NR U 5274 | JUNI 2015 | **RAPPORT**

Styrstrategier för inneklimat i kyrkor

Slutrapport för projektet MINK - Mikrobiologisk inventering i kyrkor

För Trossamfundet Svenska Kyrkan

Jacob Lindblom & Peter Sandö

IVL Svenska Miljöinstitutet

Författare: Jacob Lindblom & Peter Sandö
På uppdrag av: Trossamfundet Svenska Kyrkan
Rapportnummer: U 5274

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2015
IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60,100 31 Stockholm
Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90
www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Innehållsförteckning

Sammanfattning 3
1 Bakgrund 5
2 Syfte och mål 5
3 Metod 6
4 Förslag på strategier 7
4.1 Styrning av klimatet 7
4.2 Praktisk implementering 8
5 Teori och praktik om inneklimat i kyrkor 10
5.1 Termisk komfort 10
5.2 Uppvärmnings- och fuktstyrningsstrategier 11
5.3 Mikrobiologiska förutsättningar 13
5.4 Befintliga mögelmodeller 14
5.5 Relevanta standarder och riktlinjer 18
5.6 Uppvärmningstekniker 22
5.7 Avfuktningstekniker 26
5.8 Energianvändning 28
6 Inventering och uppföljning av kyrkor med CultureBee-system 30
6.1 Sammanfattande intryck av intervjuer och platsbesök 31
6.2 Analys av mätdata 31
6.3 Tunabergs kyrka 33
6.4 Bokenäs nya kyrka 38
6.5 Fide kyrka 44
6.6 Silleruds kyrka 49
6.7 Svanshals kyrka 52
7 Uppföljning av kyrkor med styrsystem från JEFF 56
8 Resultat 59
9 Litteraturförteckning 61

Sammanfattning

Projektet har utvärderat hur system för mätdata på temperatur och fukt i kyrkor används, hur de kan visa på risk för mikrobiologisk påväxt samt hur sådana system kan användas för att styra inneklimat och energianvändning. Projektet baseras på intervjuer och platsbesök i fem kyrkor som används regelbundet med olika intervall, litteraturstudier och analyser av mätdata för temperatur och relativ fuktighet från totalt tio kyrkor. De fem besökta kyrkorna har alla ett system med mätsensorer från systemet CultureBee installerat. Vissa av kyrkorna använder bara systemet för att logga data för temperatur och fuktnivå. Andra kyrkor använder dessa data även för att styra installationerna. Projektresultatet visar att används dessa loggade data aktivt till ett styrsystem så går det att båda tjäna energi för uppvärmning, samt att samtidigt säkerställa ett bra inneklimat för såväl kyrkobesökaren, som byggnaden och de föremål som finns där. Projektresultatet är därför av stor vikt för alla kyrkor och visar på stor förbättringspotential för många kyrkor.

De flesta av de tillfrågade har varit positiva till CultureBee-systemet, men tyvärr används det för klimatstyrning i väldigt liten omfattning idag. Många har använt det för uppföljning av inneklimatet, men endast två kyrkor har kopplat det till värmesystemet eller avfuktare. I den ena kyrkan, Tunabergs kyrka, har detta lett till en märkbar energibesparing jämfört med tidigare manuella styrning. Intervjuerna med representanter för de olika kyrkorna tyder på att det saknas information på plats om hur system som CultureBee kan användas. Det gäller dels att man kan styra värme och avfuktning med systemet och dels hur man i så fall använder det.

Underlaget av kyrkor med styrsystem för klimatkontroll utökades med fem kyrkor som använder CC Kyrka från företaget JEFF Electronics. Analysen av mätdata från alla kyrkor med båda systemen visar att det är fullt möjligt att hålla den relativa fuktigheten under kritiska nivåer inne i kyrkorummen. I några fall har för hög relativ fuktighet förbättrats genom aktiva åtgärder i kyrkorummet.

Fukttillstånden i krypgrunder och på vindar är däremot ofta mer kritiska. Sensorer för fukt och temperatur finns ofta i dessa utrymmen, men det saknas tekniska installationer och byggnadstekniska åtgärder som kan hjälpa till att förbättra fukttillståndet. Detta är en olycklig kombination och utgör därför en viktig möjlighet för potentiella förbättringar.

En litteraturstudie har gjorts av andra relevanta projekt och standarder inom klimatstyrning i kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Mätdata för temperatur och relativ fuktighet har utvärderats mot en gränsvärdeskurva utifrån dagens kunskap enligt litteraturgenomgången. Den kurva som har definierats i projektet, är baserad på minimikraven för sporgrodd och tillväxt av mycel på byggnadsmaterial. Gränsvärdeskurvan fungerar bra för att definiera en säker gräns för biologisk tillväxt och är därför lämplig att använda i ett styrsystem. I de fall utvärderingar görs och mätdata visar på värden som ligger över denna är även varaktigheten intressant, det vill säga hur länge befinner man sig över denna kurva. En fördjupad analys ger ytterligare information om riskerna för att påväxt skall uppstå (se exempelvis enligt tidigare utförd studie [1]).

Med detta som bakgrund ges i rapporten förslag till styrstrategier och praktisk implementering av styrutrustning och installationer. Bland annat rekommenderas att använda avfuktare i större utsträckning, eftersom det ofta är mer energieffektivt. Avfuktaren bör styras av en eller flera externa sensorer för bättre kontroll och driftsäkerhet.

1 Bakgrund

Projektet har utförts av IVL Svenska Miljöinstitutet på uppdrag av Trossamfundet Svenska Kyrkan. Projektdeltagare från IVL har varit Jacob Lindblom och Peter Sandö.

Styrgruppen har bestått av beställaren Marie Hård vid Kyrkokansliet, John Rothlind vid Västerås kyrkliga samfällighet och Johannes Wikström vid Karlstad stift.

Referensgrupp har utgjorts av Svenska kyrkans stiftsantikvarier och stiftsingenjörer.

2 Syfte och mål

Projektet handlar i huvudsak om styrstrategier för inneklimat och olika viktiga aspekter som är kopplade till dessa, ex skaderisker, energieffektiviseringsåtgärder samt driftssäkerhet.

I projektdirektivet som skrevs vid projektets uppstart beslutades att: Fokus läggs på ett antal kyrkor som ingått i CultureBee[1]/MIOC[2] som har kvar CultureBees sensorer och som har installerat styr- och reglersystem för sitt inneklimat. Då det inte finns någon tillförlitlig metod att åldersbestämma mikrobiell påväxt/skada fokuserar projektet på kyrkor som är mögelfria eller är sanerade, vilket gör att det inte går att bedöma huruvida påväxten härrör från innan eller efter installerande av sensorer och styrsystem. Ytterligare mikrobiella mätningar utöver de som gjort är därför onödiga. De kyrkor som slutligen kommer att ingå i projektet väljs ut i ett inledande skede i samråd med Svenska kyrkan.

Projektet skall:

- Fokusera på olika typer av kyrkor (med avseende på klimatskal, konstruktion, nyttjandegrad etc).
- Utvärdera effekten på inneklimatet, och dess koppling till fuktrelaterade skador, efter införandet av CultureBees sensorer och övrig utrustning.
- Ge förslag på en förbättrad styrstrategi i en teoretisk del (ex sammanställning av befintliga svenska och europeiska standarder, beräkningar av varaktighet enligt teorier framtagna i MIOC) och en praktisk del (ge råd om sensorplacering, placering av avfuktare etc).

[1] CultureBee är ett system för att mäta och övervaka kulturhistoriska byggnader. Se www.culturebee.se.
[2] MIOC är en tidigare IVL-studie om mögel och påväxt i relation till inneklimat och byggnadsegenskaper [1].

Vid projektets slut sammanfattas resultaten i denna uppdragsrapport som vänder sig till:

- kyrkorna som ingår i studien
- Svenska Kyrkan centralt
- systerprojektet SEG, där erfarenheterna från detta projekt kan berika deras arbete.

3 Metod

Metodiken för uppdraget bygger på intervjuer, litteraturstudier och analyser av mätdata.

Vaktmästare eller liknade representanter i tolv kyrkor har intervjuats. I fem av dessa kyrkor gjordes ett platsbesök och en enklare besiktning av fuktrelaterad status utfördes. Dessa kyrkor är ett urval av de 24 kyrkor som ingick i MIOC-studien [1]. Urvalskriterier för besök var att välja olika typer av kyrkor samtidigt som det dessutom fanns CultureBee-utrustning i drift i någon omfattning i kyrkan. Intervjuerna och besöken har gjorts för att förbättra insikten i rutiner och hur fuktfrågor hanteras i kyrkor. Vid besöken visade och berättade vaktmästarna om CultureBee-utrustningen och dess användning. Intervjuer och besök har dessutom tjänat som inspiration till ett annat projekt som IVL Svenska Miljöinstitutet genomför parallellt på uppdrag av Svenska kyrkan[3]

Analyser av mätdata från de fem kyrkorna har utförts för att utvärdera om förändringar av temperatur- och fuktförhållanden har skett sedan CultureBee-systemet installerades. Då antalet kyrkor som fortfarande använder CultureBee aktivt för mätning och styrning var lågt har mätdata från ytterligare fem kyrkor analyserats. Kyrkorna har installerat CC Kyrka, som är ett styrsystem från JEFF Electronics.

En litteraturstudie, där relevant litteratur sökts bland vetenskapliga tidskrifter och andra relevanta källor, har genomförts löpande under projekttiden. Resultatet av litteraturstudien integreras och redovisas i hela resultatkapitlet och redovisas inte separat.

[3] Strategi för egenkontroll – SEG, en praktisk handbok som hanterar fuktproblematik i kyrkor

4 Förslag på strategier

Förslagen baseras på resultaten av de intervjuer, platsbesök, litteraturstudier och analys av mätdata som har gjorts i projektet.

4.1 Styrning av klimatet

En bra strategi för styrning av inneklimatet i en kyrka är en lyckad kombination ett stabilt fukttillstånd utan alltför stora variationer, en låg energianvändning och en god termisk komfort. Termisk komfort behövs för att de som brukar kyrkan ska trivas när de vistas där. För att spara energi begränsas ofta den termiska komforten till de tillfällen kyrkan används, däremellan tillåts innetemperaturen sjunka. När innetemperaturen varierar påverkar det fukttillståndet genom att den relativa fuktigheten ökar eller minskar. Allt hänger alltså samman på ett inte helt oproblematiskt sätt.

Ett förslag på styrstrategi, som baseras på lärdomar från detta projekt, kan sammanfattas i följande punkter:

- Bestäm målvärden för högsta och lägsta tillåtna relativa fuktighet baserat på mätningar av kyrkans historiska inneklimat.
- Bestäm målvärde för innetemperatur vid förrättning och övrig tid baserat på kyrkans nyttjandegrad och krav på termisk komfort.
- Avgör varifrån det huvudsakliga fukttillskottet kommer. Är det exempelvis från uteluften och besökare eller från kapillärsugning och inträngning från grund, golv och väggar? Anpassa åtgärder och strategi efter detta.
- Avfuktning av kyrkorummet är ofta det mest energieffektiva alternativet. Använd avfuktare under sommarhalvåret istället för skyddsvärme[4].
- Avfuktning eller adaptiv ventilation är ofta lämpliga val för krypgrunder.
- Pålitlig avfuktning (och skyddsvärme) behöver robust styrning. Använd styrsystem med fuktsensorer istället för avfuktarens inbyggda hygrostat.
- Ett styrsystem med loggande sensorer för temperatur och relativ fuktighet är mycket användbart för att kontrollera och följa upp inneklimatet.

Styrstrategin bör grunda sig på kyrkans historiska inneklimat, vilket kräver minst ett års mätning av relativ fuktighet (RF) och temperatur. Målvärden för RF och temperatur bestäms sedan med avseende på bevarande av byggnad och inventarier, risk för mikrobiologisk påväxt och termisk komfort. Vidare läsning och hjälp för att bestämma dessa målvärden finns i avsnitt 5. Som övre gräns för RF kan gränsvärdeskurvan i avsnitt 6.2 användas, om inte andra lägre värden krävs av bevarandeskäl.

[4] Med skyddsvärme menas uppvärmning med avsikt att sänka den relativa fuktigheten.

Avfuktning är i de flesta fall den mest energieffektiva metoden att avhjälpa för hög RF i kyrkorummet. Avgörande vid val mellan avfuktning och skyddsvärme är förhållandet mellan byggnadens luftomsättning, volym, U-medelvärde och målvärde för den relativa fuktigheten i luften. Detta gäller under förutsättning att fukten i första hand tillförs genom uteluften. Om fukttillskottet kommer som till exempel vatteninträngning genom ytterväggen eller som kapillärsugning genom grundläggning och golv ökar sannolikt energianvändningen för att hålla nere den relativa fuktigheten. Se mer i avsnitt 5.8.

I krypgrunden är det också viktigt att minimera fukttillskottet från marken och från varm och fuktig uteluft. Marken i krypgrunden kan täckas med plast för att minska avdunstningen, men det kräver godkännande från bland annat arkeologisk expertis. När fukttillskottet är minimerat är avfuktning med avfuktare eller adaptiv ventilation lämpliga åtgärder. Uteluftventiler i grundmuren måste stängas eller anpassas till vald lösning.

Ett automatiserat styrsystem, som använder både fukt- och temperatursensorer, kan vara till stor hjälp för att hålla uppsatta klimatkrav. Det kan gälla både att nå den termiska komforten vid en förrättning och för att hålla kontroll på fuktnivån i både kyrkorum och mikroklimat. Den övervakande mätningen sker med automatik och larmfunktioner finns inbyggda i systemet i de fall inställda gränsvärden för temperatur och relativ fuktighet överskrids under en längre period.

Många styrsystem av den här typen går att kombinera med bokningssystem för kyrkans förrättningar, vilket underlättar i intermittent uppvärmda kyrkor. Med ett självlärande styrsystem innebär det att tiden för uppvärmning till komforttemperatur kan minimeras.

4.2 Praktisk implementering

Den inventering och uppföljning av kyrkor som har gjorts i det här projektet har visat att fördelarna är många med ett loggande och styrande system för inneklimatet. Det ökar förståelsen för byggnadens beteende och ger flera valmöjligheter till att kontrollera inneklimatet. För att få ett väl fungerande system finns det ett antal viktiga parametrar att tänka på vid implementering. Följande är ett förslag till punkter att ta hänsyn till gällande styrsystemet:

- Placera helst sensorer i varje avgränsat utrymme med möjlighet till eget rumsklimat, till exempel kyrkorummet, sakristia och orgelläktare.

- Lokalisera mikroklimat där RF kan bli högt och kondensation kan inträffa, exempelvis textilförvaring, bakom föremål placerade mot vägg och under bänk och predikstol. Placera sensor där för loggning och larm.

- Placera sensorer i ouppvärmda utrymmen som torn, vind och krypgrund. Även om sensorerna inte styr värme eller avfuktare kan de användas för loggning och larm.

- Tänk på att en styrande sensor placerad på en murad yttervägg ger andra värden än en sensor mitt i rummet:

- Temperaturen intill väggen kan släpa efter flera grader, vilket är negativt för temperaturhållning och komfort.

- Den relativa fuktigheten vid ytan kan vara mycket högre än i luften, vilket innebär att den är bra att styra fuktnivån efter.

För användning av tekniska installationer bör man tänka på följande:

- Avfuktare placeras ofta centralt i kyrkorummet för bästa effekt. En mobil avfuktare är bra för att inte störa och vara i vägen vid förrättningar.

- Avfuktare får inte placeras för nära känsliga föremål, till exempel träskulpturer och bemålade inventarier och inredning.

- Vid problem med fuktiga mikroklimat kan RF jämnas ut med små fläktar för omblandning av luften. Fläktarna kan vara tidsstyrda eller styras med sensorer för temperatur och luftfuktighet.

5 Teori och praktik om inneklimat i kyrkor

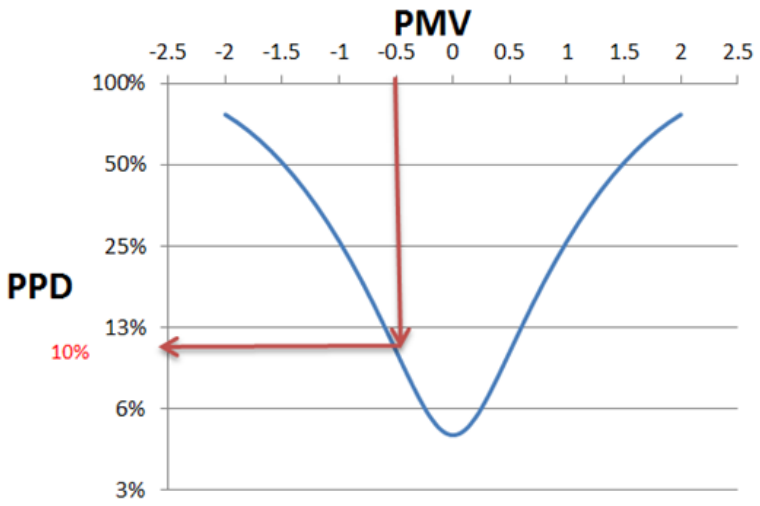
5.1 Termisk komfort

Ett stort antal av kyrkorna i Sverige har historiskt varit ouppvärmda. Svenska kyrkor värmdes normalt inte alls före 1850. Vi kan spekulera om hur den termiska komforten upplevdes av kyrkobesökare vintertid då. Säkert klädde man sig efter rådande förhållanden. Idag förväntar sig kyrkobesökare och de som vistas i kyrkan i arbetet en viss grad av termisk komfort.

Termisk komfort beror av olika parametrar: lufttemperatur, temperatur av omgivande ytor, personens fysiska aktivitet, klädsel, lufthastighet och relativ fuktighet, m.m. Därtill är den upplevda termiska komforten av individuell karaktär och det finns inget klimat då alla kan förvänta sig vara helt nöjda.

Termisk komfort kan beskrivas kvantitativt med hjälp av konceptet Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), vilket beskrivs i bland annat den internationella standarden ISO 7730 [2]. PPD är baserat på empiriska studier och relaterar till det så kallade Predicted Mean Vote (PMV). Om man låter ett stort antal människor beskriva sin upplevelse av termisk komfort med exempelvis +3 för varmt, -1 för något svalt, 0 för neutralt etc. så visar det sig att för varje kombination av parametrarna finns ett samband som visar ett medelvärde av dessa siffror (eller röster) – d.v.s. en förväntad medelröst (Predicted Mean Vote). Korrelationen mellan PMV och PPD framgår i Figur 1. De röda pilarna i figuren illustrerar en situation då den förväntade medelrösten är -0,5, då kan tydligen ca 10 % av personerna i miljön förväntas vara missnöjda. Kurvan i figuren visar också att det inte finns något klimat som alla kan förväntas vara nöjda med. HEALTHY HEATINGs web[5] ger en noggrannare beskrivning av PPD. Termisk komfort omfattar mer än PPD och ISO 7730 hanterar till exempel lokalt drag. Den europeiska standarden EN 15251 hanterar också termisk komfort. I kyrkomiljöer kan optimala förhållanden för termisk komfort stå i konflikt till krav med avseende på byggnaden och dess inventarier och standarder som ovan kan inte tillämpas okritiskt.

[5] http://www.healthyheating.com/solutions.htm



Figur 1 Korrelationen mellan PMV och PPD. De röda pilarna illustrerar en situation då den förväntade medelrösten är -0,5, då kan tydligen ca 10 % av personerna i miljön förväntas vara missnöjda. Kurvan visar också att det inte finns något klimat som alla kan förväntas vara nöjda med.

Intrycket från intervjuerna i denna studie antyder att låg termisk komfort sällan upplevs som något stort problem. En begränsad termisk komfort beskrivs som naturlig och förväntad, åtminstone i gamla kyrkor.

Den relativa fuktigheten påverkar i och för sig termisk komfort men den behöver inte bevakas av detta skäl.

Olika uppvärmningsstrategier har betydelse för den termiska komforten. I en kontinuerligt uppvärmd kyrka är tak och väggar relativt varma och problem med termisk komfort handlar i huvudsak om kallras vid fönster och kallstrålning från fönster. Framförallt besökare som sitter nära fönster kan uppleva visst obehag från kallstrålning från fönster, drag samt kalla golv.

Om intermittent uppvärmning tillämpas finns det risk att kallstrålning från omgivande ytor (som då är kallare) försämrar den termiska komforten. Detta hänger dock mycket på vilken typ av uppvärmningssystem som används. Intermittent uppvärmning sker ofta med lokalt placerade uppvärmningssystem som i huvudsak värmer vistelsezoner och människor i dessa zoner. Lokala uppvärmningssystem varierar kvalitetsmässigt stort avseende termisk komfort.

5.2 Uppvärmnings- och fuktstyrningsstrategier

Ingen eller passiv styrning

Generellt är den relativa fuktigheten (RF) högre men RF-amplituden lägre i byggnader utan klimatstyrning än i uppvärmda byggnader [3]. Passiv styrning minskar risk för saltavsättningar på väggar i de fall det är ett problem. Även väggnedsmutsning p.g.a. uppvärmningssystem uteblir. Risk kan finnas för frostskador om frostkänsliga objekt

eller byggdelar finns i byggnaden. Risk för farligt hög RF med avseende på mikroorganismer är stor men beror på flera olika parametrar. I kyrkor med tunga stommar är risken särskilt stor under vår och sommar. Själva byggnadskonstruktionen i kyrkor byggda före 1800-talet har relativt goda förutsättningar att klara sig utan styrning då de byggts för att stå ouppvärmda om inte moderna installationer talar emot detta.

Styrning för termisk komfort

Uppvärmningsbehov för att nå termisk komfort i svenska kyrkor föreligger under stora delar av året, men i olika utsträckning beroende på kyrkornas användningsmönster.

Kontinuerlig uppvärmning av en kyrka kan medföra mycket hög energianvändning med tillhörande ekonomiska kostnader och miljöpåverkan. Dessutom finns en risk att den relativa fuktigheten blir alltför låg med uttorkningsskador på inventarier som följd. Det finns olika strategier för att angripa dessa problem, se avsnitt 5.5 Relevanta standarder och riktlinjer. I flera kyrkor, framförallt i städerna, kan det finnas det skäl till kontinuerlig uppvärmning då verksamheten är så pass omfattande att det krävs.

