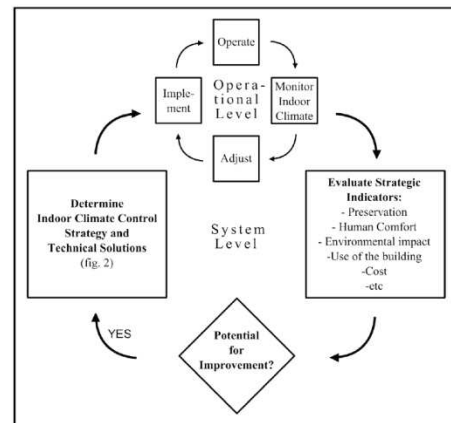
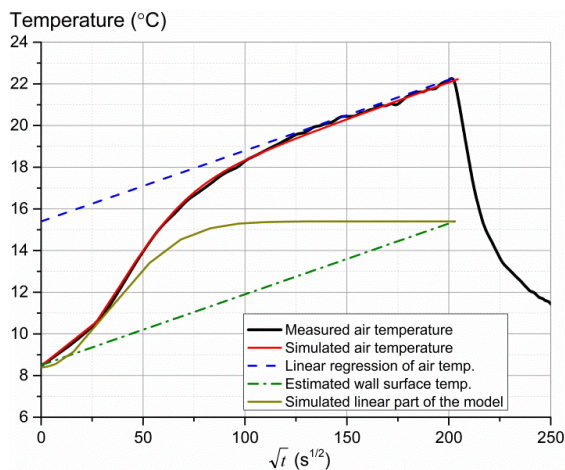




UPPSALA
UNIVERSITET

Energieffektivisering och förebyggande konservering genom klimatstyrning

Projekt nummer 41293-1 inom Energimyndighetens forskningsprogram Spara och bevara



Tor Broström

Gustaf Lejonhufvud

Magnus Wessberg

Inledning

Projektet *Energieffektivisering och förebyggande konservering genom klimatstyrning* startade redan i etapp I och II av Spara och bevara som ett tvärvetenskapligt samarbete mellan Uppsala Universitet (då Högskolan på Gotland), KTH samt Göteborgs universitet. Projektets övergripande syfte har varit att skapa kunskapsmässiga förutsättningar för att förena energisparande med ett skonsamt inneklimat i kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Nedan redovisas resultat från de två doktorsavhandlingar som blev det viktigaste utfallet av forskningen i etapp III av Spara och bevara.

Gustaf Leijonhufvud (2016): *Decision making on indoor climate control in historic buildings: knowledge, uncertainty and the science-practice gap.*

Magnus Wessberg (2019): *Indoor climate analysis and model based control of massive construction historic buildings.*

Övriga vetenskapliga artiklar och rapporter som producerats inom projektet redovisas sist i denna rapport.

Stödet från Energimyndigheten har gjort det möjligt för vår forskargrupp att under projekttiden ta en ledande roll i ett antal stora europeiska projekt varav de viktigaste är:

Climate for Culture (www.climateforculture.eu)

EFFESUS (www.effessus.eu)

HELTH (www.helthproject.eu)

Resultaten från dessa projekt redovisas under respektive hemsida.

Som ett resultat av det ovan nämnda samarbetet med Göteborgs universitet och KTH har ytterligare två doktorsavhandlingar publicerats:

Charlotta Bylund Melin: *Wooden objects in historic buildings – Effects of dynamic relative humidity and temperature.* Göteborgs universitet, 2018.

Torun Widström, *Simulation of historic buildings for enhancement of preservation and energy performance – issues and methods.* KTH 2019.

Författarna framför sitt tack till Energimyndigheten som möjliggjort detta och till våra handläggare Kenneth Asp, Marie Claesson och Jörgen Sjödin för gott samarbete.

Styrning av intermittent uppvärmning

1 Inledning

Ända sedan människan har byggt och använt byggnader har de varit intermittent uppvärmda med hjälp av lokala värmekällor såsom eldstäder eller spisar. Kyrkorna var däremot ofta helt ouppvärmda fram till 1800-talets slut. När värmesystem infördes i kyrkor var intermittent uppvärmning den övervägande uppvärmningsstrategin. Först användes kaminer och senare kom vattenburen oljeeldning eller elektriska värmesystem. Uppvärmningsprinciper som fortfarande används idag. Styrningen av intermittent uppvärmning är oftast enkel. Värmesystemet sätts på med full effekt ett antal timmar före användning och stängs sedan av direkt efter användning. I vissa byggnader används skyddsvärme (fuktstyrd värme) eller värme med en fast lägre temperatur mellan nyttjande men många byggnader står också helt kalla. I ett styrsystem för intermittent uppvärmning måste tre hänsyn tas:

- Komfort för besökare
- Bevarande av byggnaden och dess interiörer
- Energianvändning

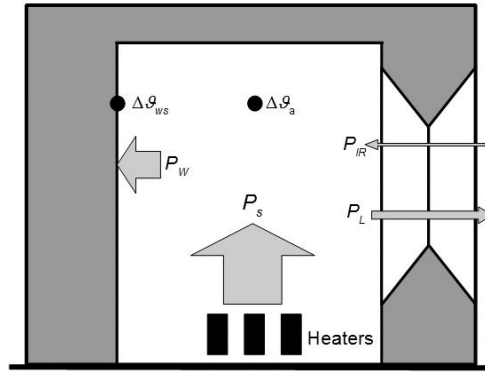
För att ge komfort för besökare och för att minimera både energianvändningen och skador på värdefulla föremål är uppvärmningstiden och värmeeffekten avgörande. Att sätta på värmen för tidigt leder till långa uppvärmningstider med onödiga energikostnader och ökad risk för skador på grund av uttorkning. Att sätta på värmen för sent leder till för låg komforttemperatur. I intermittent uppvärmda byggnader används som regel maximal värmeeffekt för att på så sätt minimera uppvärmningstiden och energianvändningen. Eftersom relativ fuktighet (RF) är starkt temperaturberoende är variationen i RF mycket stor vid varje uppvärmningstillfälle. Då temperaturen ökar hastigt minskar RF i samma takt. I byggnader med hygroskopiska material i väggarna, t.ex. putsade stenmurar, motverkas den stora förändringshastigheten i RF till viss utsträckning av fukt som frigörs från väggarna när temperaturen ökar. Detta är en komplex växelverkan som är specifik för varje byggnad och kan dessutom förändras under året.

Stora variationer i RF under korta perioder anses vara skadliga för hygroskopiska material, såsom trä, papper och färg på grund av de uppkomna fuktgradienterna i materialet. Till de mer känsliga föremålen räknas bemålat trä, som består av flera lager av olika material med olika hygroskopiska egenskaper som i sin tur rör sig olika när lagren tar upp eller släpper ut fukt. Kulturhistoriskt värdefulla byggnader, i synnerhet kyrkor, har ofta många sådana föremål, såsom altartavla, predikstol, målade kyrkbänkar och orgeln.

Som nämndes tidigare så styrs idag inte uppvärmningsförloppet alls utan värmen sätts ofta på och stängs av manuellt baserat på personalens arbetstid och erfarenhet. I vissa fall används tidsinställning eller fjärrstyrning. För att kunna styra uppvärmningsförloppet och sätta rätt uppvärmningstid behövs en modell över hur fukt- och värmeförloppet ser ut vid ett uppvärmningstillfälle.

2 Termisk modell för intermittent uppvärmning av en stenbyggnad

För att kunna styra klimatet vid intermittent uppvärmning krävs det en matematisk modell som beskriver uppvärmningsprocessen. Här nedan beskrivs hur en sådan modell kan tas fram. Figur 1 visar de huvudsakliga värmeflödena vid intermittent uppvärmning. Värmeflödet från värmekällan P_s är uppdelat i två huvudflöden. Den stora delen P_w värmer upp väggar, golv och interiörer via konvektion och strålning, medan den lilla delen P_L representerar förluster som består av infiltration och värmeledning. Värmestrålning P_{IR} från solen anses ha försumbar effekt på inomhustemperaturen under ett enskilt uppvärmningstillfälle. Värmebalansen kan då beskrivas enligt följande:



Figur 1. Värmeflöden vid intermittent uppvärmning. ϑ_{ws} är ytemperaturen på innerväggen ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_a är inomhustemperaturen ($^{\circ}\text{C}$), P_s värmeeffekten (W), P_{IR} är solinstrålningen (W), P_L förluster (W), and P_w värmeflödet in i väggen (W).

$$V_a \rho_a c_{pa} \frac{d\vartheta_a}{dt} = Ah(\vartheta_{ws} - \vartheta_a(t)) + P_s - P_L, \quad (1)$$

där t är tid, V_a är byggnadens (rummets) volym, ρ_a är luftens densitet, c_{pa} är luftens värmekapacitet, A är väggarean och h är värmeöverföringstalet. Vidare så är, ϑ_{ws} ytemperaturen på innerväggen och $\vartheta_a(t)$ är luftens inomhustemperatur.

