönstren
- Sprickor i träbalk i taket
- Spår av insektsangrepp
- Färg på trappa till predikstol har spruckit
- Färg på bänkarna har spruckit
- Allmänt sprucken färg på träföremål
- Vittring och saltutfällning på väggar
- Smutsiga väggar
- En del sprickor utvändigt



Figur 20 Sprickor i fönstervalv



Figur 21 Sprickor i takbalk

Utifrån dessa uppkomna skador kan man konstatera att kyrkan har haft problem med i princip alla kända problem med kyrkor genom åren. Skador orsakade av hög relativ fuktighet har man försökt eliminera genom installation av två avfuktare. Om det löser alla problem med hög fuktighet kommer diskuteras vidare senare. Man kan också konstatera att många av orsakerna till de uppkomna skadorna fortfarande inte har lösts med avfuktarna, exempelvis uttorkningsskadorna med all flagnande färg. De flesta mekaniska skador går inte att undvika endast genom sänkt relativ fuktighet, utan där krävs större förändringar i hela uppvärmningsstrategin. Under den period som intermittert uppvärmning har använts så har vittring och sprickor uppstått i golv och murverk. Huruvida den intermitteranta uppvärmningen kan ha bidragit eller påverkat skadorna kan inte bedömas. Haugen har som nämnts, diskuterat att denna kan ge upphov till extra rörelser. Den höga fuktigheten vid golvet kanske inte heller beror enbart på hög relativ fuktighet i inomhusluften. Det kan istället bero på dålig grundläggning och dränering och att man på så sätt får ett fuktillskott från marken. Vidare undersökning av detta krävs och kommer att göras senare i rapporten. Invändig ommålning har troligtvis skett senast på 50-talet och när det börjat flagna är osäkert.

1862 fick man ny orgel, och snabbt efter bytte man träpiporna till metallpipor. Vad det beror på vet jag inte, men det kan vara en indikation på att man hade problem med hög relativ fuktighet redan då. Men som sagt är det bara spekulationer.

Man kan också konstatera att det inte skulle vara en bra idé att helt sluta värma kyrkan eftersom historien visar att fuktskador då uppstod, vilket ledde till att altartavlan fick bytas ut.

3.1.5 Inventarier

Kyrkan innehåller textilier, målade träskulpturer, silverföremål m.m. som bör bevaras under kontrollerade former.

4 Mätningar i Starby kyrka

För att undersöka inomhusklimatet och fuktförhållandena i kyrkan utförde jag klimatmätningar på temperatur och relativ fuktighet. Genom att placera ett antal loggrar runt om i kyrkan kan man få en ganska klar bild över hur klimatet varierar på olika positioner, och se hur klimatet kan skilja sig mellan vistelsezonen och andra mikroklimat. Detta är intressant att veta eftersom man ofta endast utför mätningar just i vistelsezonen, men klimatet där behöver inte vara representativt för hela byggnaden och således kan man vara helt ovetande om hur klimatet är vid känsliga inventarier. För att förstå varför skador på föremål uppstår och vilka åtgärder som bör göras måste klimatet som de utsätts för fastställas. Att undersöka inomhusklimatet och analysera resultaten är en förutsättning för att kunna ta rätt beslut angående vad som bör göras.

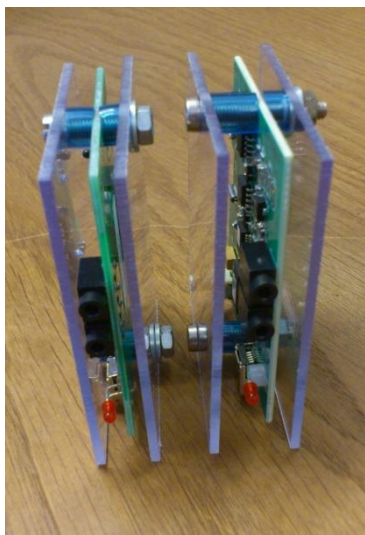
Mätningar ska göras innan, under och efter gudstjänst så att det finns mätningar både under uppvärmning och under skyddsvärme. Eftersom förrättningar i kyrkor ofta är ganska korta är det viktigt att intervallen i loggningen inte blir för långa eftersom man då kan missa hela händelsen eller inte få med alla variationer i klimatet.

Förutom mina egna mätningar presenteras här även några mätningar som gjorts av församlingen tidigare.

4.1 Modifiering av skalen

Eftersom klimatet i kyrkor utsätts för relativt stora och plötsliga variationer modifierades skalen till loggrarna så att de lättare skulle känna av förändringarna. Tanken var att tillverka egna skal som inte kapslar in givarna lika mycket utan tillåter mer genomströmning av luften.

Detta gjordes genom att såga till bitar av plexiglas som ett skydd för kretskorten och fästa dem med distanser så att luften kan strömma fritt. Distanserna mellan plexiglas och sidan på kretskorten med givarna gjordes något större så att genomströmningen där skulle bli så stor som möjligt.



Figur 22 Egenstillverkade skal till loggrarna



Figur 23 Egenstillverkade skal till loggrarna

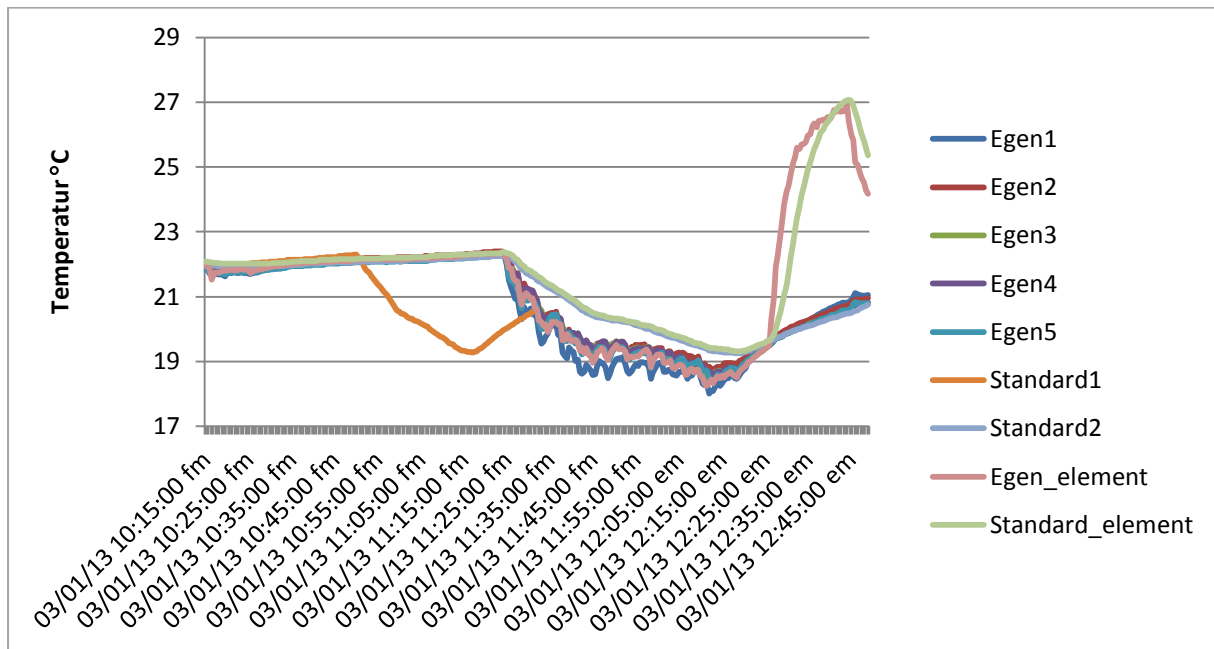
4.2 Testmätning

För att både testa om de nya skalerna gjorde någon förändring samt om någon logger visade helt fel värden gjordes ett par testmätningar.

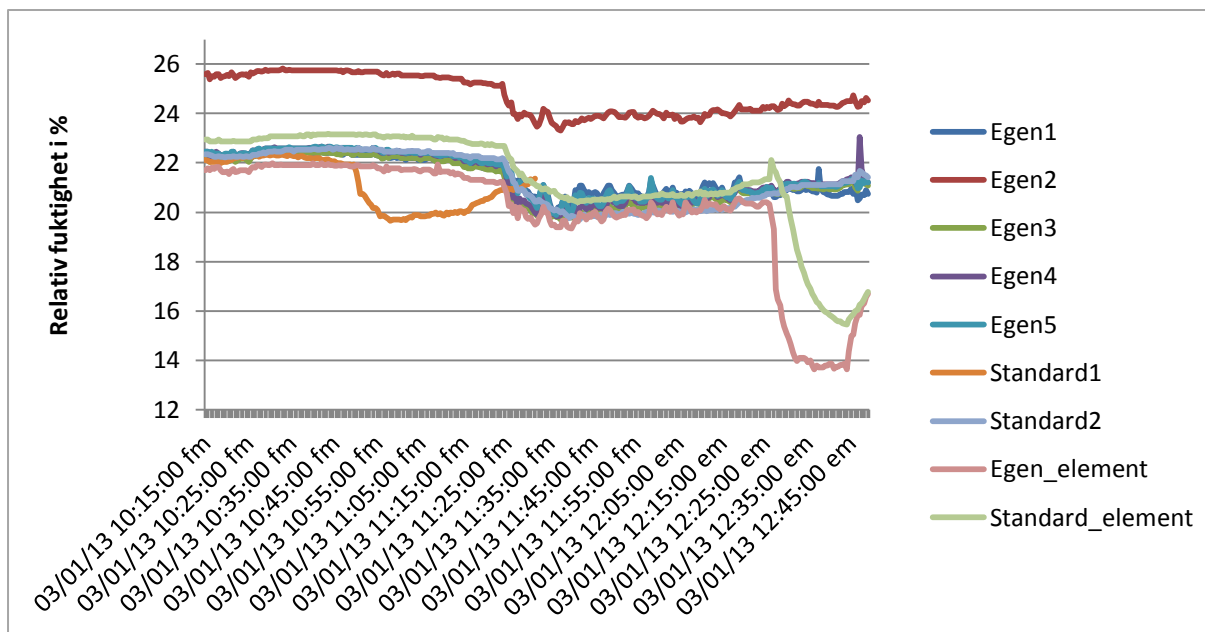
Första testmätningen gjordes inomhus, både vid konstant temperatur och vid kylning och uppvärmning. Jag hade sex loggrar med mina egentillverkade skal och tre stycken med "originalskalerna".

Kylningen gjordes genom att öppna fönstren i rummet och uppvärmningen genom placering av två av loggrarna, en med vanligt skal och en med egentillverkat skal, vid en radiator. Totala tiden för testet var ca 2,5 timmar. En logger loggade med längre intervall än de andra och därför ser den lite konstig ut i diagrammet, men tittar man på mätvärdena så ser man att värdena stämmer bra överens med de övriga.

I diagrammen har jag döpt de med egentillverkade skal till Egen och de med vanliga skal till Standard.



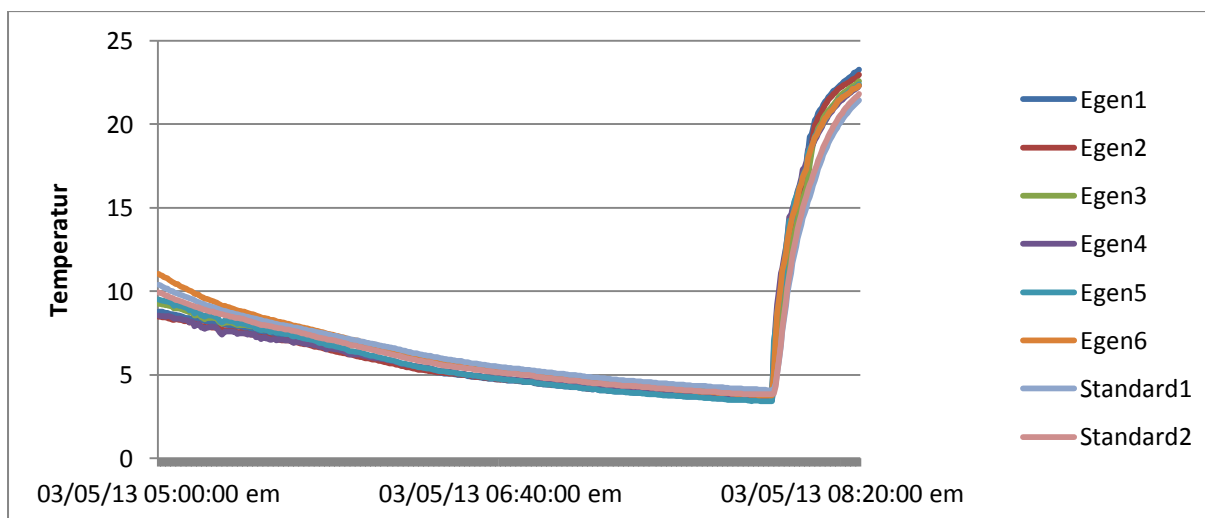
Figur 24 Testmätning inomhus, temperatur



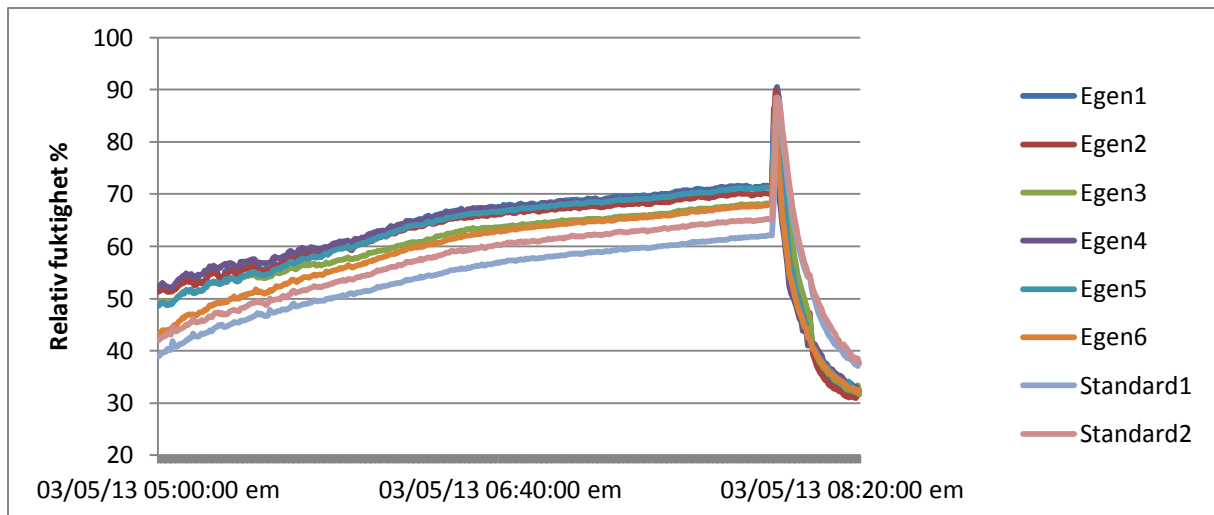
Figur 25 Testmätning inomhus, relativ fuktighet

Det första jag kunde konstatera var att en logger visade helt fel värden på relativ fuktighet och plockades därför bort (egen 2). Det andra jag kunde konstatera var att man kunde se en tydlig skillnad på resultaten från de med egentillverkade och de med originalskal. När klimatet var stabilt märktes ingen skillnad men så fort någon förändring skedde så såg man att loggrarna med de nya skalen reagerade snabbare, vilket bl. a. syns på loggrarna som placerades på ett element (ca 12:20). Exempelvis vid nedkylningen (mellan ca 11:25 - 12:15) skiljer det ca 1 grad kl 12:15 mellan det genomsnittliga slutvärdet på de med eget skal och de med de vanliga skalen. Därmed tycker jag att det är motiverat att använda de egentillverkade skalen även vid mätningarna som ska göras i kyrkan, eftersom jag misstänker att variationer i inomhusklimatet kommer att ske där också pga. den intermittenta uppvärmningen.

Därefter gjordes tester i utomhusklimat för att se så att loggrarna även visade rätt vid lägre temperaturer, eftersom en logger skulle vara utomhus vid de riktiga mätningarna.



Figur 26 Testmätning utomhus, temperatur



Figur 27 Testmätning utomhus, relativ fuktighet

Loggrarna hann inte riktigt ställa in sig i jämvikt under tiden för mätningen och därför varierar slutvärdet på relativ fuktighet något. För att vara på säkra sidan så valde jag en av loggrarna som hamnade i mitten för att sedan användas till utomhusmätningen.

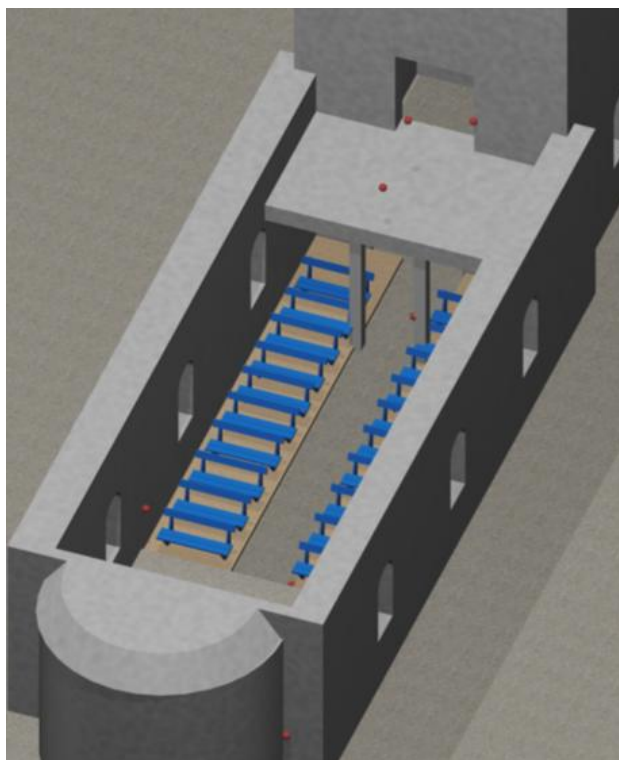
För att göra ytterligare en kontroll så att loggrarna visar rätt gjordes en kalibrering i klimatkammare efter de riktiga mätningarna. Då jämfördes resultaten med en förutbestämd temperatur och relativ fuktighet och man kan då se hur mycket loggrarna avviker från de värdena, och är avvikelsen för stor så måste mätresultaten justeras för detta.

4.3 Förutsättningar

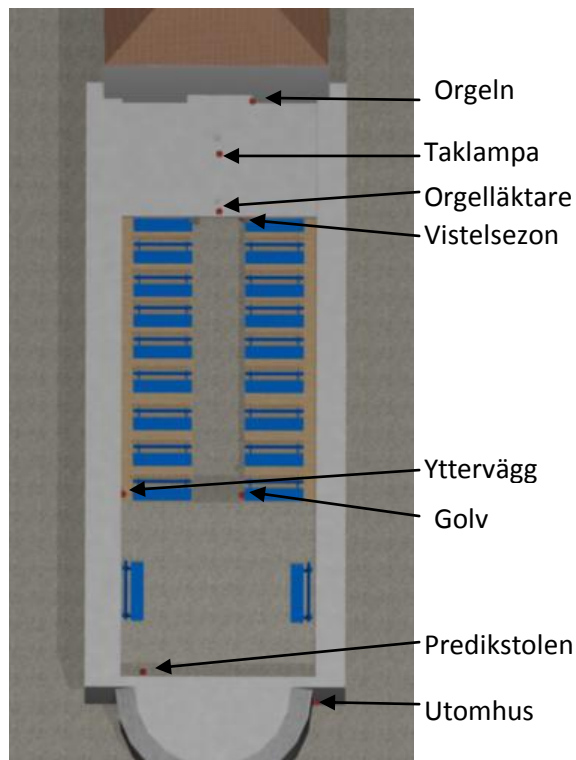
Mätpunkterna i kyrkan valdes dels utifrån var skador uppstått och dels för att undersöka skillnader i rummet, dvs. på olika höjder osv (placering framgår av fig. 28- 30). Värmekamera användes för att lokalisera kritiska punkter och s.k. mikroklimat, exempelvis mätpunkten på golvet valdes där man kunde se kallare fläckar i kameran. Totalt sett användes 8 stycken loggrar, en placerades i vistelsezonen för att mäta "komfortklimatet", en placerades utomhus, och sex stycken placerades runt om i kyrkan där det misstänktes att skadliga klimat kunde finnas och för att se skillnader i rummet. Loggrarna som placerades utomhus och på orgelläktaren hade de vanliga skalerna och de övriga hade mina egentillverkade skal. Loggern utomhus var skyddad både från direkt solljus och nederbörd.