Intermittent uppvärmning är mycket vanlig. Detta innebär att kyrkan är helt ouppvärmd eller har en låg grunduppvärmning då den inte används. Inför förrättningar värms kyrkan upp till en komfortabel temperatur (exempelvis 18°C). Oftast koncentreras uppvärmningen till de rum eller delar av rum där människor vistas. Fördelarna med metoden är att energianvändningen kan hållas relativt låg och att den tillfälliga påverkan som temperaturen har på den relativa fuktigheten är kortvarig och risken för uttorkningsskador på inventarier kan vara låg. En förutsättning för detta är att den installerade värmeeffekten är tillräckligt hög. Att gå från kontinuerlig uppvärmning till intermittent uppvärmning utan att öka värmeeffekten i till exempel bänkkvarteren, kan bli ineffektivt och inte ge önskat resultat. Nackdelar med intermittent uppvärmning är att yttemperaturerna för en tung byggnadsstomme och andra inventarier med stor termisk massa kommer att vara relativt kalla under uppvärmningsperioden vilket kan medföra kondens eller i alla fall farligt hög relativ fuktighet på ytorna avseende mikrobiologiskt angrepp.

Lokal uppvärmning innebär att kyrkan är helt ouppvärmd eller har en låg grunduppvärmning då den inte används. Inför förrättningar värms kyrkan till ca 10°C vid behov. Under själva förrättningen värms zoner där människor vistas ytterligare med hjälp av exempelvis strålningsvärmare. Fördelen är att energianvändningen han hållas låg samtidigt som kyrkorummet i stort inte utsätts för höga temperaturer med risk för skadligt låg relativ fuktighet. Nackdelen är att yttemperaturerna för en tung byggnadsstomme och andra inventarier med stor termisk massa kommer att vara ännu kallare än vid intermittent uppvärmning under uppvärmningsperioden med tillhörande högre risk för kondens eller hög relativ fuktighet på ytorna m.a.p. mikrobiologiskt angrepp.

Grunduppvärmning till en lägsta temperatur tillämpas ofta och av flera skäl. Exempelvis om det finns frostkänsliga inventarier, installationer eller byggdelar, om avfuktning saknas, etc. Tillämpad grundvärme ger ett invändigt varmare klimatskal, men även sannolikt en ökad fukttransport till rummet från klimatskalet. Effekten kan bli att risken för ytkondens på innersida av klimatskal minskar [4]. Detta betyder dock

inte automatiskt att risken för angrepp av mikroorganismer i anslutning till klimatskalet minskar, eftersom att mikroorganismer kräver högre RF vid lägre temperaturer för att trivas.

Styrning för bevarande

Skyddvärme (även kallat *conservation heating* eller *humidistatic heating)* kan ge en jämnare och lämpligare RF-nivå med hjälp av uppvärmning, som regleras med mål att hålla RF under en specifik nivå. Det innebär att termisk komfort inte alltid kan upprätthållas, eftersom temperaturen varierar i byggnaden med denna styrning. Uppvärmning kan behövas även sommartid av detta skäl. Metoden anses välbeprövad och robust [5]. Ett enkelt alternativ är att tillföra en konstant värmeeffekt för att alltid dämpa RF-nivån. Det bör beaktas att uppvärmingen sannolikt innebär en något ökad tillförsel av hygroskopisk fukt eller kapillärt stigande fukt från ytterväggen till rummet. Detta kan lokalt motverka dämpningen av RF, exempelvis i mikroklimat med betydande köldbryggor.

Fuktstyrning: Vintertid finns det ofta kalla ytor inom klimatskalet där eventuellt tillförd fukt kan kondensera eller orsaka skadligt hög RF. Att begränsa hög RF kan göras med hjälp av avfuktningsutrustning. Detta kan vara ett energieffektivt alternativ eller komplement till skyddsvärme beroende på kyrkans byggnadstekniska förutsättningar.

Det är inte självklart vilket av skyddsvärme eller avfuktning som är energieffektivast, i alla fall då el är den enda energibäraren som kommer i fråga. Det beror på klimatskalets U-värde, luftläckage, värmekälla, etc. Se vidare i avsnitt 5.8 Energianvändning. Värmetillförsel med hjälp av luft/luft värmepump kan vara effektivt, bland annat eftersom det kan röra sig om relativt låga innetemperaturer, vilket gynnar verkningsgraden för en värmepump.

Lika sorption fukt styrning (equal sorption humidity control): Denna metod innefattar det faktum att fuktinnehåll och därmed materialutvidgning i hygroskopiska material inte bara beror av RF utan även till viss del av temperaturen. Detta innebär att det finns utrymme för att tillåta något högre RF sommartid avseende säkerhet mot sprickbildning [5]. Metoden framstår som en spjutspetsmetod i mycket välkontrollerade inneklimat. Flera forskare pekar på att kopplingen mellan fuktinnehåll och RF ger en säker RF-variation på ca 7 % inom ramen för elastiska deformationer [5].

5.3 Mikrobiologiska förutsättningar

Mögelsvamp kan avge ohälsosamma produkter till inomhusmiljön såsom sporer, MVOC, nedbrutna mögelhyfer och mögelgifter. Brukare av byggnaden kan drabbas av allergier, astma, etc. Mögelsvamp kan dessutom bidra till nedbrytning av byggdelar, inredning och inventarier. Om mögelsvamp trivs så trivs kvalster och kanske även rötsvamp, vilket bryter ner bland annat trä mycket effektivt. Kort sagt vill man inte ha mögelväxt i byggnader. Omvänt är en innemiljö där mögelsvamp inte trivs en av de förutsättningar som krävs för att en byggnad, dess inventarier och dess brukare ska må bra.

Hundratals olika mögelarter kan förekomma i byggnader. Mögelsporer sprids effektivt med luften. Sporerna förekommer i varierande halter i utomhusluften men kan betraktas som att de alltid finns närvarande i miljöer såsom kyrkor oavsett om det finns sporkällor i byggnaden eller inte.

Om temperatur och fuktighet är gynnsamma under en period samt att det finns näring i anslutning till sporen så vaknar den till liv, mycelium växer till och börjar sitt nedbrytningsarbete. Det kan räcka med smuts på en yta som näring. Det finns fler förutsättningar för att möglet ska trivas, exempelvis ett visst pH-intervall, men dessa förutsättningar är normalt tillgodosedda i byggnader och behöver normalt inte beaktas. Hur snabbt en spor gror och hur snabbt mycel växer varierar med olika mögelarter. Olika mögelarter har olika optimala klimat - gemensamt för dem är att de trivs med hög luftfuktighet. Den optimala temperaturen är ofta 20-40°C, dock behövs bara några plusgrader för att möjliggöra tillväxt. Ett mögelangrepp som grott pausar sin tillväxt om tillväxtförhållanden senare saknas under en period, men vaknar ofta till liv igen om förhållandena för tillväxt åter infinner sig.

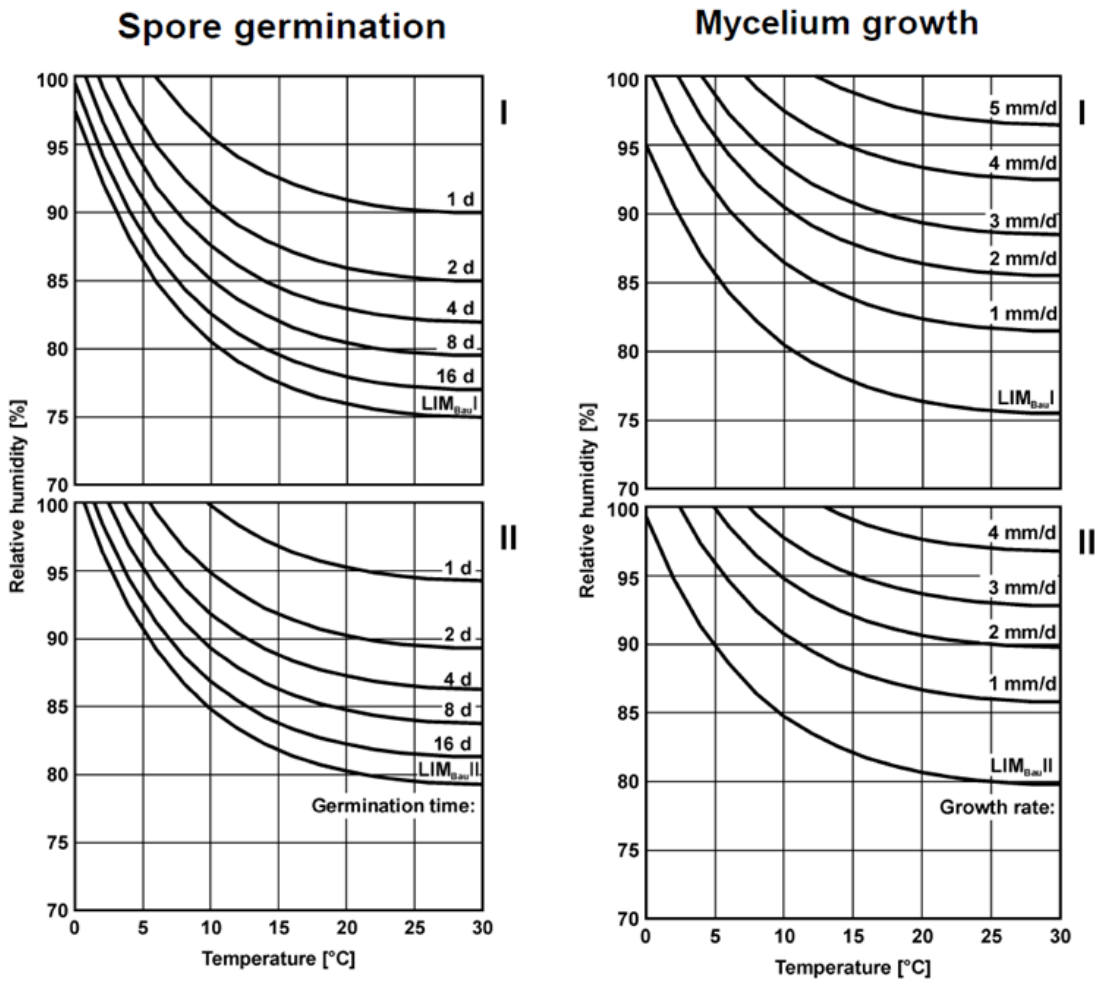
5.4 Befintliga mögelmodeller

Mögelangrepp i byggnader beror av fukt- och temperaturtillstånd, tillgång till näring och varaktigheten av dessa tillstånd. Flera forskningsaktörer har föreslagit kvantitativa modeller för att förutsäga under vilka förutsättningar mögel kan etableras och växa. Veerecken och Roels [6] ger en sammanställning av ett antal modeller. Vår bedömning av denna sammanställning är att Sedlbauers modell och Viitanens modell är värda att belysa ytterligare med hänsyn till klimatstyrning i kyrkor. Lars-Olof Nilsson, LTH, har sammanställt kunskapsläget för fuktsäker projektering för trä så sent som 2009, och även Nilssons modell belyses nedan.

Klaus Sedlbauers modeller

Två metoder att prediktera när det finns risk för att mögel gror och när det växer samt hur fort det går har skapats, bland annat, med hjälp av tillgänglig information om ett antal mögelarter: Isopletmodellen och en modell som benämns ”the biohygrothermal model” [7]

Isopletmodellen: Data om representativa tåliga mögelarter har tjänat som underlag för ett antal så kallade isopleter. Isopleterna utgör kurvor i ett koordinatsystem över relativ fuktighet och temperatur (se Figur 2). Isopleterna (eller kurvorna) motsvarar kombinationer av RF och temperatur med samma förutsättningar för mögel, exempelvis risk för grodd efter en dag (”Spore germination”, 1d) eller myceltillväxt som i de högra graferna. De övre graferna märkta ”I” motsvarar substratgrupp I som representerar exempelvis tapet, gipsskivor och byggprodukter av enkelt nedbrytbara råvaror. De nedre graferna märkta ”II” motsvarar substratgrupp II som representerar bland annat mineraliska byggprodukter och visst trä. Här bör noteras att material ur substratgrupp II som är kontaminerat (exempelvis med avsatt organisk substans som damm, pollen, etc.) kan anses höra till grupp I i alla fall.



Figur 2 Isopleterna motsvarar kombinationer av RF och temperatur med samma förutsättningar för mögel, exempelvis risk för grodd efter en dag (”Spore gerimination”, 1d) eller myceltillväxt som i de högra graferna. De övre graferna märkta ”I” motsvarar substratgrupp I som representerar exempelvis tapet, gipsskivor och byggprodukter av enkelt nedbrytbara råvaror. De nedre graferna märkta ”II” motsvarar substratgrupp II som representerar bland annat mineraliska byggprodukter och visst trä. Figur från Klaus Sedlbauers avhandling [7]

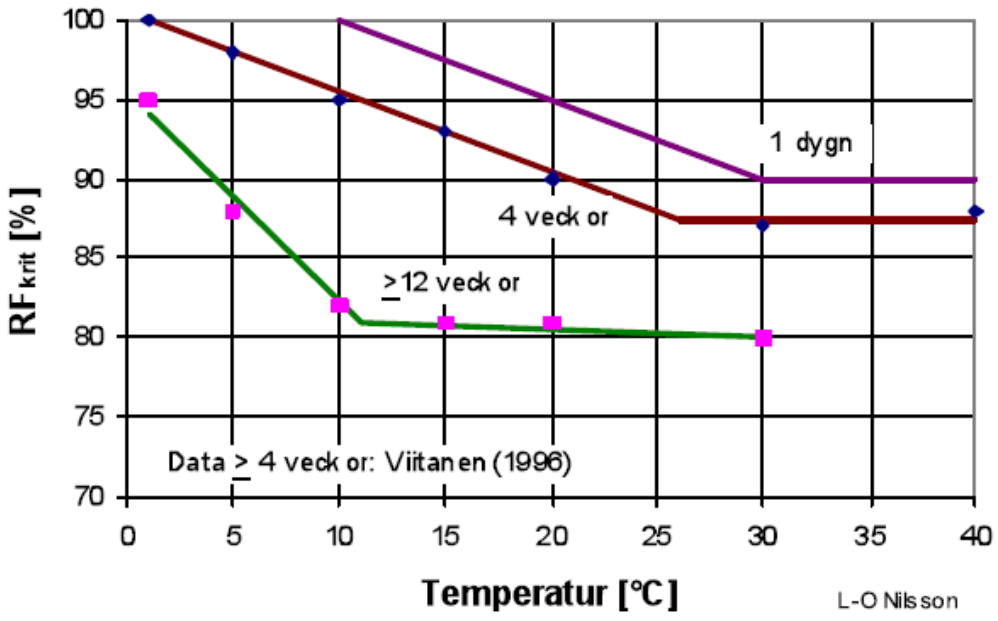
Den nedersta kurvan *Lowest Isopleth for Mould* (LIM) i var graf utgör gränsen för växt eller grodd överhuvudtaget. Dessa isopleter ska inte ses som en bästa skattning av mögelgrodd och -växt, utan representera grodd och växt i värsta fall. Klimat under LIM-linjerna kan såtillvida anses vara på säkra sidan för mögel.

Biohygrothermal modellen: Direkt användning av isopleterna ovan för bedömning av mögelväxt och grodd utgör, den något enklare, av Sedlbaurs metoder. Dock kan isopletmetoden överdriva risken för mögelgrodd eftersom den inte tar hänsyn till uttorkning av sporen mellan två fuktiga perioder. I isopletmetoden adderas alla tidssekvenser inom groddrisk vilket introducerad ett fel i resultatet. Sedelbauers "biohygrothermal modell" består av en beräkningsmodell som beräknar fukttillståndet för sporen med hänsyn till hur fukt- och temperaturförhållanden varierar i tiden.

Beräkningsmodellen är komplex och hanteras med specifikt avsedda datorprogram. Beräkningsmodellen visar under vilka förutsättningar mögelsporer kan gro.

Hannu Viitanen vid VTT har i sin avhandling från 1996 studerat faktorer för tillväxt av mögel och röta på trä [8]. Han har även medverkat till att ta fram en metod för att klassificera känsligheten hos olika byggnadsmaterial med ett mögelindex [9].

Lars-Olof Nilssons kunskapssammanställning från 2009 [10]**:** Här sammanställs kunskapsläget beträffande kopplingen fuktnivå och mögelförutsättningar på trä. Rapporten utmynnar i ”lämpliga kritiska fukttillstånd för trä tillsvidare…”, ett förslag som visar kombinationer av så kallad kritisk RF och temperatur för tre olika tidsspann, se Figur 3.



Figur 3, Nilssons ”lämpliga kritiska fukttillstånd för trä tillsvidare…” som visar kombinationer av så kallad kritisk RF och temperatur för tre olika tidsspann.

”Rekommendationen” är baserad på två olika studier som i sin tur baseras på mögelväxt på laboratorietorkat trä i ett fall och näringsmedium i det andra fallet. Gränsvärdena i grafen avser, utan säkerhetsmarginal, att visa när mögelgrodd kan förväntas ske.

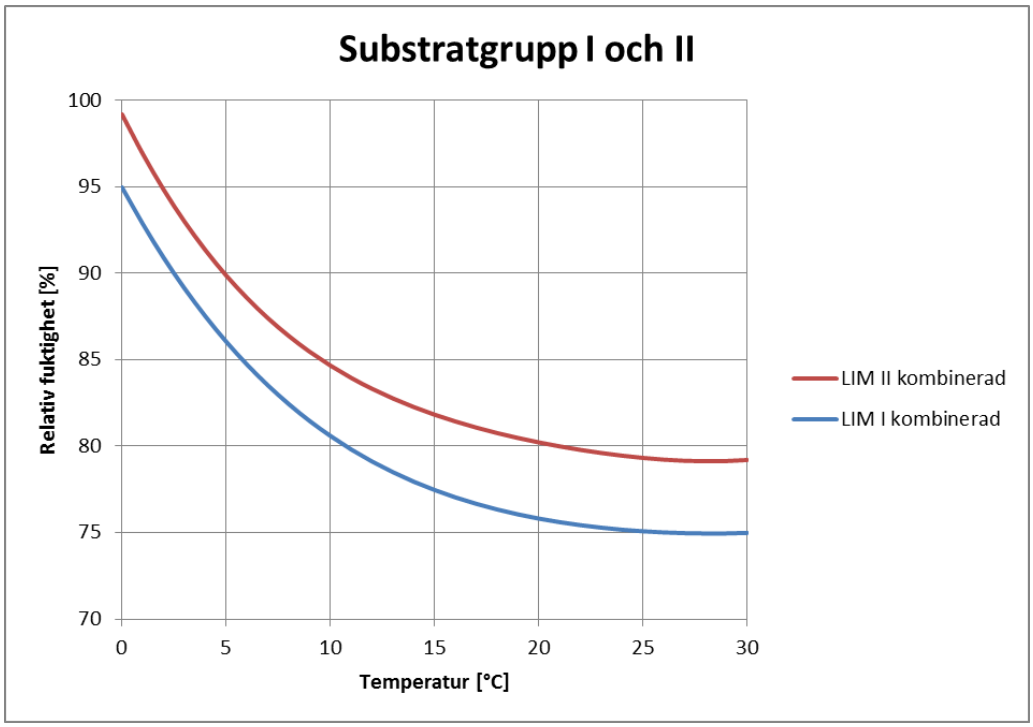
I MIOC-projektet användes de kritiska fukttillstånden i Figur 3 för att utvärdera fukttillstånden i de fem kyrkor i projektet där mikrobiell påväxt inte hittades. Fukttillstånden i kyrkorna låg i fem fall av fyra under de kritiska nivåerna och hypotesen var i MIOC-projektet att de kritiska fukttillstånden skulle kunna användas som styrparameter för att undvika mögelskador i kyrkor.

”Kyrkomögel” är ett begrepp som nämns i tidigare rapporter från IVL [11] [1]. Detta mögel inom familjen Aspergillus (eller Eurotium) verkar kunna växa vid så låg RF som 60-65 %. Det saknas dock undersökningar som bekräftar att detta. Möjligen handlar det om att de angripna mikroklimaten faktiskt utsätts för högre RF under korta tidssekvenser, kanske i samband med förrättningar, men att klimatet dessa korta sekvenser inte framgått i dessa sammanhang.

Befintliga modeller i ett kyrkoperspektiv: Det krävs ett resonemang i ett kyrkoperspektiv för att kunna inbegripa modellerna ovan i en kyrkomiljö. Det kan vara värt att notera att ett initierat mögelangrepp som bara syns i mikroskop och inte luktar inte behöver utgöra ett problem. Risken för ohälsa för brukare kan vara mindre i en kyrka än i till exempel en bostad, eftersom vistelsetiden i kyrkan sannolikt är liten i förhållande till vistelsetiden i bostaden. Å andra sidan innefattar bostäder sällande de särskilda förutsättningarna för mögel som kan råda i en kyrka, vilket kan ge upphov till stor påverkan på innemiljön från mikroorganismer.

Man bör räkna med att det historiskt sett sannolikt har funnits förutsättningar för mögelgrodd i kyrkomiljön och att det finns livskraftig mögelväxt som växer då förutsättningar uppstår, även om det kanske inte syns. I detta perspektiv är det inte intressant att veta hur lång tid det tar för mögel att gro vid olika fukttillstånd. Vilande mögel kan fortsätta växa så fort gynnsamt förhållande uppstår.

Sammantaget bör vi styra mikroklimaten mot att inte landa i förhållanden ovan varken tillväxt- eller grodd-LIM-linjerna - inte ens under korta perioder. En tänkbar generell rekommendation för styrstrategi är att använda en kombination av Sedlbauers LIM I för växt och för grodd (det mest krävande värdet för var temperatur) för mikroklimat med organiska material och motsvarande kombination av LIM II för mikroklimat med mineraliska material, förutsatt att de kan anses rena. På detta sätt undviks både risk för grodd och växt. För att vara på den säkra sidan kan den kombinerade kurvan för LIM I användas, se Figur 4.



Figur 4 Kurvor kombinerade av LIM för grodd och myceltillväxt avseende substratgrupp I och II. Baserat på [7].

Emellertid är mikrobiell påväxt bara en av flera aspekter att ta hänsyn till när inneklimatet i kyrkor ska styras. Hög RF kan även leda till nedbrytning av material som metall, glas, bemålade ytor och lim samt skapa mekaniska skador relaterade till saltutfällning.