Eftersom byggnadens volym, väggarea samt värmeöverföringskoefficienten mellan luft och vägg inte kan eller kommer att bestämmas med hjälp av reella fysiska parametrar förenklas ekvationen till

$$T_1 \frac{d\Delta\vartheta_a}{dt} + \Delta\vartheta_a = \Delta\vartheta_{ws} + b_1 P_s, \quad (2)$$

där $\Delta\vartheta_a$ and $\Delta\vartheta_{ws}$ är ökningen av temperaturen från jämviktsläge

Tidskonstanten T_1 och den statiska förstärkningen b_1 i modellen (2) kan approximativt bestämmas från mätdata från ett stegsvar, vilket visas i kapitel 2.2. Det som är kvar att bestämma är innerväggens ytemperatur $\Delta\vartheta_{ws}$. Den kan bestämmas med en lösning till värmeledningsekvationen under antagande att det är konstant värmeflöde in i väggen och att väggen kan antas vara som oändligt tjock under uppvärmningstillfället (semiinfinitt) och slutligen att temperaturen är homogen i väggen alla delar i början på uppvärmningstillfället. I detta fall räcker det att lösa ekvationen i en dimension.

Standardlösningen av värmeledningsekvationen givet villkoren ovan ger temperaturökningen $\Delta\vartheta_{ws}$ vid väggens insida ($x = 0$) från tid $t = 0$ ger:

$$\Delta\vartheta_{ws} = \frac{P_w}{A} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_w c_w \rho_w}} \cdot \sqrt{t}, \quad (3)$$

Där $P_w(W)$ är värmeflödet in i väggen, λ_w, c_w, ρ_w är materialkonstanter för väggen. Igen, eftersom det ofta inte är möjligt att bestämma väggens material med minder än att den rivs, förenklas ekvation (3) till

$$\Delta\vartheta_{ws} = a_1 P_s \sqrt{t}. \quad (4)$$

Där $a_1 = \frac{F}{A} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_w c_w \rho_w}}$ dvs ersätter materialkonstanterna och dessutom inkluderar en konstant F som är andelen av det avgivna värmeflödet som går in i väggen. Även konstanten a_1 kan bestämmas med hjälp av mätdata. Se vidare kapitel 2.2.

2.1 Approximativ modell för lufttemperatur

Den kompletta modellen för lufttemperaturen fås genom att substituera ekvation (4) in i ekvation (2).

$$T_1 \frac{d\Delta\vartheta_a(t)}{dt} + \Delta\vartheta_a(t) = a_1 P_s \sqrt{t} + b_1 P_s. \quad (5)$$

Vid intermitterent uppvärmning är det vanliga förfarandet att värmeeffekten slås på som ett steg. Matematiskt så säger man att man ger ett steg i tillförd värmeeffekt och temperaturökningen i rummet blir stegsvaret. Stegsvaret för ekvation (5) för ett steg i tillförd värmeeffekt P_s blir

$$\Delta\vartheta_a = P_s \left(a_1 \left(\sqrt{t} - \sqrt{T_1} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfi} \left(\sqrt{t/T_1} \right) e^{-t/T_1} \right) + b_1 \left(1 - e^{-t/T_1} \right) \right), \quad (6)$$

där $\operatorname{erfi}(z)$ är den imaginära felfunktionen (imaginary error function) och produkten $\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \operatorname{erfi} \left(\sqrt{t/T_1} \right) \cdot e^{-t/T_1}$ brukar anges som Dawsons integral.

2.2 Parameteridentifikation från mätdata

Stegsvaret dvs. ekvation (6) ser vid ett första påseende väldigt komplicerat ut men består egentligen bara av tre okända parametrar, a_1 , b_1 och T_1 . Parametrar a_1 och b_1 kan bestämmas relativt enkelt genom linjär regresion av den senare delen av stegsvaret där effekten av tidskonstanten har klingat av till ett närmast försumbart bidrag och där stegsvaret är approximativt linjärt med roten ur tiden, dvs.

$$\Delta\vartheta_a = P_s (a_1 \sqrt{t} + b_1) \quad (7)$$

Från den framtagna linjens ekvation kan parametrar a_1 och b_1 härledas med följande ekvationer:

$$a_1 = \frac{K_1}{P_s}, \quad (8)$$

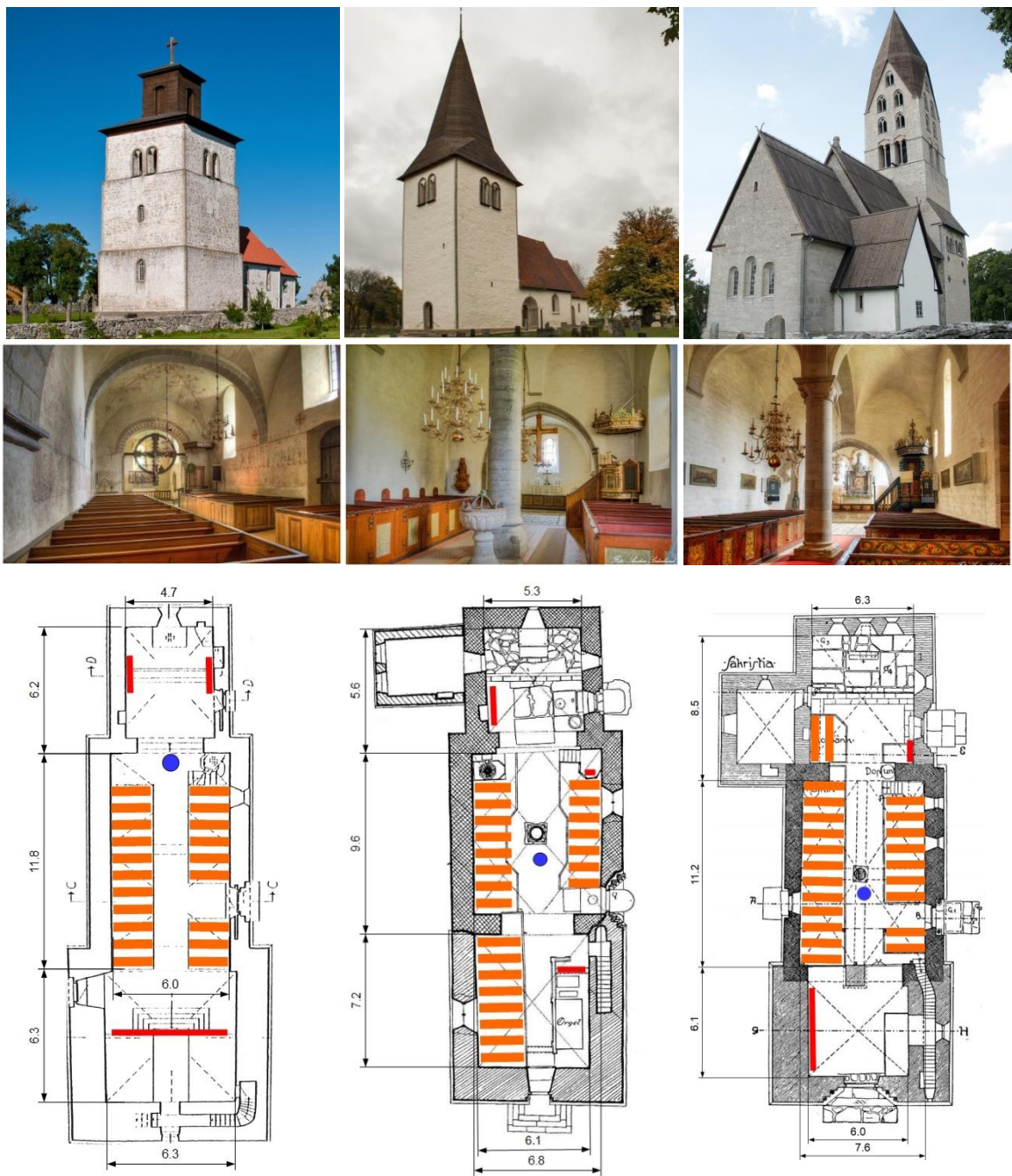
$$b_1 = \frac{(\vartheta_{a0} - \vartheta_{a0})}{P_s}, \quad (9)$$

där K_1 är lutningen av den framtagna linjens ekvation plottad mot roten ur tiden ($\sqrt{t}$), och ϑ_{ar0} är skärningen med temperaturaxeln för samma linje. ϑ_{a0} är temperaturen vid uppvärmningstillfallets början.