Mätpunkterna som valdes var:

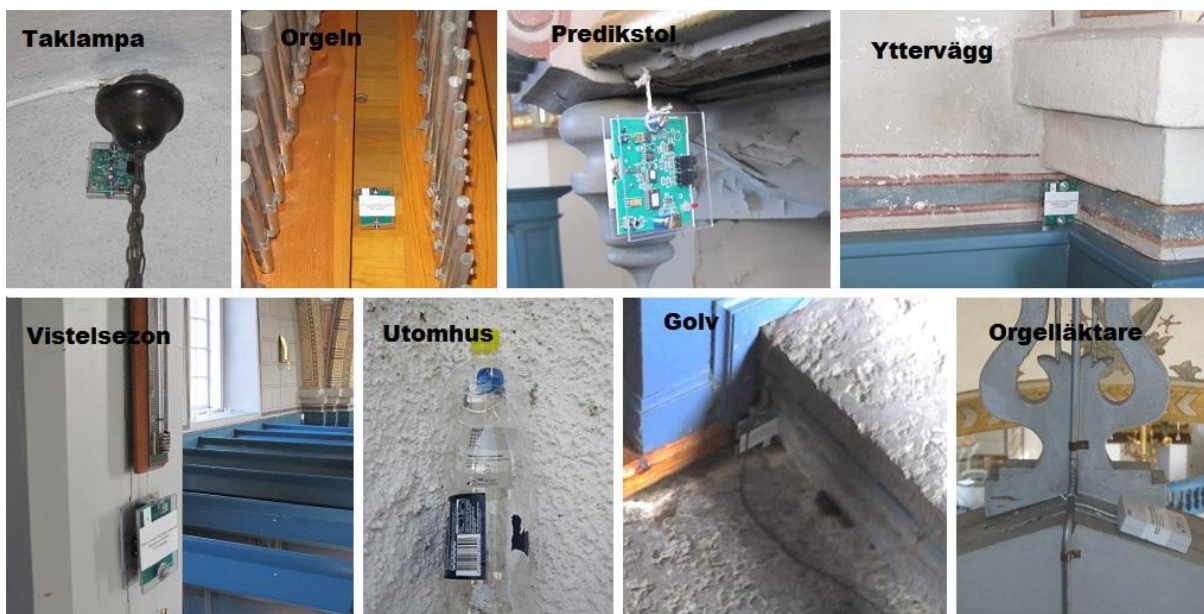
- Orgeln
- Taklampa
- Orgelläktare
- Vistelsezon
- Yttervägg
- Golv
- Predikstol
- Utomhus



Figur 28 Schematisk bild över mätpunkterna



Figur 29 Schematisk bild över mätpunkterna



Figur 30 Fotokollage över mätpunkter

Loggrarna mätte var trettionde sekund och var igång ca 7,5 dygn. De startades på ett givet klockslag i förhand och hann därmed komma i jämvikt med omgivningen innan de började logga mätningarna. Loggningen startade den 6/3 kl. 18:00 och slutade den 14/3 kl. 06:56.

Veckan som mätningarna gjordes valdes därför att där skulle vara en gudstjänst på söndagen och således skulle kyrkan värmas upp över helgen. Det visade sig att där även skulle vara ett bröllop på lördagen. På bröllopet närvarade ca 10 – 15 personer (enligt Gert Ivarsson från församlingen), och på

gudstjänsten var där 18 personer närvarande (inklusive präst och orgelspelare) (mina egna observationer).

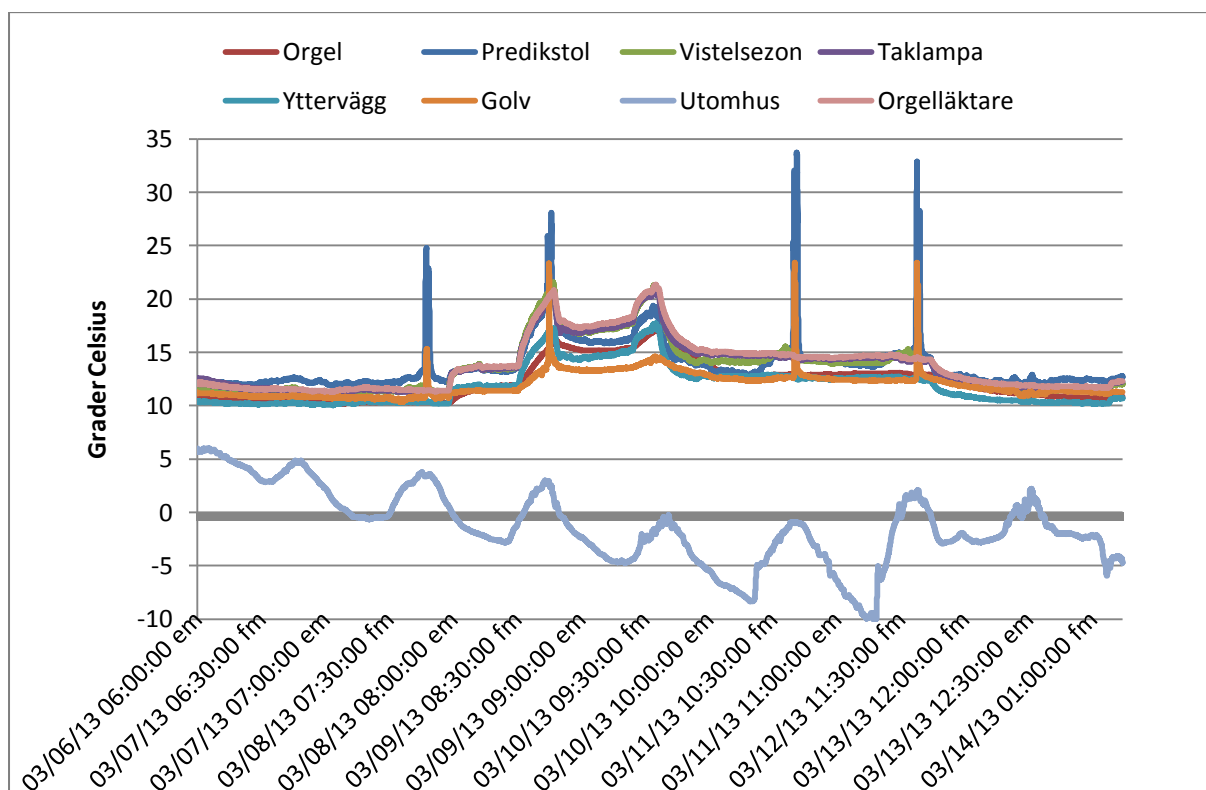
Tabell 11 Loggbok över loggningen

Händelse	Tid
Placerar ut loggrarna	6/3 kl. 9:00 – 11:00
Börjar logga	6/3 kl. 18:00
Värmen höjs något till ca 13,5 °C (beroende på mätpunkt)	8/3 ca kl. 18:30
Värmen höjs inför bröllop till ca 21 °C (beroende på mätpunkt)	9/3 ca kl. 09:00
Bröllop (10 – 15 personer)	9/3 ca kl. 13:30 – 15:30
Värmen sänks något till ca 17 °C (beroende på mätpunkt)	9/3 ca kl. 15:40
Värmen höjs igen inför gudstjänst till ca 21 °C(beroende på mätpunkt)	10/3 ca kl 07:00
Gudstjänst (18 personer)	10/3 ca kl. 11:00 – 11:40
Värmen sänks till ca 12 °C (beroende på mätpunkt)	10/3 ca kl. 12:15
Slutar logga	14/3 ca kl. 07:00
Hämtar loggar	14/3 ca kl. 14:00

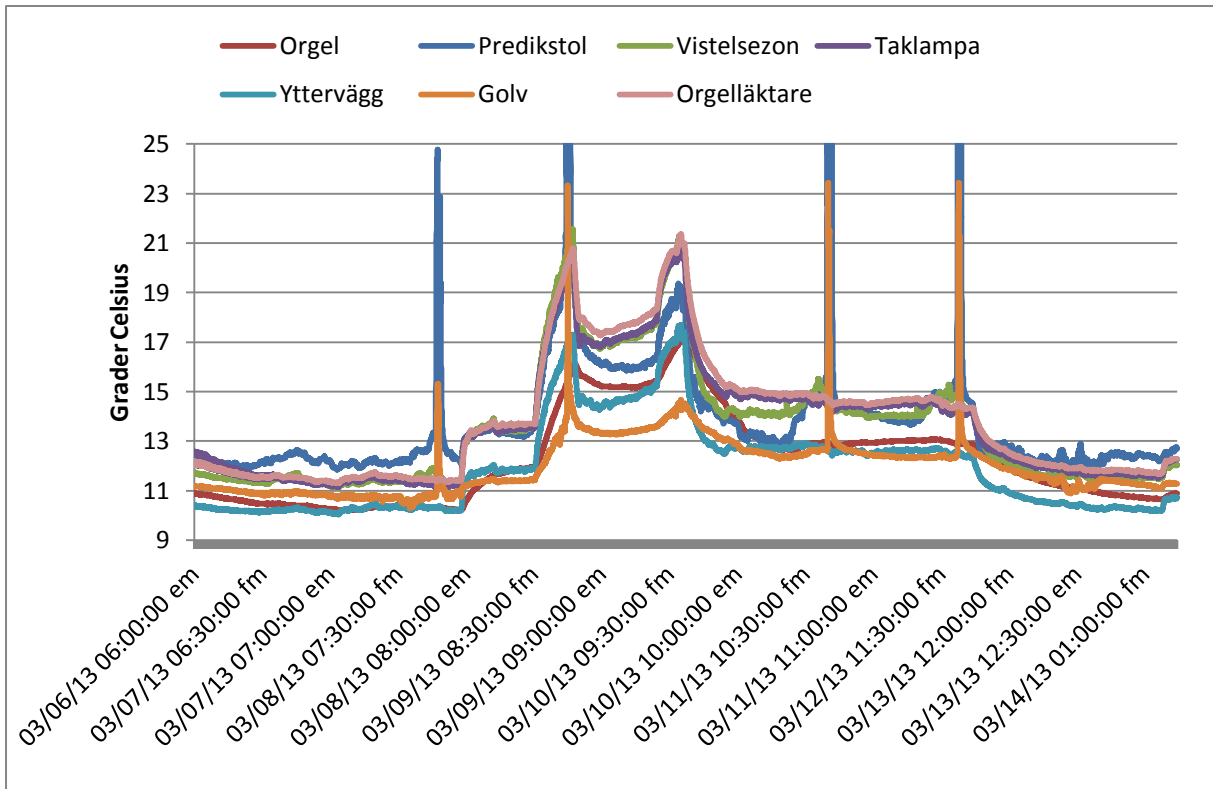
Utöver att värmekamera användes för att hitta kritiska punkter att mäta i, tog jag även bilder med den på söndagen efter gudstjänsten för att se hur det såg ut när kyrkan var uppvärmd.

Loggrarna som använts är av modellen HOBO U12-013, och värmekamerorna som använts är av modellerna FLIR ThermaCAM E46 och Testo 875-2.

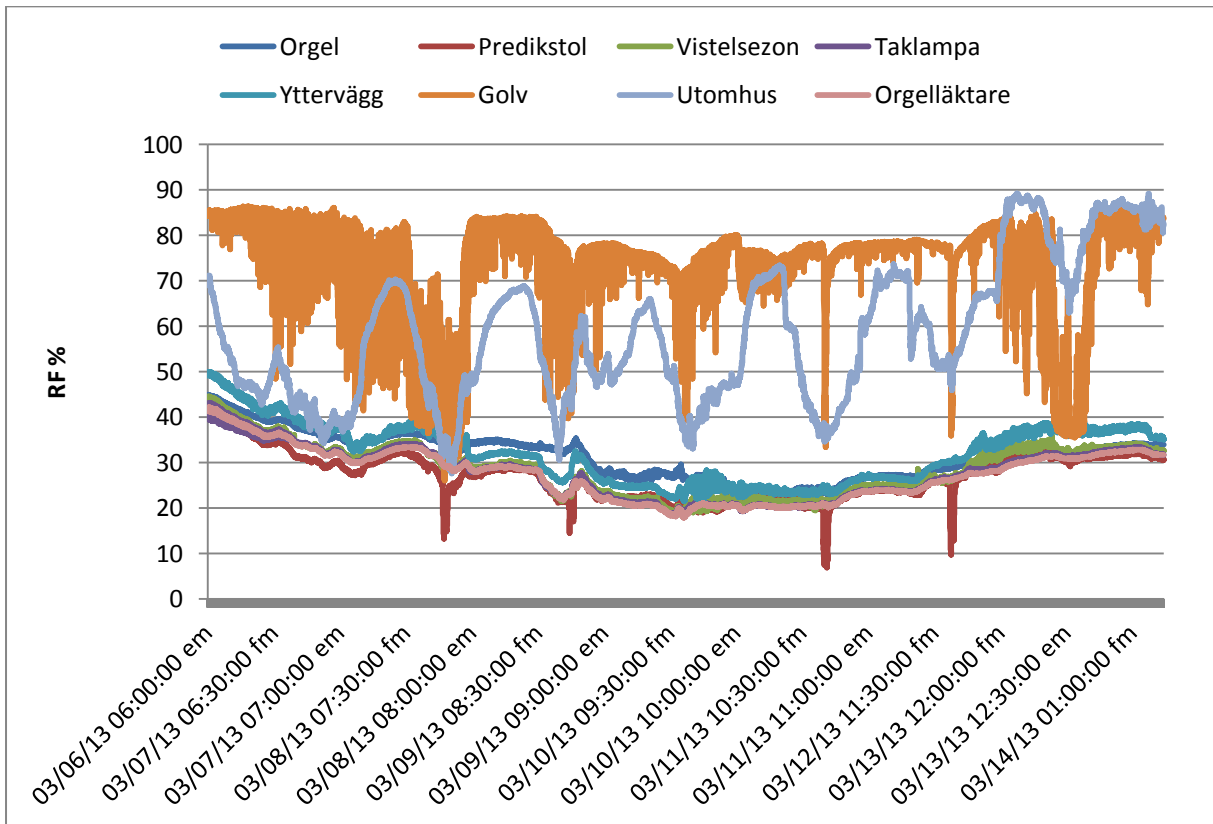
4.4 Resultat



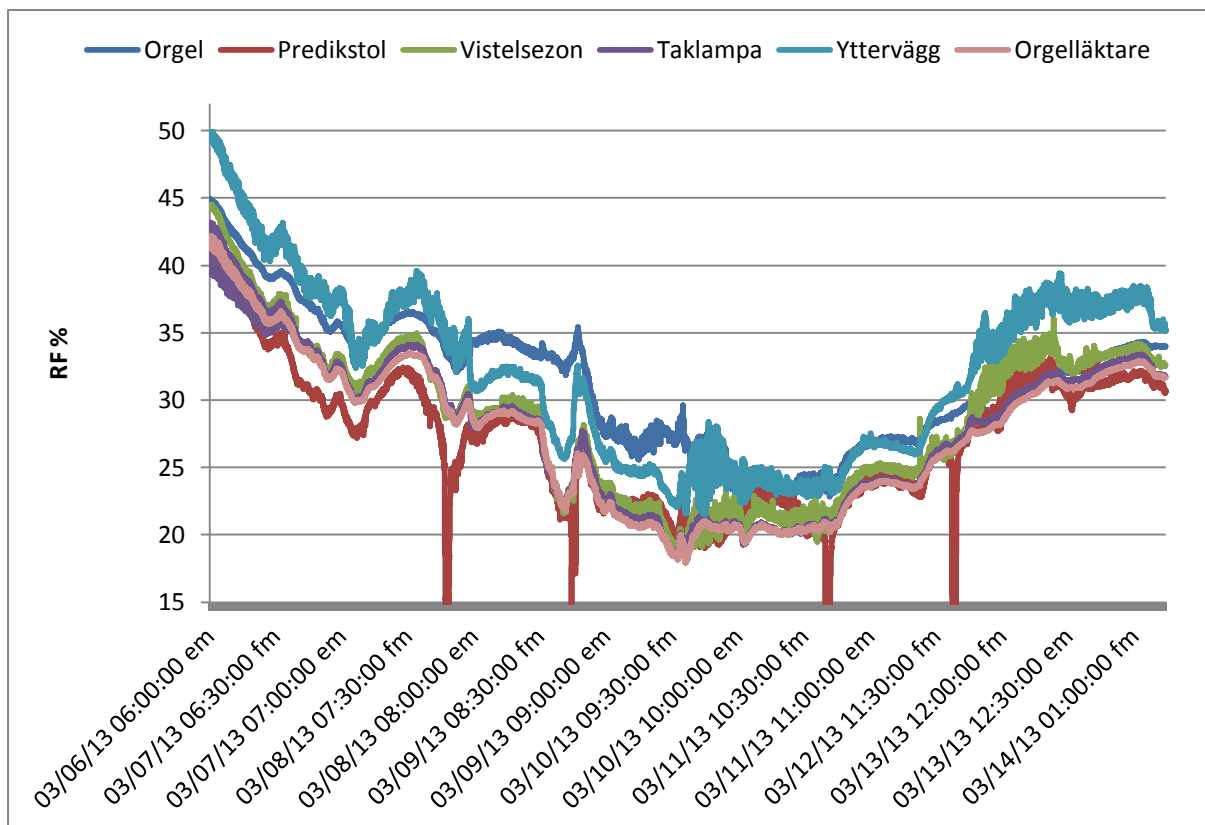
Figur 31 Loggning av temperatur, alla mätpunkter under hela mätperioden



Figur 32 Loggning av temperatur, endast mätpunkterna inomhus under hela mätperioden



Figur 33 Loggningen av relativ fuktighet, alla mätpunkter under hela perioden



Figur 34 Loggningen av relativ fuktighet, alla mätpunkter förutom utomhus och golv under hela mätperioden

Temperaturen i början av mätningarna innan värmen slås på (kvällen 8/3) ligger på ca 12 °C och den relativa fuktigheten på ca 30 - 45 % i de flesta av mätpunkterna inne i kyrkan, fränsett mätpunkterna vid golv, yttervägg och utomhus. Vid golvet och ytterväggen ligger temperaturen något lägre. Den relativa fuktigheten vid ytterväggen ligger oftast något högre än i övriga kyrkan och med lite mer variationer. Vid golvet ligger den mycket över resten av kyrkan och har mycket stora variationer, ca 40 – 85 %. RF vid golvet följer tendenser i RF utomhus någorlunda. Då det endast är skyddsvärme i kyrkan ligger oftast RF kring 80 % vid golvet. Observationerna ovan diskuteras vidare senare.

För att få en lite mer överskådlig bild av mätvärdena presenteras här nedan medelvärdena av temperatur och relativ fuktighet för mätpunkterna under hela perioden.

Tabell 12 Medelvärde på temperatur och RF under hela mätperioden

Mät punkt	Temp (°C)	Relativ fuktighet (%)
Orgel	12,3	31,3
Predikstol	13,8	27,1
Vistelsezon	13,6	28,6
Taklampa	13,7	27,9
Yttervägg	11,9	32,0
Golv	12,0	74,2
Orgelläktare	13,9	27,6
Utomhus	- 1,3	58,5

Vid personbelastning, dvs. under bröllopet och gudstjänsten, stiger den relativa fuktigheten generellt med drygt 2 procentenheter.

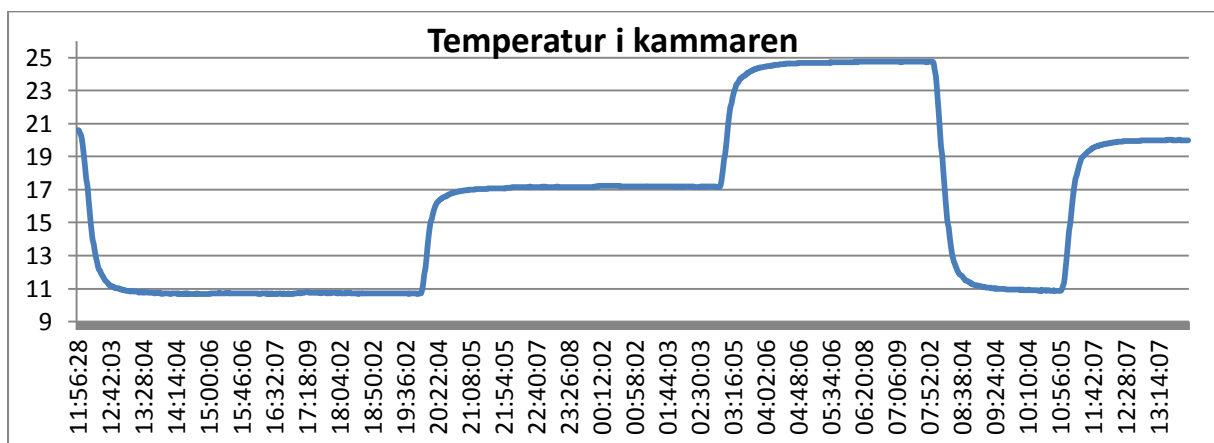
De höga topparna i temperatur för loggrarna vid golvet och vid predikstolen sker på samma tid på eftermiddagen och orsakas förmodligen av solinstrålning. Detta resulterar även i att den relativa fuktigheten sjunker vid samma tidpunkt eftersom den beror av temperaturen.

4.5 Kalibrering

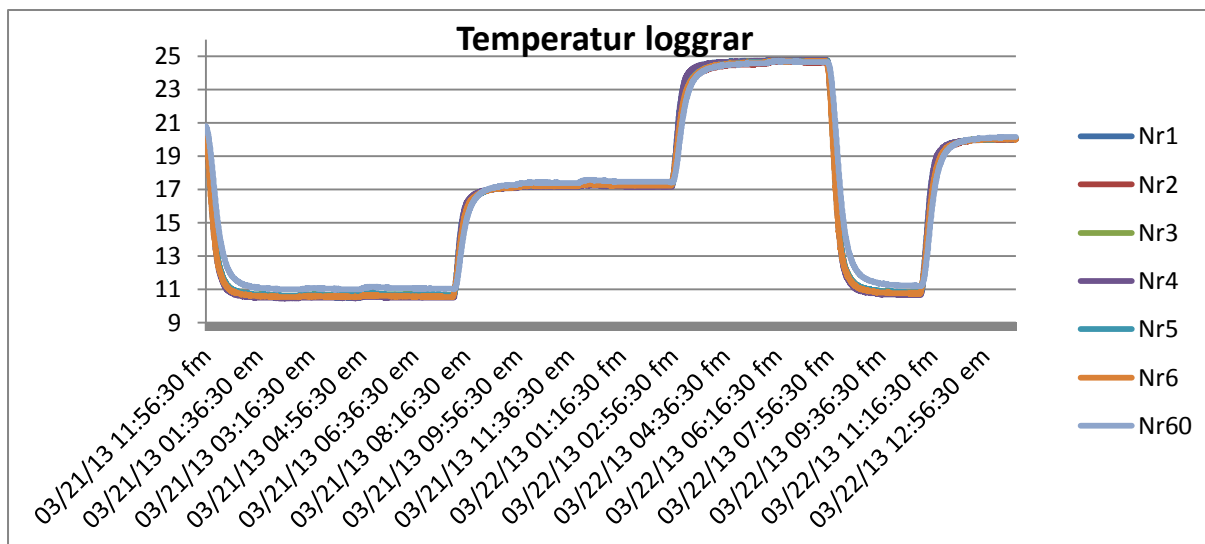
Kalibreringen av loggrarna har gjort med hjälp av en klimatkammare där temperatur och relativ fuktighet kan ställas in och varieras och sedan jämföras med resultaten från loggrarna. På så sätt ser man om loggrarna avviker från de kända värdena.