5.5 Relevanta standarder och riktlinjer

Standardisering inom ramen för *Bevarande av kulturarv* pågår i Sverige och på europeisk nivå. Idag är 19 standarder utgivna och ytterligare tolv under utveckling[6]. Följande är en listning av relevanta standarder och riktlinjer som ansetts relevanta för detta arbete. Innehåll som berör detta arbete beskrivs här kort.

Bevarande av kulturarv - Specifikationer för styrning av inomhusklimat - Del 1: Riktlinjer för uppvärmning av kyrkor, kapell och andra platser av sakral betydelse. SS-EN 15759-1:2011 [3]

Standarden ger riktlinjer för val av uppvärmningsstrategier och uppvärmningssystem i kyrkor och liknade byggnader. Standarden innehåller råd, beskrivningar samt för- och nackdelar med olika val. Standarden kan i stora delar sägas beskriva ett arbetsflöde som i huvudsak innehåller moment nedan. Vikten av att konsultera specialister

[6] http://www.sis.se/hem-och-hushåll-underhållning-sport/konstföremål-och-hantverksprodukter/sis-tk-479

understryks. Vikten av energieffektivitet påpekas, men energieffektivitet behandlas inte specifikt. Avfuktning behandlas heller inte alls.

- **Kartläggning av byggnad, interiör och objekt**: Handlar om att skapa en bild av byggnaden, luftflöden, dess inventarier och hur byggnaden används. Ett par standarder för besiktning av kulturarvsobjekt lyfts.

- **Specifikationer/bestämning lämpligt inneklimat**

    - *Fastställ historiskt inneklimat*: Minst ett års mätning föreslås (se SS-EN 15757:2010 nedan)

    - *Bestäm lämpligt inneklimat för bevarande*: Framförallt målvärde, min- och maxvärde och variationer för relativ fuktighet och temperaturgränser adresseras avseende saltkristallisering, glaskänslighet, uttorkningsspänningar och risker för mikrobiologiskt angrepp.

    - *Bestäm lämpligt inneklimat för termisk komfort*: Adresseras i huvudsak kvalitativt.

    - *Kompromissa mellan bevarande och termisk komfort*

- **Val av uppvärmningsstrategier**

    - *Grundstrategier*: Tre grundstrategier beskrivs: Ingen uppvärmning, skyddsvärme (*conservation heating*) och uppvärmning för termisk komfort

    - *Distribution i rummet*: Uppvärmning av hela byggnaden eller lokalt

    - *Distribution i tiden*: Kontinuerlig eller intermittent uppvärmning

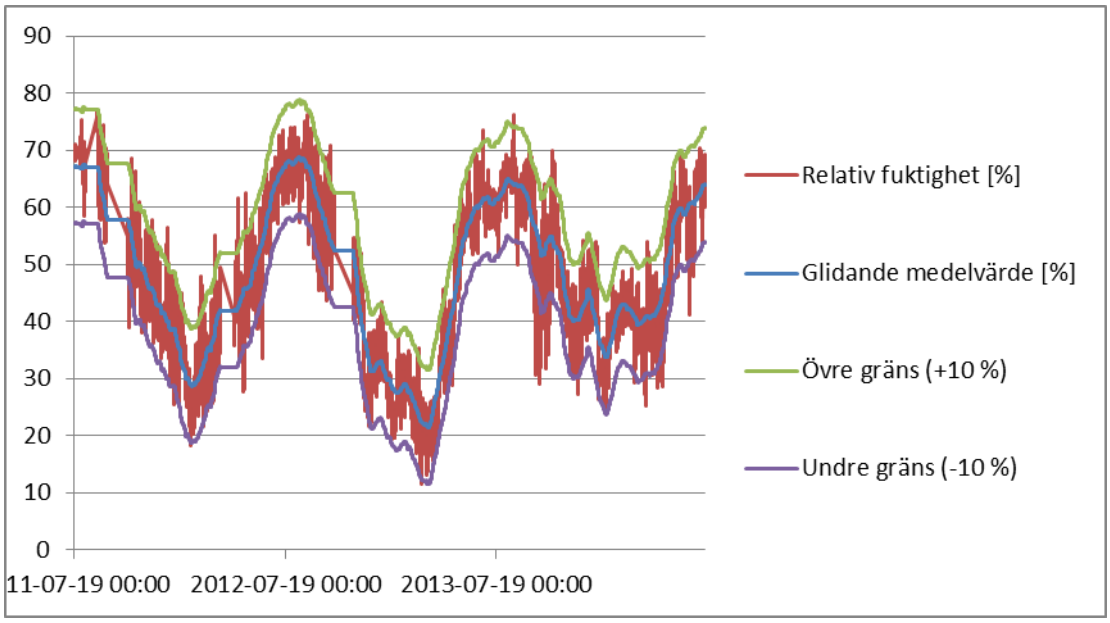
- **Val av värmesystem:** Olika typer av relevanta uppvärmningssystem behandlas avseende deras generella egenskaper, tillämpningar samt förmåga till termisk komfort och skyddsvärme.

- **Implementering och utvärdering**

Bevarande av kulturarv - Specifikationer för temperatur och relativ fuktighet i syfte att förhindra mekaniska skador på organiska, hygroskopiska material. SS-EN 15757:2010 [12]

Standarden beskriver ett tillvägagångssätt för mätning av inneklimat under en period (minst ett år) och hur dessa mätvärden kan ligga till grund för målvärden för relativ fuktighet. Strategin, som bara beaktar mekaniska skador på organiska, hygroskopiska material, utgår från att objekt som förvarats i ett specifikt klimat har acklimatiserats till detta även om det varierat. Figur 5 visar ett exempel på uppmätt RF och hur gränsvärden kan bestämmas. Resultat från en mätning och beräkning som beskrivs i

denna standard kan sedan användas som delunderlag av en specialist för bestämning av ett lämpligt inneklimat.



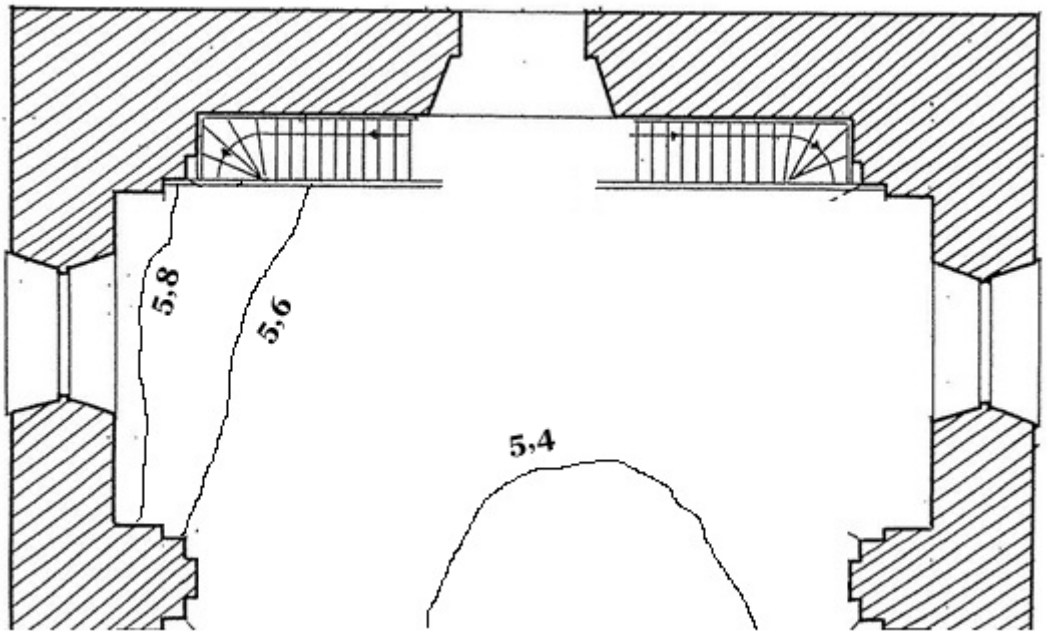
Figur 5 Målvärden för RF i ett specifikt set av mätvärden. Y-axeln avser RF och X-axeln avser månader. Glidande medelvärde är beräknat för 30 dygn. Värden inom ±10 % från det glidande medelvärdet anses som säkert avseende risk för mekaniska skador.

Bevarande av kulturarv - Metoder och instrument för att mäta relativ fuktighet i luft och fuktutbyte mellan luft och material, SS-EN 16242:2012

[13]

Denna standard visar på användningen av mätning och beräkning av luftens vatteninnehåll (g vattenånga/kg torr luft). Information om rums- och tidsvariationer i luftens vatteninnehåll kan ge viktig indata för beslut om styrning av inneklimatet. Exempelvis kan ett nät av mätpunkter i ett rum ge tydliga indikationer på om väggar avger fukt (se Figur 6). Det kan vara värdefull information huruvida en yttervägg absorberar regnvatten som sedan förångas på insidan eller om fukt i luften absorberas av väggen.

Standarden understryker vikten att mäta yttemperaturer noga för att kunna beräkna RF vid ytan.



Figur 7 Exempel på grafisk framställning av luftens vatteninnehåll i g/kg. Isolinjerna är baserade på mätpunkter i rummet och representerar punkter med samma vatteninnehåll.

Övriga riktlinjer: Bratasz [14] ger en översikt över befintliga riktlinjer för mikroklimatvariationer i museer och historiska byggnader avseende inventarier och samlingar. Risk för mekaniska skador på objekt baseras på analyser av objekts mekaniska respons på temperatur och fuktighetsvariationer, eller på analys av historiskt klimat som objektet kan anses vara acklimatiserad till. Riktlinjerna har mjukats upp med tiden på grund av energibesparingsskäl samt att de tidigare varit onödigt strikta och till och med i något fall baserats på vad som varit klimatsystemtekniskt omöjligt.

Några sammanfattande punkter från detta kapitel:

- Mikrobiologi omfattas knappt i dessa dokument
- Helst ska expert göra inventering av inventarier i byggnaden
- Mätning av luftens vatteninnehåll momentant kan ge värdefull information
- Acceptabel RF-variation med avseende på mekaniska skador kan baseras på det historiska klimatet i byggnaden. Kortidsvariationen bör hålla sig inom ±10% av det glidande medelvärdet för RF räknat på en 30-dagarsperiod.

5.6 Uppvärmningstekniker

Uppvärmning av ett rum eller en byggnad kan ske med flera tekniker, som baseras på val av energikälla och metod för överföring av värmen. Värme kan överföras från en plats till en annan genom tre olika flödessätt; ledning, konvektion och strålning. De vanligaste teknikerna för värmeöverföring från en rumsvärmare sker genom strålning eller konvektion, eller en blandning av dessa. Här beskrivs de i kyrkor vanligt förekommande teknikerna lite närmare.

Radiatorer är som namnet antyder i första hand en strålningsvärmare. Strålningsvärme har fördelen att de värmer mottagaren (personen eller föremålet) utan att först behöva värma den mellanliggande luften. Radiatorer håller en relativt låg yttemperatur, vilket innebär att den värmeavgivande ytan behöver vara ganska stor. Radiatorer används när värme ska riktas mot ett speciellt mål samtidigt som man vill undvika alltför stora luftrörelser, som en konvektionsvärmare ger. En viss del konvektiv värme kommer dock att avges ovanför radiatorn, vilket motverkar kallras när den är placerad under ett fönster. Luftrörelsen kan också orsaka problem med partikelavsättning på ytor i närheten. Man bör inte placera ömtåliga föremål i nära anslutning till en radiator, eftersom mikroklimat kan skapas med ogynnsamma temperatur- och fuktförhållanden. Radiatorer placeras oftast på väggar under fönster eller under bänkar (se vidare under Bänkvärmare). Radiatorer finns för system med vattenburen värme och direktverkande el. Vid nyinstallation kräver ett vattenburet system oftast ett större ingrepp i byggnaden än vad ett system med direktverkande el gör.

IR-värmare använder i hög grad strålning som överföringsteknik. En av de vanligaste IR-värmarna i Sverige har rörformade element som med elektricitet glödgas och avger ett röd- till vitaktigt sken. En annan vanlig variant är halogenlampor, som avger delvis synlig strålning. Detta kan upplevas som störande. IR-värmare använder höga temperaturer och måste monteras på ett tillräckligt långt avstånd från människor och föremål för att inte skapa obehag eller skada känsliga material och ytor. För att den termiska komforten ska vara acceptabel bör IR-värmen inte bidra till att en globtermometers uppmätta temperatur eller black strip-temperaturen enligt [15] överskrider 10°C. Fördelen med IR-värmare är att de snabbt kan höja temperaturen lokalt utan att påverka det allmänna inomhusklimatet i någon större utsträckning. IR-värmare lämpar sig väl för riktad, intermittent uppvärmning. Dock bör de användas i kombination med andra värmare, till exempel radiatorer eller bänkvärmare. Högt placerade IR-värmare kommer att värma en persons huvud mer än fötterna och detta upplevs ofta som ej komfortabelt.

Figur 8 IR-värmare under bänk i Silleruds kyrka

Konvektorer avger den största delen av värmen som konvektion. En konvektor har en stor värmeavgivande yta i förhållande till den värmeförande ytan. Ett kamflänsrör är den enklaste varianten av detta, där flänsar fästs på utsidan av ett rör med varmt flödande vatten eller elvärme, se Figur 9. Den omgivande luften värms vid kontakt med flänsarna och en luftrörelse skapas, så kallad egenkonvektion. Strömningen av den varma luften gör att värme fördelas i rummet och hjälper till att motverka kallras från väggar och fönster. Flänsarna är gjorda av tunn metall och har ofta skarpa kanter. Därför är det en god idé att skydda både personer och flänsarna från skador genom att bygga in röret (Figur 10). Inbyggnaden får dock inte hindra luftgenomströmningen, eftersom det minskar värmeavgivningen. Luftströmningen från en konvektor gör att svärtning av ytor ökar. Särskilt lågt placerade konvektorer, nära golvet eller i konvektorgravar i golvet, gör att damm och partiklar från golvet förs upp i luften.

Figur 9 Kamflänsrör på väggen i Svanshals kyrka. Notera svärtningen av väggen ovanför röret.

Figur 10 Konvektor vid altarringen i Fide kyrka

Bänkvärmare används för att ge termisk komfort för personer som sitter i kyrkbänkarna samtidigt som omgivande inneklimat ska påverkas så lite som möjligt. Vanligast är att fästa el- eller vattenvärmda raditorer under bänken, men IR-värmare

förekommer också. Det innebär en lokal uppvärmning som passar bra vid intermittent uppvärmning, särskilt i kyrkor med avskilda bänkkvarter. Dock måste man vara observant på att fukt från besökare i det varma bänkkvarteret kan kondensera mot kalla ytor i närheten.

Figur 11 Bänkvärmare av äldre modell i Tunabergs kyrka

Enbart bänkvärmare är sällan tillräckligt för att nå termisk komfort och för att säkerställa ett fuktsäkert inneklimat. Bänkvärmare med hög installerad effekt (t.ex. IR-värmare) kan skapa luftströmmar i rummet, vilket kan skapa obehag och ge problem med fukt som kondenserar på kallare ytor samt partikelavsättning och försmutsning. Luftrörelserna kan motverkas med konvektorer placerade vid väggarna.

Bänkvärmare med låg effekt måste ofta slås på en tid i förväg för att hinna värma ytorna lokalt runt bänkarna. Med ett lågeffektsystem får man mindre problem med luftrörelser, men det är också svårare att nå termisk komfort. Moderna bänkvärmesystem använder lågtempererad värme som fördelas från större ytor, till exempel golvvärme och värme i ryggstöd med hjälp av värmefolier. Besökaren ska omges av värma ytor, som i kombination med strålningsvärme ovanifrån kan ge god komfort vid så låga lufttemperaturer som 8-12°C [16].

Golvvärme kan utföras både med vattenburen värme och elvärme. Att nyinstallera vattenburen golvvärme i en äldre kyrka är emellertid mycket svårt med tanke på de ingrepp som måste göras i golvet. Bevarande av kulturhistoriska värden går vanligen före. Finns möjlighet att installera golvvärme bör lämplig isolering placeras under golvvärmeskiktet och golvkonstruktionen. Som jämförelse rekommenderas minst 300 mm isolering vid normal nybyggnation för en fuktsäker och energieffektiv konstruktion. Däremot är det möjligt att installera olika typer av elvärme, som inte behöver ligga under golvet. Värmefolier under vanliga mattor och elvärmda mattor är lösningar som kan användas lokalt i bänkkvarter eller vid altare för att öka komforten. Man måste tänka på att golvvärme som används där isoleringstjockleken under golvet är liten eller obefintlig också kräver en viss värmeeffekt under sommaren för att

undvika fukttransport från marken och upp genom golvet, vilket kan leda till fuktproblem [17].

Luftburen värme innebär att uppvärmning sker med varm luft. Detta kan ske i kombination med ett mekaniskt ventilationssystem där en fläkt blåser in uppvärmd luft i rummet via kanaler med ett eller flera tilluftsdon beroende på volymen som ska värmas upp. Luften värms då den passerar ett värmebatteri, som kan ha vattenburen värme eller elvärme. Från- och tilluftssystem (FT-system) tar kontinuerligt in och värmer uteluft, vilket gör att luftväxlingen säkras. Energianvändningen blir dock hög om man inte återvinner värme från frånluften i ett så kallat FTX-system. Luftvärmesystem kan vara skrymmande och inte så estetiskt tilltalande med tanke på de kanaler som behövs, särskilt med både tilluft- och frånluftskanaler. En fördel är att luften filtreras. Filtren måste underhållas och bytas med jämna mellanrum för funktionen ska vidhållas.

En annan variant av luftburen värme är en luft/luftvärmepump. Den här typen av värmepump lämpar sig bäst för mindre ytor, normalt upp till ca 120 m².

Om ett luftvärmesystem inte är väl planerat och injusterat kan det ge problem med luftrörelser som skapar obehag och svärtning av ytor. Det kan också skapa stora temperaturskillnader om donen inte är rätt placerade. Luftvolymen i kyrkorummet kan stratifieras och medföra höga temperaturer i rummets övre del där kyrkorgeln ofta är placerad. Risken för torkskador i orgeln är därmed stor.

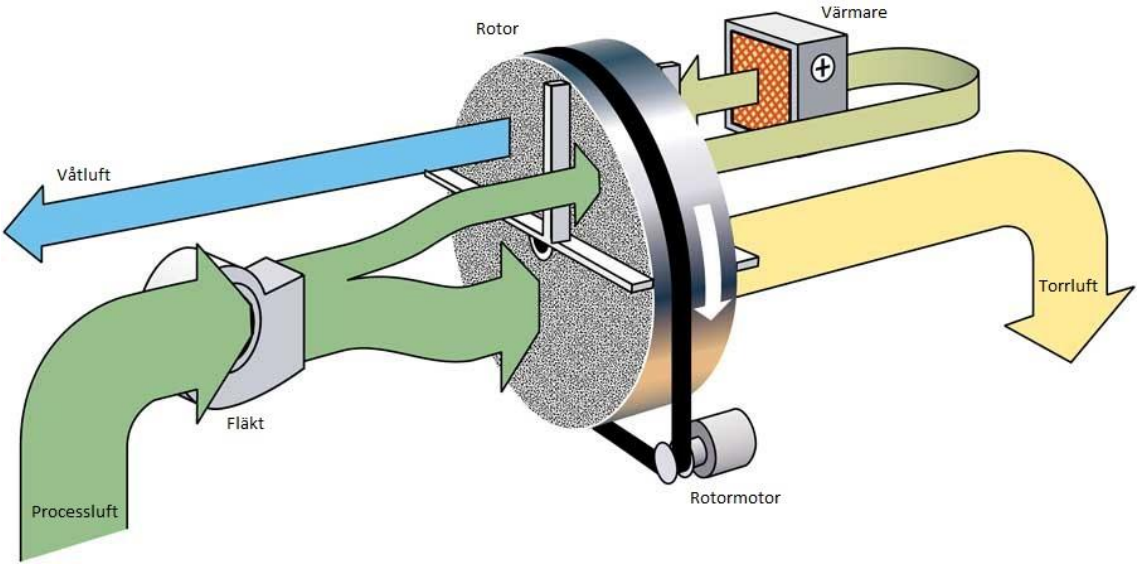
5.7 Avfuktningstekniker

I huvudsak kan avfuktning av luft indelas i två tekniker: kondensering och sorption. Därtill kan luftfuktigheten minskas helt enkelt genom att byta ut den mot torrare luft i de fall det finns tillgängligt. Detta kapitel syftar till att ge en bild av olika för- och nackdelar med dessa tekniker. Denna sammanställning har hämtat inspiration från ASHRAE HANDBOOK 2008, Heating, Ventilating, and Air-Conditioning SYSTEM AND EQUIPMENT, kapitel 22, 23 och 24 [18] och FMVs Avfuktningstekniska handbok [19].

Kondensering av vatten ur luft kan ske genom att luften kyls eller genom att trycket höjs. En vanlig tillämpning är att vatten kondenseras ur luften genom avkylning med hjälp av kompressorkylteknik. Tekniken lämpar sig väl vid normal rumstemperatur eller högre. Processen avger relativt mycket värme till rummet som avfuktas, vilket kan vara bra om det finn ett värmebehov. Vid låga temperaturer (under ca 15 °C) tappar tekniken kapacitet och vid ytterligare lägre temperatur uppstår frostproblem och tekniken fungerar i princip inte. Det måste finnas tillgång på avlopp för kondensvatten. Utrustningen har en tendens att bullra då den innehåller en kompressor. [20]

Sorption är samlingstermen för adsorption och absorption. Enkelt uttryckt innebär adsorption att fukt upptas på ytan på en ”adsorbent”, absorption innebär att fukt upptas i ett medium, en ”absorbent”, som kan vara fast eller flytande. En vanlig tillämpning för lufttorkning är att låta luften passera genom en rotor med kanaler som

är impregnerade med ett torrt hygroskopiskt material där vattenånga kan upptas för att i ett andra steg låta varm luft passera genom detta för att torka rotorsektionen inför nästa cykel (se Figur 12). Den varma luftströmmen måste naturligtvis bortföras från rummet.



Figur 12 Principerna för en rotor-sorptionsavfuktare. Rotorn innehåller kanaler med ett hygroskopiskt ämne. Bildkälla Seibu Giken DST AB.