Tidskonstanten T_1 kan integreras fram med s.k. signalintegration av ekvation (5) men T_1 kan även skattas genom att helt enkelt studera stegsvaret och ta tiden där effekten av tidskonstanten klingat av och sedan dela den tiden med 5 eftersom effekten av tidskonstanter klingar av vid $5T_1$

2.3 Identifikation av modellparametrar i tre kyrkor

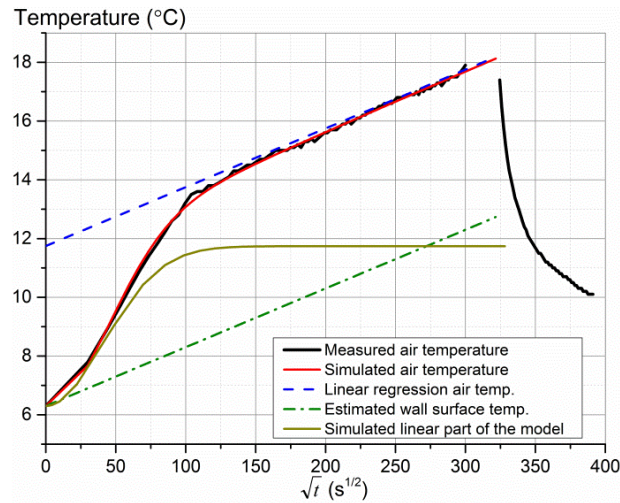
Tre praktiska test har genomförts i tre olika kyrkor. Se figur 3-5. Det framgår tydligt att alla tre svaren stämmer väldigt bra överens med det teoretiska antagandet som beskrivits ovan. Den första delen i stegsvaret följs av den delen som är proportionell mot roten ur tiden. Den ackumulativa delen är cirka tre timmar för alla tre kyrkorna. Det övre blå streckade linjen i figurerna motsvarar den linjära ekvation som tagits fram med linjär regresion på den senare delen av stegsvaret, där dynamiken med tidskonstant T_1 har mycket liten inverkan. Från regressionslinjen har lutningen K_1 och skärningen ϑ_{ar0} med temperaturaxeln bestämts. Parametrarna a_1 och b_1 har beräknats med ekvation (8) respektive (9). De identifierade parametervärden från de tre kyrkorna ges i tabell 1. Som förväntat skiljer sig tidskonstanterna inte väsentligt från varandra på grund av att volymen är liknande i alla tre kyrkorna. Skillnaderna beror förmodligen på skillnader i värmeöverföringskoefficienter och materialkonstanter.



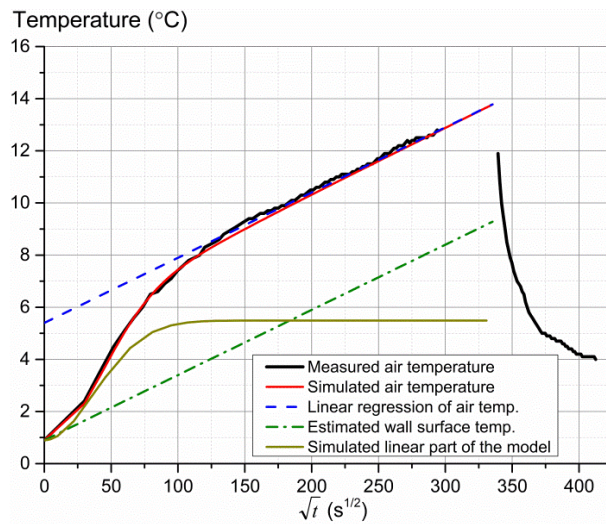
Figur 2. (vänster) Fide kyrka, (mitten) Hangvar kyrka, and (höger) Tingstäde kyrka. (Foto Anders Söderlund). Den blå punkten visar var mätutrustningen var placerad i respektive kyrka. De orangefärgade fälten visar bänkvärmen och de röda fälten visar radiatorers placering.

	ϑ_{a0} (°C)	ϑ_{ar0} (°C)	K_1 (°C/s ^{1/2})	P_s (kW)	a_1 (°C/kW/s ^{1/2})	b_1 (°C/kW)	T_1 (s)
Fide kyrka	6,3	11,8	0,020	32	$5,7 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-1}$	3400
Hangvar kyrka	0,9	5,4	0,025	27	$9,3 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-1}$	2800
Tingstäde kyrka	8,4	15,4	0,034	50	$6,6 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-1}$	2250

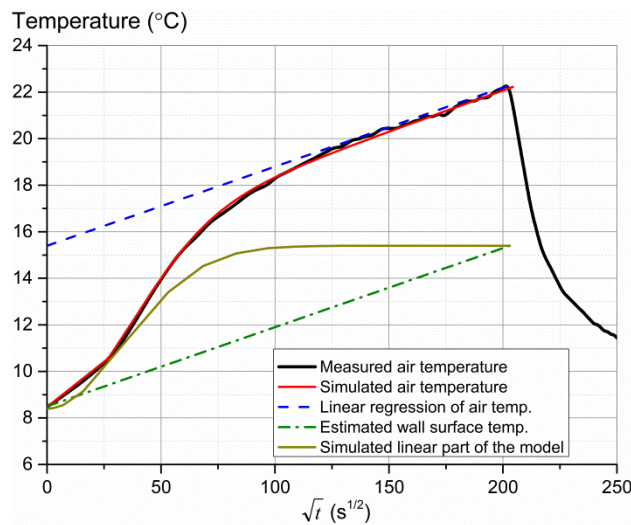
Tabell 1. Parametrar framtagna från stegsvar, se Figurer 3, 4, and 5.



Figur 3. Uppvärmning av Fide kyrka: mätt stegsvar jämfört med stegsvar simulerat med modell (6).



Figur 4. Uppvärmning av Hangvar kyrka: mätt stegsvar jämfört med stegsvar simulerat med modell (6).



Figur 5. Uppvärmning av Tingstäde kyrka: mätt stegsvar jämfört med stegsvar simulerat med modell (6).

Trots att det bara är tre parametrar i den förenklade modellen ger modellen mycket god överensstämmelse med mätdata. Parametern a_1 är en materialspecifik konstant, men det kan

förändras under året beroende på väggens fukttinnehåll. Den statiska förstärkningen b_1 innefattar värmeöverföringskoefficienten och är därför temperaturberoende. Stegsvartester, som genomförts under olika årstider i olika kyrkor, visade dock att variationerna i dessa parametrar är relativt små och påverkad inte mycket av säsongsmässiga förändringar.

2.4 Förenklad modell för att estimerar uppvärmningstid

Lufttemperaturen i slutet av uppvärmningsperioden som funktion av tid är relevant för praktiska beräkningar. Tidskonstanten har inverkan endast vid den första delen av uppvärmningen, men vid den slutliga temperaturen är dess påverkan endast några tiondelar av en grad Celsius. Om uppvärmningstiden är större än fem tidskonstanter ($5T_1$) och konstanterna a_1 och b_1 är kända från stegresponsetestet kan sluttemperaturen approximeras med följande förenklade ekvation:

$$\vartheta_{af} - \vartheta_{a0} = P_s(a_1\sqrt{t_f} + b_1), \quad (10)$$

Där ϑ_{af} är önskad temperatur efter t_f sekunder. Genom att lösa ut tiden t_f ur ekvation (18) kan uppvärmningstiden approximativt beräknas med

$$t_f = \left(\frac{\vartheta_{af} - \vartheta_{a0} - P_s b_1}{P_s a_1} \right)^2, \quad (11)$$

Vilket gör det möjligt för personal som hanterar värmesystemet i byggnaden att beräkna när värmen skall slås på för att uppnå en viss temperatur. Genom att lösa ut P_s ur ekvation (18) kan erforderlig effekt för att nå önskad temperatur på tiden t_f beräknas.

$$P_r = \frac{\vartheta_{af} - \vartheta_{a0}}{a_1\sqrt{t_f} + b_1}, \quad (12)$$

3 Fuktmmodell för intermittent uppvärmning av en stenbyggnad

Under ett uppvärmningstillfälle ökar fukttinnehållet i inomhusluften med temperaturökningen, eftersom fukt avdunstar från innerväggar och inredning. Massbalansen under ett uppvärmningstillfälle ges av

$$K_a A(x_w(t) - x_a(t)) = \rho_a V_a \frac{dx_a}{dt} + n\rho_a V_a(x_a(t) - x_{out}(t)), \quad (13)$$

där K_a är förångningskonstanten, A är det effektiva väggarean från vilken fukt avdunstar (inklusive golv, tak och inredning), x_w är ångkvoten (mixing ratio MR) vid väggytan, x_a är MR för inomhusluften, ρ_a är luftens densitet, n är luftomsättningen. V_a är volymen av inomhusluften och x_{out} är MR för utomhusluften. Stora variationer i MR i utomhusluften påverkar fuktigheten inuti om infiltrationen är stor men under en enda uppvärmningstillfälle är emellertid dessa variationer vanligen inte tillräckligt stora för att påverka fukttinnehållet i inomhusluften avsevärt. Således kan x_{out} betraktas som en konstant. Ekvation (13) kan följaktligen förenklas till

$$T_2 \frac{d\Delta x_a(t)}{dt} + \Delta x_a(t) = C_1 \Delta x_w(t), \quad (14)$$

där

$$T_2 = \frac{\rho_a V_a}{K_a A + n\rho_a V_a}, \quad (15)$$

och

$$C_1 = \frac{1}{1+n\frac{\rho_a V_a}{K_a A}}. \quad (16)$$

Vidare antas det att på grund av kapillärverkan vid väggens inneryta är RF vid väggytan 100%. Därför antas MR vid väggytan endast vara beroende av väggytans temperatur. Eftersom väggytans temperatur vid det intermittenta uppvärmningsförfarandet är en funktion av kvadratroten av tiden, kan ekvationen (14) högerled approximeras enligt

$$C_1 \Delta x_w(t) = P_s (a_2 \sqrt{t} + b_2), \quad (17)$$

där a_2 and b_2 är konstanter. Uttrycket för luftens ångkvot blir då

$$T_2 \frac{d\Delta x_a(t)}{dt} + \Delta x_a(t) = P_s (a_2 \sqrt{t} + b_2), \quad (18)$$