Klimatet i kammaren valdes utefter värdena som jag fick från mätningarna i kyrkan. Både temperatur och relativ fuktighet varieras för att se så att loggrarna visar rätt värden i de olika fallen. Man ser också vilken fördröjning som finns i loggrarna jämfört med klimatet i kammaren. Detta blir speciellt tydligt för den relativa fuktigheten, där loggrarna inte kan reagera lika snabbt som kammaren. Speciellt loggern med "originalskalet" har en fördröjning, och när RF ändras stort hinner inte den anpassa sig och ställa in sig i klimatet tillräckligt snabbt.

Resultatet från kalibreringen redovisas i diagram över klimatet från både kammaren och sedan loggrarna. För att se om loggrarna avviker från kammaren beräknas ett medelvärde i slutet av varje steg och jämförs med varandra.



Figur 35 Temperatur som genererats av kammaren



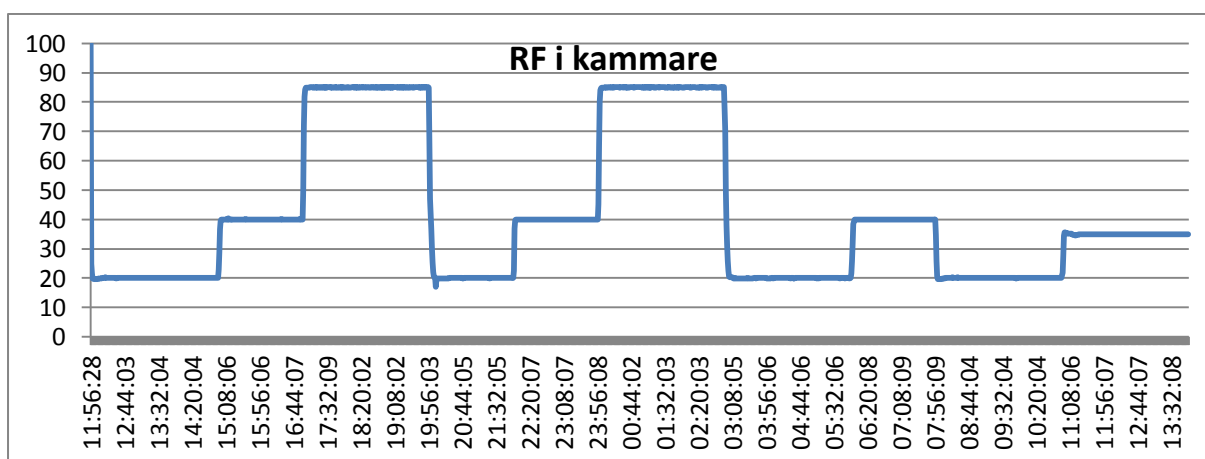
Figur 36 Loggrarnas temperaturloggning

Tabell 13 Värden från kalibreringen i oC. De angivna värdena är ett genomsnitt av värdena i slutet av varje steg.

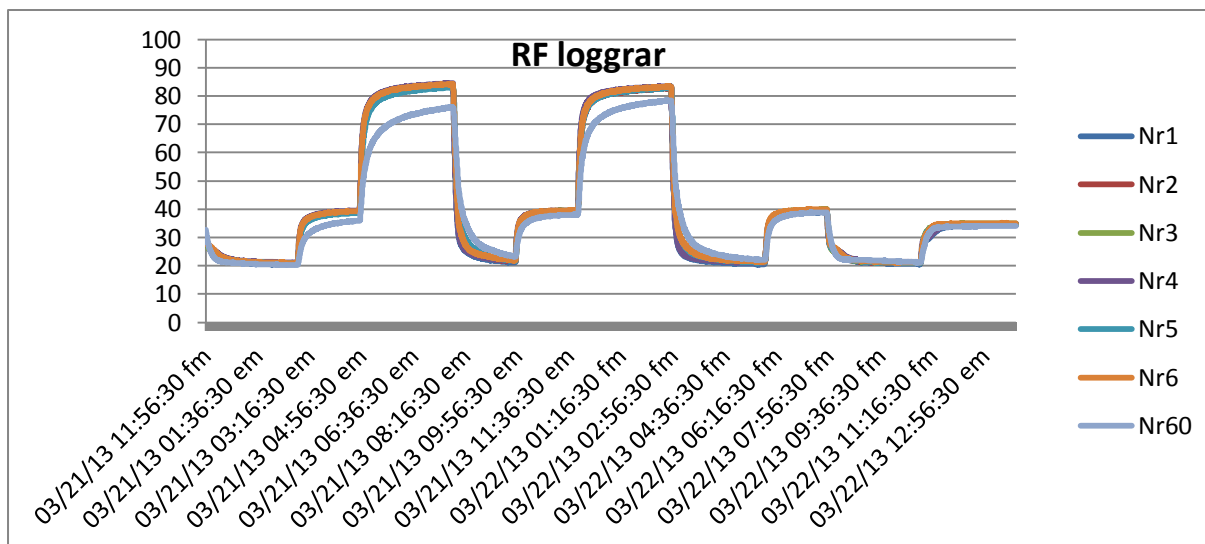
Originalskal

	Kammare	Logger1	Logger2	Logger3	Logger 4	Logger5	Logger6	Logger60
Steg 1	10,71	10,52	10,59	10,64	10,47	10,64	10,55	11,03
Steg 2	17,16	17,18	17,23	17,25	17,15	17,25	17,20	17,44
Steg 3	24,74	24,75	24,62	24,75	24,74	24,70	24,66	24,65
Steg 4	10,88	10,69	10,76	10,79	10,64	10,81	10,72	11,18
Steg 5	20,00	20,03	20,03	20,06	20,01	20,04	20,01	20,13

Här ser man att loggrarna klarar av att följa temperaturen i kammaren ganska bra. Ingen visar helt fel och ingen har en stor fördröjning heller. Noterbart är att den med "originalskalet" ändå är "långsammast". Men temperaturresultaten från kalibreringen är ändå godkända och någon justering av mätvärdena från kyrkan behöver därför inte göras.



Figur 37 Relativa fuktigheten som genererats av kammaren

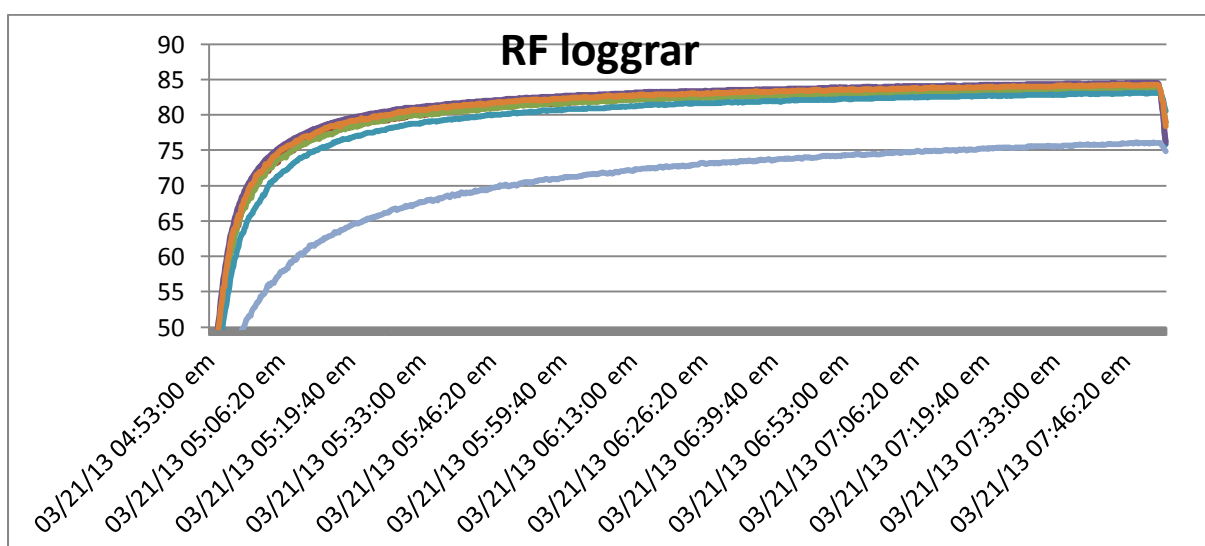


Figur 38 Loggrarna loggning av relativ fuktighet

Tabell 14 Värdena från kalibreringen i %. De angivna värdena är ett genomsnitt av värdena i slutet av varje steg

Originalskal

	Kammare	Logger1	Logger2	Logger3	Logger 4	Logger5	Logger6	Logger60
Steg 1	20,00	20,48	20,78	20,71	21,16	20,81	21,01	20,25
Steg 2	40,00	38,79	38,86	38,87	39,48	38,58	39,24	35,74
Steg 3	85,00	83,93	83,56	83,52	84,35	82,84	84,01	75,60
Steg 4	40,00	39,05	39,15	39,49	39,57	39,13	39,64	38,01
Steg 5	85,00	83,18	82,83	83,10	83,39	82,68	83,24	78,23
Steg 6	40,00	39,01	39,59	39,82	39,42	39,46	39,97	38,87
Steg 7	20,00	20,65	20,92	20,99	21,26	20,99	21,19	21,35
Steg 8	35,00	34,36	34,65	34,98	34,85	34,59	35,06	34,12



Figur 39 "Inzoomning" av loggrarnas mätning av relativ fuktighet vid första höjningen till 85 %

I figur 35 - 39 ser man tydligt att loggrarna har lite svårt att hänga med i de stora variationerna som kammaren skapar. Speciellt för den med "originalskalet" (logger 60) där den inte hinner komma upp i de högsta värdena innan det sedan går ner igen. Detta kan förklaras med att den är inkapslad och

därmed får sämre genomströmning än de andra. Den har fortfarande en stigande kurva när den sedan går ner igen och därför är det svårt att säga om den visar fel eller bara tar lång tid att ställa in sig. I verkligheten har den inte utsatts för sådana variationer som i kalibreringen, utan där har den legat mellan 20 och 40 %. Den logger som utsatts för störst värden och störst variationer i verkligheten är också den som klarat det bäst i kalibreringen. Generellt sett så är resultaten från kalibreringen bra och därmed behöver jag inte ta någon större hänsyn till differensen mellan kammaren och loggrarna och justera mätvärdena från kyrkan. Analys av resultaten redovisas längre fram i rapporten.

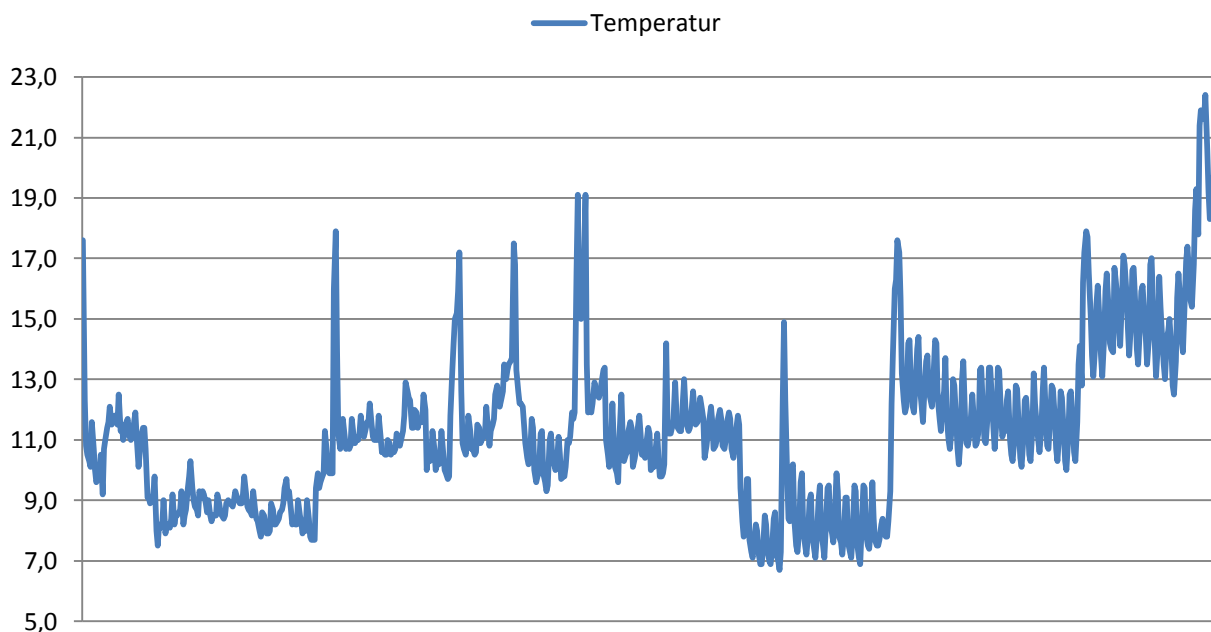
4.6 Mätningar som utförts av Gunnar Arvidsson (från församlingen)

4.6.1 Klimatmätningar

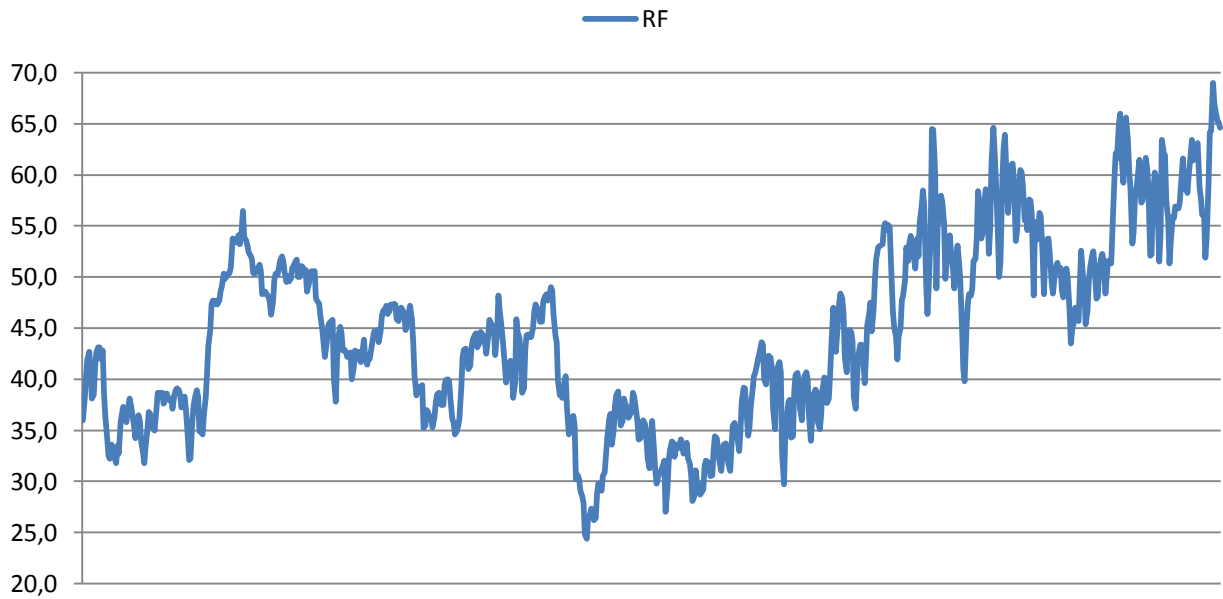
Mätningarna har gjorts i långhuset på ca 1,5 meters höjd med en logger av modellen Testo 177-H1. Loggern har varit placerad på norra sidan av en pelare till orgelläktaren. (Liknande placering som min logger som mätte i "vistelsezonen").

Nedan visas resultaten från Arvidssons mätningar för några olika perioder och ska täcka in alla årstider. Intervallet på mätningarna är 4 timmar.

4.6.1.1 Temperatur och relativ fuktighet 13/1 - 20/5 2013

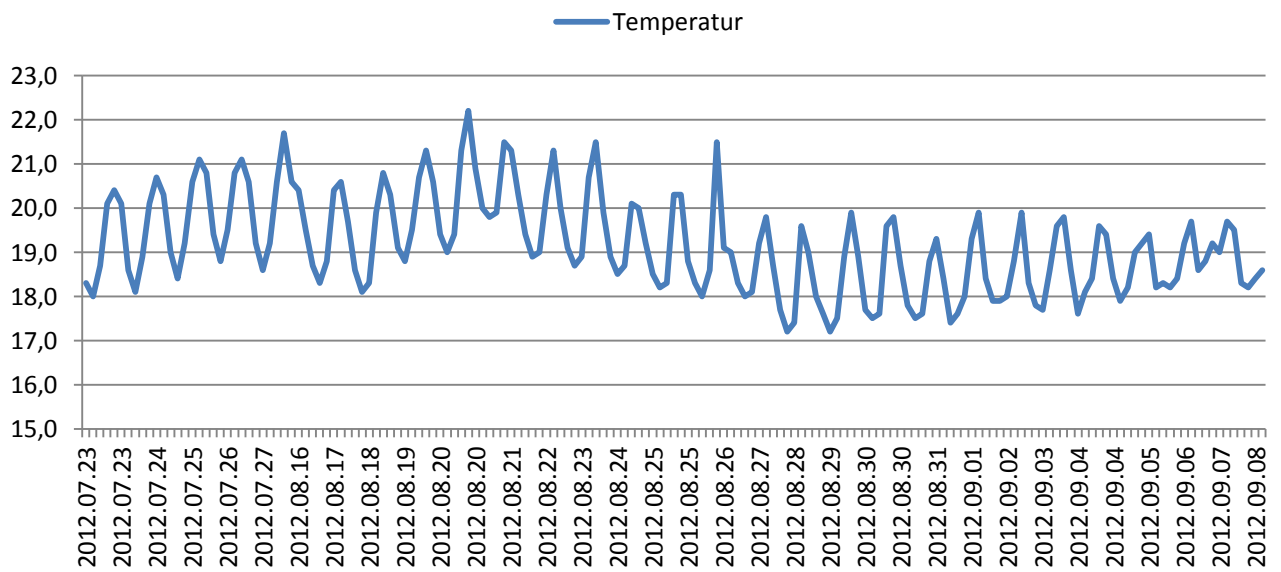


Figur 40 Temperatur i °C under perioden 13/1 - 20/5 2013

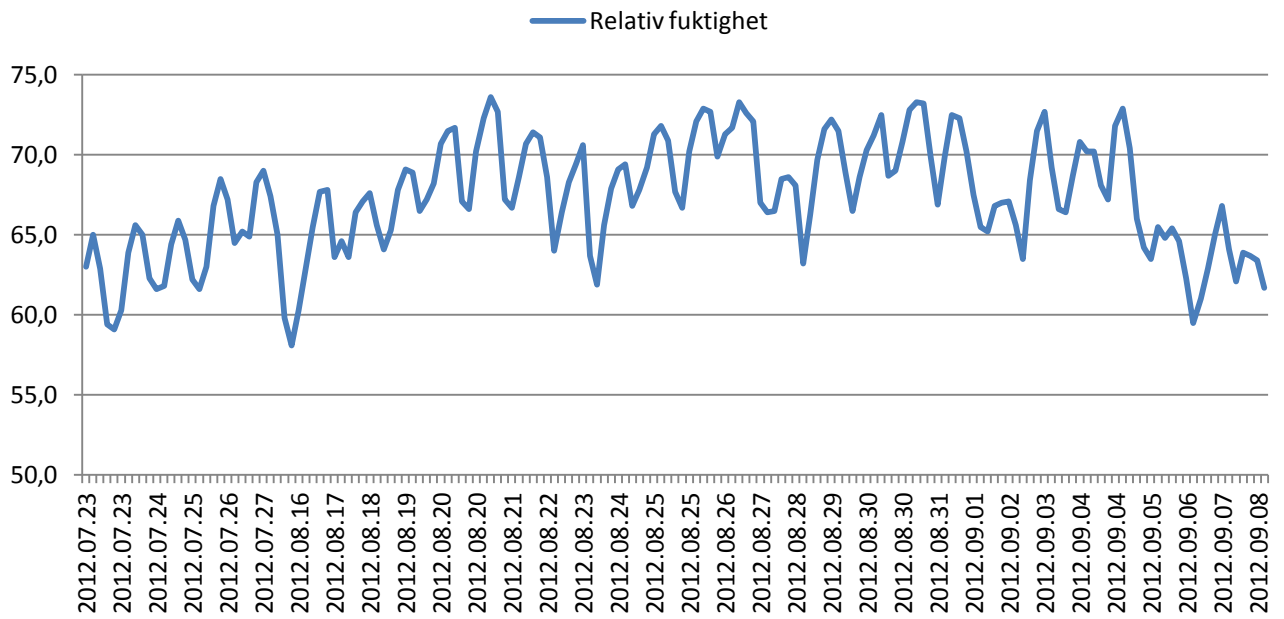


Figur 41 Relativ fuktighet i % under perioden 13/1 - 20/5 2013

4.6.1.2 Temperatur och relativ fuktighet 23/7 - 8/9 2012



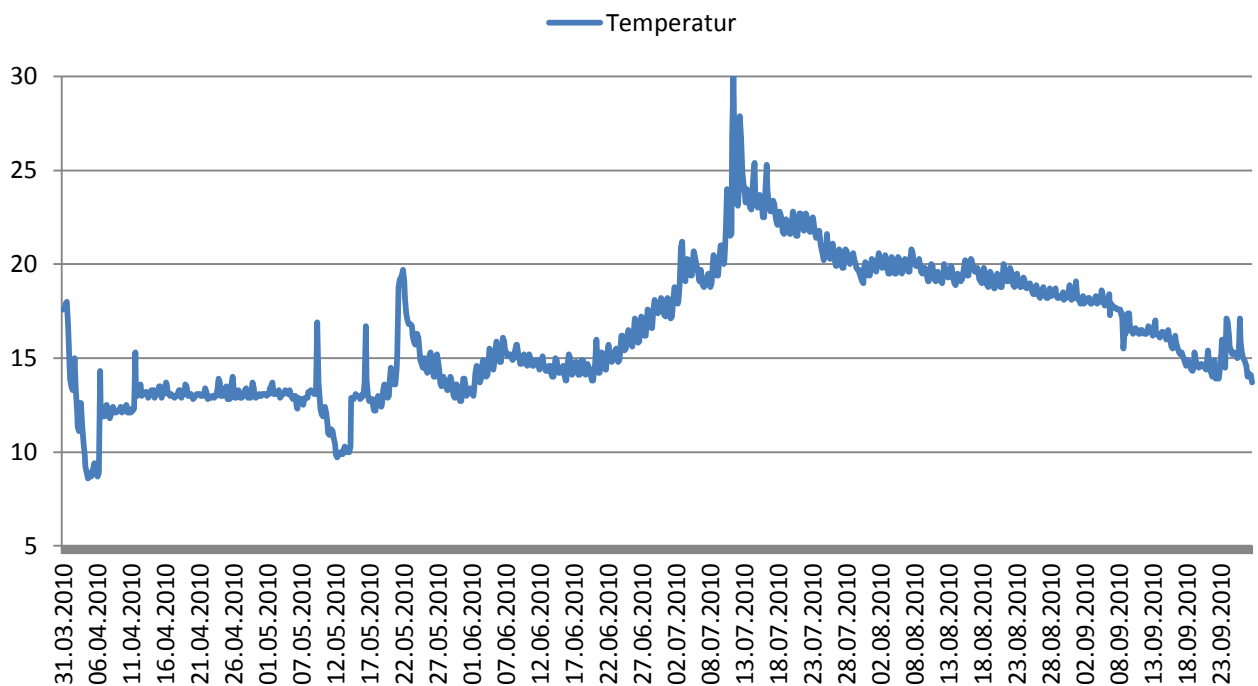
Figur 42 Temperatur i °C under perioden 23/7 - 8/9 2012