Sorptionsprincipen kan även tillämpas statiskt, d.v.s. att ett torkmedel placeras i ett utrymme och fukten tranporteras dit genom diffusion - ”av sig självt”. Användning av denna princip i kyrkomiljöer kan anses vara tillämpbart endast i undantagsfall.

Processen hanterar vattnet i ångform och kan tillämpas även vid låga temperaturer, vilket ofta är aktuellt i kallställda eller intermittent uppvärmda kyrkor och deras krypgrunder (processen fungerar även vid minusgrader). Installationer i krypgrunder där våtluften förs ut kan skapa ett visst undertryck som minskar spridning av luften i krypgrunden till vistelseutrymmet i byggnaden.

Processen innebär i praktiken ofta att värdefull värme bortförs tillsammans med den våta luftströmmen. Det finns dock metoder för att återvinna denna värme vilket kan kräva större installationer för att vara ekonomiskt försvarbart. Den statiska varianten är långsam, ger en ojämn avfuktning under den tid som torkmedlet är verksamt. Därtill måste torkmedlet bytas (eller torkas med hjälp av värme) när det är mättat – en viss manuell hantering helt enkelt.

Ventilering: Försök pågår i svenska kyrkor med så kallad adaptiv ventilation. Denna metod kan användas i kallställda kyrkor genom att uteluft blåses in i kyrkan då den absoluta fuktigheten är lägre i uteluften, vilket ofta sker nattetid. Metoden kan vara lämplig i ouppvärmda utrymmen som krypgrund och vindar. Det finns risk för att RF och temperaturfluktuationerna inne i kyrkan blir farligt höga med avseende på risk för

sprickbildningar i inventarier [21]. Bland andra Uppsala universitet campus Gotland bedriver forskning inom detta område, där till exempel Magnus Wessberg studerar ett alternativ där solenergi utnyttjas för att värma den annars kalla tilluften [22].

Ett exempel på teknikombination är Airwatergreens avfuktare som kombinerar absorption och kondensering m.h.a. en temperatur och tryckökningsfas. Metoden kallas *Controled Moisture Capture and Release* (CMCR) eller V*armkondensering*. Kammaren som innehåller sorbtionsabsorbenten stängs när absorbenten är mättad, absorbenten värms, varmed vattnet förångas för att åter kondensera på väggarna i kammaren och samlas upp för avledning.

Energieffektivitet: Det saknas idag allmänt accepterade referensvärden för vad som kan anses vara energieffektiv avfuktning. Ett intressant värde är kg avfuktat vatten per kWh. Men till detta tillkommer att beakta huruvida avfuktaren avger värme skulle ha tillförts på annat sätt annars. Sorptionsavfuktare kräver normalt mer energi än en kondesnavfuktare. För sorptionsavfuktning behövs 1,5-2,5 kWh/kg vid 50 % RF vid temperaturer mellan 0-20°C. Kondensavfuktare använder 0,5-2,0 kWh/kg vid 60 % RF och 20°C [23].

5.8 Energianvändning

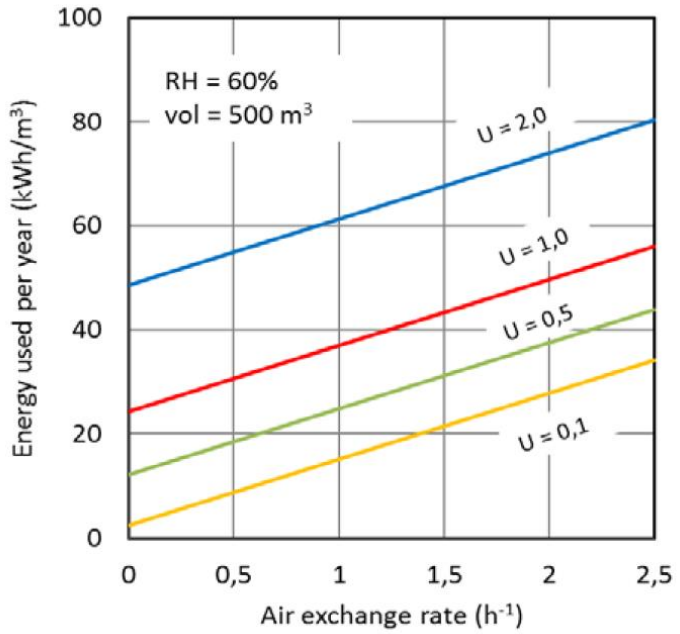
En viktig anledning till att styra inneklimatet i kyrkor och byggnader i allmänhet är att minimera energianvändningen i möjligaste mån. Att hålla ett fuktsäkert inneklimat och samtidigt ha en låg energianvändning behöver inte vara motsägelsefullt, bara man anpassar systemlösningen efter förutsättningarna i den specifika kyrkan.

Avfuktning ses ofta som ett mer energieffektivt alternativ till skyddsvärme [24] [5]. Några faktorer som avgör valet mellan avfuktning och skyddsvärme är byggnadens luftomsättning, volym, U-medelvärde och börvärde för den relativa fuktigheten i luften [23].

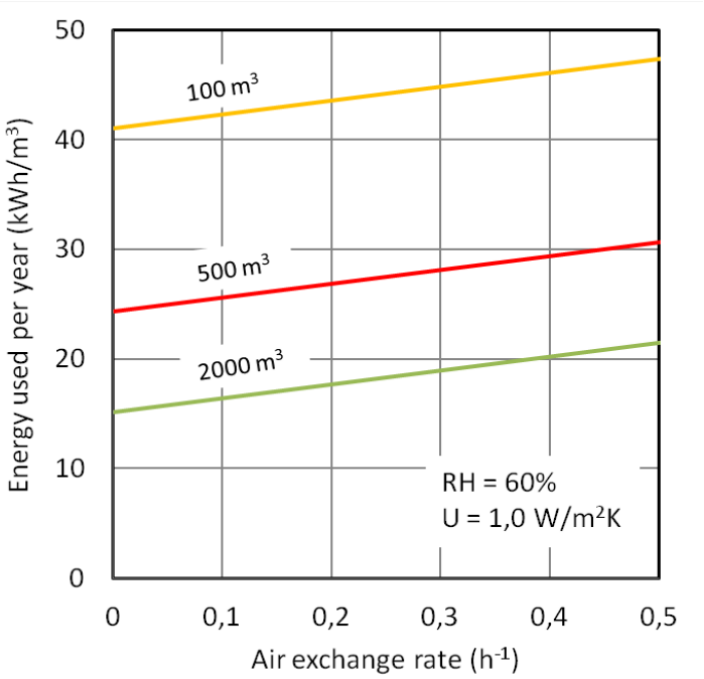
Poul Klenz Larsen, verksam vid Nationalmuseet i Danmark, har jämfört hur energianvändningen i en fiktiv byggnad påverkas när dessa faktorer ändras. Jämförelsen är gjord för ett klimat som motsvarar genomsnittsvärden för Danmark. Byggnaden har antagits vara tom och inga interna eller externa värmetillskott förekommer. När det gäller fukttillskott inomhus är den enda källan fukten i utomhusluften, som kommer in i byggnaden genom luftomsättningen.

I Figur 13 visar Larsen att energianvändningen för skyddsvärme ökar med ökande luftomsättning och ökande U-medelvärde, vilket är ett givet samband. I Figur 14 ser man att energianvändningen per byggnadsvolym är större i mindre byggnader, eftersom förhållandet mellan omslutningsarea och volym är större i en liten byggnad.

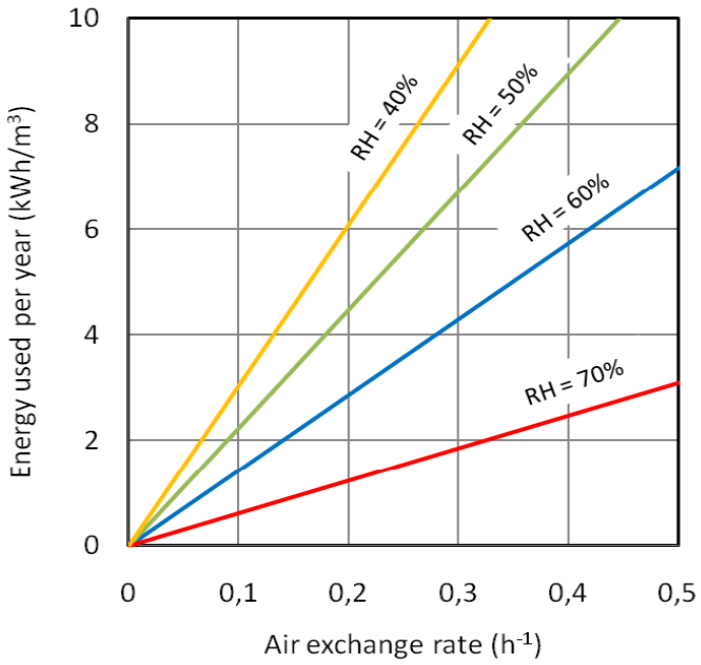
Larsen har också gjort beräkningar för avfuktning för samma fiktiva byggnad i danskt klimat, se Figur 15. Det är alltså bara fukttillskott från uteluften som ingår i beräkningarna. Det innebär att om luftomsättningen är noll så är energianvändningen noll. Vidare har han antagit att avfuktarens energianvändning är 1 kWh/kg vatten.



Figur 13 Energianvändning per byggnadsvolym för *skyddsvärme* som funktion av U-medelvärde och luftomsättning per timme. RF hålls konstant till 60 % och byggnadsvolymen är 500 m³. Källa [23].



Figur 14 Energianvändning per byggnadsvolym för *skyddsvärme* som funktion av byggnadsvolym och luftomsättning per timme. RF hålls konstant till 60 % och U-medelvärde är 1,0 W/m²K. Källa [23].



Figur 15 Energianvändning per byggnadsvolym för *avfuktning* som funktion av luftens RF. Byggnadsvolymen är 500 m³. Källa [23].

Luftomsättningen i kyrkor är ofta lägre än vad man kanske förväntar sig, det visar en studie gjord vid Högskolan i Gävle [25]. Bland 20 undersökta kyrkor i Mellansverige ligger medianvärdet på 0,09 luftomsättningar per timme. I topp ligger en träkyrka från 1900-talet och en stenkyrka 1800-talet, båda med ventilerade krypgrunder. Träkyrkan hade 0,40 oms/timme och stenkyrkan hade 0,23 oms/timme.

Under antagandet att luftomsättningen i svenska kyrkor ligger omkring 0,1 oms/timme och att det danska klimatet är jämförbart med klimatet i åtminstone södra halvan av Sverige framstår avfuktning som mer energieffektivt i figurerna ovan.

6 Inventering och uppföljning av kyrkor med CultureBee-system

Projektet ska utvärdera effekten på inneklimatet, och dess koppling till fuktrelaterade skador[7], efter införandet av CultureBees sensorer och övrig utrustning. Vid starten av det här projektet användes CultureBee-systemet aktivt för styrning och/eller loggande mätning i fem kyrkor: Bokenäs nya kyrka, Fide, Sillerud, Svanshals och Tunaberg. Med aktiv användning menas dels att systemets sensorer och nätuppkoppling fungerar och underhålls, och dels att systemet används för uppföljning och i vissa fall styrning av temperatur och RF.

[7] Här avses skador till följd av hög fuktbelastning och risk för mögelpåväxt.

6.1 Sammanfattande intryck av intervjuer och platsbesök

Förutom att platsbesök gjordes i fem kyrkor har telefonintervjuer utförts med representanter för ytterligare sju kyrkor, i syfte att samla erfarenheter med att använda CultureBee. Dessa kyrkor är Bro, Ekshärad, Frösthult, Mattmar, Odensvi, Stora Mellby och Årstad. Här beskrivs intrycken från samtliga kyrkor.

Det upplevda inneklimatet och den termiska komforten beskrivs generellt som bra, mot bakgrund av de förutsättningar som finns i kyrkobyggnader. Drag upplevs framförallt i träkyrkan Tunaberg medan kallras från fönster och väggar beskrivs i andra kyrkor. Problem med påtagligt dålig lukt förekommer inte i någon av kyrkorna, även om några nämner att det kan ”lukta lite fuktigt”.

Det är inte ovanligt att man på vaktmästarnivå inte känner till om dräneringssystem finns och vilken status detta i så fall har. Takavvattningssystemet beskrivs fungera bra av alla, men vid platsbesöken noterades flera brister. Exempelvis lövsilar fulla med löv och kvistar, glipande fogar i stuprören och tecken på att vatten blir stående nedanför vattenutkastaren nära grundmuren.

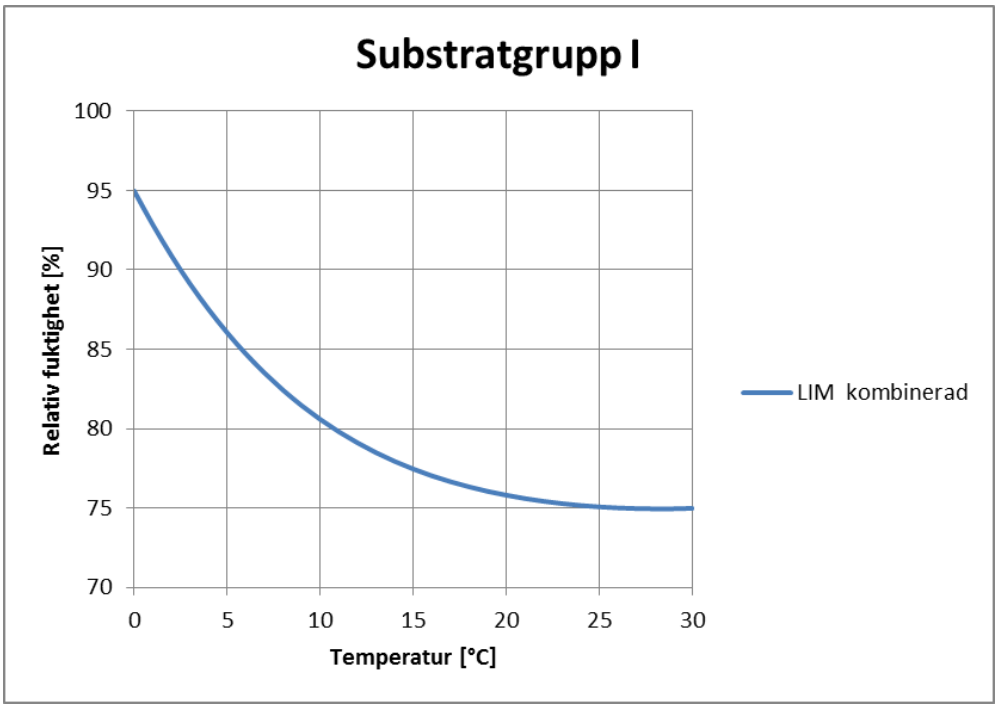
När det gäller tekniska installationer är eluppvärmning med bänkvärmare och kompletterande radiatorer eller konvektorer vanligast. Två kyrkor avviker: Odensvi kyrka med sitt luftvärmesystem och Årstad med pelletspanna och vattenburet värmesystem. Alla kyrkor ventileras med självdrag genom otätheter och ventiler i klimatskalet i förekommande fall. Intermittent uppvärmning praktiseras i alla kyrkor för att spara energi. Värmesystemet kan styras på distans eller förprogrammeras i sju av kyrkorna. I hälften av kyrkorna finns avfuktare, men bara i Fide kyrka är den kopplad till central styrning.

De flesta var positiva till CultureBee-systemet, men det användes mest för information om aktuell temperatur och relativ fuktighet. Endast Tunaberg och Fide har använt CultureBee för styrning av klimatet i byggnaden. Någon tyckte att gränssnittet för presentationen av mätvärdena skulle kunna förbättras. Flera var omedvetna om möjligheten att kunna styra klimatet med hjälp av sensorerna och CultureBees styrbox. När batteriet i sensorerna har tagit slut är det flera som har slutat att använda systemet.

6.2 Analys av mätdata

Mätdata från CultureBee har analyserats från de fem kyrkor som fortfarande aktivt använder sensorerna för uppföljning eller styrning av inneklimatet. Dataunderlaget innehåller alla mätvärden som har registrerats från och med CultureBee-systemets installation 2011 fram till och med augusti 2014. Mätdata för temperatur och relativ fuktighet utvärderas mot en gränsvärdeskurva som är definierad som en kombination av de lägsta kurvorna för sporgrodd och tillväxt av mycel enligt Klaus Sedlbauers isolpletmodell för substratgrupp I, se avsnitt 5.4. Kurvan visar vid en given temperatur den högsta relativa fuktighet, som inte bör överskridas. Risken för mögelproblem ökar med storlek och varaktighet av övertrampet ovanför kurvan (Figur 16). Här har vi inte gått vidare med utvärderingsmetoden från MIOC där varaktigheten beaktades, eftersom vi utgår från att grott mögel redan kan finnas i kyrkan. Ett övertramp över

LIM-kurvan innebär att möglet fortsätter att växa. LIM är en förkortning av Lowest Isopleth for Mould.



Figur 16 Kurva för utvärdering av acceptabelt fukttillstånd. Baserad på [7].

6.3 Tunabergs kyrka

Beskrivning av byggnaden

Tunabergs kyrka uppfördes mellan åren 1618-1620. Kyrkan har en stomme av knuttimrat liggtimmer. Utvändigt sitter en rödmålad lockläktspanel, som har målats om efter 2011. Invändigt är stockarna synliga och dekorerade. Innertaket är av trä.

Fönstren är av typen 2-glasfönster med karm och båge av trä samt blyspröjs i ytterbågen. Vid inventeringen pågick renovering av tre fönster. Fönstren har måtten 130x150 cm, förutom ett fönster på läktaren som är 15x150 cm.

Hela kyrkan är grundlagd på krypgrund eller snarare torpargrund. Det är inte möjligt att ta sig in i grunden för inspektion, men golvbrädor går att lyfta på ett par ställen för lokal besiktning. Tidigare hade man fuktproblem vid sidoskeppet mot norr, men detta avhjälptes när dräneringen runt kyrkan förbättrades för några år sedan.

Yttertaket har formen av ett sadeltak med valmning mot öster. Nya träspån lades på taket omkring 1997. Kyrkan har inget torn, däremot finns en vidstående klockstapel.

Uppvärmning sker med direktverkande el i form av bänkvärmare och värmefolier i bänkarna. År 1996 drogs nya elledningar i kyrkan.

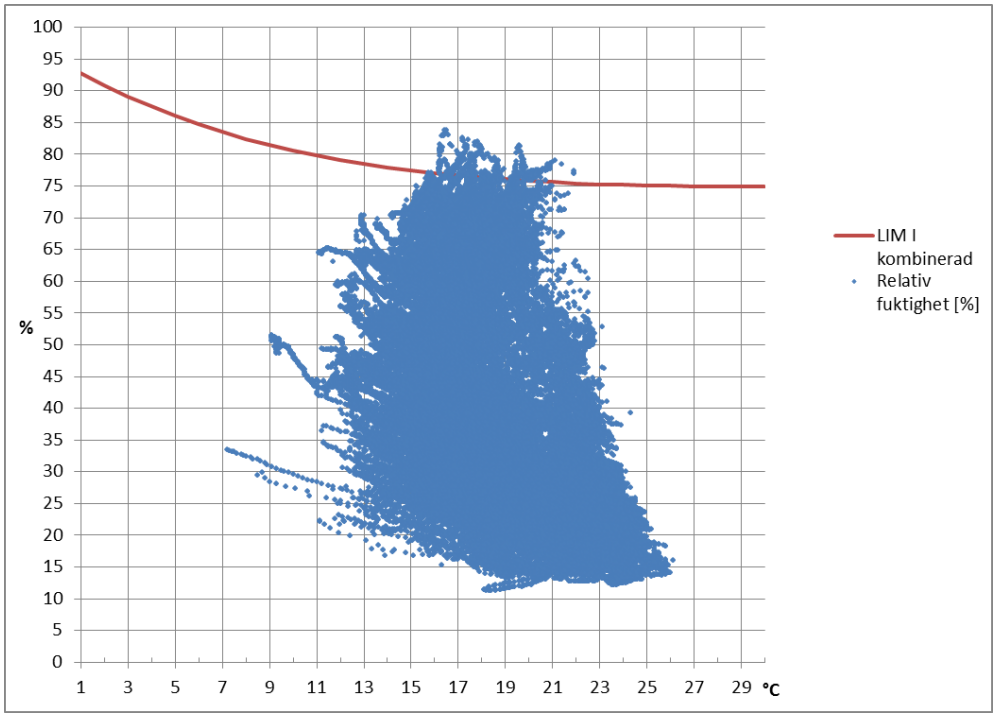
Ventilation sker med självdrag genom otätheter i byggnadens klimatskal.

Uppföljning av inneklimatet

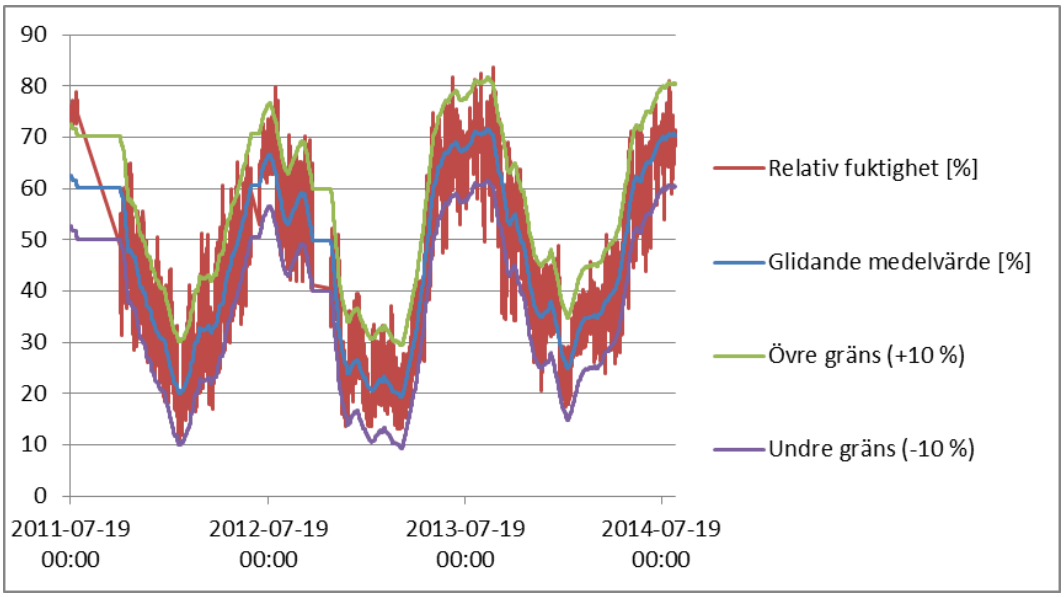
I Tunaberg används CultureBee-systemet både för loggning av temperatur och för relativ fuktighet samt för styrning av innetemperaturen. Det är framförallt funktionen att styra temperaturen till ett visst värde vid en viss tidpunkt som används. Styrningen gör att uppvärmningen inför en förrättning kan starta olika lång tid förväg beroende på

utetemperaturen. Systemet används också för att larma via e-post när tanken till en portabel kondensavfuktare är full. Kyrkan upplevs som ganska dragig och är svår att värma upp när det är kallt ute. Vid -10°C eller kallare når man bara ca 12°C inne. Innan CultureBee kunde värmen vara på onödigt länge, vilket gjorde att luften blev torr. Torr luft kan fortfarande skapa problem under vintern. Framförallt märks det på att orgeln kan kärva och att kyrkokören upplever att det är svårt att sjunga. Börvärdet för innetemperaturen är inställt på 19°C vid förrättningar under vintern och ca 14°C övrig tid.