Vilket har samma typ av lösning som för ett stegsvar i temperatur.

$$\Delta x_a = P_s \left(a_2 \left(\sqrt{t} - \sqrt{T_2} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfi} \left(\sqrt{t/T_2} \right) e^{-t/T_2} \right) + b_2 \left(1 - e^{-t/T_2} \right) \right). \quad (19)$$

För att bestämma parametrarna a_2 , b_2 och T_2 kan samma tillvägagångssätt som används för lufttemperatur appliceras, med hjälp av uppmätt data från ett stegsvarssprov som plottas mot kvadratroten ur tiden. En linjär regression utförs från den tidpunkt då tidskonstantens inverkan har klingat av till slutet av uppvärmningstiden. Från den regrerade linjen fås lutning K_2 och skärningspunkten x_{ar0} , erhålls parametrarna a_2 och b_2 enligt följande:

$$a_2 = \frac{K_2}{P_s}, \quad (20)$$

$$b_2 = \frac{(x_{ar0} - x_{a0})}{P_s}. \quad (21)$$

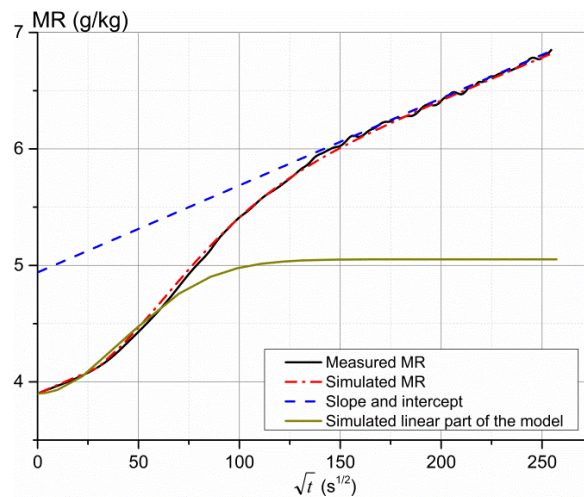
På samma sätt som för temperatur kan parameter T_2 bestämmas genom signalintegration av ekvation (18) men man kan också titta på kurvan och sätta $5T_2$ där effekten av tidskonstanten klingat av.

3.1 Identifikation av modellparametrar i tre kyrkor

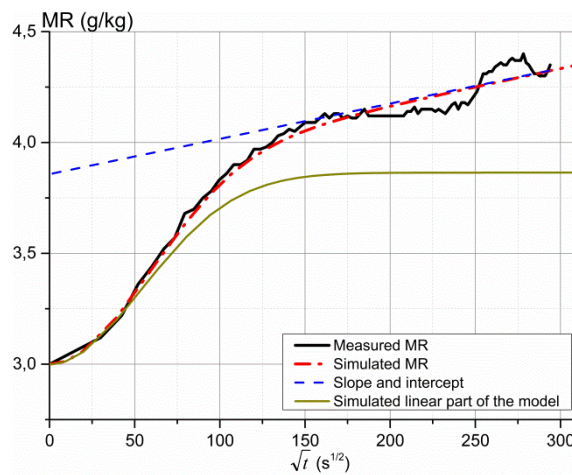
Identifieringsproceduren har testats på mätdata från de tre ovanstående kyrkorna. Se figur 2. Ångkvoten beräknas utifrån mätdata för relativ fuktighet och temperatur med Magnus-formeln (Magnus-Tetens). Beräknad ångkvot, dess lutning K_2 och skärning med ångaxeln x_{ai} visas i figurerna 9-11. De framtagna parametrarna anges i tabell 2. Som det framgår av simuleringsresultaten i figurerna 9-11 är modellen mycket bra för alla tre kyrkor. Observera att eftersom fuktförhållandena hos väggen sannolikt kommer att förändras under årstiderna, måste modellens hygrotermiska parametrar justeras under året.

	x_{a0} (g/kg)	x_{ai} (g/kg)	P_s (kW)	K_2 (g/kg/s ^{1/2})	a_2 (g/kg/kW/s ^{1/2})	b_2 (g/kg/kW)	T_2 (s)
Fide church	3,9	4,96	32	0,0072	230×10^{-6}	36×10^{-3}	3600
Hangvar church	3	3,87	27	0,0016	56×10^{-6}	32×10^{-3}	5900
Tingståde church	5,86	8,2	50	0,0135	270×10^{-6}	47×10^{-3}	3500

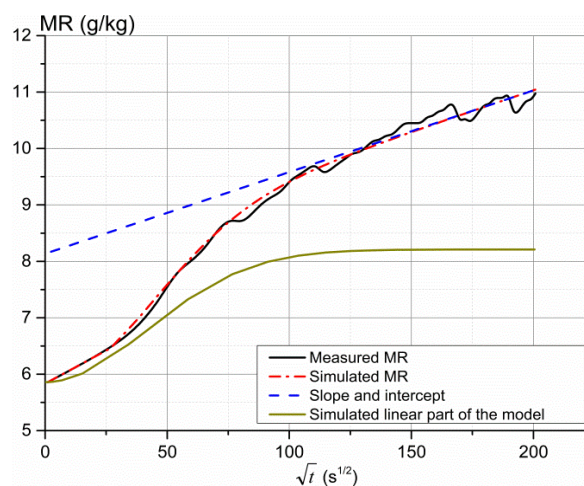
Tabell 2. Fuktmodellens parametrar framtaget från stegsvar.



Figur 9. Ångkvot beräknad från på mätdata jämförd med simulera ångkvot för inomhusluften i Fide kyrka, vid ett uppvärmningstillfälle. Parametrar från tabell 2.



Figur 10. Ångkvot beräknad från på mätdata jämförd med simulera ångkvot för inomhusluften i Fide kyrka, vid ett uppvärmningstillfälle. Parametrar från tabell 2.



Figur 11. Ångkvot beräknad från på mätdata jämförd med simulera ångkvot för inomhusluften i Fide kyrka, vid ett uppvärmningstillfälle. Parametrar från tabell 2.

4 RF kontroll

Målet med att härleda de approximativa hygrotermiska modellerna ovan är för att kunna optimera uppvärmningsperioden i intermittert uppvärmda massiva byggnader. En styrenhet för intermittert uppvärmning av en murverksbyggnad ska ha följande krav:

RF-förändring, regulatören bör justera värmeeffekten så att RF-ändringshastigheten inte överstiger ett angivet värde.

Energiförbrukning, ju längre värmen är på desto större värmeförluster får man. För att hålla energiförbrukningen låg bör värmen vara påslagen kortast möjliga tid innan byggnaden används och med så mycket effekt som RF-förändringskravet tillåter.

Komforttemperatur, den förutbestämda komforttemperaturen måste uppnås vid en viss given tidpunkt.

För att följa rekommendationerna för RF-varianter i interiörer av historiska byggnader ska RF-förändringsgraden vid början av uppvärmningsperioden begränsas. En rimlig RF-förändringshastighet är $\Delta\varphi_{a,s} = 2\%$ per timmer. (således den observerade tidsperioden $\Delta t = 1$ h). Andra värden för både RF-växlingshastighet och tidsperiod kan definieras.

Därefter bestäms en stegvis inställning av värmeeffekten i tidsintervallet $i\Delta t, i = 0,1,2 \dots$ som tillgodoser den givna maximala förändringshastigheten för RF per Δt .

Till att börja med kan ekvation (6) och (19) uttryckas på följande form:

$$\Delta\vartheta_a(t) = K_\vartheta(t)\Delta P_s, \quad (22)$$

$$\Delta x_a(t) = K_x(t)\Delta P_s, \quad (23)$$

där

$$K_\vartheta(t) = a_1 \left(\sqrt{t} - \sqrt{T_1} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfi} \left(\sqrt{\frac{t}{T_1}} \right) e^{-t/T_1} \right) + b_1 \left(1 - e^{-t/T_1} \right), \quad (24)$$

$$K_x(t) = a_2 \left(\sqrt{t} - \sqrt{T_2} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfi} \left(\sqrt{\frac{t}{T_2}} \right) e^{-t/T_2} \right) + b_2 \left(1 - e^{-t/T_2} \right). \quad (25)$$

för ett fast t , $K_\vartheta(t)$ och $K_x(t)$ är konstanta. Givet detta, blir uppgiften att bestämma ΔP_s vid $t = 0$ så att

$$\Delta\varphi_a(\Delta t) \leq \Delta\varphi_{a,s}. \quad (26)$$

Genom att använda den förenklade Magnus formeln för ångkvot (27), kan ändringar i $\Delta\vartheta_a$ and Δx_a transformeras till ändringar i $\Delta\varphi_a$.

$$x_a = 3.795 \times 10^{-5} \varphi_a 10^{\frac{a\vartheta_a}{b+\vartheta_a}}, \quad (27)$$

där $a = 7.65$ and $b = 243.12$ ($^{\circ}\text{C}$). Genom att lösa ut φ_a i ekvation (27), fås

$$\varphi_a = f_\varphi(x_a, \vartheta_a) = \frac{1}{3.795} \times 10^5 x_a 10^{-\frac{a\vartheta_a}{b+\vartheta_a}}. \quad (28)$$