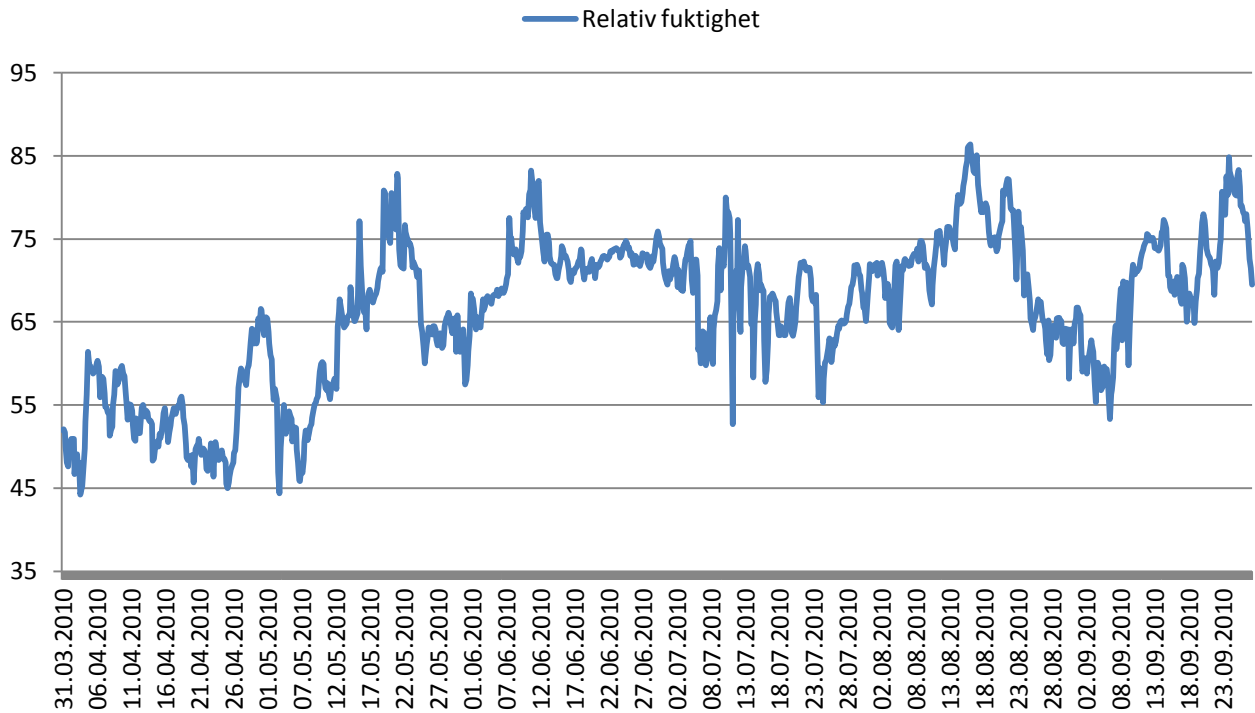
Figur 43 Relativ fuktighet i % under perioden 23/7 - 8/9 2012

Medelvärde under perioden på 67,3 % RF och 19,2 °C.

4.6.1.3 Temperatur och relativ fuktighet 31/3 - 28/9 2010



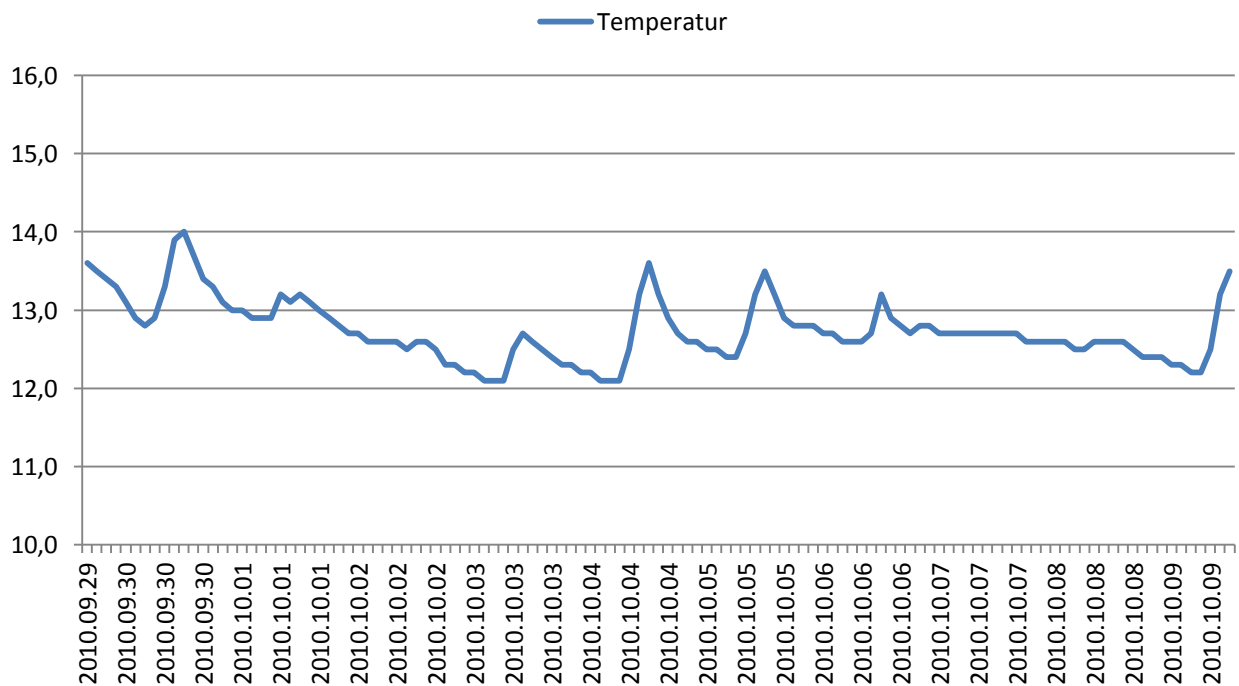
Figur 44 Temperatur i °C under perioden 31/3 - 28/9 2010



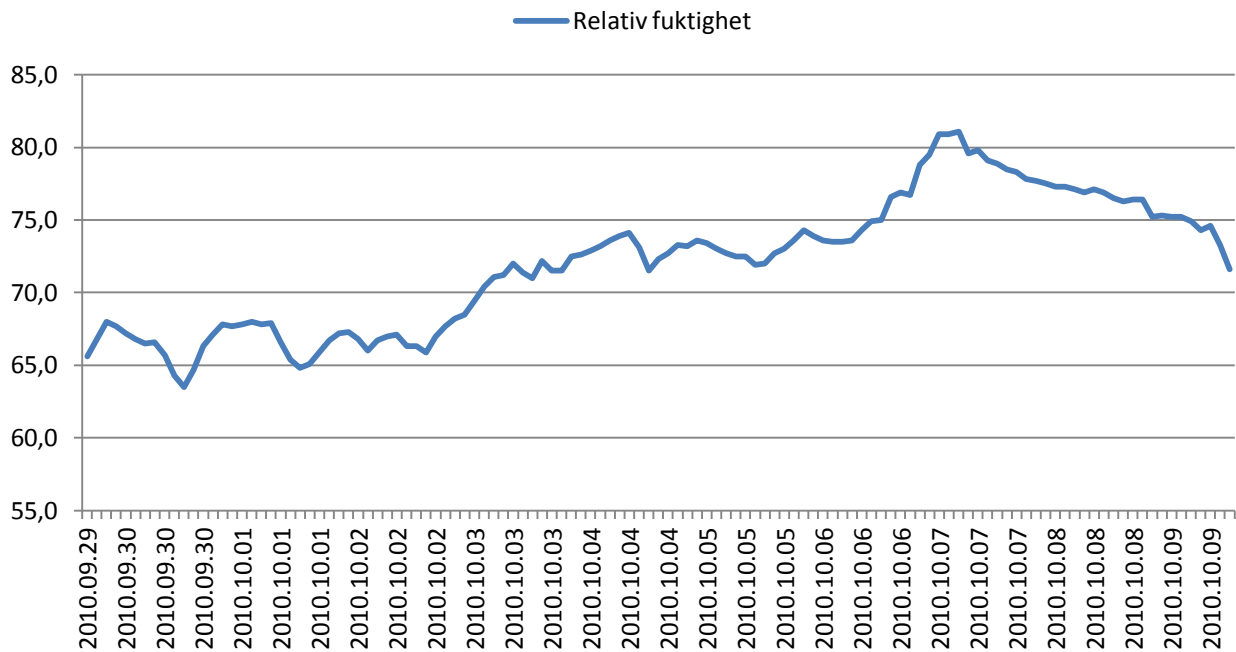
Figur 45 Relativ fuktighet i % under perioden 31/3 - 28/9 2010

Medelvärde under perioden på 66,4% RF och 16,4 °C. Tittar man bara under augusti månad ligger medelvärdet på 72,5 % RF.

4.6.1.4 Temperatur och relativ fuktighet 29/9 - 9/10 2010



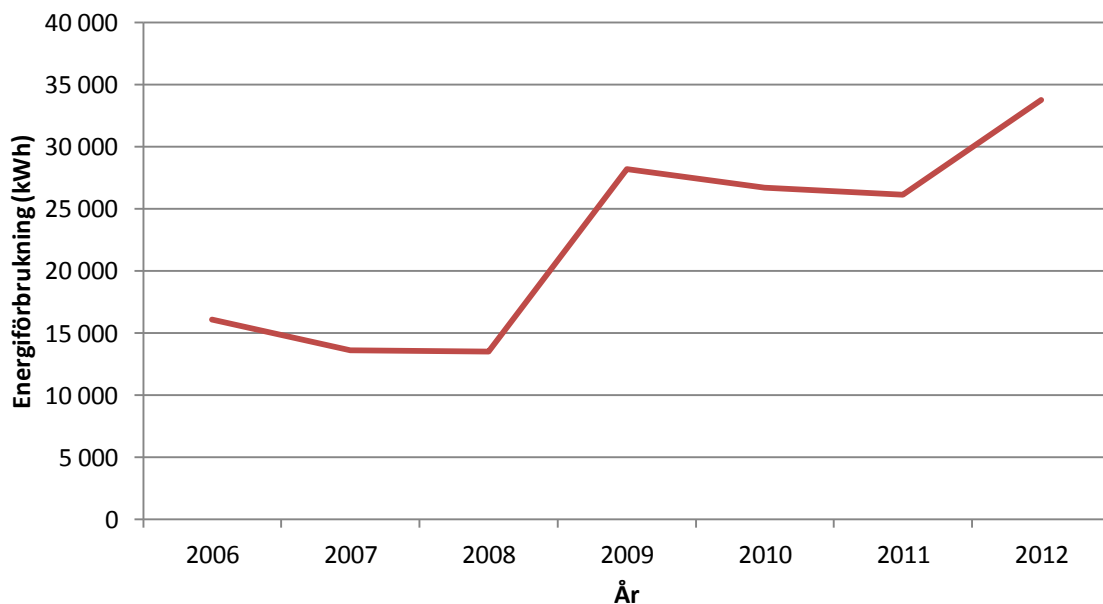
Figur 46 Temperatur i °C under perioden 29/9 - 9/10 2010



Figur 47 Relativ fuktighet % under perioden 29/9 - 9/10 2010

Medelvärde under perioden på 72,0 % RF och 12,7 °C.

4.6.2 Energiåtgång i Starby



Figur 48 Energiåtgång i Starby kyrka 2006 - 2012

BRA (bruksarea) = 159 m².

Detta ger ca 164 kWh/m² (2011). Detta är väldigt högt med tanke på att den för det mesta håller låg temperatur, endast "normal" inomhustemperatur fåtal gånger på vintern. BBR:s krav på nya lokaler

med elvärme är $55 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$. Alltså är Starbys energianvändning ca tre gånger större. Att jämföra energianvändningen i en gammal kyrka med en ny byggnad är såklart inte helt rättvist, men det kan ändå vara intressant att se skillnaden. Dessutom så håller man inte "normal" inomhustemperatur i kyrkan särskilt många timmar under uppvärmningsperioden vilket naturligtvis ger lägre energianvändning. Skulle man hållit komfortvärme året om skulle skillnaden varit ännu större. Den högre energiåtgången under 2012 beror på att innerglasen på fönstren plockats bort pga. kondens. Vad som hänt mellan 2008 och 2009 är oklart.

Energipriset är 1,16 kr/kWh. Inklusivt alla avgifter blir den totala kostnaden 1,69 kr/kWh, vilket ger en total uppvärmningskostnad på 57 135 kronor.

5 Analys

För att kunna dra slutsatser behöver man analysera alla resultat, fakta, förutsättningar osv. Detta görs nedan genom beräkningar och resonemang.

För att se om den högre relativa fuktigheten vid golvet endast beror på att där är lägre temperatur, och därmed lägre mätnadsånghalt, räknar jag ut ånghalten där och jämför med ånghalten i vistelsezonen.

Golv:

7/3 kl. 17:00

$$\left. \begin{array}{l} T \approx 10,8 \text{ }^\circ\text{C} \\ RF \approx 80 \% \end{array} \right\} \Rightarrow v \approx 7,9 \text{ g/m}^3.$$

Vistelsezon:

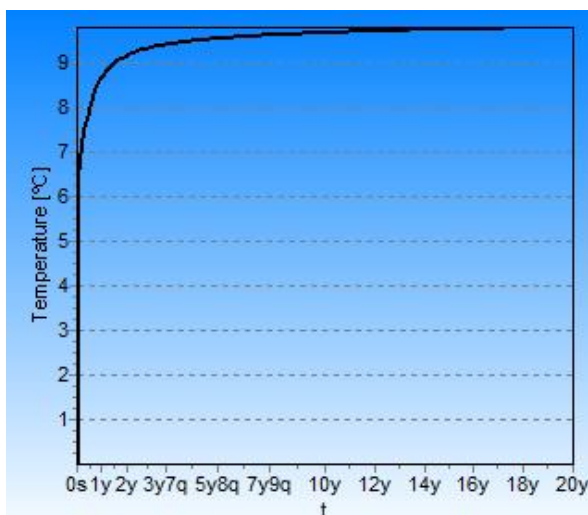
7/3 kl. 17:00

$$\left. \begin{array}{l} T \approx 11,3 \text{ }^\circ\text{C} \\ RF \approx 32 \% \end{array} \right\} \Rightarrow v \approx 3,3 \text{ g/m}^3.$$

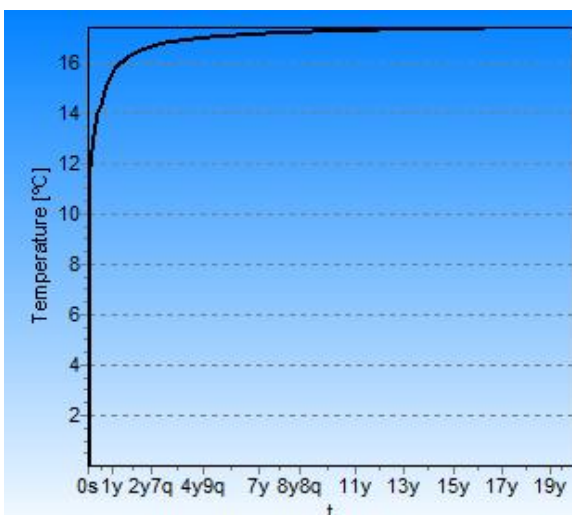
Detta innebär att luften nere vid golvet innehåller mer än dubbelt så mycket vattenånga jämfört med vad den gör i vistelsezonen, vilket tyder på att det finns ett fuktillskott där.

Vid samma tidpunkt var ånghalten utomhus $2,3 \text{ g/m}^3$. Det innebär att fuktillskottet i vistelsezonen var 1 g/m^3 och vid golvet $5,6 \text{ g/m}^3$.

För att vidare undersöka den höga fuktigheten vid golvet valde jag att simulera markförhållandena i Heat2. Att göra en helt korrekt simulering är i princip omöjligt eftersom det inte bara är utomhustemperaturen som varierar, utan också inomhustemperaturen. Vintertid hålls den relativt konstant med undantag vid förrättningar. Sommarhalvåret varierar den med utomhustemperaturen med viss förskjutning på grund av värmekapaciteten i byggnaden. Att lösa detta i Heat2 skulle vara oerhört komplicerat. Därför har jag valt att förenkla simuleringen och tittar endast på hur temperaturen i marken mitt under golvet påverkas av inne- och utetemperatur, alltså inte enligt "verklig" innetemperatur. Utifrån resultaten kan man ändå dra slutsatser om hur det är i verkligheten. Jag gjorde två simuleringar, den första med konstant inomhustemperatur på $10 \text{ }^\circ\text{C}$, och den andra med konstant innetemperatur på $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Utomhus har jag valt att variera temperaturen över året med hjälp av en sinuskurva enligt $T(t) = 8 + 13 \cdot \sin \frac{2\pi(t-3q)}{1y}$ (medelvärde på 8 grader, amplitud på 13 , kallaste temperaturen (-5) antas uppnås den 1:a januari varje år och den varmaste (21) uppnås den 1:a juli varje år). Simuleringarna gjordes över 20 år. Mätpunkten var placerad 500 mm under golvet. Som sagt, denna temperaturkurva är endast en förenkling av verkligheten.