Mätdata från CultureBee för Tunaberg visar att den relativa luftfuktigheten i kyrkorummen sällan överskrider kritiska nivåer enligt Sedlbauers Isopletmodeller. Ett exempel är sakristian (Figur 17) där luftfuktigheten överstiger gränsvärdet ett fåtal gånger under hela mätperioden från juli 2011 till slutet av augusti 2014. Å andra sidan visar RF också påtagligt låga värden och det kan innebära risk för uttorkningsskador. En granskning av hur RF varierar under mätperioden visar att värdet ibland ligger utanför det intervall på ±10 %, som anses vara säkert. Det sker dock inte kontinuerligt, se Figur 18.

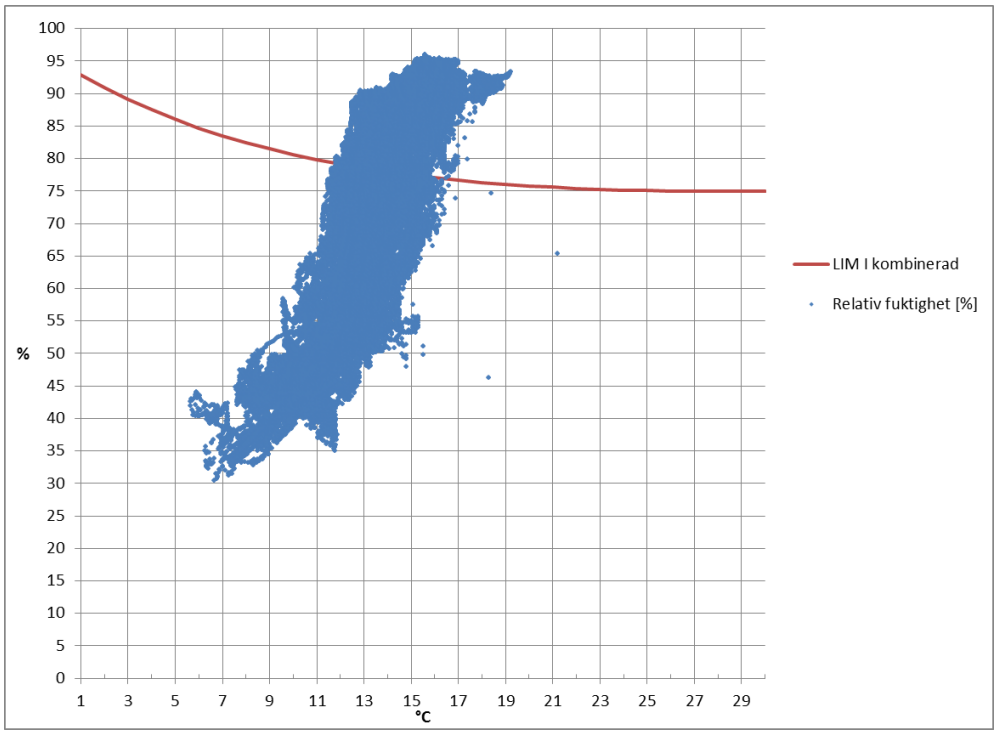


Figur 17 Sensor e2099 i sakristian i Tunabergs kyrka. Mätvärden för perioden 2011-07-04 till 2014-08-30.



Figur 18 Relativ fuktighet i sakristian. Glidande medelvärde för 30 dygn. Värden inom ±10 % från det glidande medelvärdet anses som säkert avseende risk för mekaniska skador [12].

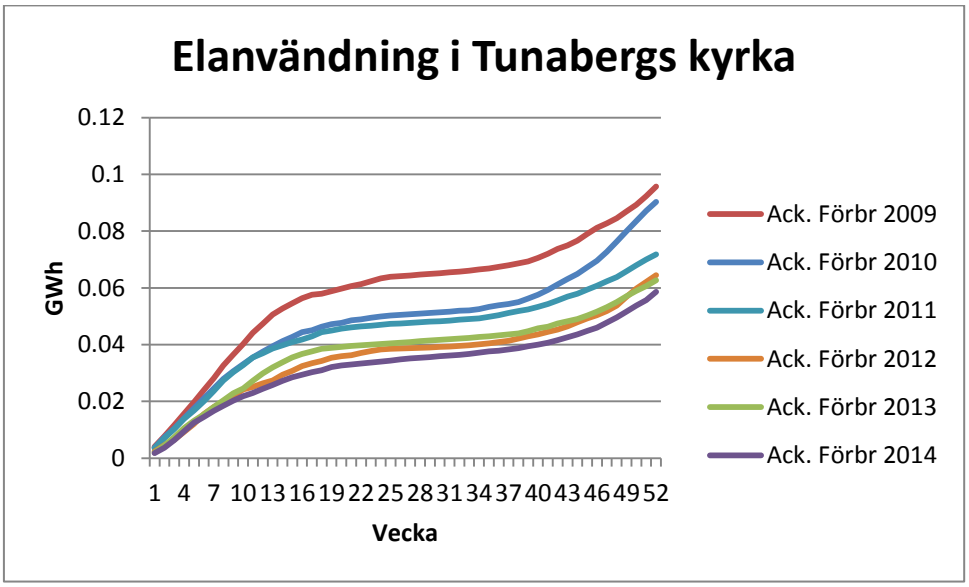
Mer kritiska nivåer tillstånd återfinns under kyrkans golv mot mark eller krypgrund. De utrymmen som gick att inspektera på plats var så låga att de inte gick att krypa in i och är snarare att betrakta som golv mot mark. Figur 19 visar mätdata från en punkt under den så kallade Nävekvarnsläktaren. Den relativa fuktigheten överskrider gränsvärdeskurvan ordentligt under långa sammanhängande perioder under sommaren. Ibland ända från mitten av maj till mitten av september. Under hela vintersäsongen ligger dock den relativa fuktigheten under kurvan. Organiskt material fanns på marken under golvet, bland annat i form av träflisor och gamla trädrötter. Inga för ögat uppenbara mögelangrepp gick att se. Kyrkvaktmästaren upplever heller inte problem med dålig lukt. Dock får man förutsätta att både grodd och tillväxt av mögel i någon utsträckning sker under sommarmånaderna för att sedan avstanna under den kallare delen av året.



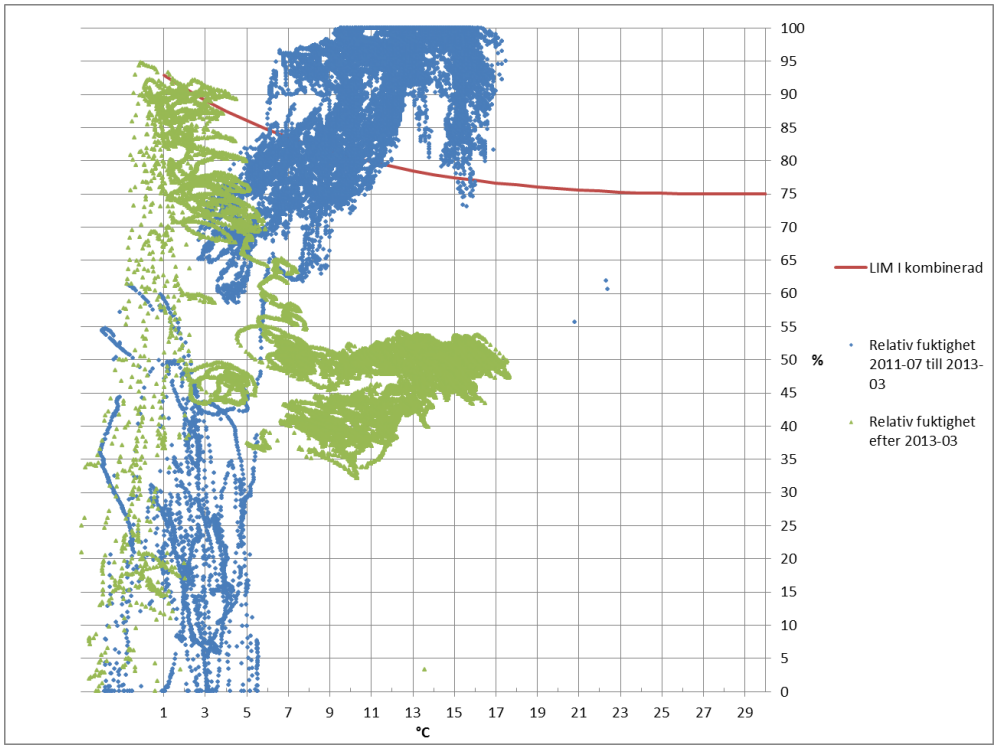
Figur 19 Sensor e2108 under golvet i Nävekvarnsläktaren

Även i krypgrunden under trappan till orgelläktaren har hög luftfuktighet uppmätts. Skillnaden här är att klimatet blev mycket bättre under sommaren 2013, se Figur 21. En förklaring kan vara att ett åtgärdat tidigare problem med dränering och avvattning kring vapenhuset nu visar effekt i den här mätpunkten.

CultureBee-systemet installerades med värmestyrning i juni 2011. Figur 20 nedan visar att energianvändningen har minskat från hösten 2011. Observera att det inte är normalårskorrigerade värden i figuren och att all elanvändning inkluderas, inte bara uppvärmningen. Minskningen mellan 2009-2014 är 39 % och mellan 2011-2014 är den 18 %.



Figur 20 Ackumulerad energianvändning i Tunabergs kyrka. Observera att energianvändningen inte är normalårskorrigerad.



Figur 21 Sensor e2107 i krypgrund under trappa till orgelläktaren

Förslag till åtgärder

Att styra klimatet med CultureBee-systemet verkar vara framgångsrikt i kyrkorummen i fråga om att få komforttemperatur i rätt tid och att undvika höga RF-nivåer.

Låga RF-nivåer förekommer under vintermånaderna och skulle kunna föranleda uttorkningsskador. Granskningen av RF-variationerna i sakristian, som har bland de lägst uppmätta värdena, visar att variationen är acceptabel. Det är dock bra att fortsätta följa RF-variationerna över tid.

Alla sensorer placerade på olika ställen i grunden och under golvet visar att den relativa fuktigheten blir hög under sommar och höst. Grundkonstruktionen är låg och inte lätt att inspektera i sin helhet. Man bör man fortsätta att logga RF och kontinuerligt följa upp med egenkontroller. Viktigt för klimatet i grunden är att avledning av ytvatten och dräneringen runt kyrkan fungerar ordentligt.

6.4 Bokenäs nya kyrka

Beskrivning av byggnaden

Bokenäs nya kyrka uppfördes mellan åren 1899-1901. Kyrkan har en murverksstomme av sten med synliga stenar (granit) exteriört. Insidan är putsad. Takkonstruktion och pelare av trä. Kyrkan har renoverats invändigt och blev färdigställd 1998. Ytterligare ombyggnad skedde under läktaren omkring 2001.

Omfattande putsskador förekommer invändigt i tornet, runt koret och i sakristia med förråd. Runt kyrkporten längst ner i tornet finns rikligt med saltavsättningar. Den sydvästra fasaden, som vetter mot havet, är extra utsatt och överlag mest skadad.

Fönstren i kyrkorummet och koret består av 2-glasfönster i ramar/karmar av järn. Skräp och sand förekommer mellan glasen, vilket tyder på otäthet. I tornet har 1-glasfönster kompletterats med ett innerfönster.

Hela kyrkan är grundlagd med uteluftventilerad krypgrund. Trägolv i kyrkorummet och koret. Lösa mattor ligger i gångarna, medan kor och sakristia har heltäckningsmatta.

Yttertaket har bandtäckning av plåt. Stuprören har lövsilar och leder ner till ett dräneringsrör runt kyrkan. Dräneringen leds ut i slänt sydväst om kyrkan.

Uppvärmning sker med direktverkande elradiatorer. När vinden ligger på är det svårt att hålla temperaturen uppe. Under vintern hölls inga gudstjänster, förutom vid julen. Enstaka begravningar förekommer vintertid. Detta framgår av Figur 24. På sommaren hålls förrättningar en eller två gånger i månaden.

Kyrkan har övervägande självdragsventilation, dock finns frånluftsfläkt (Paxfläkt) i WC.

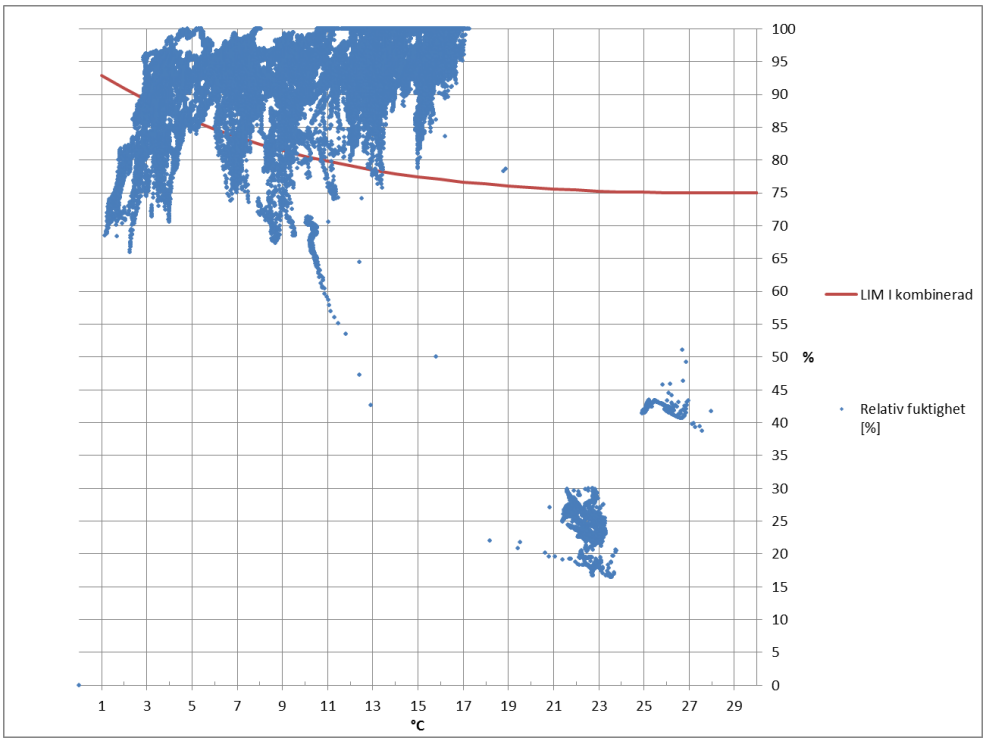
Uppföljning av inneklimatet

CultureBee-systemets styrenehet har inte använts för styrning av värmesystemet. Däremot finns ett årsprogramur[8] i elcentralen, som används för tidsinställning av värmen.

Luften i krypgrunden/källaren är mycket fuktig och marken, där det översta skiktet består av jord och sand, är synligt fuktig på vissa partier. I mitten av krypgrunden finns en pumpgrop med en dräneringspump. Delar av trossbottens undersida och isolering har fallit ur på några ställen. Runtomkring syns att virket är fuktskadat och har troligen mikrobiell påväxt, se Figur 22. Att det råder ett kritiskt klimat i krypgrunden blir tydligt i Figur 23. Den relativa fuktigheten ligger bara i undantagsfall under gränsvärdeskurvan. Vid provtagningen i samband med MIOC-projektet hittades här påväxt av mögelsvamp och aktinomyceter.

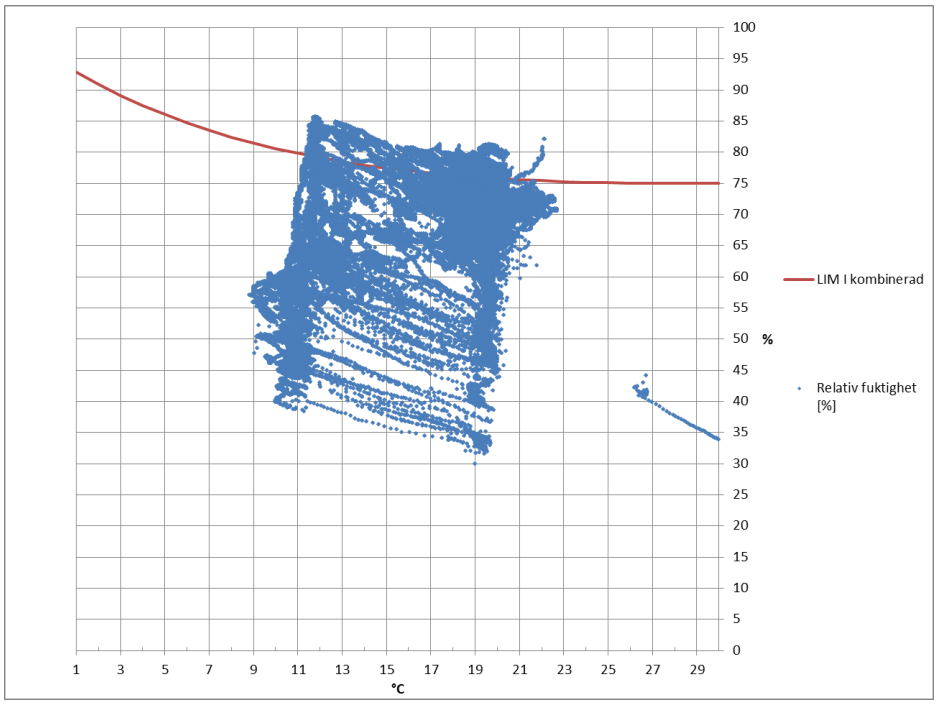
Figur 22 Fuktskadad trossbotten

[8] Fabrikat Westerstrand, modell WYP-4 Mini.

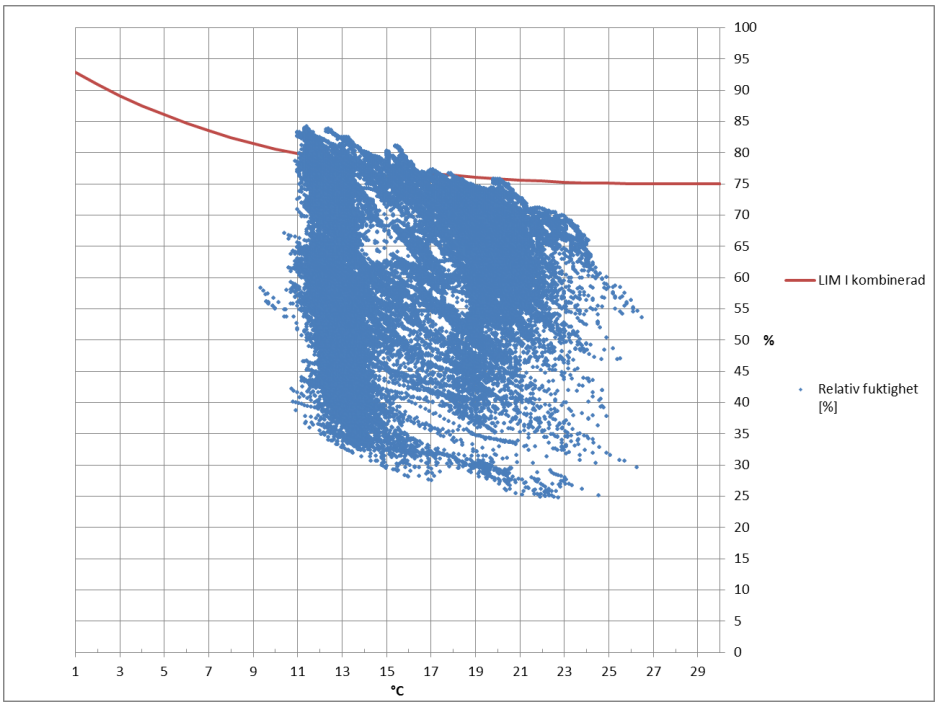


Figur 23 Sensor e2224 i nedgång till krypgrunden. Mätvärden för perioden 2011-07-26 till 2014-08-30.