Antag att variationerna i $\Delta\vartheta_a$ och Δx_a från jämviktsläget $\vartheta_{a,0}, x_{a,0}$ (som bestämmer $\varphi_{a,0}$) inom Δt är små, kan ekvation (28) linjäriseras till

$$\Delta\varphi_a = C_x(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})\Delta x_a + C_\vartheta(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})\Delta\vartheta_a, \quad (29)$$

där

$$C_x(\vartheta_{a,0}, x_{a,0}) = \left. \frac{\partial f_\varphi(x_a, \vartheta_a)}{\partial x_a} \right|_0 = \frac{1}{3.795} \times 10^5 \times 10^{-\frac{a\vartheta_{a,0}}{b+\vartheta_{a,0}}}, \quad (30)$$

$$C_\vartheta(\vartheta_{a,0}, x_{a,0}) = \left. \frac{\partial f_\varphi(x_a, \vartheta_a)}{\partial \vartheta_a} \right|_0 = -\frac{1}{3.795} \times 10^5 x_a 10^{-\frac{a\vartheta_{a,0}}{b+\vartheta_{a,0}}} \times \frac{ab}{(b+\vartheta_{a,0})^2} \ln(10). \quad (31)$$

Genom att substituera ekvation (22) och (23) i ekvation (29) och sätter $t = \Delta t$, fås

$$\Delta\varphi_a = C_x(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})K_x(\Delta t)\Delta P_{s,0} + C_\vartheta(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})K_\vartheta(\Delta t)\Delta P_{s,0}. \quad (32)$$

Värmeeffekten vid $t = 0$ för att uppnå maximalt tillåten RF $\Delta\varphi_{a,s}$ över tiden Δt kan bestämmas genom att lösa ut $\Delta P_{s,0}$ ur ekvation (42)

$$\Delta P_{s,0} = \frac{1}{C_x(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})K_x(\Delta t) + C_\vartheta(\vartheta_{a,0}, x_{a,0})K_\vartheta(\Delta t)} \Delta\varphi_{a,s}. \quad (33)$$

Ovanstående bestämning av värmeeffekten kan formaliseras i en algoritm

Algoritm 4.1 Bestämning av värmeeffektsteg $\Delta P_{s,i}$ vid $i - te$ steget

1. $x_a(t)$ och $\vartheta_a(t)$ vid $t = i \Delta t$ bestäms genom

$$\vartheta_{a,i} = \vartheta_{a,0} + \sum_{k=0}^{i-1} K_\vartheta((i-k)\Delta t)\Delta P_{s,k}, \quad (34)$$

$$x_{a,i} = x_{a,0} + \sum_{k=0}^{i-1} K_x((i-k)\Delta t)\Delta P_{s,k}, \quad (35)$$

Som ger RF värdet $\varphi_{a,i}(t) = f_\varphi(x_{a,i}, \vartheta_{a,i})$ genom ekvation (38).

2. $\bar{x}_a(t)$ och $\bar{\vartheta}_a(t)$ bestäms vid $t = (i+1)\Delta t$

$$\bar{\vartheta}_{a,i+1} = \vartheta_{a,0} + \sum_{k=0}^{i-1} K_\vartheta((i-k+1)\Delta t)\Delta P_{s,k}, \quad (36)$$

$$\bar{x}_{a,i+1} = x_{a,0} + \sum_{k=0}^{i-1} K_x((i-k+1)\Delta t)\Delta P_{s,k}, \quad (37)$$

Vilket ger RF värdet $\bar{\varphi}_{a,i+1}(t) = f_\varphi(\bar{x}_{a,i+1}, \bar{\vartheta}_{a,i+1})$ genom ekvation (38).

3. Maximal RF minskning ges av

$$\Delta\varphi_{a,r_i} = \Delta\varphi_{a,s} + (\varphi_{a,i} - \bar{\varphi}_{a,i+1}). \quad (38)$$

4. vid $t = i \Delta t$ maximal värmeeffekt ges av

$$\Delta P_{s,i} = \frac{1}{C_x(\vartheta_{a,i}, x_{a,i})K_x(\Delta t) + C_\vartheta(\vartheta_{a,i}, x_{a,i})K_\vartheta(\Delta t)} \Delta\varphi_{a,r_i}. \quad (39)$$

5. Om följande olikhet är uppfylld

$$\sum_{k=0}^i \Delta P_{s,k} \geq P_{s,m}, \quad (40)$$

Reduceras $\Delta P_{s,i}$ till $\Delta P_{s,i} = P_{s,m} - \sum_{k=0}^{i-1} \Delta P_{s,k}$ och algoritmen stoppas. Annars sätts $i = i + 1$ och algoritmen repeteras från steg 1.

Efter styrningen av värmeeffekten i början av uppvärmningsperioden är den sista uppgiften att uppskatta den totala uppvärmningstiden t_f för att nå temperaturen $\vartheta_{a,f}$. Med hjälp av superposition, dvs. att bidragen från varje effektsteg summeras ihop, kan tiden bestämmas som en lösning av följande icke-linjära ekvation:

$$\vartheta_{a,f} = \vartheta_{a,0} + \sum_{k=0}^i K_{\vartheta}(t_f - k \Delta t) \Delta P_{s,k}, \quad (41)$$

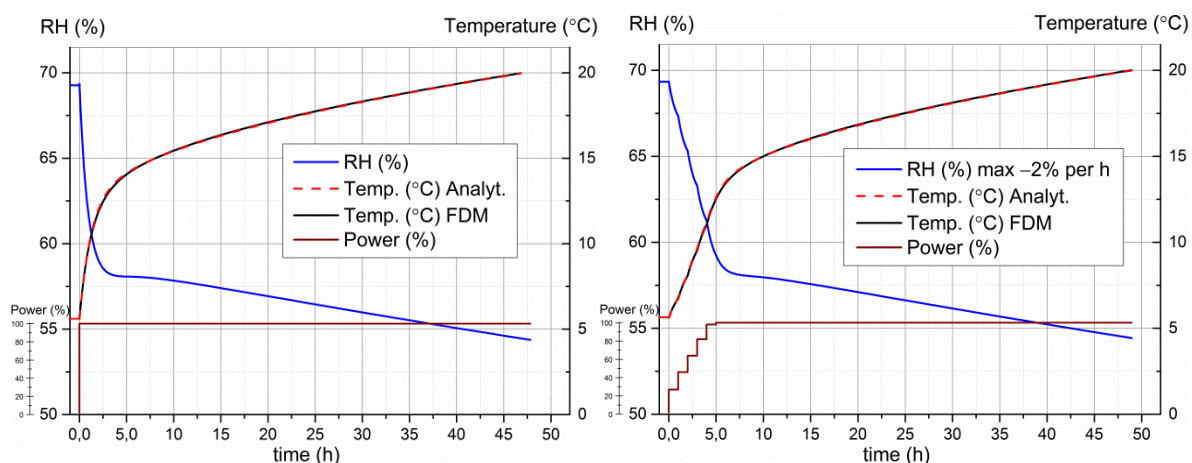
med $t_f > i \Delta t$. Ekvationen kan lösas med användning av en etablerad numerisk metod, såsom Newtons metod, men enklast är helt enkelt att stega fram tiden t_f från $t_0 = i_{max} \Delta t$ och simulera temperaturen tills sluttemperaturen $\vartheta_{a,f}$ uppnås. Det låter sig göras i t ex Excel. Med tanke på antagandet att uppvärmningstiden för varje steg är större än fem tidskonstanter, dvs $5T_1$, kan ekvation (41) förenklas avsevärt för formen

$$\vartheta_{a,f} = \vartheta_{a,0} + \sum_{k=0}^i (a_1 \sqrt{t_f - k \Delta t} + b_1) \Delta P_{s,k}. \quad (42)$$

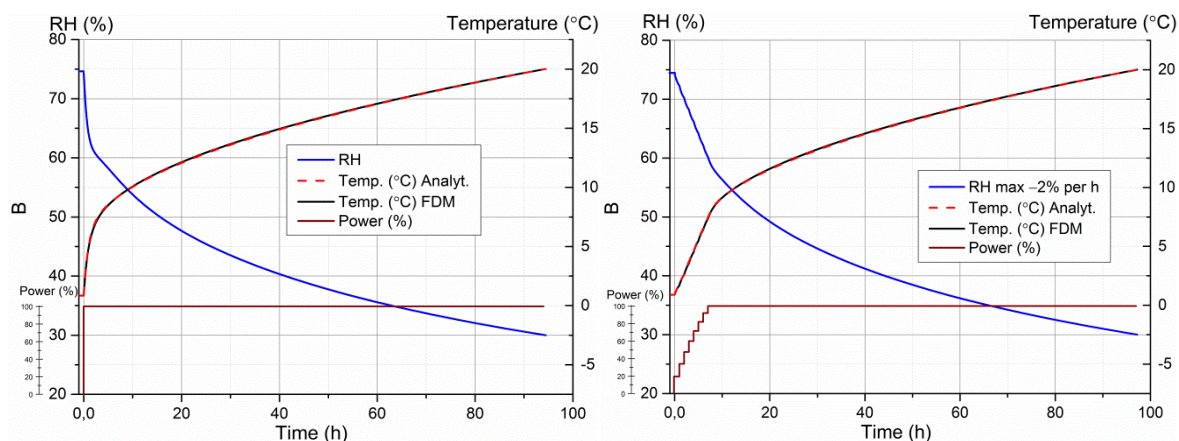
Ekvation (42) är fortfarande olinjär och en numerisk lösning behövs för att hitta t_f .