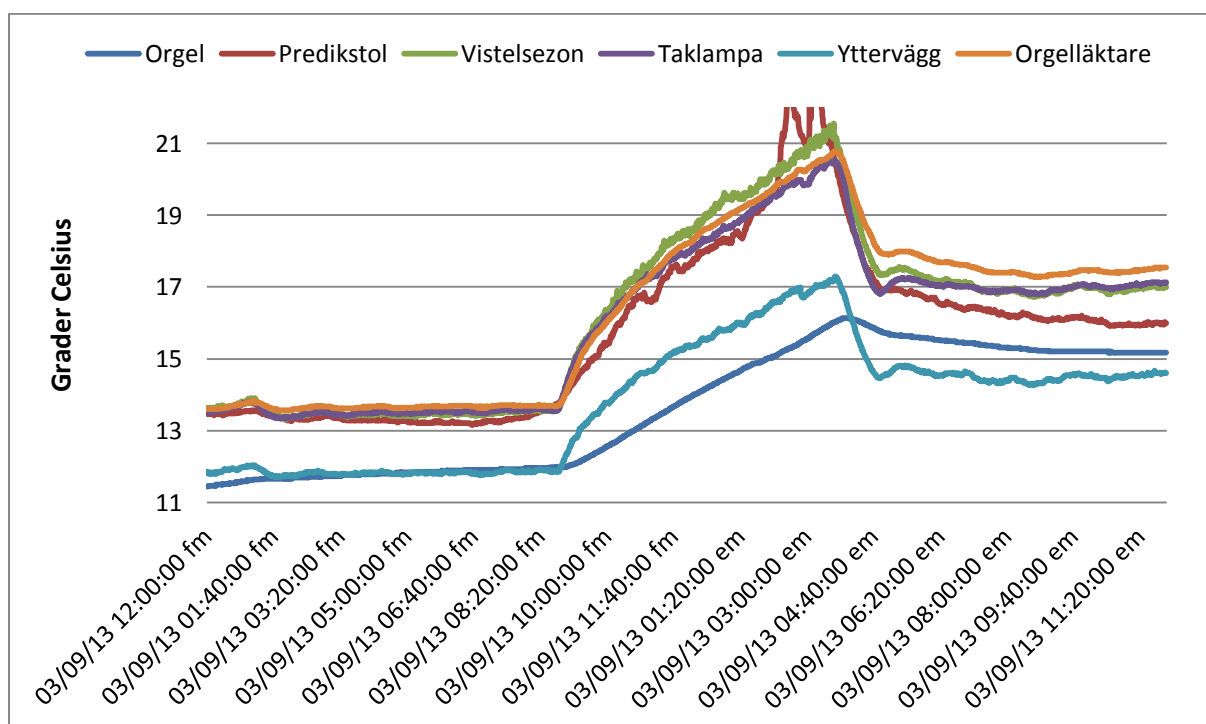
Figur 49 Temperatur 500 mm under golvet vid konstant inomhustemperatur på 10 °C



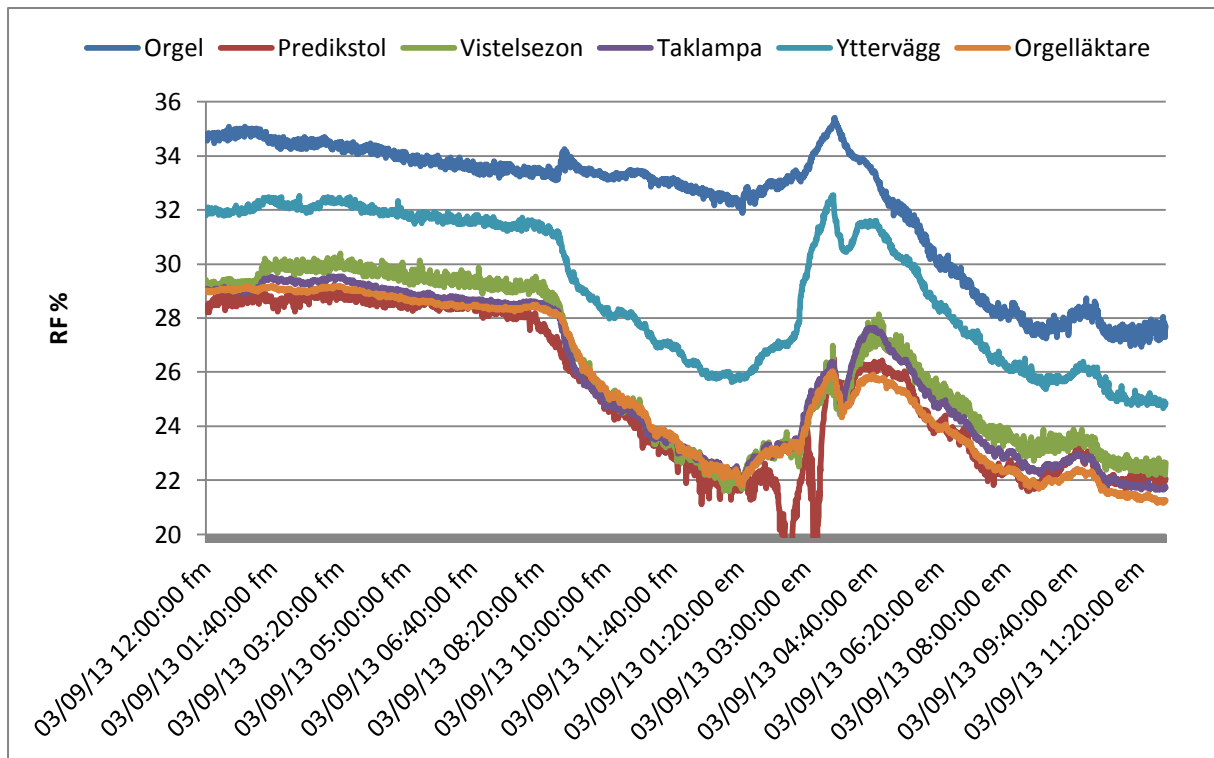
Figur 50 Temperatur 500 mm under golvet vid konstant inomhustemperatur på 18 °C

Man kan konstatera att bristen på isolering gör att temperaturen i marken är i princip densamma som inomhus, bara något lägre och med viss fördröjning. Man kan också konstatera att eftersom temperaturen i marken under följer inomhustemperaturen samt att RF där i stort sett alltid ligger nära 100 % så är ånghalten mycket högre i marken än inomhus. Detta leder till fukttransport upp i byggnaden på grund av den stora potentialdifferensen.

Jag vill också undersöka förändringshastigheterna på temperatur och relativ fuktighet vid uppvärmningen för att kunna jämföra med rekommendationer från litteraturen.



Figur 51 Temperaturförändring vid bröllop, mätpunkterna inomhus förutom golvet



Figur 52 Förändring i relativ fuktighet vid bröllopet, mätpunkterna inomhus förutom golvet

Beräkning av förändringshastighet på temperatur och relativ fuktighet i vistelsezonen inför bröllopet:

Tabell 15 Förändringshastighet på temperatur och relativ fuktighet i vistelsezonen inför bröllopp

08:17	T ≈ 13,5 °C	Δ T = 11 °C	
15:17	T ≈ 24,5 °C	Δ t = 7 h	$\frac{11}{7} = 1,57 \text{ K/h}$
08:17	RF ≈ 28,0 %	Δ RF = 9,5 %	
14:33	RF ≈ 18,5 %	Δ t ≈ 6,25 h	$\frac{9,5}{6,25} = 1,52 \text{ \%RF/h}$

Vid uppvärmning inför gudstjänsten på söndagen var förändringarna mindre eftersom differensen mellan start- och slutvärdet inte var så stor, då där var ca 17 °C under natten mellan lördag och söndag. Schellen rekommenderar högst 2-5 RF% och 2 K förändring per timme. Förändringshastigheten verkar vara i samma intervall som de föreslår.

5.1 Optimalt inneklimat för människor

Vid framtagning av optimalt klimat för brukarna, både besökare och de som arbetar där, väljer jag att dela in i några olika typfall för att på så sätt kunna anpassa uppvärmningen beroende på vilken aktivitet som ska äga rum. Typfallen som väljs är:

- Dop
- Begravning
- Bröllop
- Gudstjänst

Förutsättningarna för de olika typfallen skiljer sig något åt och därmed blir också det optimala inneklimatet olika. Genom att undersöka skillnaderna kan man optimera klimatet och förhoppningsvis leder det till både bättre komfort och lägre energiförbrukning. Temperaturerna som

tas fram gäller vintertid, eftersom det är då energibesparingarna är möjligt. Sommartid kan något högre temperaturen accepteras då man kan ha mindre kläder på sig.

Vid gudstjänster på vintern är det rimligt att förvänta sig att besökarna har mycket kläder på sig, och varför inte behålla jackan på. Därför kan man räkna med ett clo-värde på ca 1,5 - 2,0. Aktivitetsnivån för besökarna är låg eftersom man bara sitter och lyssnar, och därmed blir metabolismen 1,2 met. Utgår man då ifrån sambandet mellan aktivitet och beklädnad kan man få fram en optimal operativ temperatur för termisk komfort. I detta fall blir den ca 17 °C för ett PMV-index = 0, dvs. så många som möjligt kommer tycka att det är lagom varmt. Men trots det kommer ca 5 % att vara missnöjda med det termiska klimatet pga. individuella preferenser. Tillåter man PMV- indexet att variera mellan -0,5 till 0,5, dvs. ca 10 % kommer vara missnöjda, kan även temperaturen variera från det optimala med ± 3 °C. Om man tänker att det på en vanlig gudstjänst endast är ca 10 - 15 personer närvarande så innebär det statistiskt sett att max 1 - 2 personer kommer att vara missnöjda. Ur energisynpunkt vill man såklart hålla så låg temperatur som möjligt och därför kan man lägga sig i undre delen av intervallet, dvs. ca 15 °C, för att spara så mycket som möjligt. Annars kan ca 17 °C vara lämpligt. Det är en bedömning som församlingen får göra.

På ett bröllop blir det svårare att sänka temperaturen eftersom brudens klänning oftast är ganska tunn och sval, och därmed kräver hon högre temperaturer för att uppnå komfort. Däremot kan man tänka sig att bruden har en något högre aktivitetsnivå än övriga besökare, och således jämnare det ut sig lite. Därmed blir optimal temperatur på ett bröllop är ca 21 °C, ± 2 °C enligt sambandet mellan optimal operativ temperatur och beklädnad och aktivitet. På samma sätt här kan man ligga i undre delen av intervallet om man vill spara så mycket energi som möjligt.

Dop och begravning kan nog vara relativt lika i både aktivitetsnivå och beklädnad. Om förrättningen äger rum en kall vinterdag är det rimligt att förvänta sig att besökarna har lite tyngre kläder än på en varm sommardag. Därmed är det rimligt att sätta 1 - 1,5 clo som klädisolering. Aktivitetsnivån är densamma som de tidigare. Optimal temperatur blir då ca 18 °C.

Tabell 16 Optimal operativ temperatur för några typfall

Förrättning	Aktivitet [met]	Klädsel [clo]	Optimal operativ temperatur [°C]
Gudstjänst	1,2	1,5 – 2,0	15 – 17
Dop	1,2	1,0 – 1,5	Ca 18
Bröllop	1,2 – 2	0,5 – 1,0	Ca 20
Begravning	1,2	1,0 – 1,5	Ca 18

Från tabellen ovan kan man utläsa vilken operativ temperatur man vill uppnå vid olika förrättningar för att besökarna ska uppleva termisk komfort. För att förenkla lite kan man dela in i 2 lägen:

- "Vanlig gudstjänst", ca 15 – 17 °C
- "Övriga förrättningar", ca 19 °C.

En annan faktor för termisk komfort är lufthastigheter och kallras. För att undersöka detta räknar jag ut vilka lufthastigheter som genereras av de kalla fönsterytorna. Beräkningarna görs för en utomhustemperatur på 0 °C och inomhustemperatur på 19 °C. Lufthastigheten beräknas med formeln $v = 0,1 \cdot \sqrt{\Delta T \cdot H}$

$\Delta T =$ skillnad i temperatur mellan ytan och rummet (K)

$H =$ kalla ytans höjd (m)

Alltså måste fönsterytans temperatur först beräknas. U-värdet på fönstret väljs till 5,0, vilket är ett schablonvärde för gamla englasfönster. Höjden på fönstret är ca 1,7 meter.

$$T_{yta} = T_i - \frac{R_{si}}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 19 - \frac{0,13}{1/5} \cdot (19 - 0) = 6,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v = 0,1 \cdot \sqrt{(19 - 6,65) \cdot 1,7} \approx 0,46 \text{ m/s}$$

Enligt litteraturen är lufthastigheter mellan 0,15 – 0,20 m/s inte störande. Således kan kallraset från fönstren i detta fall upplevas som störande. Bättre isolerade fönster skulle såklart minska kallraset och således göra så att färre känner obehag.

5.2 Bäst inneklimat för bevarande

Som man kan se i min litteraturstudie så finns det inget definitivt klimat som är optimalt för bevarande, utan det varierar beroende på källa. Därför går det heller inte att enkelt att säga vilka värden på temperatur och relativ fuktighet som man bör styra efter vid uppvärmning av en kyrka. Det blir upp till varje enskild person att avgöra vem man vill lyssna på och dra egna slutsatser utifrån rekommendationerna som finns. Det enda som man kan få fram från litteraturstudien är ett intervall inom vilket man bör ligga.

Det som kan konstateras är att kyrkor och dess inventarier är känsliga och en omfattande undersökning av forskning och rekommendationer underlättar bestämning av krav. Därför har jag försökt att göra detta och sammanställa resultaten i lättöverskådliga figurer som presenteras nedan, i figur 53 – 54.

Förutom nivåer på temperatur och relativ fuktighet bör även förändringshastigheterna och uppvärmningstiden kontrolleras för att vara så skonsamt som möjligt för inventarier och byggnad. Rimlig uppvärmningstid för att uppnå detta analyseras senare.

5.3 Bäst inneklimat ur energisynpunkt

Ur energisynpunkt skulle det bästa vara att inte värma kyrkan alls. Men i de flesta fall blir det inte enbart energianvändningen som styr, utan man vill värma ändå för att besökarna ska uppleva termisk komfort. I de fall kan intermittenta uppvärmning vara ett bra alternativ eftersom man kan hålla nere energiåtgången stora delar av året samtidigt som där är varmt när det behövs. Men för att optimera den intermittenta uppvärmningen ur energisynpunkt bör man hålla både skyddsvärmen och komfortvärmen så låg som möjligt.

Även fukten i kyrkan påverkar energiåtgången. En fuktig byggnad har ett högre energibehov än en torr och därmed bör man eftersträva att hålla så låg relativ fuktighet som möjligt. Det högre energibehovet fås genom att fukten ökar materials värmeledningsförmåga, fasomvandlingar kan leda till energitransport samt att uttorkning av fukt kräver energi.

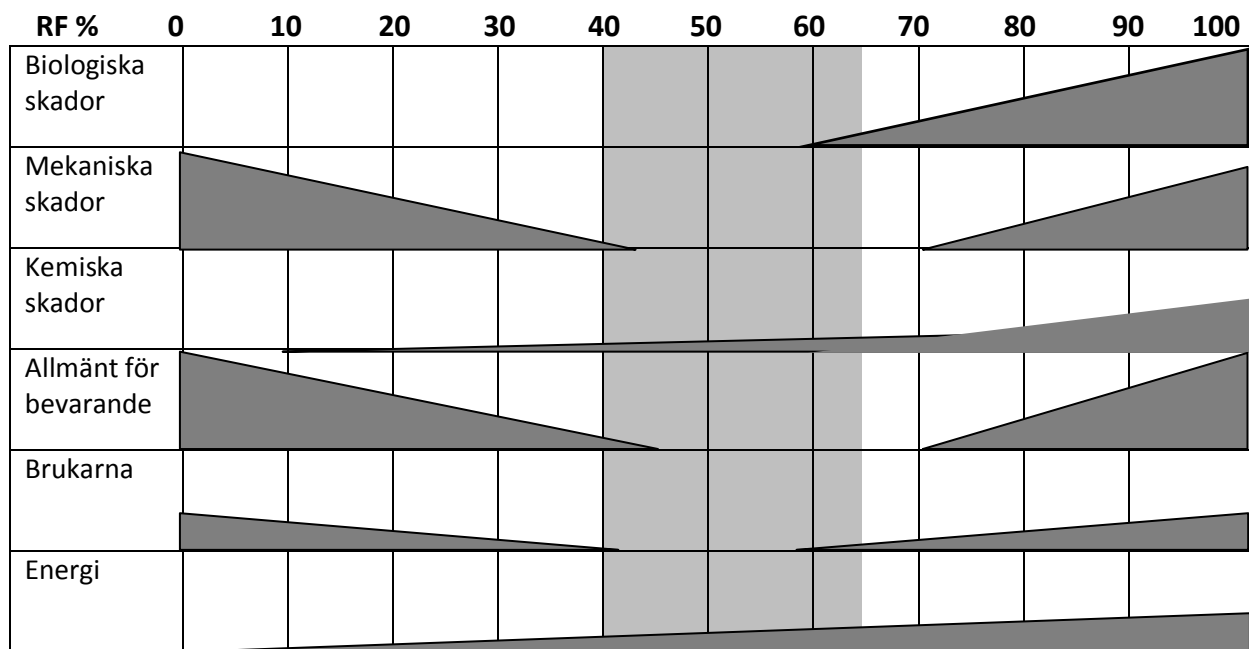
5.4 Kompromisser

Det är omöjligt att skapa klimat som uppfyller alla kriterier för både komfort, bevarande och energi. I vissa fall är de dessutom helt motstridiga mot varandra. För att hitta kriterier att styra

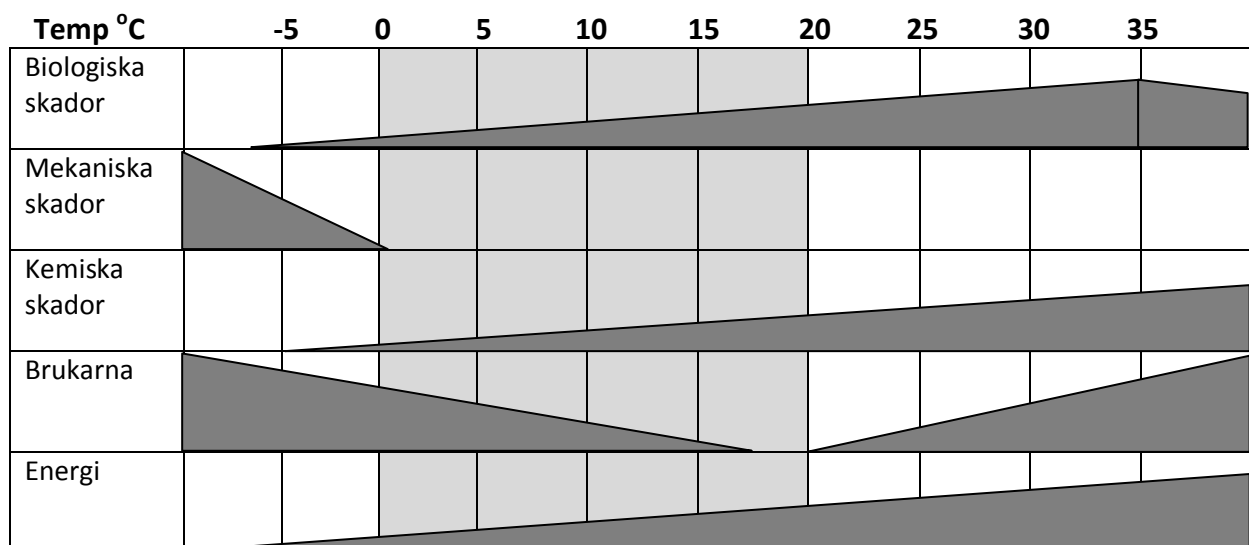
uppvärmningen efter måste man vikta kraven mot varandra och hitta kompromisser som förhoppningsvis kan uppfylla de flesta kriterier någorlunda.

För att få en klarare bild över kraven och rekommendationerna som finns har jag gjort två schematiska bilder över hur relativ fuktighet samt temperatur påverkar olika faktorer.

De mörkgrå områdena ska symbolisera risken för att skador ska uppstå eller att brukare blir missnöjda osv., och de ljusgrå vilka intervall som jag tycker att man bör ligga inom. I figurerna tas ingen hänsyn till förändringar och tillåtna variationer, eller hur temperatur och relativ fuktighet inverkan på varandra.



Figur 53 Schematisk bild över rekommendationer och risker för relativ fuktighet



Figur 54 Schematisk bild över rekommendationer och risker för temperatur

I figurerna ovan har risker viktats och bedömts och utifrån det kompromissat och dragit slutsatserna om vilka intervall som man bör ligga inom.

Givetvis går gränserna på några av faktorerna att diskutera om de är rätt eller inte. Exempelvis har jag valt att börja "risktriangeln" för RF på biologiska skador på 60 %. Detta är ganska lågt och anledningen till det är att litteraturstudien visat att textilier löper risk för mögelpåväxt redan vid 60 %. För de flesta andra material ligger gränsen högre, t.ex. ca 70 – 80 %, beroende på förutsättningarna. Men då någon form av textilier finns i de flesta kyrkor så blir 60 % en relevant gräns. När de gäller temperaturgränsen för mekaniska skador har jag satt den på 0 °C av den enda anledningen att om det blir minusgrader så finns risk för frostsprängning av både material och vattenledningar.

Bilderna visar alltså generella risker och rekommendationen, men i verkligheten kan det skilja sig mellan olika fall beroende på individuella förutsättningar och egenskaper.

Sammanfattningsvis kan man konstatera från de schematiska bilderna ovan att den relativa fuktigheten bör ligga inom intervallet 40 - 65 %, och temperaturen bör ligga mellan 0-20 °C, beroende på användning och uppvärmningsstrategi. Vidare måste man tänka på att man inte bara kan ta hänsyn till vilka intervall som är tillåtna utan man måste också titta på vilka variationer och förändringshastigheter som man kan acceptera, samt hur temperatur och relativ fuktighet samverkar. Exempelvis kan man tillåta högre relativ fuktighet vid låg temperatur eftersom riskerna för mögel då minskar.

5.4.1 Tider för uppvärmning vid intermittert

Uppvärmningstiden bör regleras enligt litteraturen till ca 2 K/h, eller 2 – 5 %RF/h. Räkna man att man kan hålla grundtemperaturen på 5 °C och ska värma till 19 °C blir uppvärmningstiden enligt första kriteriet 7 timmar. Att istället värma till 15 °C innebär en uppvärmningstid på 5 timmar.

Antar man att man kan hålla 50 % RF vid 5 °C inomhus och höjer temperaturen till 19 °C utan att tillföra någon fukt blir den relativ fuktigheten då ca 21 %. En begränsning av förändring i RF på 2 eller 5 %/h innebär då att uppvärmningstiden blir 5,8 – 14,5 timmar, beroende på begränsningen.

Ska man istället höja till 15 °C utan att tillföra fukt blir den relativa fuktigheten ca 27 %. Med en begränsning av förändring i RF på 2 eller 5 %/h blir uppvärmningstiden 4,6 -- 11,5 timmar.

De största förändringarna vid den intermitterta uppvärmningen sker på vintern. Övriga årstider blir differensen mellan start- och slutvärme mindre och uppvärmningstiden kan då också förkortas.