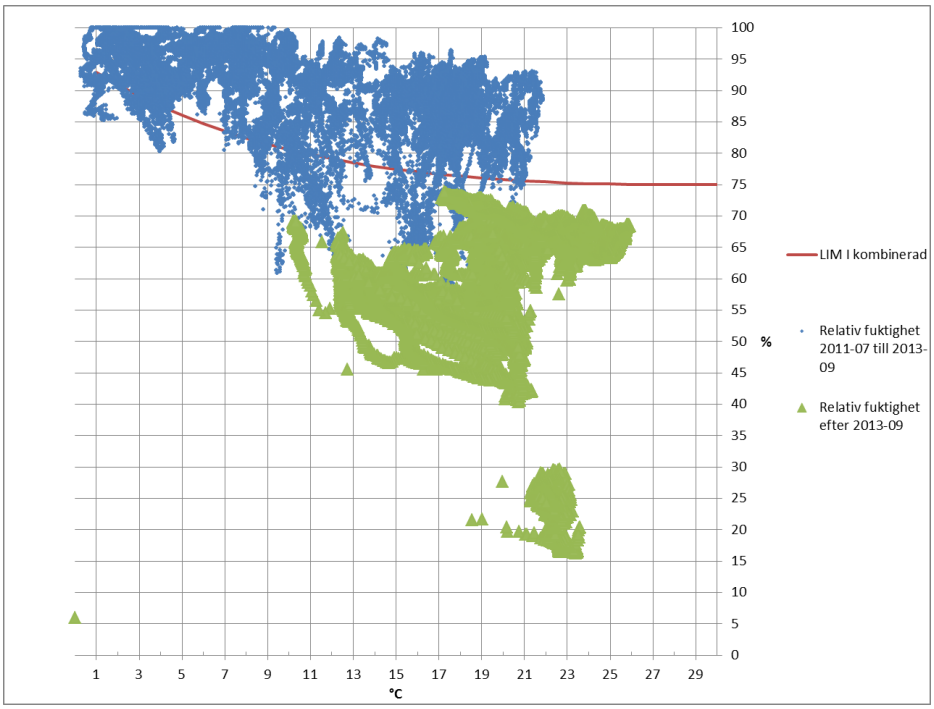
Grundvärmen i kyrkorummet ligger omkring 11°C och höjs till 19-20°C vid förrättningar. I Figur 24 kan man se hur temperaturen under den bakre bänkraden varierar mellan grundvärme och förrättning. Figuren visar också att RF varierar mellan ganska låga nivåer till nivåer strax över LIM-kurvan. Samma tendenser finns vid altaret, men där har temperaturen större spridning (Figur 25).



Figur 24 Sensor e2223 i bakre bänkraden. Mätvärden för perioden 2011-07-26 till 2013-10-03.

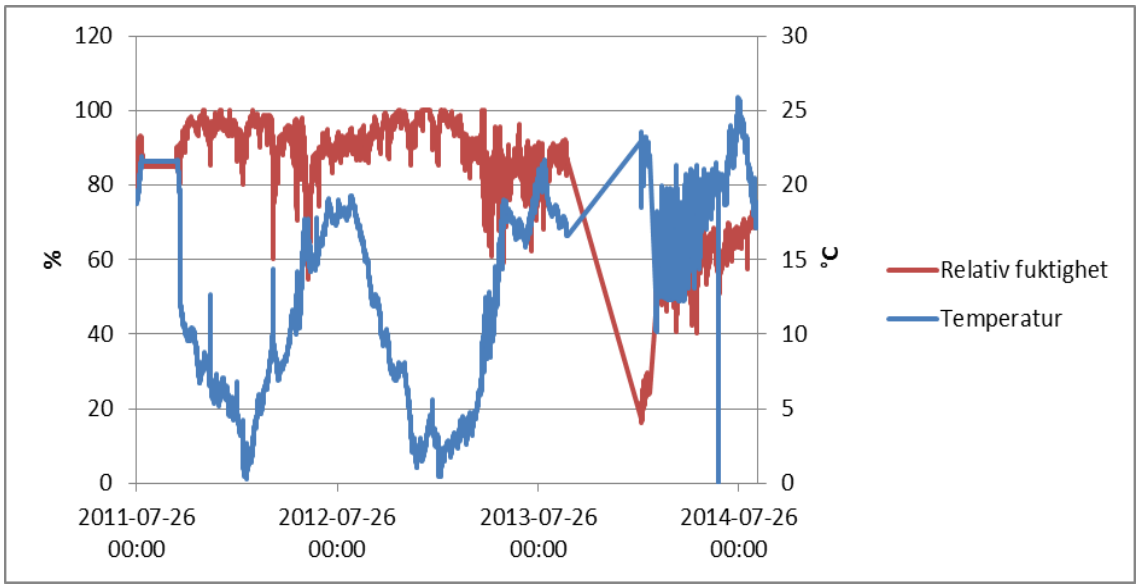


Figur 25 Sensor e2221 vid altaret. Mätvärden för perioden 2011-07-26 till 2014-08-30.

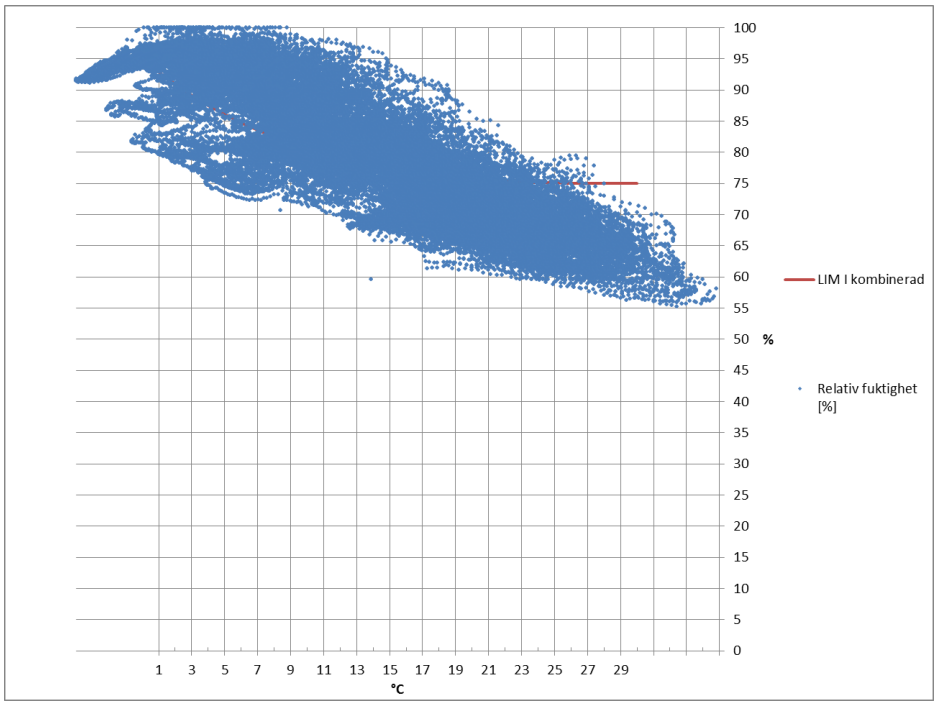


Figur 26 Sensor e2229 placerad i tornet. Mätvärden för perioden 2011-07-26 till 2014-08-30.

Sensor e2229, placerad i tornet, visar att en tydlig förbättring av klimatet har skett efter september 2013 (Figur 26). Från denna tidpunkt är temperaturen i regel alltid över 12°C och går intermittent upp till 20-21°C. På sommaren blir temperaturen ännu högre. Den kontrollerade värmen verkar ha varit avgörande för att sänka RF (Figur 27).



Figur 27 Efter hösten 2013 har RF i tornet minskat till acceptabla nivåer. Före hösten 2013 varierar temperaturen med årstiderna.



Figur 28 Sensor e2227 placerad på vinden nära tornet. Mätvärden för perioden 2011-07-26 till 2013-11-26.

Fukttillståndet på vinden är ovanför LIM-kurvan stora delar av året, men blir bättre under sommarmånaderna när temperaturen ökar. RF ökar när utetemperaturen sjunker, eftersom temperaturen på vinden i det närmaste är densamma som utetemperaturen (Figur 28).

Förslag till åtgärder

Krypgrunden har det mest kritiska fukttillståndet. Funktionen av dagvattenavledning och dränering runt bör utredas ordentligt. Kyrktornet och den sydvästra långsidan är mest utsatta för vindar från havet. På insidan av dessa ytor hittar man också de största problemen med saltutfällning, putssläpp och påväxt av vad som ser ut att vara alger. För att kartlägga hur och var fukt tillförs kyrkan och hur fuktutbytet sker mellan luft och material rekommenderas att genomföra mätningar enligt standarden SS-EN 16242:2012 [13]. Standarden beskrivs kort i avsnitt 5.5 Relevanta standarder och riktlinjer.

RF är ofta hög även på kallvinden. Närheten till havet bidrar antagligen till ökad fuktighet på vinden. Utred om ventileringen kan anpassas och om tätheten i vindsbjälklaget kan förbättras.

6.5 Fide kyrka

Beskrivning av byggnaden
Fide kyrka uppfördes mellan åren 1200-1250 och har en murverksstomme av natursten och sandsten [26]. Fasaden är putsad och insidan av yttermuren likaså. Sadeltakkonstruktionen över kor och långhus är av trä. Även tornhuven har en träkonstruktion. Yttertaket över kor och långhus är täckt med enkupigt lertegel medan tornhuven är klädd med träpanel.

Det finns totalt fem fönster i kyrkorummet; två fönster i koret, två i långhuset och ett i tornet. Fönstren är rundbågiga och har alla olika storlek.

Kyrkan är grundlagd mot mark utan kryputrymme under stengolvet. En större golvsten blev tidigare ofta våta av kondensvatten, men händer inte sedan avfuktning påbörjades. Golvstenen är troligen av annan bergart än resten av golvet. I bänkkvarteren ligger ett trägolv ca 8 cm ovanför stengolvet.

Uppvärmning sker med bänkvärmare i bänkkvarteren samt två konvektorer och två elradiatorer i koret. En mindre elradiator sitter på yttermuren i predikstolen.

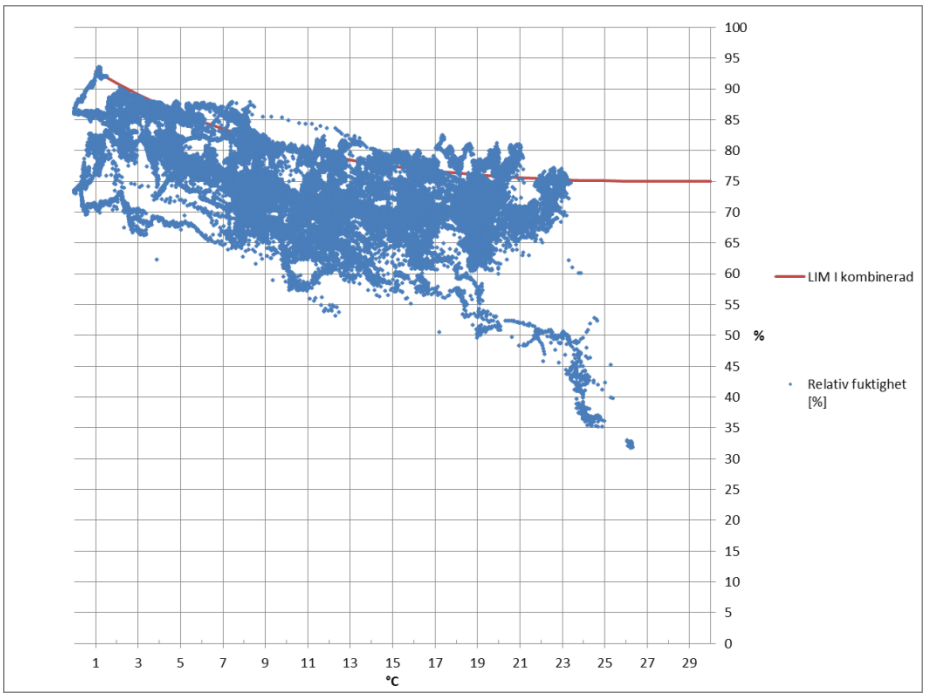
Ventilationen baseras på självdrag genom otätheter. En sorptionsavfuktare[9] installerades under 2013 i samband med ett forskningsprojekt som drivs av Magnus Wessberg på Uppsala universitet campus Gotland. Avfuktaren är placerad på orgelläktaren och styrs av sensorn placerad bakom altartavlan.

Uppföljning av inneklimatet

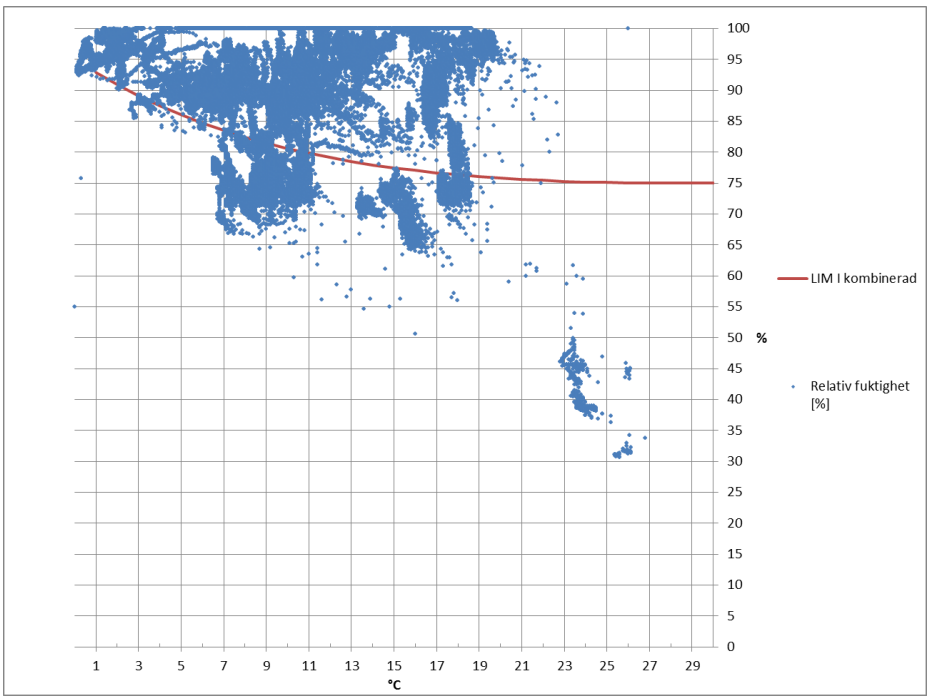
CultureBee-systemet används för att för att styra inneklimatet genom att sensor e2214 bakom altaret reglerar en sorptionsavfuktare. I Figur 29 ser man att avfuktaren strävar efter att hålla RF under LIM-kurvan medan temperaturen har stor variation. Man har haft fuktproblem i korets nordöstra hörn till följd av att dagvattenavledningen inte fungerade. I samband med MIOC-projektet hittade man mikroorganismer (aktinomyceter och alger) i det hörnet. För ca tre år sedan åtgärdades takavvattningen, som nu leds bort med dagvattenrör i marken. Man upplever en klar förbättring av inneklimatet och luftkvaliteten sedan takavvattningen åtgärdades och avfuktaren installerades. Dock visar sensorn placerad i golvnivå vid altarringens norra del att mycket höga fuktnivåer och kondens fortfarande inträffar i denna del av kyrkan, se Figur 30. Tittar man på inomhusluftens vatteninnehåll i den här punkten är det oftast högre än vatteninnehållet i utomhusluften, vilket tyder på ett fukttillskott i byggnaden. Vatteninnehållet uttrycks i gram vattenånga per kg torr luft och benämns ofta mixing ratio. Se Figur 31.

Kyrkan används sparsamt under vintermånaderna, kanske 3-4 gånger. Vår till höst används den ungefär var fjortonde dag. Temperaturen höjs då vid behov till 18°C, övrig tid sker ingen styrning av temperaturen i långhus och kor. Sakristian, belägen under orgelläktare, styrs enligt uppgift till att hålla 18-20°C och 65 % RF. Figur 32 visar dock att temperatur och RF rör sig inom stora spann, men bara undantagsvis ovanför LIM-kurvan. Det finns däremot risk för mekaniska skador på ömtåliga föremål.

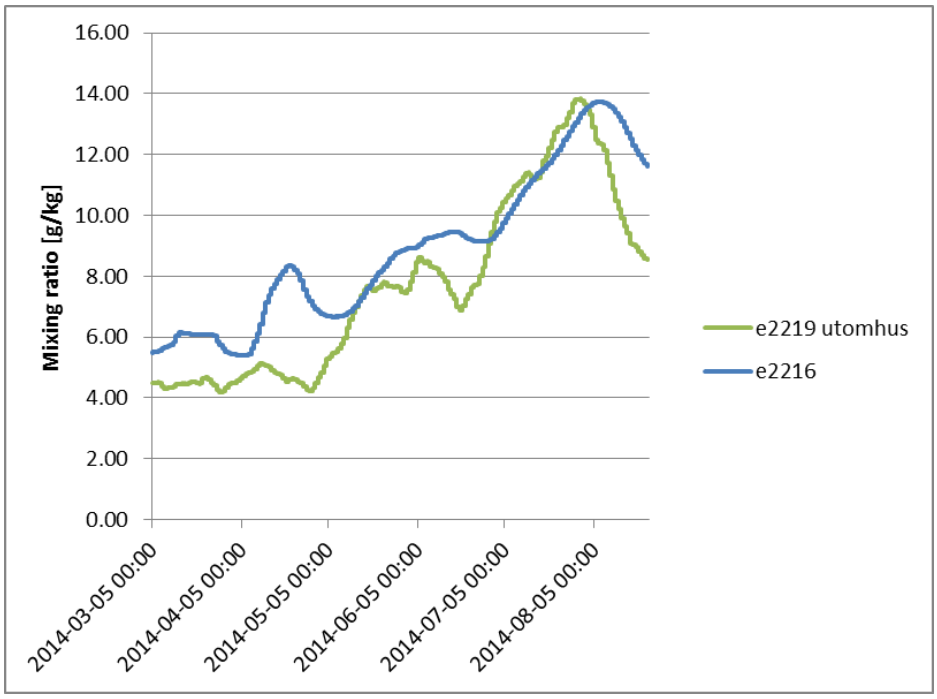
[9] Fabrikat DST Seibu Giken modell DR-20B



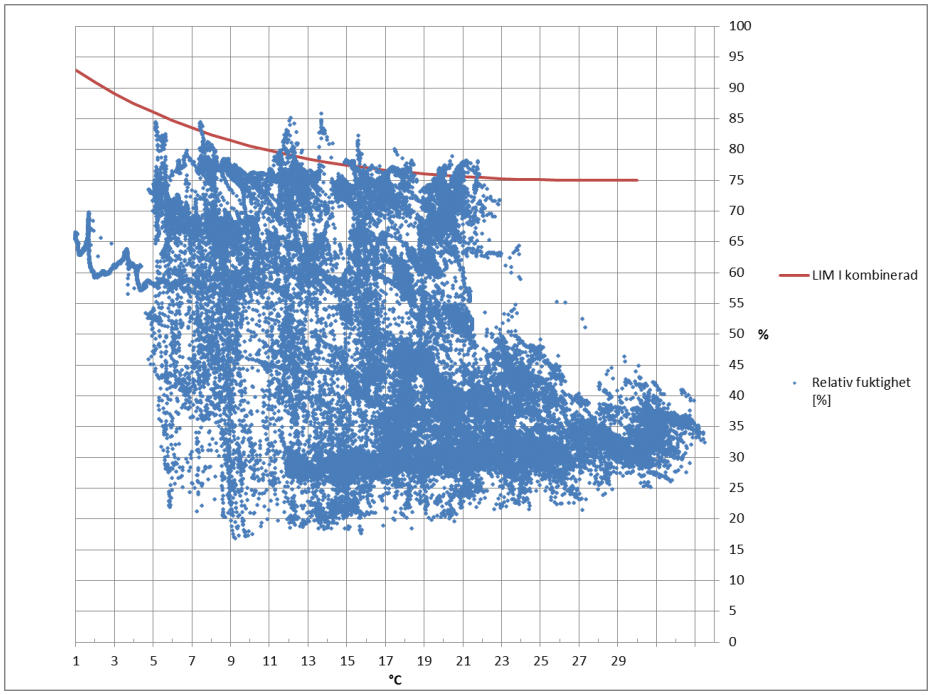
Figur 29 Sensor e2214 placerad bakom altaret. Mätvärden för perioden 2011-06-30 till 2014-08-30.



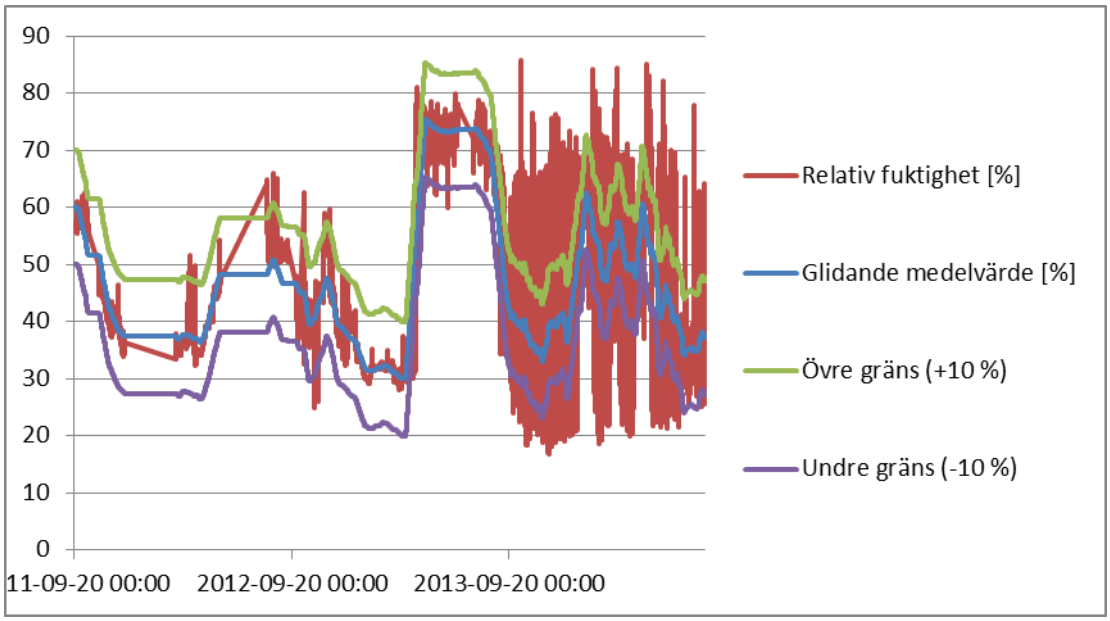
Figur 30 Sensor e2216 vid golvet intill altarringens norra sida. Mätvärden för perioden 2011-06-30 till 2014-08-30.



Figur 31 Inomhusluftens vatteninnehåll överstiger oftast utomhusluftensvatteninnehåll. 14 dagars glidande medelvärden.



Figur 32 Sensor e2210 i sakristian. Mätvärden för perioden 2011-06-30 till 2014-08-30.



Figur 33 Relativ fuktighet i sakristian. Glidande medelvärde för 30 dygn. Värden inom ±10 % från det glidande medelvärdet anses som säkert avseende risk för mekaniska skador [12].