4.1 Simulation-based validation of the proposed indoor-climate control

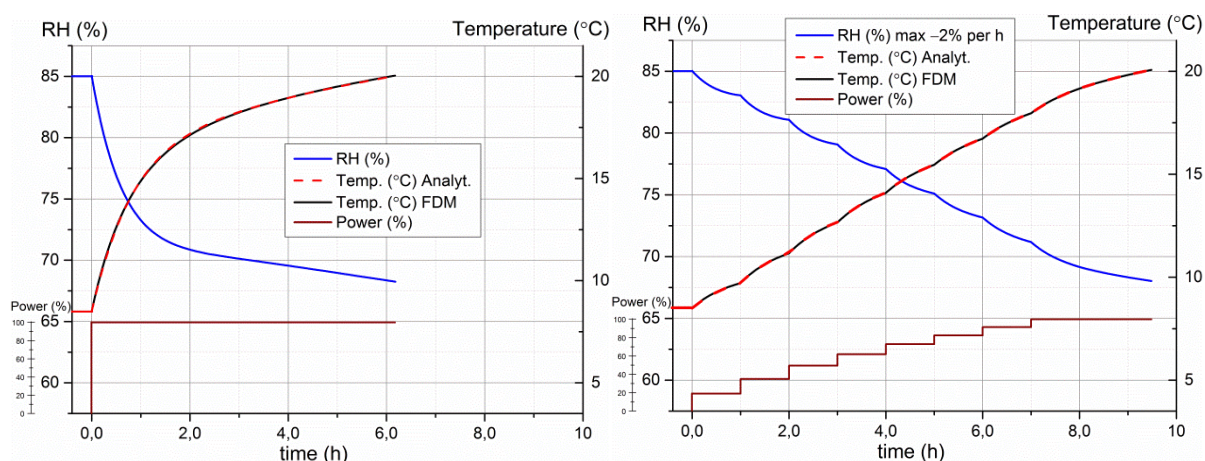
Algorithm 4.1 validerades genom simuleringar i de tre kyrkorna. Se figur 12–14. Måltemperatur för alla tre kyrkorna var $\vartheta_{a,f} = 20^\circ\text{C}$. Initialvärden för temperatur och RF var $\vartheta_{a,0} = 6^\circ\text{C}, \varphi_{a,0} = 69.5\%$ för Fide, $\vartheta_{a,0} = 1.3^\circ\text{C}, \varphi_{a,0} = 74.7\%$ för Hangvar, och $\vartheta_{a,0} = 8^\circ\text{C}, \varphi_{a,0} = 85\%$ för Tingstäde. Tiden för att uppnå $\vartheta_{a,f} = 20^\circ\text{C}$ var beräknad med ekvation (58) till $t_f = 47$ h för Fide, $t_f = 94$ h för Hangvar, and $t_f = 6,2$ h för Tingstäde. Det syns i figur 12-14 att ändringshastigheten för RF är hög i det högra grafen medan i den vänstra grafen som visar den stegvis styrda uppvärmningen håller sig ändringshastigheten för RF till $\Delta\varphi_{a,s} = 2\%$ per timme.



Figur 12. Fide kyrka: Simulering av uppvärmningstillfälle genom traditionell uppvärmning med full effekt (vänster) jämfört med stegad effekttökning bestämd med Algorithm 4.1. (höger) $i = 0, \dots, 5$. (Simuleringen utförd både med analytisk metod beskriven här och Finit Differens Metod, FDM).



Figur 13. Hangvar kyrka: Simulering av uppvärmningstillfälle genom traditionell uppvärmning med full effekt (vänster) jämfört med stegad effekttökning bestämd med Algoritm 4.1. (höger) $i = 0, \dots, 7$. (Simuleringen utförd både med analytisk metod beskriven här och Finit Differens Metod, FDM).



Figur 14. Tingstäde kyrka: Simulering av uppvärmningstillfälle genom traditionell uppvärmning med full effekt (vänster) jämfört med stegad effekttökning bestämd med Algoritm 4.1. (höger) $i = 0, \dots, 7$. (Simuleringen utförd både med analytisk metod beskriven här och Finit Differens Metod, FDM).

För att validera modellen har simuleringar även utförts med Finit differens metod, FDM. I Figur 12-14 kan man se att FDM-simulering av temperaturen (svart) är exakt samma som simulering med hjälp av den analytiska modellen (röd streckad)

5 Sammanfattning

Modellen och metoden presenterad i denna skrift möjliggör på ett helt nytt sätt styrning av intermittent uppvärmning. Modellen ger möjlighet att beräkna vid vilken tidpunkt värmesystemet skall sättas på men också vilken värmeeffekt som skall användas i början av uppvärmningsperioden.

Det är viktigt att påpeka att de härledda modellerna endast kan användas för massiva byggnader med företrädesvis putsade stenmurar. Vidare gäller modellen endast för byggnader med små fönsterytor samt att antagandena om liten och konstant infiltration och ganska små effekter av solstrålning under uppvärmningsevenemanget gälla.

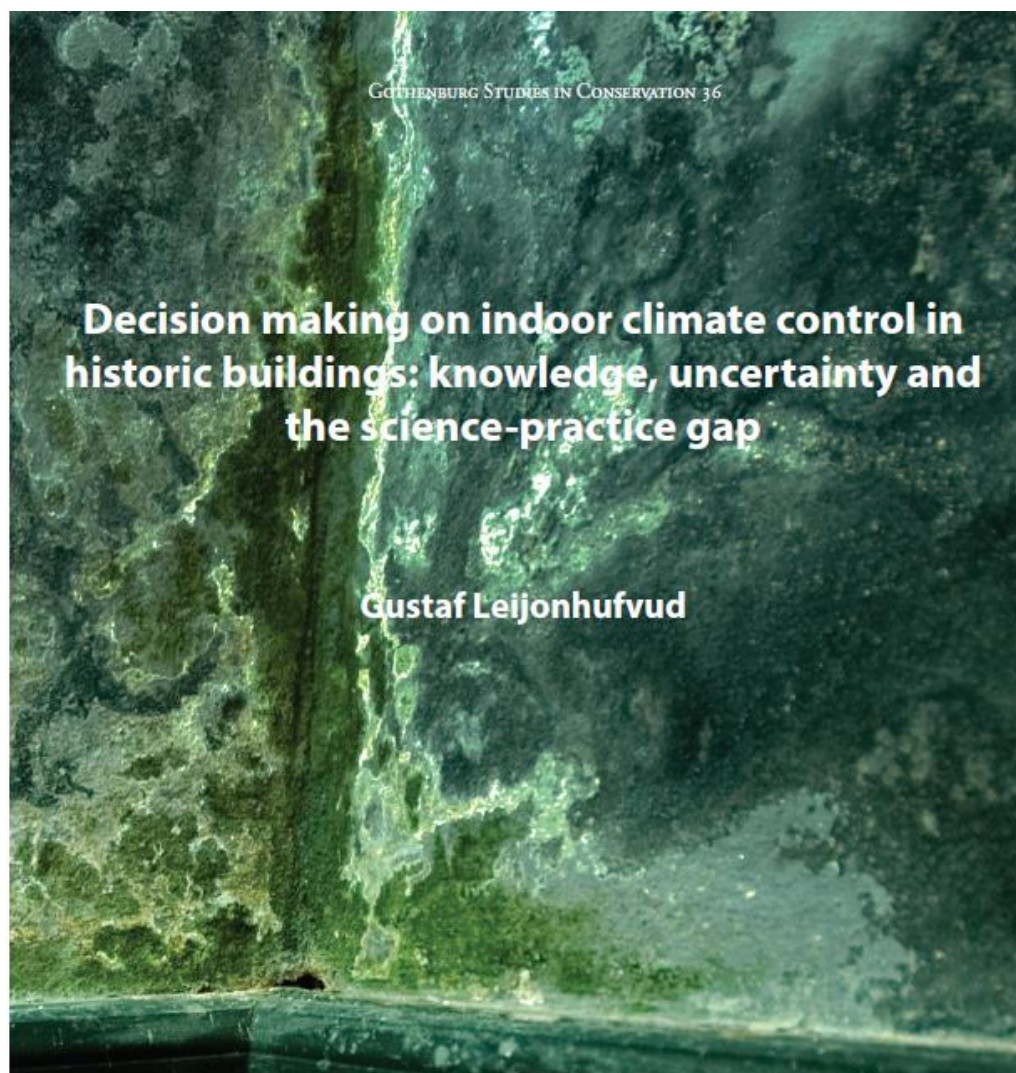
Baserad på mätning av temperatur och relativ fuktighet under ett intermittert uppvärmningstillfälle i byggnaden, presenteras en enkel metod för att hitta de tre ingående parametrarna. Förfarandet utförs i två steg. Först plottas temperatur och ångkvot (MR) i grafer där x-axeln har skalan roten ur tiden ($\sqrt{t}$). Ur de två graferna tar man ut respektive lutning på den senare, linjära delen av grafen som direkt ger $a_1 P_s$ respektive $a_2 P_s$. Skillnaden mellan startvärdet vid tiden noll och linjens skärning med y-axeln ger direkt $b_1 P_s$ respektive $b_2 P_s$. Tidskonstanterna erhålles T_1 och T_2 kan tas fram i grafen genom att låta 5 T vara lika med tidpunkten där grafen blir linjär med kvadratroten ur tiden.