5.5 Analys av strategier och system

Som tidigare skrivits så lämpar sig olika uppvärmningsstrategier för olika typer av kyrkor och beroende på verksamheten i den. Den aktuella kyrkan i Starby är gammal, används sällan och innehåller en del känsliga material och föremål. Eftersom den används så sällan så är alternativet att den ska värmas kontinuerligt mindre aktuellt. Att inte värma alls anses inte heller vara ett bra alternativ eftersom risken är att man lätt får frostsador och hög relativ fuktighet periodvis, och således skulle det ge upphov till skadligt klimat. Att endast använda skyddsvärme skulle kunna vara ett bra alternativ eftersom man då både kan skapa ett skonsamt klimat för bevarande samt hålla låg energianvändning. Men på grund av vårt kalla klimat i Sverige hade det troligtvis blivit svårt att använda kyrkan vintertid då det hade varit orimligt att uppnå termisk komfort. Eftersom

församlingen önskar att kunna använda kyrkan för gudstjänster, bröllop osv. även vintertid så kan också denna strategi räknas bort. Skulle man däremot i framtiden ändra sig och sluta använda kyrkan på vintern på grund av höga energikostnader så skulle strategin att endast hålla skyddsvärme kunna vara ett bra alternativ.

I dagens läge i Starby kyrka kan den bästa uppvärmningsstrategin ur energibesparingssynpunkt vara att värma intermittent och till viss del zonindelad. Men detta får församlingen bedöma. Då kyrkan används relativt sällan kommer den genomsnittliga temperaturen att kunna hållas låg och därmed hålla nere energianvändningen, och vid förrättningar kan man uppnå komfort året om. För att minimera energiåtgången vid den intermittenta uppvärmningen bör lufttemperaturen i byggnaden endast höjas lite och att komforten för brukarna ska ske genom att man värmer lokalt i zonerna där man vistas. På så sätt bör man kunna uppnå en acceptabel kompromiss mellan komfort, bevarande och energi. Uppvärmningstiden bör kontrolleras så att inte förändringshastigheten på temperatur blir för stor, med hänsyn till mekaniska påfrestningar som då kan uppstå. Ur bevarandesynpunkt måste man vara försiktig med intermittent uppvärmning. Skador har uppstått i kyrkan under tiden som intermittent uppvärmning har använts och om det har bidragit är svårt att säga.

För att uppnå önskad uppvärmningsstrategi och klimatkrav krävs ett uppvärmningssystem som kan leverera vad som begärs. En del system lämpar sig bättre för vissa strategier än för andra och därför måste man ha bestämt strategi innan man sedan väljer vilket system som man ska installera. Sedan är det, som skrevs i litteraturstudien, framförallt fyra punkter som styr val av system:

- **Läge:** möjlighet till fjärrvärme, tillgång till biobränsle, tillgång till berggrund för borrhål etc.
- **Byggnadstyp:** ny eller befintlig byggnad, flerfamiljshus, lokalbyggnad, kulturminnesmärkt etc.
- **Miljöhänsyn:** energislag, bränsleslag etc.
- **Ekonomi:** kapitalkostnader, driftkostnader etc.

Här kan man konstatera att läget innebär att det inte finns möjlighet till fjärrvärme. Dessutom är förutsättningarna för bergvärme inte heller optimala, då borrning i lera innebär fler komplikationer samt att befintligt system för vattenburen värme saknas vilket skulle innebära stora kostnader för installation. Avsaknaden av befintligt system för vattenburen värme innebär att alla system som bygger på varmvatten kommer att kräva en stor investeringskostnad eftersom både nya värmeledningar och radiatorer måste installeras. Att den aktuella byggnaden är en kyrka betyder också man måste ta hänsyn till reversibilitet och varsamhet, som beskrivs i litteraturstudien. Det kan också tala emot att installera ett vattenburet värmesystem då det gör en relativt stor inverkan på byggnaden. När det gäller miljöhänsyn och ekonomi är det i första hand låg energiförbrukning som eftersträvas, och därmed låg driftskostnad.

Ett alternativ är att behålla de gamla bänkvärmarna från 50-talet, men risken är att de går sönder samt att de inte är energieffektiva eftersom hela behovet av energi måste köpas. Utifrån de givna förutsättningar, samt utifrån litteraturstudien, skulle någon form av luft-luftvärmepump för skyddsvärme kunna vara en bra lösning i Starby. De studier som presenterats i litteraturstudien har visat att luft-luftvärmepump verkar fungera bra för just skyddsvärmen i kyrkor. Energianvändningen kan då minskas eftersom man inte behöver köpa all tillförd energi, och detta alternativ är därmed mer hållbart ur energisynpunkt. Om församlingen även i fortsättningen önskar att hålla komfortvärme under förrättningar på vintern kan någon form av stålningvärmare vara lämpligt, då det visats att det kan ge god termisk komfort. Eftersom Starby kyrka används så sällan är det viktigast

att göra skyddsvärmen energieffektiv. Nackdelen med att använda en luft-luftvärmepump för skyddsvärmen är att vid låga inomhustemperaturer kan funktionen inte alltid garanteras på grund av att utedelen måste avfrostas och att värme då tas från inomhusluften. Detta är särskilt ett problem vid låg temperatur och hög RF utomhus. Tillfällena när man kan sänka inomhustemperaturen, om man styr efter RF, är framförallt när man har både låg temperatur och låg RF utomhus. Därför borde det inte vara något större problem. Idag finns dessutom luftvärmepumpar som klarar av en inomhustemperatur ner till 5 °C.

Eftersom de presenterade systemen drivs av elektricitet kan ett alternativ för att både få ner driftkostnaderna och bidra till minskad miljöpåverkan vara att installera solceller i anslutning till kyrkan. Kyrkans tak är egentligen optimalt för placering av solceller, men det skulle förmodligen inte vara aktuellt och därför kan man istället installera solcellerna på någon kringliggande byggnad eller på marken. Investeringskostnaden skulle givetvis öka, men driftkostnaderna skulle kunna sänkas ganska kraftigt. Dessutom går det att få installationen och hårdvaran subventionerad med upp till 35 %. Alternativt får man göra ROT-avdrag för arbetskostnaden av installationen.

Ett enklare alternativ, jämfört med värmepump och värmefolie, skulle vara att bara göra om eldragningen och installera nya elektriska bänkvärmare, liknande de som redan finns där. Det nya systemet skulle i så fall inte innebära någon energieffektivisering i sig, men med ändrad och förbättrad uppvärmningsstrategi och användning kan man ändå uppnå en energieffektivisering. Nya bänkvärmare skulle också kunna vara ett alternativ till värmefolien och därmed endast användas vid förrättningar, och ha luftvärmepump för grundvärmen. Fördelen med bänkvärmarna skulle vara att installationen är enklare och något diskretare.

5.6 Energi- och effektbehov

Eftersom tillräcklig beskrivning av byggnaden och de ingående materialen saknas måste många antagningar göras för att kunna beräkna effektbehovet. Mått på byggnaden som jag kan utgå ifrån är att långhuset från 1200-talet sägs vara ca 20 x 14 alnar (ca 11,9 x 8,3 m), vilket sägs utgöra ca 2/3 av det nuvarande långhuset, samt att bruksarean är ca 159 m². Om måttet på långhuset är invändigt eller utvändigt framgår inte, men efter lite beräkningar på area och utvärdering och jämförelse med angiven BRA, drar jag slutsatsen att det är utvändiga mått. Således är de invända måtten i det nuvarande långhuset ca 15,9 x 6,3 m. Vad som ingår i den mätta bruksarean framgår inte heller, men jag antar att det är vapenhuset, långhuset, koret, plan 2 i tornet, samt orgelläktaren. Utifrån detta har jag beräknat areorna för de olika delarna, vilket behövs för effektberäkningarna.

Luftläcket i kyrkan är okänt och därför använder jag schablonvärden från litteraturen. Men skillnaden i de angivna schablonvärdena är enligt en faktor 10. Därför väljer jag att göra en slags känslighetsanalys och räkna på olika värden.

Effektbehovet som jag vill beräkna är det dimensionerande, dvs. effektbehovet vid värsta fall.

5.6.1.1 Effektbehov 1:(Brostöm, 1996)

Effekten för att hålla skyddsvärme. Effektbehovet beräknas för värsta fallet. Därför väljs T_u till det dimensionerande vinterutetemperaturen, DVUT.

$$P = Q_{tot} \cdot (T_i - T_u) - P_{gratis}$$

$$Q_{tot} = Q_{köldbryggor} + (\sum U_j \cdot A_j) + \rho \cdot c \cdot q_{vent} \cdot (1 - v) \cdot d + \rho \cdot c \cdot q_{läckage}$$

Eftersom hela byggnaden i detta fall är relativt dåligt isolerad så kommer inte köldbryggorna att ha så stor inverkan och därför väljer jag att försumma dem. Mekanisk ventilation finns inte heller och då försvinner hela termen med $q_{vent} \cdot T_i$ blir temperaturen som används som skyddsvärme vintertid. Eftersom jag räknar med DVUT, och därmed låg ånghalt utomhus, kan temperaturen inomhus antagligen också vara ganska låg vid den tidpunkten. I mina mätningar kunde inomhustemperaturen sänkas till ca 4 °C och ändå hålla ca 51 % RF. Vilken temperatur som kan hållas kommer naturligtvis variera beroende på förutsättningarna, men för att ligga på säkra sidan väljer jag i detta fall att en grundtemperatur på 5 °C. Vid beräkning för värsta fallet räknar jag inte heller med P_{gratis} .

För att bestämma den dimensionerande vinterutetemperaturen måste byggnadens tidskonstant först beräknas.

$$\tau_b = \frac{\sum(m_i \cdot c_i)}{(\sum U \cdot A) + Q_{l\ddot{a}ckage}} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24}$$

m = massa [kg]

c = värmekapacitet [J/kgK]

Detta kan då först göras efter att förlustfaktorn för transmission och läckage beräknats.

5.6.1.1.1 Transmissionsförluster:

Förlustfaktorn $U \cdot A$ beräknas för de olika byggnadsdelarna med hjälp av uppskattningar och materialegenskaper.

Väggar	d [m]	λ [W/mK]	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
Rse				0,04
Tegel	1	0,7	1,428571	
Rsi				0,13
				0,625559
Area [m2]				213
A*Utot				133,244

Tak	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
Rse				0,04
tegel	0,5	0,7	0,714286	
mu	0,3	0,038	7,894737	
Rsi				0,13
				0,113908
Area [m2]				124
A*Utot				14,12458

Fönster	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
				5
Area [m ²]				26
A*Utot				130

Dörrar	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
				2
Area [m ²]				5
A*Utot				10

U-värdet för grunden kan i detta fall beräknas på samma sätt som för platta på mark. Först behöver man då beräkna den karakteristiska dimensionen B', som är ett förhållande mellan golvarea och utvändiga omkretsen på byggnaden.

$$B' = A/(0,5P) = 124/(0,5 \cdot 67) = 3,701$$

Därefter beräknas den ekvivalenta tjockleken dt.

$$dt = w + \lambda(R_{si} + R_{sf} + R_{se}) = 1 + 1,5(0,13 + 0,08 + 0,04) = 1,375$$

Då $dt < B'$ innebär det att grunden är oisolerad, och U-värdet för grunden beräknas då enligt:

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B' + dt} \cdot \ln\left(\frac{\pi B'}{dt} + 1\right) = \frac{2 \cdot 1,5}{\pi \cdot 3,701 + 1,375} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot 3,701}{1,375} + 1\right) = 0,518 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Grund	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
				0,518
Area [m ²]				124
A*Utot				64,2

$$\sum U \cdot A = 133,2 + 14,1 + 130 + 10 + 64,2 = 351,5 \text{ W/K}$$

5.6.1.1.2 Förluster genom luftläckage:

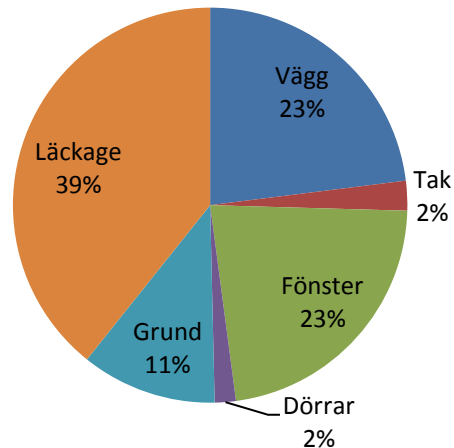
Läckageflödet är, som jag skrivit tidigare, okänt. Jag räknaren gång på en luftomsättning på 0,2 oms/h och en gång på 2 oms/h. För att få fram flödet måste byggnadens volym bestämmas. Golvarean har redan uppskattats så det som behövs är då höjden. Eftersom innertaket består av valvbågar varierar takhöjden och därför gör jag en förenkling och antar att den genomsnittliga höjden är 5 meter. Luftvolymen blir då $124 \cdot 5 = 620 \text{ m}^3$. 0,2 oms/h motsvarar då $0,2 \cdot 620 \cdot 1000/3600 = 34,4 \text{ l/s}$. 2 oms/h motsvarar 344,4 l/s.

$$\rho_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot q_{läck,34,4} = 1,2 \cdot 1000 \cdot 34,4 \cdot 10^{-3} = 41,3 \text{ W/K}$$

$$\rho_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot q_{läck,344,4} = 1,2 \cdot 1000 \cdot 344,4 \cdot 10^{-3} = 413,3 \text{ W/K}$$

Vilket värde som är mest troligt är omöjligt att säga. Men om man lyckas hålla relativt låg grundtemperatur blir den termiska drivkraften lägre och därmed minskar läckaget. I och med det antas läckaget på 344,4 l/s vara för stort. Jag uppskattar att ett rimligt värde att räkna på är medelvärdet av de två framräknade, dvs. $(41,3 + 413,3)/2 = 227,3 \text{ W/K}$.

Förlustfaktorerna fördelas enligt nedan. Man kan se att den största andelen är läckageförluster.



Figur 55 Fördelning av de dimensionerande förlustfaktorerna

Den dimensionerande utomhustemperaturen fås från tabell 17. Närmsta ort med angiven DVUT är Lund och därför väljs det. Men först måste tidskonstanten beräknas.

Tabell 17 DVUT för Lund

	1 dygn	2 dygn	3 dygn	4 dygn	5 dygn	6 dygn	7 dygn	8 dygn	9 dygn
Lund	-11,6	-10,6	-10,1	-10,0	-9,8	-9,4	-9,4	-9,1	-8,8

$$\tau_b = \frac{\sum(m_i \cdot c_i)}{(\sum U \cdot A) + Q_{\text{läckage}}} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24}$$

Summan av värmekapaciteten beräknas i tabellen nedan.

Tabell 18 Beräkning av Σmc

	tjocklek [m]	densitet [kg/m ³]	area [m ²]	specifik värmekapacitet [J/kgK]	värmekapacitet [J/K]
kalksten	1	2300	124	1000	285200000
tegel	1	1500	337	1000	505500000
Summa:					790700000

$$\tau_b = \frac{\sum(m_i \cdot c_i)}{(\sum U \cdot A) + Q_{\text{läckage}}} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24} = \frac{790700000}{227,3 + 351,5} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24} = 16 \text{ dygn}$$

Tidskonstanten sätts till 12 dagar, enligt FEBY12 för tung byggnad. DVUT kan sedan interpoleras fram till $-7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Det dimensionerande effektbehovet för skyddsvärmen blir då: $(227,3 + 351,5) \cdot (5 - (-7,9)) = 578,8 \cdot 12,9 = \underline{7467\text{ W}}$.

5.6.1.2 Effektbehov 2: (Broström, 1996)

Effekten för att värma intermittent vid förrättningar. Även nu vill jag beräkna det dimensionerande effektbehovet. Därmed räknar jag med att temperaturen ska höjas till $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ vid förrättningar från $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, som det andra systemet skulle klara att värma till. Utomhustemperaturen sätts även här till DVUT. Inomhustemperaturen som används vid beräkning av transmissions- och ventilationsförlusterna fås fram som ett tidsmedelvärde enligt formeln nedan.

$$T_i = \frac{T_{i0} + 2T_{i,slut}}{3} = \frac{5 + 2 \cdot 19}{3} = 14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Eftersom temperaturen inte ökar linjärt med tiden kan inte man ta vanliga medelvärdet.

När det gäller uppvärmningstiden kommer denna variera både beroende på vilken nivå på begränsningar man väljer och på förutsättningarna i varje situation. I beräkningarna nedan väljer jag att sätta uppvärmningstiden till 8 timmar eftersom det ligger inom de beräknade intervallen.

Transmissionsförlusterna här innebär värmeförlusterna genom de delar av byggnaden som inte har någon större värmelagrande förmåga. I Starby kyrka blir det endast fönster och dörrar.

$$P_{tr} = (\sum U_j \cdot A_j) \cdot (T_i - T_u)$$

Fönster	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
				5
Area [m ²]				26
A*Utot				130

Dörrar	d [m]	λ	R (d/ λ)	U (1/Rtot)
				2
Area [m ²]				5
A*Utot				10

$$P_{tr} = (\sum U_j \cdot A_j) \cdot (T_i - T_u) = (130 + 10) \cdot (14,3 - 5) = \underline{1302\text{ W}}$$

När det gäller läckageförlusterna i detta fall blir de något större än tidigare eftersom de termiska drivkrafterna ökar när inomhustemperaturen ökar. Beräknar både med en luftomsättning på 1 oms/h och 2 oms/h.

$$P_{vf,1} = (n \cdot \rho_l \cdot c_l \cdot V) \cdot (T_i - T_u) = \left(\frac{1}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot 620\right) \cdot (14,3 - (-11)) = 5229\text{ W}$$

$$P_{vf,2} = (n \cdot \rho_l \cdot c_l \cdot V) \cdot (T_i - T_u) = \left(\frac{2}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot 620\right) \cdot (14,3 - (-11)) = 10457\text{ W}$$

Precis som tidigare så är det omöjligt att veta vilken den verkliga omsättningen är i Starby. Själva byggnaden är nog ganska tät i sig, utan det är fönster, dörrar och andra håligheter som står för läckagen. Jag antar att den verkliga omsättningen är 1,5 oms/h, alltså mitt emellan de beräknade.

$$P_{vf} = 7843 \text{ W}$$

Effektbehovet för att värma luften beräknas enligt:

$$P_l = \frac{\rho_l \cdot c_l \cdot V \cdot (T_i - T_{i0})}{t} = \frac{1,2 \cdot 1000 \cdot 620 \cdot (19 - 5)}{8 \cdot 60 \cdot 60} = 361,7 \text{ W}$$

Det som återstår är då effektbehovet för att värma de värmelagrande ytorna. Det blir i detta fall väggar, tak och golv. Först behöver man då räkna ut byggnadsdelens uppeldningskonstant u . Den beräknas enligt formeln:

$$u = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}}$$

Alltså behöver man ta fram lite materialegenskaper. Både väggen och taket består av tegel och har därmed samma värmelagrande egenskaper.

$$u = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot 0,7 \cdot 1000 \cdot 1500}} \approx 0,0011$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{tegel}} &= 0,7 \text{ W/mK} \\ c_{\text{tegel}} &= 1000 \text{ J/kgK} \\ \rho_{\text{tegel}} &= 1500 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Effektbehov för uppvärmning av väggarna och taket blir:

$$P = \frac{\Delta T_i}{\frac{u}{A} \sqrt{t} + \frac{1}{\alpha \cdot A}} = \frac{14}{\frac{0,0011}{337} \cdot \sqrt{28800} + \frac{1}{(0,13)^{337}}} = 14898 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= 14 \text{ K} \\ t &= 28800 \text{ s} \\ \alpha &= 1/0,13 \text{ W/m}^2\text{K} \\ A &= 337 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Jag testar även att räkna med en annan formel där man istället använder temperaturökningen i väggen för att se effektbehovet för att värma ytorna.

$$\Delta T_v = u \frac{P_v}{A} \sqrt{t} \rightarrow P_v = \frac{\Delta T_v A}{u \sqrt{t}}$$

Där ΔT_v = temperaturökningen vid väggen

Från mina mätningar i kyrkan, vid nuvarande förutsättningar, ser jag att temperaturen vid ytterväggen ligger ca 2 grader under lufttemperaturen, och att differensen mellan star- och stoppvärde är lite mindre. Om den relativa differensen mellan förändringen i luft- och

väggtemperatur är densamma även om start- och slutvärdet ändras, blir förändringen vid väggen $\Delta T_v = 0,65 \cdot 14 \approx 9 \text{ }^\circ\text{C}$, då $\Delta T_i = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_{v,t} = \frac{9 \cdot 337}{0,0011 \sqrt{28800}} = \mathbf{16247 \text{ W}}$$

Alltså blir de relativt lika varandra.