Förslag till åtgärder

Orsaken till den höga fuktnivån vid golvet vid korets norra vägg bör utredas närmare. Fukt verkar komma in i byggnaden från golvet eller yttermuren.

Stora fluktuationer i RF startade sensommaren 2013 i sakristian. Möjligen kan det hänga ihop med driftsättningen av sorptionsavfuktaren. Det bör undersökas om problemen kvarstår och åtgärdas.

6.6 Silleruds kyrka

Beskrivning av byggnaden

Silleruds kyrka uppfördes mellan åren 1887-1888. Kyrkan har åttkantig planlösning där murverksstommen är av sten. Både utsidan och insidan är putsad. Vid besöket pågick renoveringsarbeten i form av sandblästring av fasaden och invändig målning av fönster. Fasaden renoverades senast 1980 då den tidigare putsen sandblästrades bort och ersattes med ny KC-puts. Innertaket är ett kryssvalv av trä, klätt med pärlspont.

Kyrkorummets fönster är dels runda med en diameter om 300 cm och dels rundbågiga med måtten 70x130 cm. Fönstren är av typen 1+1-glasfönster, där det inre glaset är blyinfattat. Fönsterbågar är av trä.

Kyrkan är grundlagd med krypgrund, där marken är täckt av jord. Golvbjälklagets konstruktion är byggnadsåren, men delar är bytta på 1950-talet. Trägolvet är täckt med yllemattor i gångarna.

Tack vare kyrkans åttkantiga form och centrala torn finns det många olika takfall. De avslutas dock med sadeltakgavel eller en tornöverbyggnad. Taken är täckta med svartmålad plåt.

Uppvärmning sker med direktverkande elradiatorer, många är av äldre modell. Dessa är placerade i bänkar och på väggar.

Ventilation saknas, utöver självdrag genom otätheter. Avfuktare har använts sommartid sedan ca 10 år tillbaka, då man hade mögelproblem i orgeln.

Uppföljning av inneklimatet

CultureBee-systemets styrenehet har inte använts för styrning av värmesystem eller avfuktare. Sensorerna användes för loggning och uppföljning av inneklimatet, om än inte dagligdags.

Under året används kyrkan ungefär två gånger per månad för gudstjänster. Därutöver tillkommer omkring 20 begravningar och bröllop. Under vintersäsongen värmer man till 15-20°C vid förrättning. Värmen slås på upp till 12 timmar i förväg. Övrig tid värmer man inte alls.

Vid provtagningen som gjordes i Silleruds kyrka under MIOC-projektet fann man mikrobiella skador på två ställen, i krypgrunden och på yttermuren i närheten av en trappa. CultureBee-sensor (e2247) finns i krypgrunden, men inte vid trappan mot yttermuren. Hög RF noterades också bakom altaret (sensor e2243) och på vinden (e2250), men här har provtagning inte utförts.

Figur 35 visar att fuktbelastningen i krypgrunden är hög och överskrider gränsvärdeskurvan under stora delar av året. Alla tre sensorer i krypgrunden (e2246, e2247 och e2248) registrerar kontinuerligt hög RF. En stickprovskontroll på plats visade att fuktkvoten i virket på bjälklagets undersida var ca 20 % (Figur 34).

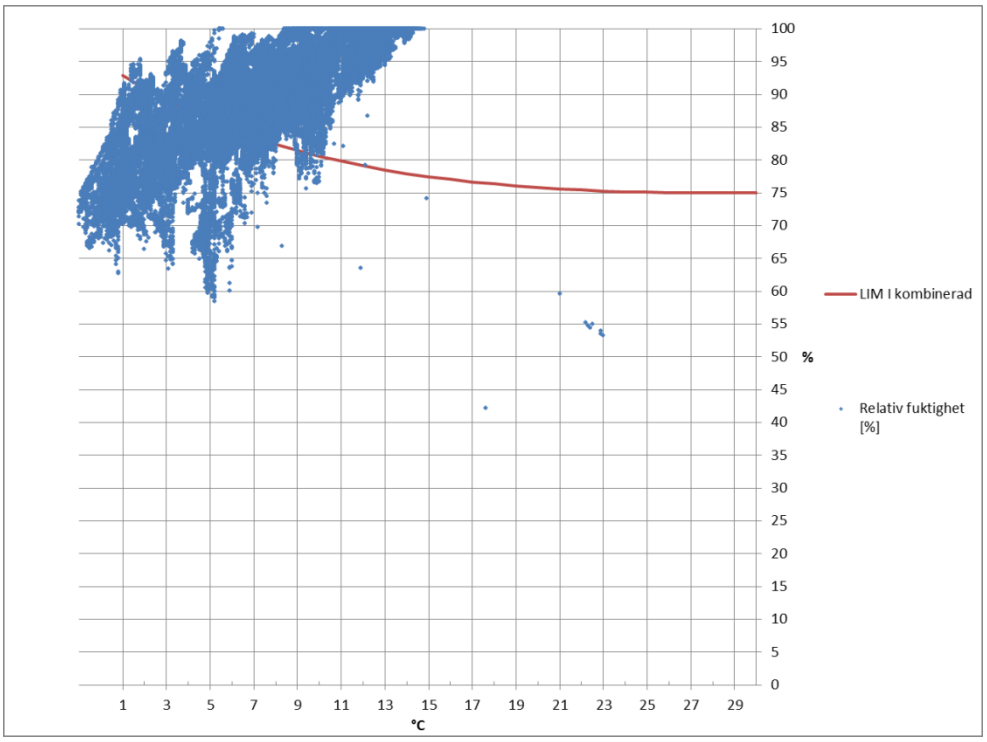
Figur 34 Krypgrunden under Silleruds kyrka. Fuktkvoten i bjälklaget uppmättes till ca 20 %.

Mätdata från sensorn bakom altartavlan visar att den relativa fuktigheten generellt ligger nära gränsvärdeskurvan och att den överskrids under höst och början av vintern när temperaturen inomhus sjunker, se Figur 36.

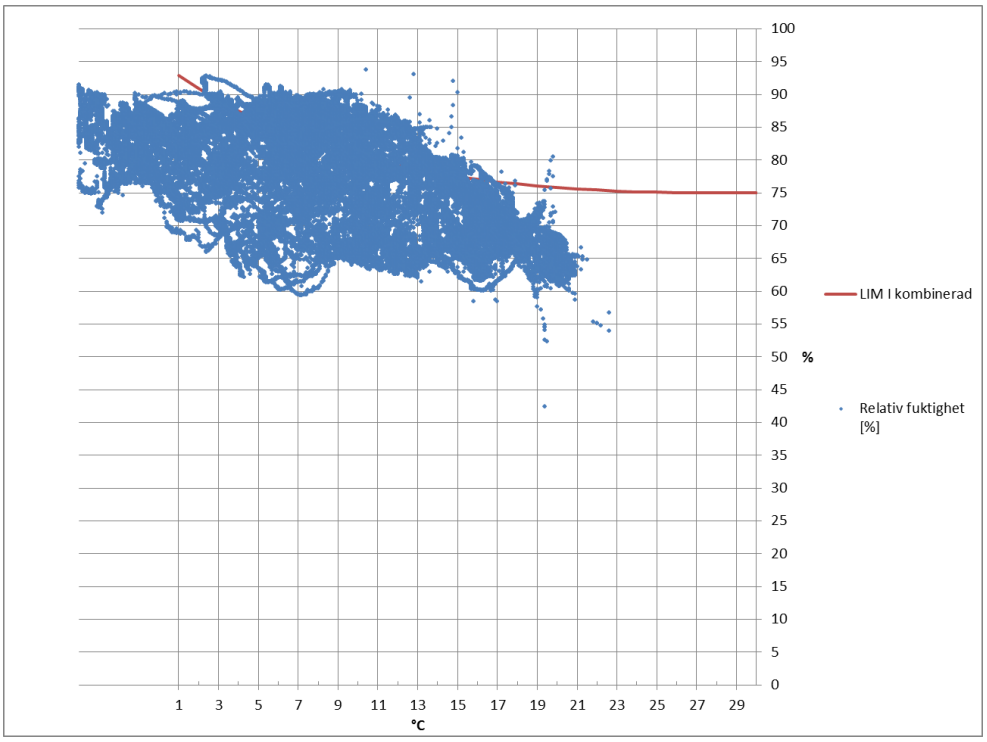
Grunduppvärmning av kyrkorummet sker ej. Det visar både sensorn bakom altartavlan och sensor e2245, placerad under en bänk. Temperaturen varierar mycket under året och går ibland under fryspunkten under vintern. Intermittent uppvärmning sker vid förrättningar då temperaturen stiger till 15-17°C. Två stycken avfuktare finns sedan flera år tillbaka och används under vår till höst. Den relativa fuktigheten under bänken överskrider gränsvärdeskurvan endast vid ett fåtal tillfällen under ett år.

Klimatet på vinden har stor variation under året. Generellt är det varmt och torrt under sommarhalvåret och kallt och fuktigare under vinterhalvåret. Gränsvärdeskurvan överskrids periodvis under senhösten (Figur 37).

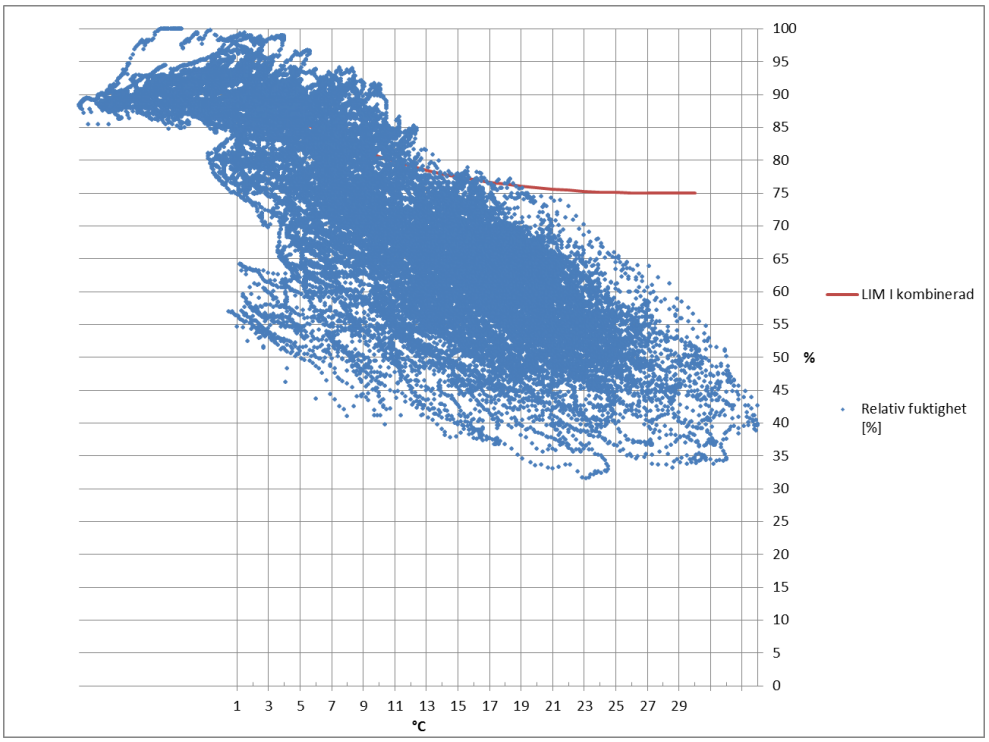
De ouppvärmda trapphusen har problem med saltutfällning på yttermurarna sedan lång tid tillbaka.



Figur 35 Sensor e2247 i krypgrunden. Mätvärden för perioden 2011-07-21 till 2014-01-12.



Figur 36 Sensor e2243 bakom altaruppsatsen. Mätvärden för perioden 2011-07-21 till 2013-12-14.



Figur 37 Sensor e2250 på vinden. Mätvärden för perioden 2011-07-21 till 2013-01-22.

Förslag till åtgärder

Utred närmare vad som orsakar den kontinuerligt höga relativa fuktigheten i krypgrunden. Behöver dräneringen runt kyrkan förbättras? Nuvarande arrangemang med stenkista tros vara från 1950-talet. Undersök möjligheten att placera avfuktare i krypgrunden, som kan styras med befintliga CultureBee-sensorer. Marken bör då täckas med plast för att minska fuktdiffusionen från marken.

6.7 Svanshals kyrka

Beskrivning av byggnaden

Svanshals kyrka har sitt ursprung från 1100-talet, men dess nuvarande utseende kom till 1842-1845. Kyrkan har en murverksstomme av sten. Både utsidan och insidan är putsad, väggarna renoverades under 2011. Innertaket är ett tunnvalv och putsat likt väggarna. Takkonstruktionen är av trä och ovanpå innertaket ligger äldre isolering med skyddspapp överst.

Fönstren i kyrkan består av 1+1-glasfönster, där det inre glaset är blyinfattat. Fönsterkarmar är av trä. Fönstren i kyrkorummet har storleken 150x360 cm, medan sakristians enda fönster mäter 120x150 cm.

Kyrkan är grundlagd enligt krypgrundsprincipen, dock är utrymmet inte krypbart. Utvändig dränering saknas. I golvet nära vapenhuset finns två gravstenar, som ofta har varit fuktiga på ytan av kondensvatten.

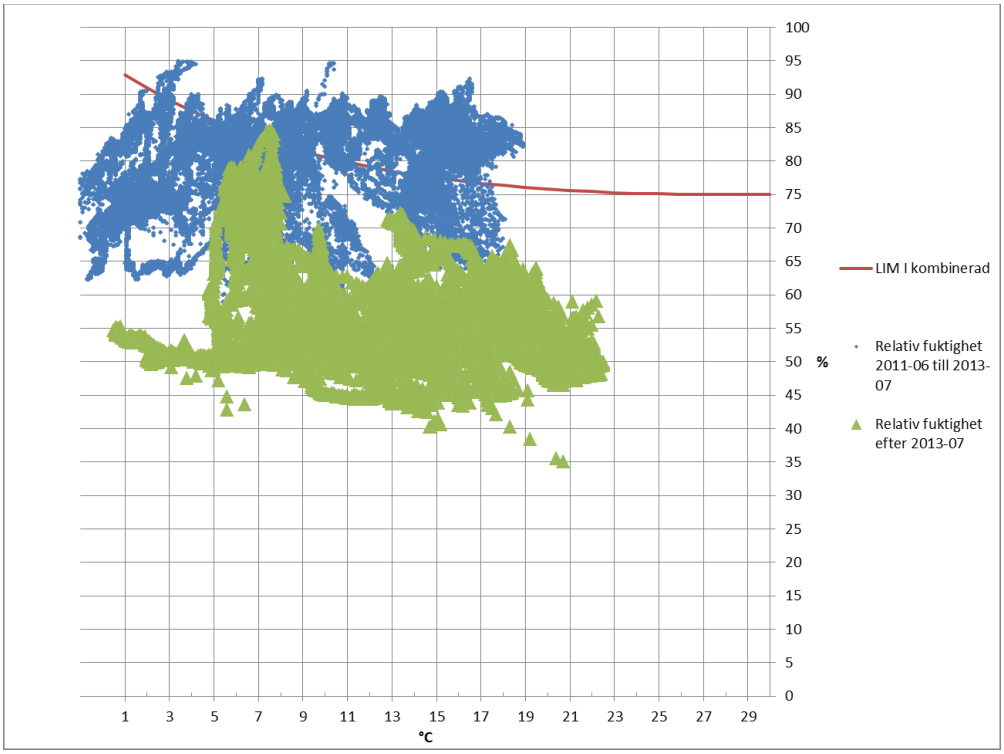
Långhusets sadeltak är spånklätt medan sakristians tak och lanterninen är klädd med svartmålad, galvaniserad plåt.

Uppvärmning sker med direktverkande elradiatorer i bänkar och på väggar. Ventilation saknas, utöver självdrag genom otätheter i byggnaden.

Uppföljning av inneklimatet

Kyrkan används för förrättning omkring 10 gånger per år med tyngdpunkt under sommarsäsongen. Under vintern är kyrkan vanligen kallställd, med undantag av gudstjänst vid första advent.

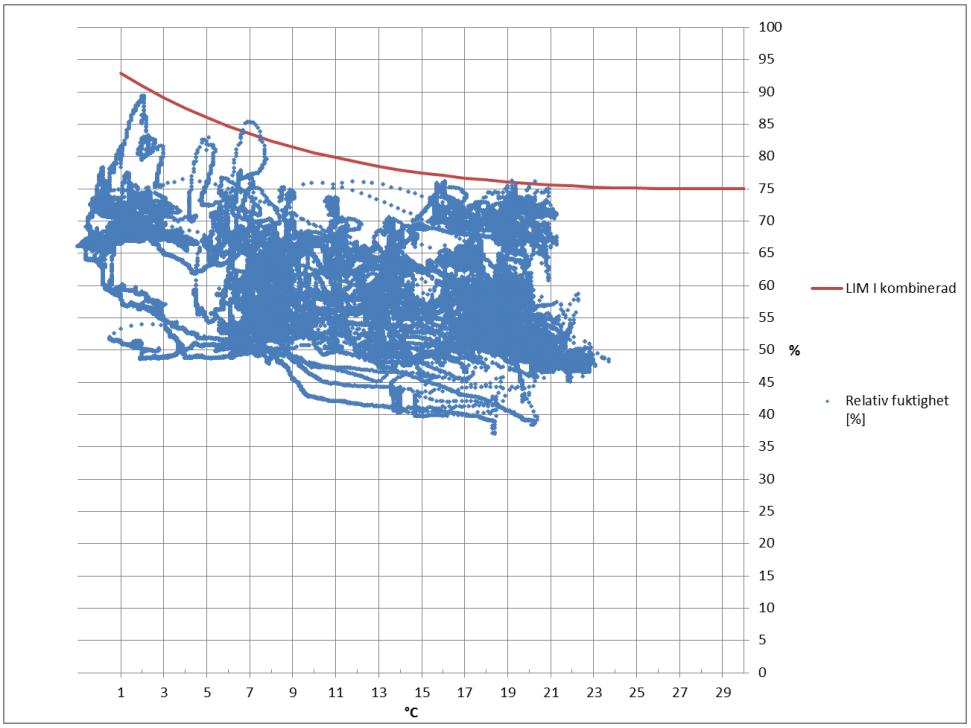
Sänkningen av RF som visas i Figur 38 kopplas till att en avfuktare har installerats. Tidigare har kondensutfällning skett på stengolvet, vilket var främsta skälet till att avfuktaren installerades. Tömning av avfuktaren sköts av personer från sockenrådet, vilka öppnar och stänger kyrkan varje dag.



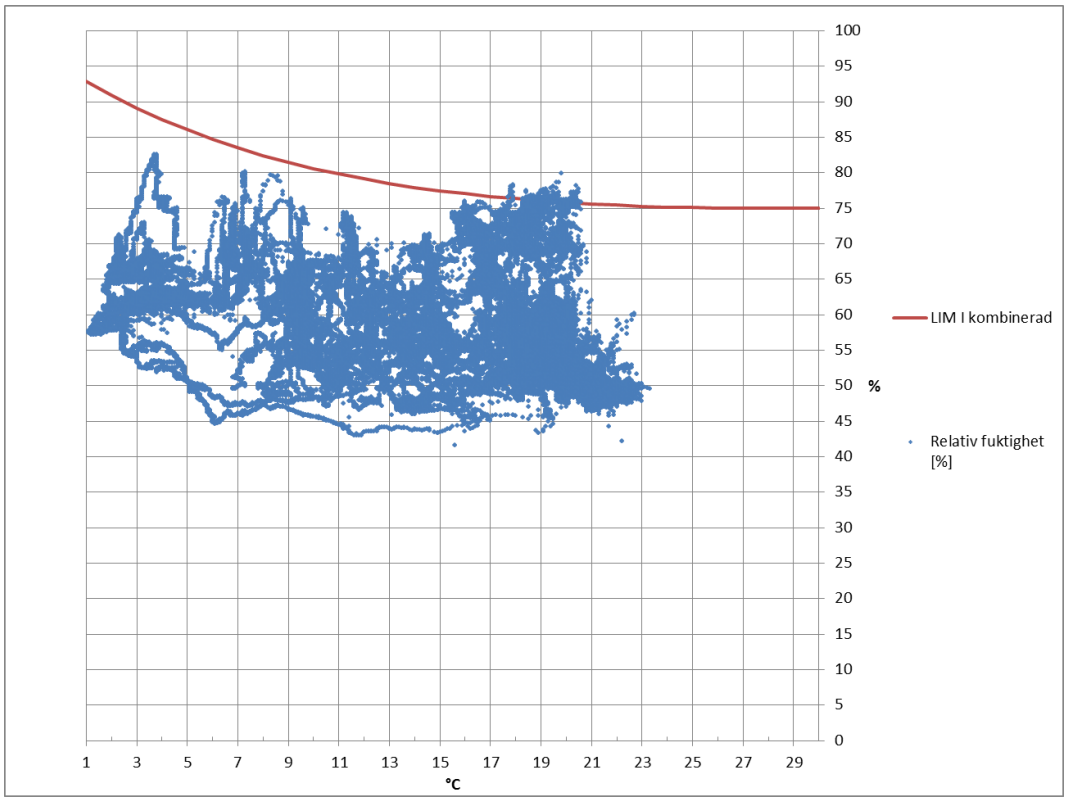
Figur 38 Sensor e2018 på golvet bakom sista bänken. Mätvärden för perioden 2011-06-20 till 2014-03-30.

Vid provtagning under MIOC-projektet hittades mögelpåväxt av Aspergillus sp. i orgeln. Orgeln är nyrenoverad och sanerad från mögel. Den relativa fuktigheten var

inte anmärkningsvärd hög den gången och det gäller fortfarande. RF har legat under LIM-kurvan i princip hela mätperioden, se Figur 39. Dock anses den aktuella arten av Aspergillus kunna klara RF ner till 60 %. RF visar en nedåtgående trend under mätperioden, vilket är positivt ur det här hänseendet. Detsamma gäller vid sensor e2015 bakom altaret.



Figur 39 Sensor e2019 i orgel. Mätvärden för perioden 2011-06-20 till 2014-03-30.



Figur 40 Sensor e2015 bakom altaret. Mätvärden för perioden 2011-06-20 till 2013-12-09.