Med de kompletta modellerna kan uppvärmningstiden sedan "simuleras" fram genom prövning i tex Excel eller genom några få rader programkod. Alternativt kan den approximativa ekvation (11) användas.

Modellerna med dess parametrar kan också användas för att styra effekten för att i sin tur styra ändringshastigheten av relativ fuktighet. Endast ett fåtal iterationer (<10) med algoritm 4.1 krävs för att beräkna den stegvisa ökade effekten. Styrningen kan implementeras på enklast möjliga sätt t ex genom att manuellt sätta på radiatorer enligt de framräknade stegen i effekt. Alternativt kan hela algoritmen vara automatiserad och implementerad i ett fastighetssystem eller PLC.

Denna skrift baseras på en artikel publicerad i tidskriften Building and Environment, Magnus Wessberg, Tomáš Vyhlídal, Tor Broström, *A model-based method to control temperature and humidity in intermittently heated massive historic buildings*, Building and Environment, Volume 159, 2019.

Materialet ligger också till grund för avhandlingen, *Design and analysis of energy efficient indoorclimate control methods for historic buildings* av Magnus Wessberg



UNIVERSITY OF GOTHENBURG
ACTA UNIVERSITATIS GOTHOBURGENSIS

Inledning

Det övergripande syftet med avhandlingen var att undersöka klyftan mellan forskning och praktik avseende energieffektiv klimatstyrning i kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Tidigare forskning och erfarenhet visar att det inte är någon självklarhet att forskningsresultat kommer till nytta.

Den grundläggande utmaningen när det gäller klimatstyrning i kulturhistoriskt värdefulla byggnader är att balansera en rad olika mål som i en del fall är motstridiga. Målen handlar om energianvändning, ekonomi, komfort och bevarande. På sikt behöver vi också ta hänsyn till effekterna av ett förändrat globalt klimat. Inneklimatkompromissen utgår från två grundläggande frågor:

- Vilket inneklimat ska vi ha?
- Hur uppnår vi det önskade inneklimatet på ett hållbart sätt?

Den första frågan handlar i första hand om lämpliga nivåer och intervall för temperatur och relativ fuktighet. Den andra frågan handlar om tekniska lösningar för klimatstyrning. I många kulturhistoriskt värdefulla byggnader finns det begränsade möjligheter att förbättra inneklimatet och minska energianvändningen genom att förbättra klimatskalet. Klimatstyrning blir därför i många det viktigaste sättet att påverka energianvändningen.

Avhandlingen inriktas på studier av beslutsprocesser snarare än tekniska lösningar. För bostäder och lokaler, där klimatet styrs av komfortkrav, finns det standards och riktlinjer som ger en tydlig utgångspunkt. I kulturhistoriskt värdefulla byggnader är kraven på inomhusklimatet mer komplexa. Bevarandekraven för inomhusklimatet måste balanseras mot byggnadens användning och förväntningar på termisk komfort. Inomhusklimat sådana byggnader blir därför ofta som ett resultat av en kompromiss mellan hänsyn till bevarandet av inventarier och byggnaden å ena sidan och användningen byggnaden å den andra sidan.

Internationella standarder för inneklimat i kulturhistoriska värdefulla föreslår två grundläggande steg i beslutprocessen för att uppnå en hållbar klimatstyrning i kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Det första steget är att ange börvärden för inomhusklimatet är med avseende på användning och bevarande. Det andra steget är att bestämma hur det önskade klimatet kan uppnås på ett hållbart sätt för den specifika byggnaden inom ramen tillgängliga resurser. En konceptuell modell över de faktorer som påverkar beslutsprocessen har utvecklats för denna avhandling, se fig 1.

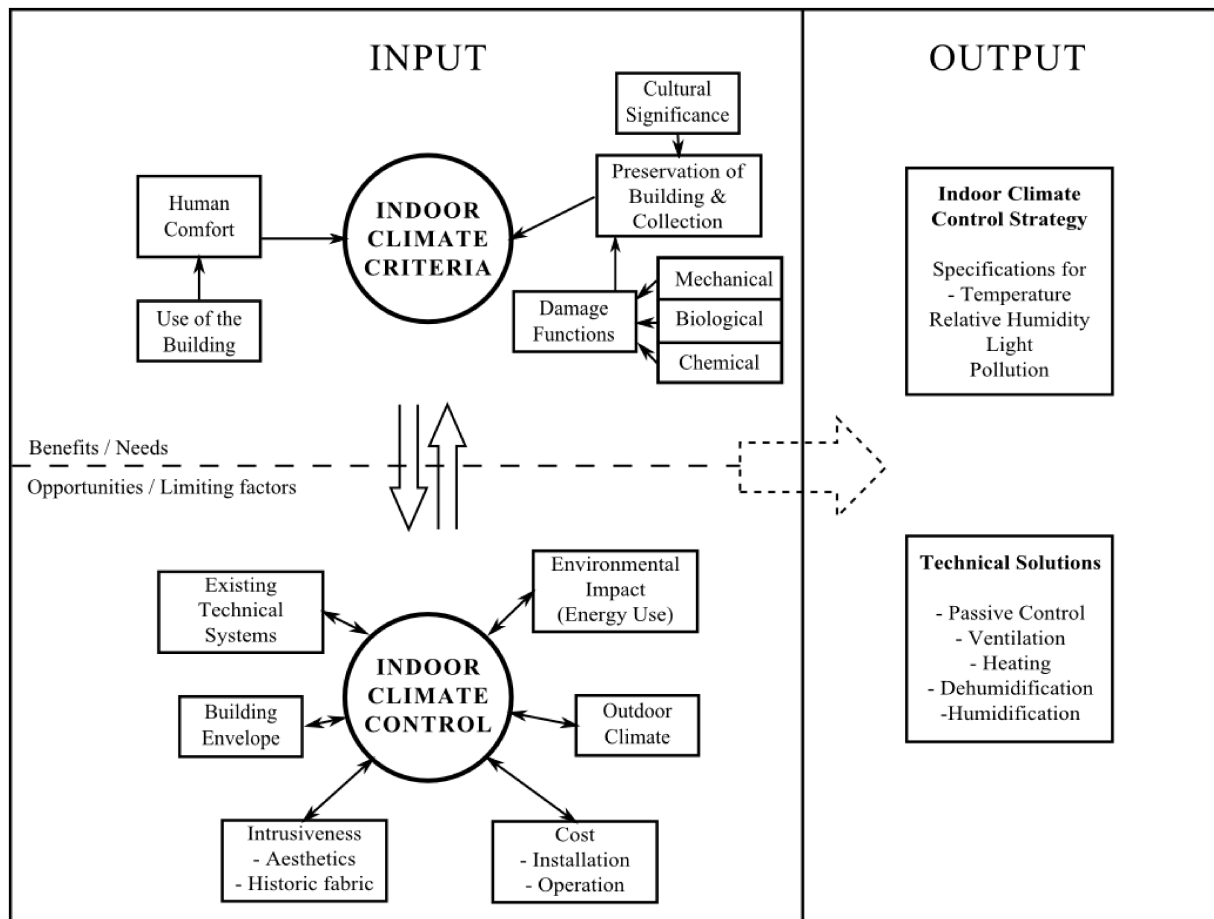


Fig 1. En konceptuell modell för beslut om klimatstyrning i kulturhistoriskt värdefulla byggnader

Tanken om ett optimalt inomhusklimat för museer och andra byggnader med känsliga och värdefulla interiörer har under den förebyggande konserveringens historia varit förenad med många praktiska svårigheter. Tanken som sådan har kritiserats sedan början av 1990-talet. Från forskarhåll har det ofta argumenterats för mer flexibla börvärden för RH och T i museer, medan den museala praktiken drivit på i motsatt riktning, inte minst genom strikta klimatkrav för utlånade föremål. Även om man fokuserar enbart på bevarandenaspekterna är det uppenbart att sökandet efter ett "optimalt" inomhusklimat är förgäves. T.ex. så anges i den senaste brittiska standarden PAS 198: 2012 att universellt säkra relativa fuktighets- eller temperaturområden inte kan specificeras baserat på kända samband för mekanisk, kemisk och biologisk nedbrytning av olika material.

Det finns för varje historisk byggnad ett antal mål som bör balanseras när det önskade inomhusklimatet bestäms. Förhandlingen kring dessa mål sker på olika nivåer från inriktningsbeslut till den dagliga verksamheten. Att endast fokusera på en typ av mål (t.ex. energianvändning, bevarande, eller kostnad) begränsar problemets komplexitet men döljer det som ofta är centralt: samspelet mellan de olika målen och därmed möjligheten att balansera målen på ett hållbart sätt.