Effektbehovet för att värma golvet:

$$u = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot 2,5 \cdot 1000 \cdot 2670}} = 4,37 \cdot 10^{-4}$$

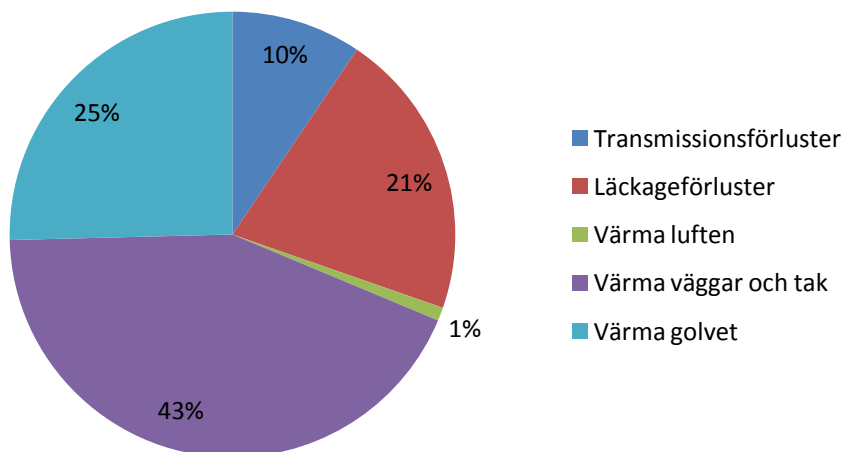
$$\begin{aligned} \lambda_{\text{kalksten}} &= 2,5 \text{ W/mK} \\ C_{\text{kalksten}} &= 1000 \text{ J/kgK} \\ \rho_{\text{kalksten}} &= 2670 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

På samma sätt som tidigare så räknar jag ut temperaturhöjningen vid golvet för de nya förutsättningarna med hjälp av mätvärdena. Temperaturskillnaden vid golvet är mycket mindre än i vistelsezonen, endast ca 40 %. $\Delta T_g = 0,40 \cdot 14 \approx 5,7 \text{ }^\circ\text{C}$, då $\Delta T_i = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_g = \frac{5,7 \cdot 124}{4,37 \cdot 10^{-4} \sqrt{28800}} = \mathbf{9530 \text{ W}}$$

Eftersom beräkningarna i detta fall görs utifrån elradiatorer kan P_s försummas. För beräkning av den dimensionerande effekten försummas även solinstrålning och det interna värmetilskottet.

$$P_{\text{tot}} = 1302 + 7843 + 362 + 14898 + 9530 = 37524 \text{ W} = \mathbf{33,935 \text{ kW}}$$



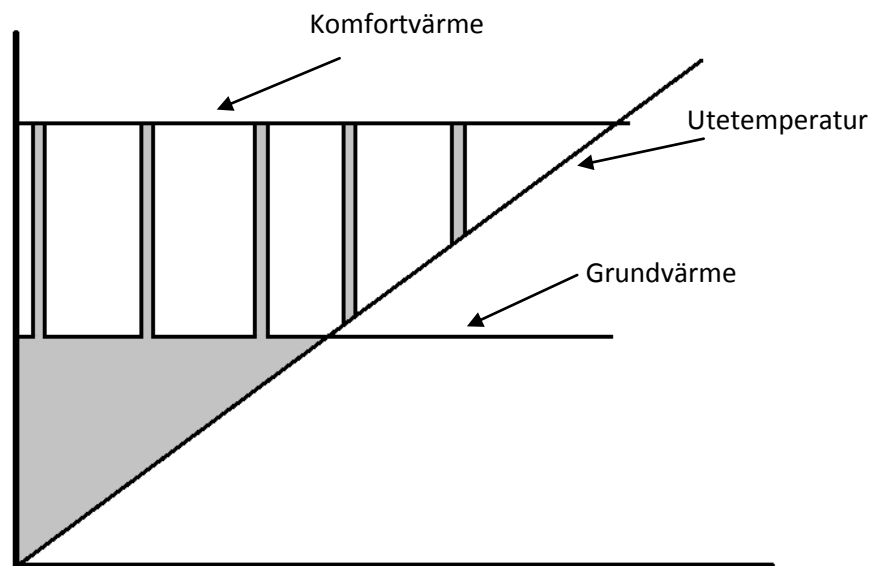
Här ser man att det höga effektbehovet framförallt kommer från uppvärmning av väggar, tak och golv. Uppvärmning av luften har minimal betydelse.

5.7 Ekonomi

Vid byte av de direktverkande elradiatorerna som finns idag till luft-luftvärmepump kan elförbrukningen reduceras ganska stort. Antar man ett genomsnittligt COP-värde över året på 3,0 så minskar elförbrukningen med 67 %. Detta förutsätter att man inte gör några andra förändringar än just byte av direktverkande el till värmepump. Dock är det inte riktigt rimligt att anta ett genomsnittligt COP-värde på 3,0 eftersom det varierar med utomhustemperaturen. Dessutom kanske inte värmepumpen kan täcka riktigt hela energibehovet.

Men ska man bara använda värmepump till skyddsvärme så blir besparingarna inte riktigt lika stora. Strålningsvärmare har inte bättre verkningsgrad än de befintliga, men effektivare användning av kilowattimmarna kan ändå leda till lägre förbrukning. Med det menas att man ska värma besökarna så mycket som möjligt och inte luften och övriga byggnaden, samt att uppvärmningsstrategin kan effektiviseras exempelvis genom att hålla lägre temperatur.

Att investera i nytt system för komfortvärme är inte särskilt ekonomiskt. Det krävs ganska stor effekt för att kunna värma tillräckligt mycket, men den totala energiåtgången är relativt liten. Alltså blir investeringen stor men användningen liten. Detta visas i den schematiska bilden nedan, där det gråa ska motsvara energiåtgången. Topparna vid förrättningarna kräver alltså stor effekt men den totala energiåtgången blir inte så stor, dvs. investeringskostnad/utnyttjad kWh blir hög.



Figur 56 Schematisk bild över energiåtgång för komfort värme och grundvärme

Bilden visar också att den största energiåtgången kommer att gå till grundvärmen och därmed är det där man kan göra störst besparingar och det systemet som bör vara mest energisnålt.

6 Slutsatser

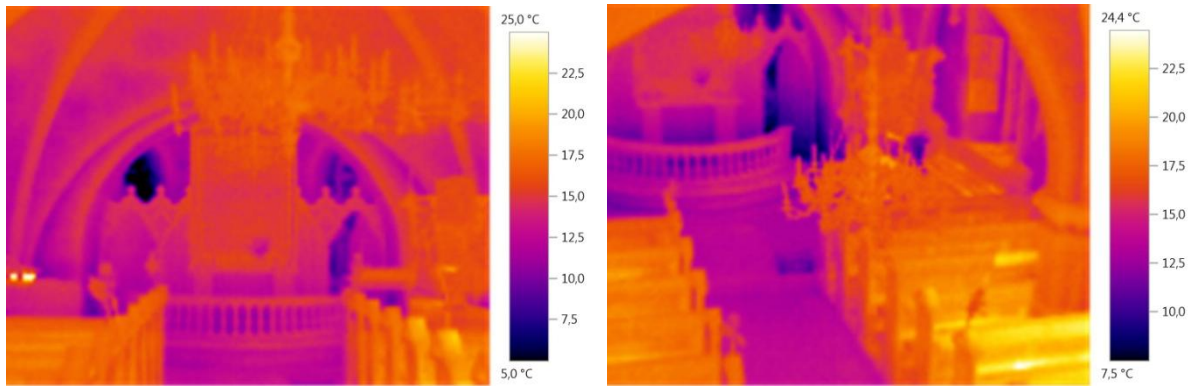
6.1 Slutsatser från litteraturstudien

Slutsatsen man kan dra från litteraturstudien är att det inte finns några givna värden att styra uppvärmningen efter i en kyrka, utan det varierar beroende på källa. Dessutom finns det inte många som har gjort sammanställda rekommendationer över klimatet som ska ta hänsyn till alla parametrar. Det mesta som finns behandlar bara en eller ett par aspekter, t.ex. hur man undviker mögel eller mekaniska skador. Man kan också se att de rekommendationer som försöker täcka in alla parametrar ofta bygger mer på erfarenheter och tradition än på forskning. Detta behöver inte vara dåligt eftersom man från erfarenheter ofta får bra kunskaper, men risken kan vara att man inte får med alla kriterier eftersom man inte har alla fakta. Dessutom bygger många lärdomar från erfarenheterna på misstag och felaktiga beslut, vilket innebär att för att kunna veta vad som fungerar och inte fungerar genom erfarenheter måste man först begå misstag som eventuellt skadar kyrkor och inventarier. Genom forskning och undersökningar kan detta undvikas.

Klasserna i ASHRAE, förutom de med väldigt lågt ställda krav, är oerhört svårt att uppnå i en kyrka. Speciellt om man tillämpar intermittent uppvärmning. Slutsatsen man kan dra av detta är att det inte går att styra inneklimatet på samma sätt i en kyrka som i museer och arkiv på grund av att man oftast saknar mekanisk ventilation och andra klimatsystem, och därmed är det inte heller rimligt att ställa samma krav. Skulle det vara så att man i en kyrka har något föremål som kräver striktare kontrollerat klimat så måste man eventuellt flytta det föremålet till ett museum eller arkiv, eller installera ett klimatskåp i kyrkan.

6.2 Slutsatser från mätningarna

Den vertikala temperaturgradienten i kyrkorummet var ganska liten. Temperaturen var i princip densamma i vistelsezonen som i taket. Det som skilde sig åt var de låga temperaturerna på golvet och vid ytterväggen, vilket är ganska förståeligt med tanke på byggnadens egenskaper. Ur komfortsynpunkt vill man enligt litteraturen att temperaturgradienten ska vara liten mellan golv och huvudhöjd. Men ur energi- och bevarandesynpunkt vill man inte att man får hög temperatur högt upp i rummet, utan att värmen ska vara där den behövs, dvs. vid bänkarna. Litteraturen säger också att elektriska strålvärmare, som de som sitter i Starby, ska kunna värma lokalt i de zoner som besökarna vistas i. Detta undersökte jag med värmekamera.



Figur 57 Bild med värmekamera i Starby efter gudstjänst Figur 58 Bild med värmekamera i Starby efter gudstjänst

Bilderna visar att man har lyckats hyfsat bra med att värma lokalt. Temperaturen vid bänkarna är högre än omgivningen. Dock ser man även att en del värme har samlats högt upp i byggnaden. Detta innebär att en del energi har använts till att värma där det inte behövs och således kan det effektiviseras. Men givetvis är det svårt att uppnå på grund av den grundläggande fysiken att varm luft stiger.

Man kan också se att den relativa fuktigheten borde vara högre än vad den är i de flesta mätpunkter ur bevarandesynpunkt och detta kan leda till uttorkningsskador enligt litteraturen. Exempelvis i vistelsezonen ligger den mellan 20 – 40 % under hela mätperioden. Bara för att undersöka så räknade jag ut vad den relativa fuktigheten skulle vara om inomhustemperaturen istället sänktes till 4 °C, och fick då ca 51 % (vid samma förutsättningar som när jag räknade ut ånghalterna, dvs. vid endast skyddsvärme). Enligt litteraturen är det en betydligt bättre nivå på att ligga på. Daggpunkten ligger då på ca - 4,8 °C, vilket inte är särskilt sannolikt att man skulle få någonstans inomhus, och därmed är risken för kondens inte särskilt stor även om man skulle sänka inomhustemperaturen. Därmed borde temperaturen kunna sänkas inne i kyrkan utan att utan att RF blir för hög och problem uppstår.

Vid golvet är den relativa fuktigheten däremot väldigt hög och väldigt varierande, från ca 30 – ca 85 %, med ett medelvärde på drygt 74 %. Detta ger risk för saltutfällning och vittringsskador. Den höga relativa fuktigheten ger även risk för biologiska skador, framförallt när det blir lite varmare utomhus. Vid bänkarna är det trägolvet och där blir då väldigt stor risk för mögel och röta med så hög relativ fuktighet. Speciellt undersidan av trägolvet riskerar att få fuktskador. För att klargöra risken för biologiska skador i träet behöver man göra ytterligare mätningar på fukten i träet.

Temperaturen i orgeln är relativt stabil och klimatet där är skonsammare än på de flesta andra ställen i kyrkan. Temperaturen är oftast något lägre och topparna är jämnare, vilket antagligen beror på att loggern är lite "undängömd" och att där inte finns någon radiator i närheten. Men precis som i de flesta andra mätpunkter så är den relativa fuktigheten för låg och medelvärdet ligger på drygt 31 %.

Förändringshastigheterna på temperatur och relativ fuktighet vid uppvärmningen är ganska låga och borde därmed inte ge upphov till skador. Förändringen av temperatur ligger inom det rekommenderade intervallet, och förändringen av RF ligger under det maximalt tillåtna enligt litteraturstudien.

Den relativa fuktigheten vid golvet möjliggör saltutfällning eftersom den varierar över jämviktsfuktigheten för ett par salter, däribland vanligt natriumklorid. Detta fenomen har också observerats okulärt.

Från mätningarna över alla årstider ser man att den relativa fuktigheten har varit alldeles för hög under sommarhalvåret. Exempelvis låg RF i stort sett över 65 % från mitten av maj till slutet av september 2010. Förmodligen kommer de installerade avfuktarna att kunna sänka fuktigheten något i framtiden, men mätningarna från maj 2013 visar att de inte har tillräcklig kapacitet för att hålla RF på rimlig nivå. Därför bör nytt och större system installeras.

Angående förändringshastighet på temperatur och relativ fuktighet är det svårt att dra några slutsatser från församlingens mätningar eftersom de utförts med intervall på 4 timmar och därmed är det omöjligt att säga när värmen slagits på och stängts av.

6.3 Riskbedömning

Risken för mögelpåväxt vid golvet anses hög eftersom den relativa fuktigheten med stor sannolikhet är hög där under stora delar av året. Enda mätningarna som har gjorts på golvet är de som jag gjorde i mars, och de visade att fuktigheten där är väldigt hög trots att den är låg i övriga byggnaden. Man kan misstänka att det ser likadant ut över hela året, dvs. att den relativa fuktigheten vid golvet är högre än i övriga byggnaden. Ser man på andra mätningar så bör RF vid golvet vara ännu högre vid andra årstider, vilket har observerats på vår och sommar då golvet varit blött. Detta kan förklaras med varm och fuktig luft kondenserar på det kallare stengolvet. I övriga byggnaden är RF väldigt låg på vintern, vilket visas i mina mätningar, och således är risken för sprickor och flagnande färg betydande.

Det nuvarande systemet är gammalt och elrevisionen har visat att det borde bytas ut. Riskerna med det gamla systemet kan vara brandrisk eller att det slutar fungera, vilket kan leda till hög relativ fuktighet.

6.4 Möjliga åtgärder

Från litteraturstudien, mätningarna, analysen och slutsatserna har lämpliga åtgärdsförslag tagits fram och presenteras i korthet här nedan. Eftersom det i litteraturstudien har visat sig att det inte finns ett givet svar på hur uppvärmningen bör styras, samt att min egen undersökning är begränsad, så går det inte att definitivt säga att åtgärderna nedan är de mest optimala och kommer att lösa alla problem. Men ex-jobbet ska förhoppningsvis kunna fungera som ett underlag för församlingen vid åtgärder.

- Grunden bör undersökas vidare och möjliga orsaker bör och åtgärder bör utredas. Det kan som nämnts både bero på fukttransport från marken alternativt kondensering på golvet. Möjligen måste kapillär fukttransport från marken hindras. Om kondens är en stor del av orsaken bör snarare inneklimatet inne beaktas och möjligen bör ånghalten sänkas alternativt golvtemperaturen höjas.
- Som tidigare elrevision visat bör hela elsystemet med ledningar och radiatorer bytas ut.
- Min rekommendation är att installera en eller två luft-luftvärmepumpar med en sammanlagd effekt på minst ca 7,5 kW för skyddsvärme, exempelvis Toshiba Polar 2 RAS 13, som dessutom klarar av låg inomhustemperatur. Litteraturstudien har visat att luftvärmepumpar verkar fungera bra för just skyddsvärmen. Om församlingen även i fortsättningen vill ha

komfortvärme på vintern kan antingen värmefolie i bänkarna eller strålvärmare under bänkarna på sammanlagt 34 kW vara ett bra alternativ, se även kommande diskussion. Skyddsvärmen kan styras efter nivå på relativ fuktighet med en hygrostat. Komfortvärmen kan styras efter temperatur med en termostat. Den bör även kunna delas in i zoner så att man endast värmer där besökarna sitter. Vid lågt utnyttjande kan man nöja sig med att värma vissa bänkrader. Om inte hänsyn måste tas till komfort för besökarna hade det ultimata varit att inte installera något system för komfortvärmen.

- Ett alternativ till att installera nya värmare för komfortvärmen kan vara att behålla de gamla så länge det går. Det blir såklart billigare just nu, men kostnaderna skjuts bara fram några år då elrevisionen visat att de bör bytas ut snart.
- Ny avfuktare bör installeras eftersom mätningarna visat att de nuvarande inte har tillräcklig kapacitet. Erfarenheterna från avfuktaren i Ausås kyrka verkar positiva och ett liknande system i Starby kan därför vara lämpligt.
- Efter utförda åtgärder bör uppföljning göras genom klimatmätningar i olika punkter i kyrkan samt analys av energiförbrukningen för att se effekterna av åtgärderna.

6.4.1 Möjlig uppvärmningsstrategi

För att optimera både inomhusklimatet och energiåtgången väljer jag att ta fram olika varianter för olika typfall. Kan man hålla nere temperaturen utan att försämra komforten kan energibesparingar göras. Eftersom aktiviteten i kyrkan påverkar hur man upplever klimatet kan olika klimat vara optimalt för olika tillfällen. Förändrar man exempelvis vilken temperatur man vill uppnå måste man även förändra strategin för uppvärmningen, så att t.ex. även förändringshastigheten blir optimal.

Som jag kom fram till i analysen är det rimligt med två strategier, en för "vanliga gudstjänster" och en för "övriga förrättningar".

Eftersom det är på vinter när det är kallt utomhusklimat som man kan spara energi på uppvärmning gäller strategierna nedan för vinterfallet. Mer resonemang kring strategierna nedan finns under "Analys".

6.4.1.1 "Vanlig gudstjänst"

Grundtemperatur: Styr temperaturen efter relativ fuktighet. Temperaturen kommer då att variera beroende på förutsättningarna, framförallt beroende på utomhusklimatet. Från mätningarna kan man se att grundtemperaturen oftast kommer att ligga mellan 5 – 10 °C vintertid om man styr efter ca 55 % RF. Vid väldigt kallt och torrt utomhusklimat kommer inomhustemperaturen behöva vara lägre för att hålla 55 % RF. Men litteraturen har visat att lite säsongvariationer inte ska vara något problem och därför kan en lägsta gräns på ca 4 – 5 °C vara rimligt för att säkerställa driften av värmepumparna. Man bör dock beakta risken för högre fuktnivå då ytemperaturerna sänks.

Optimal operativ temperatur: Vid kalla vinterdagar är en operativ temperatur på ca 15 °C lämpligt om besökarna har lite tjockare kläder på sig, för att spara energi.

Temperaturdifferens: Temperaturdifferensen beror såklart på grundtemperaturen, och således på utomhusklimatet. När det är som torrast ute blir differensen ca 10 – 11 °C, och annars lite mindre.

Uppvärmningstid: En begränsad temperaturförändring på 2K/h ger en uppvärmningstid på ca 5 timmar vid grundtemperatur på 5 °C. Tiden är enkel att räkna ut, endast temperaturdifferensen/2.

En begränsning av förändringshastighet på RF är lite mer komplicerad. Men enligt analysen är en uppvärmningstid, med hänsyn till förändring i RF, på ca 6 timmar rimlig vintertid.

6.4.1.2 "Övriga förrättningar"

Grundtemperatur: Samma som för "vanlig gudstjänst".

Optimal operativ temperatur: Ca 19 °C.

Temperaturdifferens: Precis som jag skrev tidigare så beror differensen på förutsättningarna. Differensen blir lite större i detta fall jämfört med "vanlig gudstjänst". När det är som torrast blir den ca 14 – 15 °C.

Uppvärmningstid: En begränsad temperaturförändring på 2K/h ger en uppvärmningstid på ca 7 timmar vid grundtemperatur på 5 °C.

Enligt analysen är en uppvärmningstid, med hänsyn till förändring i RF, på ca 7 timmar rimlig vintertid.

6.4.2 Styrning

Systemet för komfortvärme kan möjligen zonindelas så att endast vissa delar av kyrkan värms vid förrättningar. Uppvärmningstiden vid den intermittenta uppvärmningen kan vara 6 – 7 timmar beroende på förutsättningarna. Skyddsvärmen kan styras efter relativ fuktighet med ett genomsnittligt värde på ca 55 %. Variationer i relativ fuktighet kan accepteras säsongvis, men bör hållas inom intervallet 40 – 65 %. Dygnsvariationer på maximalt 10%/dygn och maximalt 5%/h. Nivåerna på temperatur ur bevarandesynpunkt bör ligga mellan 0 – 20 °C. Används luftvärmepump bör inomhustemperaturen inte understiga 5 °C, och 8 – 10 °C vid kallt och fuktigt klimat. Komfortvärmen kan ligga mellan 15 – 19 °C vintertid beroende på förutsättningarna.

6.5 Risker efter åtgärder

Som skrivits tidigare så är det inte forskningsmässigt klarlagt hur uppvärmning av kyrkor bör ske och därför går det inte klart att säga att alla risker försvinner om åtgärderna utförs. Större avfuktare och ordentlig grundläggning kan ta bort riskerna förknippade med hög relativ fuktighet. Förändringen i uppvärmningsstrategin ska förhoppningsvis minimera riskerna med mekaniska skador. Skador i Starby har uppkommit medan intermittent uppvärmning har använts vilket visar att det kanske inte är den mest optimala strategin om man vill undvika skador.

En annan risk är att värmepumparna inte kan avfrostas om innetemperaturen blir för låg. Men risken för frost är som sagt inte så stor när det är torrt i luften, och det är då som man måste sänka innetemperaturen för att hålla stabil RF. Ett sätt att lösa problemen med frost är att höja inomhustemperaturen vid riskfyllda klimat till ca 8 – 10 °C tillfälligt. Men det finns luftvärmepumpar som enligt tillverkare ska klara inomhustemperaturer ner till 5 °C.

7 Diskussion

Att det finns så många olika rekommendationer och att många är motstridiga gör att det är fritt fram för tolkningar och att man får dra sina egna slutsatser. Detta kan i sin tur leda till att skadliga inneklimat skapas i kyrkorna, beroende på tolkning. Det pågår forskning kring inneklimat och energi i kyrkor, bland annat ett stort forskningsprojekt i Sverige kallat Spara & Bevara.