Förslag till åtgärder

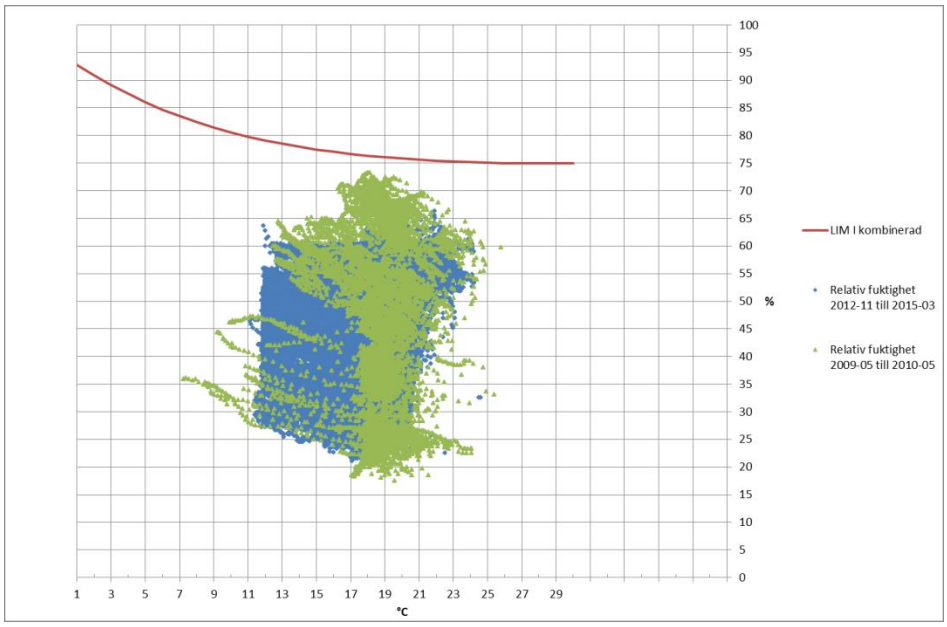
Fukttillståndet i orgeln bör följas upp kontinuerligt. Tidigare mögelskada har inträffat utan tydliga indikationer på kritisk fuktnivå från sensor e2019. Den mögelart ur Aspergillus-familjen som tidigare hittades anses kunna klara RF ner till 60 %. Det kan finnas gott om mikroklimat i en orgel och möjligen kan man testa att flytta sensorn till andra punkter i orgeln under en tid för hitta den mest kritiska punkten att styra efter.

Den kondensavfuktare som används kräver manuell tömning av kondensvattentanken. Det är viktigt att det finns en fungerande rutin för detta för att inte äventyra fuktsäkerheten. Ett altenativ vore att leda ut kondensvattnet utanför byggnaden via ett rör, men då blir installationen mindre flexibel.

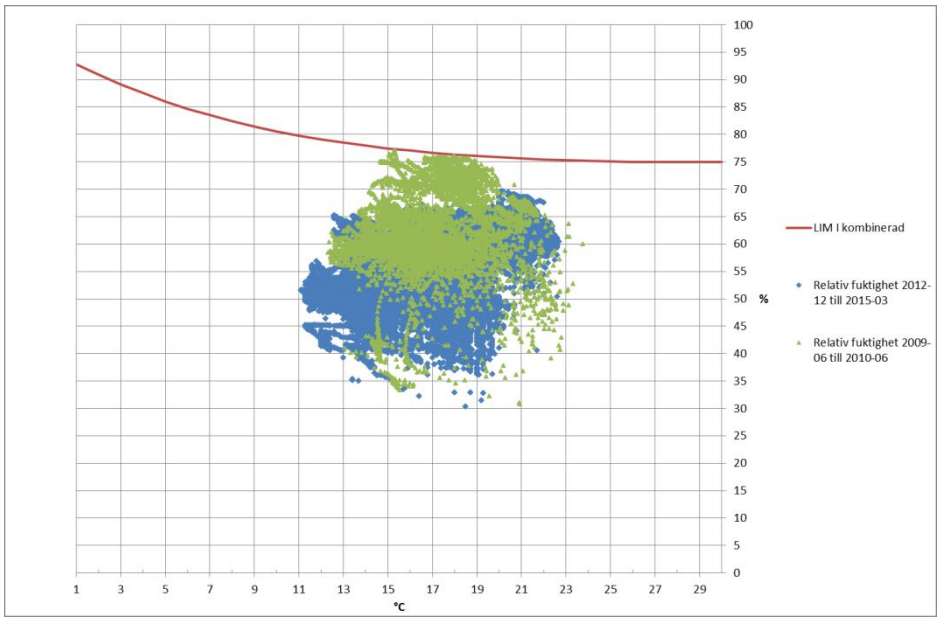
7 Uppföljning av kyrkor med styrsystem från JEFF

I samband med projektets uppstart visade det sig att antalet kyrkor som fortfarande aktivt använde CultureBee-systemet var färre än väntat. För att öka underlaget av kyrkor med styrning- och loggningssystem har mätdata från tolv kyrkor i Göteborgs stift funnits tillgängliga, varav fem har inkluderats i uppföljningen. Kyrkorna har inte inventerats på plats i det här projektet. De tolv kyrkorna är idag utrustade med systemet CC Kyrka från JEFF Electronics. De har tidigare (2009-2011) ingått i ett klimatprojekt inom stiftet [27], där temperatur och relativ fuktighet i kyrkorummet registrerades med dataloggers.

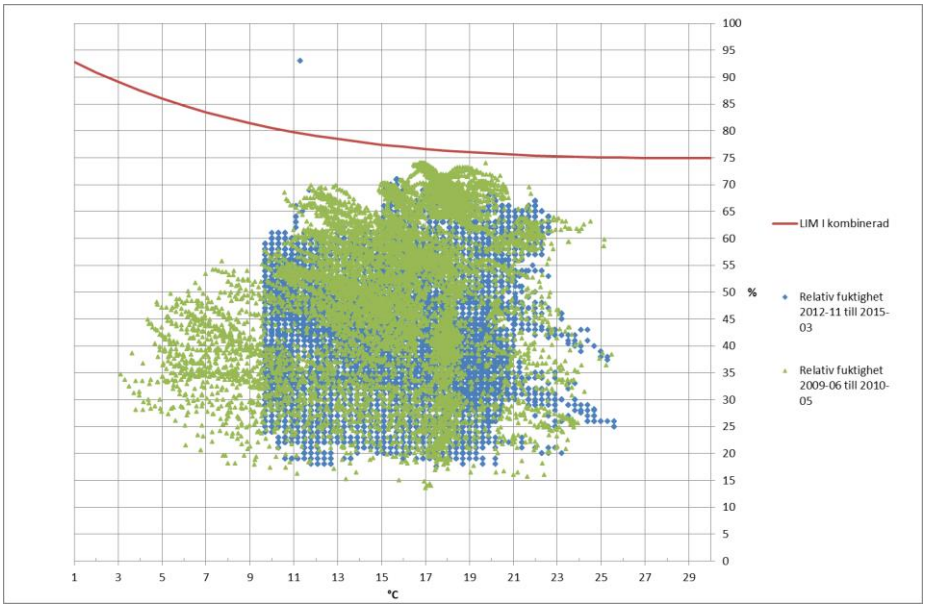
Generellt kan sägas att styrningen av inneklimatet är påtaglig i alla kyrkorna, när fukt- och temperaturdiagrammen analyseras. Framförallt efter det att CC Kyrka har installerats, men i många fall även innan dess. LIM-kurvan överskrids mycket sällan inne kyrkan. Några exempel från kyrkorummen visas i Figur 41, Figur 42 och Figur 43. Innetemperatur och relativ fuktighet varierar inom ganska väldefinierade intervall. Styrande övre värde för RF i JEFF-systemet är 65-70 %, vilket ger marginal till LIM-kurvan.



Figur 41 Mätvärden från kyrkorummet i Bollebygds kyrka från två olika sensorer. Värden från tiden 2009-05 till 2010-05 från Intab-logger i ljuskrona. Värden från 2012-11 och framåt från JEFF-sensor.

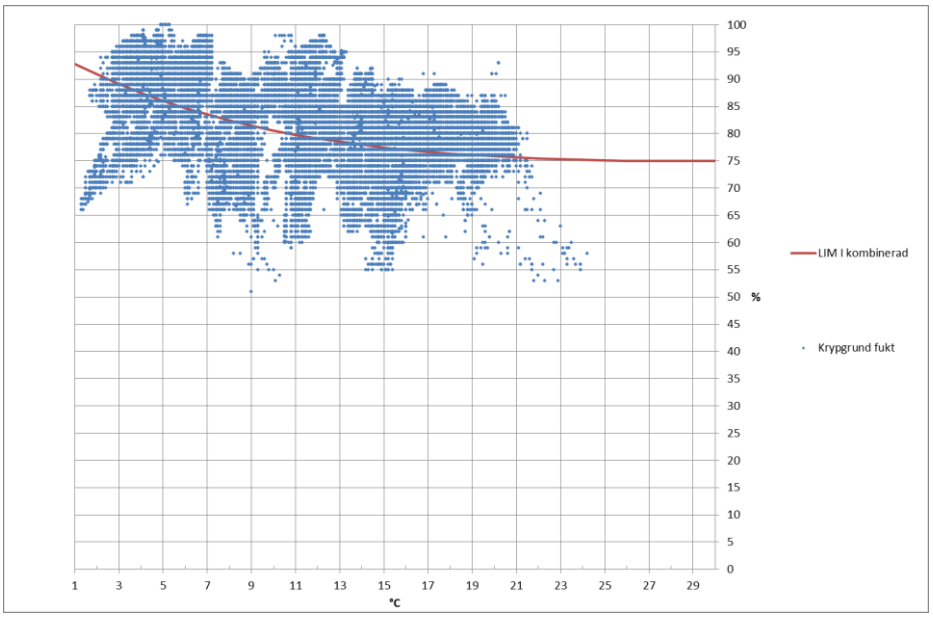


Figur 42 Mätvärden från kyrkorummet i Öxabäcks kyrka från två olika sensorer. Värden från tiden 2009-06 till 2010-06 från Intab-logger i ljuskrona. Värden från 2012-12 och framåt från JEFF-sensor.

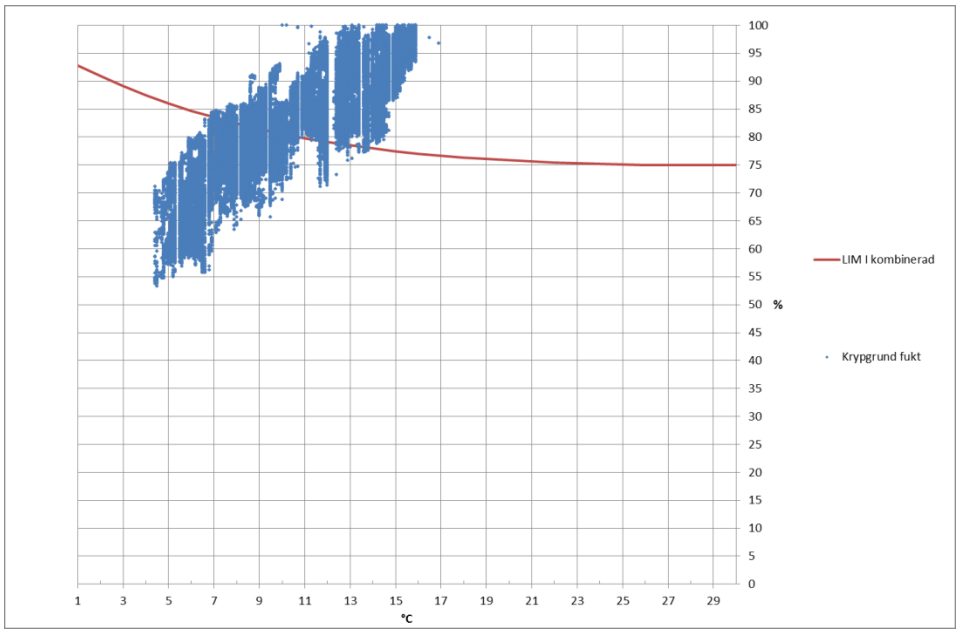


Figur 43 Mätvärden från kyrkorummet i Töllsjö kyrka från två olika sensorer. Värden från tiden 2009-06 till 2010-06 från Intab-logger i ljuskrona. Värden från 2012-11 och framåt från JEFF-sensor.

Fyra av de tolv kyrkorna har JEFF-sensorer i krypgrunden. De loggade värdena visar i samtliga fall att RF frekvent ligger ovanför den kritiska LIM-kurvan. Exempel i Figur 44 och Figur 45. RF-värdena i Olsfors kyrka ligger i samma intervall oavsett temperatur. RF i Öxabäcks krypgrund ökar med ökande utetemperatur på vår och försommar. Sambandet med uteluften är därmed tydligare i Öxabäck. Man bör utreda fuktkällorna och överväga åtgärder för att förbättra fukttillståndet i samtliga krypgrunder.



Figur 44 Mätvärden från krypgrunden i Olsfors kyrka. Värden från 2013-04 och framåt från JEFF-sensor.



Figur 45 Mätvärden från krypgrunden i Öxabäcks kyrka. Värden från 2012-12 och framåt från JEFF-sensor.

8 Resultat

Resultaten av intervjuer, platsbesök och analys av mätdata har visat att det finns stor potential i att använda styrsystem med sensorer för temperatur och relativ fuktighet för styrning av klimatet i kyrkor. Med ett sådant system kan temperatur och fuktighet styras efter förinställda fasta eller varierande börvärden. Styrsystemet har möjlighet att kontrollera både uppvärmningssystem och avfuktare med hjälp av sensorer utplacerade på strategiska ställen i byggnaden. Används dessa loggade data aktivt till ett styrsystem så går det att båda tjäna energi för uppvärmning, samt att samtidigt säkerställa ett bra inneklimat för såväl kyrkobesökaren, som byggnaden och de föremål som finns där. Projektresultatet är därför av stor vikt för alla kyrkor och visar på stor förbättringspotential för många kyrkor.

Styrning med CultureBee används tyvärr i väldigt liten omfattning idag i de kyrkor som har fått det installerat. Många har använt det för uppföljning av inneklimatet, men endast två kyrkor har kopplat det till värmesystemet eller avfuktare. I Tunabergs kyrka används CultureBee framförallt till att styra uppvärmningen efter kyrkans användningsmönster. Eftersom systemet är självlärande har detta lett till en påtaglig energibesparing jämfört med tidigare manuella styrning. Intervjuerna tyder på att det saknas information om CultureBee på kyrkvaktmästarnivå. Dels om att man kan styra värme och avfuktning med systemet och dels hur man i så fall använder det.

De studerade kyrkorna med styrsystemet CC Kyrka från JEFF Electronics visar att det går att hålla klimatet i kyrkorummet inom definierade intervall och under gränsvärdeskurvan för kritiskt hög fuktnivå. Fuktstyrning sker genom uppvärmning,

vilket gör att innetemperaturen stundtals blir hög. Avfuktare skulle förmodligen kunna användas med lägre energianvändning som följd.

Studier och erfarenheter från andra projekt pekar på att avfuktning i många fall är mer energieffektivt än uppvärmning som metod att undvika för hög RF. Det gäller särskilt i kyrkor som har låg grundvärme eller är intermittent uppvärmda och inte är ovanligt otäta.

Utvärderingen av mätdata från kyrkorna visar att inneklimatet i kyrkorummen oftast ligger på acceptabla nivåer, sett ur ett mikrobiologiskt perspektiv. I några fall har för hög relativ fuktighet förbättrats genom aktiva åtgärder i kyrkorummet. Däremot är risken för mögelproblem stor i de krypgrunder eller golv mot mark, som har undersökts. Detsamma gäller på många av vindarna. Det saknas ofta tekniska installationer och byggnadstekniska åtgärder som kan hjälpa till att kontrollera och förbättra fukttillståndet i de här utrymmena. Förutom att minska fukttillskottet genom till exempel förbättrad dränering eller minskad ventilation, kan avfuktare eller adaptiv ventilation användas för att sänka RF.

Övre gränsvärdet för RF för att undvika mögelproblem, utgörs här av en kombination av de lägsta gränsvärdeskurvorna för sporgrodd respektive myceltillväxt, framtagna av Klaus Sedlbauer [7]. Se Figur 16 på sidan 32. Fukttillståndet blir kritiskt när RF ligger ovanför LIM-kurvan för en given temperatur. Hur kritiskt tillståndet är handlar också om varaktighet. Ju högre RF är desto snabbare börjar mögelsporer att gro. För redan etablerat mögel ökar tillväxthastigheten med ökad RF. Här finns det anledning att studera varaktigheten vidare i till exempel krypgrunder och mikroklimat, för att se hur tiden för kritiska tillstånd påverkar förekomsten av mögel. Detta har inte rymts inom ramen för det här projektet, eftersom hanteringen av mätdata är omfattande.

Det skulle också vara intressant att gå vidare och utveckla parametrar för ett styrsystem, som tar hänsyn till såväl hög som låg RF samt för hastiga variationer däremellan. För låg RF kan leda till uttorkningsskador och problem med saltskador. Styrparametrar skulle kunna utvecklas för bästa kombinationen av värmesystem och avfuktning med avseende på bevarande och energieffektivitet.

9 Litteraturförteckning

[1] E. Bloom, P. Sandö, M. Erlandsson, K. Svennberg och S. Langer, ”MIOC - Mögel och påväxt i relation till inneklimat och byggnadsegenskaper - En studie av kyrkor i 12 stift i Sverige,” IVL Svenska Miljöinstitutet, 2013.

[2] ISO, *ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria,* ISO the international organisation for standardisation, 2005.

[3] SIS, *SS-EN 15759-1:2011 Bevarande av kulturarv - Specifikationer för styrning av inomhusklimat - Del 1: Riktlinjer för uppvärmning av kyrkor, kapell, och andra platser av sakral betydelse,* SIS, 2011.

[4] H. L. Schellen, ”Uppvärmning av kyrkor och dess effekt på interiören,” *Energi och Miljö,* nr 10, pp. 62-64, 2008.

[5] T. Broström, T. Vyhlidal, G. Simeunovic, P. Klenz Larsen och P. Zitek, ”Evaluation of different approaches of microclimate control in cultural heritage buildings, Climate for Collections Standards and Uncertainties 2013, Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012,” Munich, 2013.

[6] E. Vereecken och S. Roels, ”Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation,” *Building and Environment,* vol. 51, nr Maj 2012, pp. 296-310, 2012.

[7] K. Sedlbauer, ”Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components,” Dissertation Universität Stuttgart, 2001.

[8] H. Viitanen, ”Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden materials and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time.,” SLU, Uppsala, 1996.

[9] T. Ojanen, R. Peuhkuri, H. Viitanen, K. Lähdesmäki, J. Vinha och K. Salminen, ”Classification of material sensitivity - New approach for mould growth modeling,” i *Proceedings from the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011*, Tampere, 2011.

[10] L.-O. Nilsson, ”Kunskapsläge och råd kring fuktsäker projektering och tillämpning av fuktkrav i BBR för träkonstruktioner, Lägesrapport 2009, Woodbuild E1,” Lunds Tekniska Högskola, Byggnadsmaterial, Lund, 2009.

[11] E. Bloom, M. Ferm, M. Fjaestad, M. Haeger-Eugennsson, M. Liljeberg, A. Must, K. Svennberg och L. Tang, ”Mögel, organiska syror och kulturarv,” IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, 2010.

[12] SIS, *SS-EN 15757:2010, Bevarande av kulturarv - Specifikationer för temperatur och relativ fuktighet i syfte att förhindra mekaniska skador på organiska, hygroskopiska material,* SIS, 2010.

[13] SIS, *SS-EN 16242:2012, Bevarande av kulturarv - Metoder och instrument för att mäta relativ fuktighet i luft och fuktutbyte mellan luft och material,* SIS, 2012.

[14] L. Bratasz, ”Allowable microclimatic variations in museums and historical building: reviewing the guidelines, Climate for Collections Standards and Uncertainties 2013, Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November

2012," Munich, 2013.

[15] SIS, *SS-EN 15758:2010, Bevarande av kulturarv - Metoder och instrument för mätning av luft- och yttemperaturer,* SIS, 2010.

[16] D. Melander, T. Broström, E. Brokvist, M. Hård, L. Andrén och L. Bångens, Handbok i hållbar energianvändning för kyrkan, Andra reviderade utgåvan red., Stockholm: Verbum Förlag AB, 2008.

[17] L. E. Nevander och B. Elmarsson, FUKT handbok, praktik och teori, Andra, reviderade utgåvan red., AB Svensk Byggtjänst, 1994.

[18] ASHRAE, "ASHRAE Handbook,Heating, Ventilating, and Air-Conditioning SYSTEM AND EQUIPMENT," American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2008.

[19] FMV, "Avfuktningsteknisk handbok (ATH), M7786-010301," 2010.

[20] D. Camuffo, "The friendly heating projectand the conservation of the cultural heritage preserved in churches," 2010.

[21] A. Hagen Holm, F. Antretter, R. Kilian, F. Ritter och B. Wehle, "Controlled Ventilation of Historic Churches - Assessment of Impact on the Indoor Environment Via Hygrothermal Building Simulation: International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto - Portugal April 12th-15th 2011," 2011.

[22] M. Wessberg, P. Klenz Larsen och T. Broström, "10th Nordic Symposium on Building Physics, Solar energy augmented adaptive ventilation in historic buildings,," Lund, 2014.

[23] P. K. Larsen och T. Broström, Climate control in historic buildings, Uppsala universitet, Nationalmuseet National museum of Denmark, 2015.

[24] J. Bjurman, "Undvik mögel och spara energi genom fjärrstyrning och fjärrävervakning av inneklimatet i kyrkor," 2015.

[25] M. Sandberg, M. Mattson, A. Hayati och A. Sattari, "Energibesparing i kyrkor: Luftläckage-, nedsmutsnings-, och klimatmätningar," Högskolan i Gävle, 2014.

[26] Riksantikvarieämbetet, "Bebyggelseregistret," 2015. [Online]. Available: http://www.raa.se/hitta-information/bebyggelseregistret/. [Använd maj 2015].

[27] K.-A. Karlsson, N.-O. Sellin, H. Alnebratt, K. F. Sandblad och T. Broström, "Klimatprojekt för kyrkorna i Marks och Bollebygds kontrakt 2009-2011, Bollebygds pastorat," Svenska kyrkan, Göteborgs stift, 2011.

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60,100 31 Stockholm
Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90
www.ivl.se