Schellen och van Schijndel säger att det sämsta man kan göra är att värma med full effekt medan Mandahl menar att man bör värma med full effekt. Detta är rakt motstridigt mot varandra, vilket är väldigt intressant. Det innebär att beroende på vem som har rätt och vem man väljer att lyssnar på så kan resultaten bli destruktiva för inventarierna i byggnaden. En sak som man kan fundera på och som ingen av dem anger är vad de menar med full effekt. Beroende på vad full effekt för värmesystemet är så blir förändringshastigheterna olika, hög effekt ger snabb förändring och låg effekt ger långsam förändring. I vissa fall, då systemet inte har särskilt hög effekt, kan man säkert uppfylla Schellen och van Schijndels rekommendationer på förändringshastighet även om man värmer med full effekt. Därför hade både de och Mandahl behövt ange vad de menar med full effekt för att kunna förstå helt vad de menar. Schellen och van Schijndels undersökningar har gjorts i en kyrka som har ett värmesystem som kan leverera maximalt 115 kW. Men var går gränsen för när man får använda full effekt och inte? Det är också olika från fall till fall beroende på kyrkans egenskaper. En stor kyrka behöver ju större effekt än en liten. Det de menar är kanske att i just deras fall var det det sämsta alternativet att värma med full effekt. Man kan då konstatera att man kan strunta lite i om man ska värma med full effekt eller inte, utan att det är förändringshastigheterna som spelar roll.

Broström et al. samt Mandahl säger att uppvärmningstiden vid intermitterent uppvärmning bör vara drygt 6 timmar. Även detta kan vara motstridigt mot Schellen och van Schijndels rekommendationer, beroende på förutsättningarna. Är differensen mellan start- och slutvärdet stort så blir förändringshastigheten större jämfört med om man bara ska värma lite då uppvärmningstiden är densamma. Följer man istället Schellen och van Schijndels rekommendationer blir det istället uppvärmningstiden som varierar medan förändringshastigheterna är konstant. Vad den optimala uppvärmningstiden ska vara är svårt att säga eftersom det inte finns särskilt mycket forskning kring detta. Schellen och van Schijndel har som sagt föreslagit några begränsningar som kan minska mekaniska påfrestningar, men om de är de mest optimala eller ej går inte att säga. I min undersökning hamnade förändringshastigheten inom de båda rekommendationerna vilket visar att de inte alltid är motstridiga.

Att beräkna effektbehovet är ganska svårt för en kyrka. Vanliga beräkningar som används för vanliga byggnader går inte alltid att applicera i en kyrka, speciellt i gamla kyrkor som värms intermitterent. Värmeförlusterna genom transmission och ventilation är svåra att beräkna korrekt, dels för att man sällan har fullständig materialförteckning av konstruktionen och dels är det svårt att bestämma luftomsättningen i byggnaden. Byggnadens stora volym gör att vanlig spårgasmetod oftast inte är möjlig. Dessutom varierar luftläckagen beroende på temperaturen inne i kyrkan, vilken också varierar vid intermitterent uppvärmning.

Ett annat exempel kan vara att i litteraturen man skriver att man endast behöver mäta RF i en punkt i kyrkan, i andra punkter kan man räkna ut med hjälp av temperatur och ånghalt (ånghalten antas då konstant i hela kyrkan). Detta har motbevisats i mina mätningar, där ånghalten inte alls var konstant i hela byggnaden, och rekommendationer gällande det bör därför kollas över.

En annan rekommendation från litteraturen som man kan fundera över är att man rekommenderar att RF ska vara så jämn som möjligt, och att hålla låg temperatur mellan förrättningar och värma intermittens. Alltså, hålla jämn RF och varierande temperatur. Att variera temperaturen och samtidigt hålla jämn nivå på RF låter väldigt motsägande. Då krävs det en rejäl fuktbufferande förmåga i byggnad och inredning som är anpassad till brukarvanorna, dvs i praktiken omöjligt

Haugen rekommenderar att man inte ska värma intermittent eftersom det kan ge större påfrestningar i murverken än vid kontinuerlig uppvärmning. Därmed går hon emot andra rekommendationer som säger att man ska värma intermittent. Det som skiljer Haugens undersökningar och rekommendationer från andras är att hon endast tittat på hur murverken påverkas medan andra tittat på hur övriga byggnaden och inventarier påverkas. Man kan ju då fundera på vad man bör prioritera och utifrån det avgöra om man vill värma intermittent eller inte. Jag tror att i de flesta fall så anser man att murverken inte är lika värdefulla som inventarier och därför väljer man att inte ta så stor hänsyn till dem vid utformning av uppvärmning. I en del fall finns dock värdefulla väggmålningar på murverken.

Min rekommendation på att hålla RF under 60 % är lägre än BBR:s krav på 75 %. Detta på grund av att textilierna är känsliga och litteraturen har visat att de kan mögla redan vid 60 %. Om man flyttar alla textilier till en annan byggnad eller skyddat förvaringsskåp kan det tillåtna intervallet höjas. Men precis som jag skrev tidigare så är mina rekommendationer i figur 53 – 54 generella och kan i verkligheten skilja sig från fall till fall beroende på förutsättningarna.

I ASHRAE beskrivs olika klasser på inomhusklimat för bevarande i framförallt museer, arkiv och gallerier. Kraven som ställs i de mest "lämpliga" klasserna går inte att uppnå med intermittent uppvärmning. Temperaturskillnaden mellan grundvärmen och komfortvärmen är större än vad klasserna tillåter. För att kunna använda någon av klasserna från ASHRAE vid intermittent uppvärmning måste man gå ner ända till klass C, vilket jag inte tror skulle vara ett lämpligt klimat för bevarande i kyrkor eftersom risker för skador skulle vara överhängande. Därmed kan man konstatera att det är svårt att applicera krav som ställs på museer osv. i svenska kyrkor eftersom man inte har alls samma förutsättningar att styra klimatet. Hög fuktighet kan begränsas med avfuktare, men vill man ha det varmt inomhus under vintern går det inte att undvika låg relativ fuktighet utan fler och mer avancerade installationer. Specifika krav måste ställas på varje enskild byggnad.

Jag har föreslagit att man kan installera en luft-luftvärmepump för grundvärmen, trots att det finns vissa motsättningar mot luftvärme i kyrkor. Från litteraturen har jag dragit slutsatsen att det skulle fungera bra just för skyddsvärmen, men mindre bra för komfortvärme. Hur pass stora luftrörelser och skador som luftvärme ger upphov till är osäkert och forskning inom detta pågår. Det finns exempel på när det både har fungerat bra och när det har fungerat dåligt, vilket innebär att man måste vara försiktig och noga tänka igenom lösningar. Det finns även fall där radiatorer och konvektorer har gett upphov till skadliga luftrörelser och således kan man inte helt enkelt säga att luftvärme är sämre ur det perspektivet bara för att deras själva funktion bygger på luftrörelser. Tills bättre lösningar finns tillgängligt kan luft-luftvärmepumpar vara ett bra alternativ eftersom uppvärmningskostnaden och energiförbrukningen kan minskas ganska drastiskt. En förutsättning för att räkna luftvärmepump som ett bra alternativ är, som jag skrev tidigare, att man är projekterar noga och utför installationerna på ett väl genomtänkt sätt. Bra filter är ett måste för att inte oönskade partiklar ska tillföras byggnaden och bidra till nersmutsning. Forskning om hur luftvärme

påverkar inventarier och byggnad under lång tid pågå, men vad som visats hittills fungerar det bra för skyddsvärme. Men det går att göra fel och en kyrka och dess inventarier är ofta känsligare än en ny byggnad, och därför måste man vara försiktigare i en kyrka än i en ny villa om man vill installera en luftvärmepump. Fördelen med luftvärmepumpar är att de är relativt reversibla och kan enkelt plockas bort om man inte längre vill ha dem. Problemen med frost kan göra så att inomhustemperaturen måste hållas lite högre än om man t.ex. använt direktverkande elradiatorer, men värmepumparnas effektivitet innebär att man ändå skulle spara energi.

Undersökningarna som bland annat Erhardt och Mecklenburg visar riskerna för skador baserat på förändringar i relativ fuktighet. Det som man inte riktigt förstår är tidsaspekten i deras siffror, alltså om förändringarna får ske t.ex. under en timme eller ett år. $\pm 10\%$ RF under ett år är inte särskilt mycket, men på en timme är det en stor förändring. Schellen m.fl. rekommenderar att förändringen i RF får vara maximalt 5%/h men ingen begränsning över längre perioder. Kaeferhaus har däremot rekommenderat både maximal förändring per timme och per dygn.

Förhoppningsvis kan min litteraturstudie och efterföljande sammanställning samt analys användas även i andra fall för att uppnå bra inomhusklimat i kyrkor. Givetvis måste en individuell undersökning och dimensionering göras av varje kyrka, men jag hoppas att lärdomar ska kunna dras från detta fall och att arbetet kan användas som underlag vid framtagning av möjliga åtgärder.

Det faktum att varm luft samlas upp i byggnaden trots att man använder strålvärmare kan betyda att man har varmt under för lång tid och att man då går miste om en del av värmen. Optimalt hade varit om man kunde använda strålvärma endast för att värma människorna och ytorna vid bänkarna utan att luften värmdes så mycket. Men detta kan nog endast åstadkommas genom att sätta igång värmarna precis innan besökarna kommer in. I dagens läge med den nuvarande uppvärmningsstrategin är det inte möjligt eftersom önskad temperatur då inte kan uppnås.

Temperaturen i vistelsezonen i dagsläget under förrättningar är ganska hög och hade kunnat sänkas utan att människor känt diskomfort. Det hade varit ett enkelt sätt att spara energi och samtidigt sannolikt skonsammare för inventarier.

Enligt beräkningarna på relativ fuktighet så skulle innetemperaturen kunna sänkas mellan förrättningarna utan att problem uppstår ur bevarandesynpunkt. Däremot kan andra problem uppstå. Om temperaturen mellan förrättningar sänks kommer differensen till komfortvärmen att bli större och därmed måste man värma "fler steg" för att komma upp i önskad temperatur. Detta kan ge en förlängd uppvärmningsperiod eller snabbare förändringar, och beräkningar på förändringshastigheten behöver därför göras för att se till så att inte förändringarna ger upphov till skador. Kan man även sänka temperaturen under förrättningarna kanske kurvan bara förskjuts neråt och differensen mellan start- och slutvärde är detsamma som tidigare. Men troligtvis kan inte temperaturen vid förrättningar sänkas lika mycket på grund av komfort och således kommer differensen att bli större om skyddsvärmen sänks.

Det går att se en liten ökning av RF vid förrättningarna på grund av personbelastningen. Den är dock endast ca 2 procentenheter, vilket är relativt sett litet. Detta kan bero på att det inte var särskilt många personer närvarande samt att de inte vistades särskilt länge i lokalen. Dessutom är det möjligt att deras kläder kan buffra en del av fukten som sedan följer med ut när besökarna lämnar efter förrättningen. Stora delar av tiden har man alltså inget fuktillskott från människor eller

verksamheten. Det enda fuktillskottet kommer då från marken och eventuellt lite från lagrad fukt i väggarna. Kan man åtgärda fuktproblemen med grunden och således ta bort fuktillskottet från marken kan temperaturen sänkas ytterligare och mer energi sparas. Dock måste man se till så att inte yttemperaturerna, t.ex. vid golvet, blir för låga så att kondens uppstår.

Beräkningarna på dimensionerande effektbehov är något osäkra eftersom där är många okända parametrar som jag har behövt uppskatta. Exempelvis luftläckaget, som har stor inverkan på värmeförlusterna. Värdet är taget från tidigare undersökningar, men hur det ser ut i just Starby är svårt att säga. Läckaget blir större ju högre inomhustemperatur man har, och därför blir också läckageförlusterna störst vid förrättningarna. Därför borde man kunna använda lägre värde vid dimensionering för grundvärmen jämfört med för den intermittenta uppvärmningen. Egentligen är nog byggnaden och klimatskalet ganska tätt, förutom fönster, dörrar och andra öppningar. Kan man tätta dem kan man minska en stor del av läckageförlusterna. Även transmissionsförlusterna genom fönstren är osäkert. U-värdet som använts är ett schablonvärde för englasfönster, och även här är det omöjligt att säga om det stämmer i verkligheten. Fönsternischerna i gamla stenkyrkor är oftast djupare än normalt vilket innebär att R_{si} förmodligen blir större än i vanliga fall. Effekten för att värma de värmelagrande ytorna är också osäkra eftersom temperaturhöjningen endast är uppskattad. För att få ett korrekt värde hade man behövt ha en mätare inne i väggen som mätte hur mycket temperaturen höjs. Jämför man mitt beräknade effektbehov för den intermittenta uppvärmningen med det nuvarande systemet så ser man att det beräknade är ganska mycket större, trots att det nuvarande verkar fungera bra även kalla dagar. Detta innebär att antingen något antagande eller något i formeln inte riktigt stämmer. En sak skulle kunna vara att formeln inte riktigt är anpassad för strålvärmare, och att uppvärmning av ytorna då får för stor vikt.

8 Litteratur

Abel, E. & Elmroth, A. (2008) *Byggnaden som system*. Forskningsrådet Formas

Broström, T. (2008) *Handbok i hållbar energianvändning för kyrkan*. Verbum Förlag, Stockholm

Broström, T. (1996) *Uppvärmning i kyrkor. Fukt- och värmetekniska beräkningar för dimensionering och klimatstyrning*. Kungliga Tekniska Högskolan.

Broström, T. (2010) *Luft-luftvärmepumpar för skyddsvärme i kyrkor*. Centrum för energieffektivisering i kulturhistoriskt värdefulla byggnader, Högskolan på Gotland.

Broström, T. & Holmberg, J. (2009) Översättning av kapitel 21 i *2007 ASHRAE HANDBOOK Heating, Ventilation and Air-Conditioning APPLICATIONS*. Centrum för energieffektivisering i kulturhistoriskt värdefulla byggnader, Högskolan på Gotland.

Broström, T., Wessberg, M., Samuelsson, A. (2012) *Södra Kedum kyrka - Klimatmätningar vid snabb uppvärmning med varmluft*. Centrum för energieffektivisering i kulturhistoriskt värdefulla byggnader, Högskolan på Gotland.

Buck, R. (1978) *A note on the effect of age on the hygroscopic behavior of wood*. IIC Congress, Oxford.

Burström, P. G. (2007) *Byggnadsmaterial - uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur AB, Lund

Camuffo, D. (2010) *The friendly heating project and the conservation of the cultural heritage preserved in churches*. DEVELOPMENTS IN CLIMATE CONTROL OF HISTORIC BUILDINGS - Proceedings from the international conference "CLIMATIZATION OF HISTORIC BUILDINGS, STATE OF THE ART" Linderhof Palace, 2010, s. 7-12.

Christoffersen, L.D. (1995) *ZEPHYR Passive Climate Controlled Repositories - Storage facilities for museum, archive and library purposes*. Rapport TVBH-3028, Department of Building Physics, Lund University, Sweden.

Erhardt, D. & Mecklenburg, M.F. (1994) *Relative humidity re-examined*. Preventive Conservation. Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress s. 32-38. IIC, London.

Erhardt, D., Mecklenburg, M.F., Tumosa, C.S. (1996) *New versus old wood: Differences and similarities in physical, mechanical, and chemical properties*. ICOM Conservation Committee 11th Triennial Meeting, Edinburgh s. 903-910. James and James Science, London.

Erlebacher, J.D., Brown, E., Tumosa, C.S., Mecklenburg, M.F. (1992) *The effects of temperature and relative humidity on the rapidly loaded mechanical properties of artists' acrylic paints*. Materials Issues in Art and Archaeology III, Paper 267, s. 359-370.

European committee for standardization (2012) *UNI EN 15759-1 Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship*. English version.

Grzywacz, C.M. & Tennent, N.H. (1994) *Pollution monitoring in storage and display cabinets: Carbonyl pollutant levels in relation to artifact deterioration*. Preventive Conservation. Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress s.164-170. IIC, London.

Johansson, P. (2012) *Critical Moisture Conditions for Mould Growth on Building Materials* TVBH-3051 Lic, Lund

Kaferhaus, J. (2010) *Historic buildings and museums - Sustainability and energy saving in museums, depots, churches and historic buildings*. DEVELOPMENTS IN CLIMATE CONTROL OF HISTORIC BUILDINGS - Proceedings from the international conference "CLIMATIZATION OF HISTORIC BUILDINGS, STATE OF THE ART" Linderhof Palace, 2010, s. 29-37.

Kerschner, R.L. (2008) *Proving Safe and Practical Environments for Cultural Property in Historic Buildings... and Beyond*. The Kilgarlin Center for Preservation of the Cultural Record, School of Information, The University of Texas at Austin

Klenz Larsen, P. (2002) *Moisture measurements in Tirsted Church*. Journal of Architectural Conservation, no.1, vol 10, 2004, s. 22-35.

Klenz Larsen, P. (1999) *Salt damage to the medieval plaster on a vault in Fanefjord Church*. Proceedings of the International RILEM Workshop: Historic Mortars: Characteristics and Tests, s. 43-50. Paisley University, Scotland.

Klenz Larsen, P. (2002) *The use of passive climate control to prevent salt decay in Rørby Church*. The study of salt deterioration mechanisms. Decay of brick walls influenced by interior climate changes, s. 102-107. European Heritage Laboratories.

Künzel, H. & Holz, D. (1991) *Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten un beheizten Gebäuden alter Bauart*. Fraunhofer Institut für Bauphysik.

LaFontaine, R.H. (1979) *Environmental norms for Canadian museums, art galleries and archives*, CCI Technical Bulletin 5, Canadian Conservation Institute, Ottawa.

Lagerstedt, E. (1971) *Effektbehovet vid kyrkouppvärmning*. Byggnadsstyrelsen.

Leijendeckers, P.H.H. (1995) *Leerboek klimaatregeling*. Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde.

Madsen, L. & Nørgaard, J. (1986) *Kirkevarmeanlæg. Varmeforbrug og indeklima ved diskontinuert opvarmning af store rum*. Danmarks Tekniske Højskole.

Mandahl, A. (2009) *Stiftstyrelsens krav på underlagsmaterial inför ansökan av kyrkoantikvarisk ersättning och kyrkobyggnadsbidrag för utbyte av värmeinstallation - intermittent värme*. Svenska kyrkan, Lunds stift

Mecklenburg, M.F., Tumosa, C.S. (1991) *Mechanical behaviour of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity*, Art and Transit s. 173-216, National Gallery of Art, Washington D.C.

- Mecklenburg, M.F., Tumosa, C.S., Erhardt, D. (1998) *Structural response of wood panel paintings to changes in ambient relative humidity*, Painted Wood: History and Conservation s. 464-483, Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Mecklenburg, M.F., Tumosa, C.S., Erhardt, D. (2005) *The changing mechanical properties of aging oil paints*, Art and Archeology, Materials Research Society 852.
- Michalski, S. (1991) *Paintings, their response to temperature, relative humidity, shock and vibration*, Work of Art and Transit s. 223-248, National Gallery of Art, Washington D.C.
- Michalski, S. (1993) *Relative humidity in museum, galleries and archives: Specification and control*, Bugs, Mold and Rot III: Moisture Specification and Control in Buildings s. 51-61, National Institute of Building Science, Washington D.C.
- Neuhauser, H.P. & Schata, M. (1994) *Gesundheitsvorsorge in Archiven*. Der Archivar, Jahrgang 47, s. 119-128.
- Nevander, L.E. & Elmarsson, B. (2006) *Fukthandbok, Praktik och teori*. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Ny Teknik (2011) *Så ska slöseriet i kyrkan stoppas*. Publicerad 1 augusti 2011.
- Oreszczyn, T., M. Cassar, K. Fernandez (1994) *Comparative studies of air-conditioned and non-air-conditioned museums*. Preventive Conservation. Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress s.144-148. IIC, London.
- Padfield, T., Bøllingtoft, P., Eshøj, B., Christensen, M. (1993) *The wall paintings of Grunsømagle Church, Denmark*. Preventive conservation, theory, practice and research: Preprints for the IIC Congress in Ottawa s. 90-98.
- Pfeil, A. (1975) *Kirchenheizung und Denkmalschutz*. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.
- Riksantikvarieämbetet (2004) *Att vårda en kyrka*. Verbum förlag, Stockholm.
- Riksantikvarieämbetet (1991) *Uppvärmning av gamla kyrkor, seminarium*. Enheten för byggnadsvård, Stockholm.
- Sawdy, A. & Heritage, A. (2007) *Evaluating the influence of mixture composition on the kinetics of salt damage in wall paintings using time lapse video imaging with direct data annotation*. Environmental Geology, vol 53, s. 303-315.
- Schellen, H.L. (1998) *Onderzoek naar Klimaatbeheersing in Monumentale Gebouwen*. TNO-rapport 98-CBO-R1307 SNH/BNI
- Schellen, H.L. (2002) *Heating Monumental Churches: Indoor Climate and Preservation of Cultural Heritage*. Technische Universiteit Eindhoven
- Schellen, H.L & van Schijndel, A.W.M. (2011) *Setpoint control for air heating in a church to minimize moisture related mechanical stress in wooden interior parts*. Department of Building and

Architecture, Building Physics and Systems, Technische Universiteit Eindhoven. Building Simulation, Vol. 4, No.1, s. 79-86

Snow, D., Crichton, M.H.G, Wright, N.C. (1944) *Mould deterioration of feedingstuffs in relation to humidity of storage. Part I: The growth of moulds at low humidities*. The annals of applied biology, No.2, 31:102-110. Cambridge University Press, London.

van Schijndel, A.W.M., Schellen, H.L., de Wit, M.H. (2008) *Improved HVAC operation to preserve a church organ*. Department of Building and Architecture, Building Physics and Systems, Technische Universiteit Eindhoven. Building and Environment 44 (2009) s. 156-168