Avhandlingen utforskar dessa till synes tekniska problem från en alternativ utgångspunkt, där de aktörer som är ansvariga för förvaltningen av samlingar och byggnader är i centrum. Om vi försöker

se bortom tekniska lösningar, vilken sorts frågor ställs då och vilken typ av svar kan ges? Vilken typ av kunskap behövs för att utveckla området, och vilken typ av praktiskt tillämpbar kunskap skulle de utövare som deltar i beslutsfattandet dra nytta av?

Forskningsmål

En systematisk beslutsprocess är viktig för beslut om inneklimat i historiska byggnader vi har begränsad kunskap om denna process ur både deskriptiv och normativ synvinkel. Detta är grunden för det första delmålet: *Att förstå hur beslut fattas och hur åtgärder vidtas om inneklimat i de typer av byggnader som tidigare beskrivits.*

Det andra delmålet gäller den roll som osäkerhet spelar för beslut om inneklimat i historiska byggnader. Hanteringen av osäkerhet är en del av allt beslutsfattande, men det har under senare år fått mer uppmärksamhet inom bevarandeområdet. Det andra delmålet är: *Att utforska och diskutera hur osäkerhet kring beslut om inneklimat kan hanteras och kommuniceras.*

En central fråga för samspelet mellan vetenskap och praktik är hur komplex och osäker kunskap bör kommuniceras till slutanvändare. Riktlinjer, standarder och andra former av allmänna råd spelar en viktig roll för besluten om klimatstyrning. Det tredje specifika målet i avhandlingen riktas därför mot standardiseringens roll: *Att utforska och diskutera hur beslutsprocesser inneklimatstyrning kan stödjas med standarder för att uppnå en mer hållbar förvaltning.*

2.5 Sammanfattning av de artiklar som ingår i avhandlingen

I. Leijonhufvud, Gustaf and Charlotta Bylund-Melin. 2009. "Preventive conservation climate in historic buildings – some gaps in the knowledge". This paper has been translated from Swedish and was originally published in the Scandinavian peer-reviewed journal *Meddelser om konservering* nr 1 2009, s. 22-30 with the title "Bevarandeklimat i historiska byggnader- Några kunskapsluckor."

II. Leijonhufvud, Gustaf, Erik Kjellström, Tor Broström, Jonathan Ashley-Smith, and Dario Camuffo. 2013. "*Uncertainties in damage assessments of future indoor climates.*" In *Climate for collections: Standards and uncertainties*. Edited by Jonathan Ashley-Smith, Andreas Burmester, and Melanie Eibl, 405–18. London: Archetype Publications.

III. Broström, Tor, and Gustaf Leijonhufvud. 2010. "*The indoor climate in Skokloster Castle.*" In *Historical buildings as museums: Systems for climate control and heritage preservation*. Edited by Davide Del Curto, 84–93. Firenze: Nardini Editore.

IV. Leijonhufvud, Gustaf, and Annette Henning. 2014. "Rethinking indoor climate control in historic buildings: The importance of negotiated priorities and discursive hegemony at a Swedish museum." *Energy Research & Social Science* 4 (0): 117-23. doi: 10.1016/j.erss.2014.10.005.

V. Leijonhufvud, Gustaf. 2016. Making sense of climate risk information: the case of future indoor climate risks in Swedish churches. *Climate Risk Management*. doi:10.1016/j.crm.2016.05.003.

VI. Leijonhufvud, Gustaf, and Tor Broström. Standardizing the indoor climate in Swedish churches: opportunities, challenges and ways forward. Manuscript. A shorter version of the manuscript has been accepted for publication in the proceedings of the 2nd International Conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings, Brussels 2016.

Artikel I. Bevarandeklimat i historiska byggnader-Några kunskapsluckor.

Denna artikel publicerades i den nordiska tidskriften *Meddelser om konservering* med titeln *Bevarandeklimat i historiska byggnader: några kunskapsluckor*. Den granskar litteraturen om mekaniska skador på hygroskopiska material som orsakas av fluktuationer i fukt och temperatur, med ett fokus på typiska inneklimat i byggnader i Skandinavien. Kunskapsbrister som är kritiska för att bedöma risker med strategier för energieffektiv klimatstyrning identifieras med hjälp av två hypotetiska fallstudier av historiska byggnader i Sverige. Litteratursammanställningen visar att i vissa situationer när inneklimatet avviker från det typiska museiklimatet så saknas en robust vetenskaplig grund för att göra riskbedömningar. De två typfallen handlar om var låga innetemperaturer vintertid samt intermitterent uppvärmning. I byggnader som inte värms upp för termisk komfort, är det möjligt att begränsa en för hög relativ fuktighet under vintern med skyddsvärme eller avfuktning. I praktiken innebär detta låga minimitemperaturer för uppvärmning och ännu lägre om avfuktning används. Frågan i detta fall är vilken effekt den låga temperaturen har på risken för mekaniska skador. För det andra finns det en lång tradition av att använda intermitterent uppvärmning i Svenska kyrkor. Genom att snabbt värma kyrkan är det möjligt att kombinera termisk komfort och låg energianvändning. Emellertid orsakar uppvärmningen fukt- och temperaturfluktuationer med hög amplitud och kort varaktighet som kan orsaka mekaniska skador på föremål. Frågan i det här fallet är om det är möjligt att bedöma risken för skador som orsakas av intermitterent uppvärmning. Granskningen drar slutsatsen att det finns både ett behov och en potential att förbättra kunskapsunderlaget för att svara på dessa två frågor på ett tillfredsställande sätt.

Artikel II. Uncertainties in damage assessments of future indoor climates

Denna artikel bygger även den på en litteratursammanställning och syftar till att identifiera och kvalitativt beskriva de viktigaste osäkerheterna i de riskkartor som genererats i projektet Climate for Culture (CfC). Informationen som producerats inom CfC skiljer sig inte kvalitativt från andra typer av simuleringar som används vid beslutsfattande om inneklimatstyrning. Det extra modelleringssteget som tar med klimatförändringar medför dock komplexitet och osäkerhet. I artikeln identifieras och analyseras källorna till osäkerhet i varje steg i modelleringsprocessen och kategoriseras utifrån deras dominerande natur: epistemisk, aleatorisk eller tvetydig (eng: ambiguity). Osäkerheterna fortplantar sig och förstoras genom de olika stegen i modelleringsprocessen. Denna process inbegriper i det första steget osäkerhetsfaktorer relaterade till klimatförändringar, fortsätter med byggnadssimulering och slutligen skadefunktioner (eng: damage functions). En slutsats är att den relativa nivån av osäkerhet för varje modelleringssteg bör studeras ytterligare, och att de deterministiska metoder (eng: best guess) som oftast kommer till användning har stora begränsningar eftersom osäkerhetens omfattning i stor utsträckning är okänd. Även ansatser som utgår från worst case har stora nackdelar när de används i riskanalys. Med utgångspunkt i litteraturen om klimatanpassning diskuteras även hur en hög osäkerhet kan hanteras och kommuniceras i beslutsprocesser och vilka alternativa ansatser som finns för modellering. En slutsats som är viktig för resten av avhandlingen är att klimatanpassningsbeslut måste fattas trots djup osäkerhet, och att osäkerheter som är beroende av värderingar alltid kommer att spela en betydande roll.

Artikel III. The indoor climate in Skokloster Castle

Syftet med denna artikel är att analysera inomhusklimatet i Skoklosters slott, göra en riskbedömning och föreslå energieffektiva åtgärder för att förbättra inomhusklimatet med hänsyn till långsiktigt bevarande av byggnaden och dess samlingar.

Frågan som ställs är hur användbara befintliga riktlinjer för inneklimat är för en ouppvärmad historisk byggnad i Sverige. Skoklosters inomhusklimat kännetecknas av hög termisk tröghet och hög, varierande, relativ fuktighet. Klimatskalets passiva funktion för att minska fluktuationer varierar avsevärt mellan olika rum i byggnaden. Trots klimatskalets passiva funktion är både fluktuationerna och nivåerna av temperatur och luftfuktighet långt över vad som anses vara säkert i litteraturen. I stället för att rekommendera nivåer och gränser som finns i litteraturen analyseras hur energianvändningen påverkas av olika målnivåer, vilka visualiseras med varaktighetsdiagram. En miniminivå av klimatstyrning, som skulle bestå av endast passiva åtgärder, är en möjlig lösning men aktiv styrning är nödvändig för att helt undvika den största risken: mögel. En slutsats av studien är att riskbedömningen är den svaga länken när resultaten från inneklimatmätningar ska omsättas i tekniska åtgärder för att förbättra inomhusklimatet. I samband med avhandlingen är denna fallstudie utforskande genom att den identifierar begränsningar med befintliga riktlinjer för inneklimatstyrning och ger upphov till ett antal frågor relaterade till användningen av standarder. Denna studie har bidragit till utvecklingen av resten av avhandlingen genom att den visar hur en rent naturvetenskaplig ansats begränsar typen av potentiella möjliga lösningar på de problem som avhandlas.

Papper IV. Rethinking indoor climate control in historic buildings: The importance of negotiated priorities and discursive hegemony at a Swedish museum.

I denna artikel, skriven tillsammans med socialantropologen Annette Henning, visar vi på nödvändigheten att komplettera de dominerande tekniska ansatserna för inneklimatstyrning med forskning som tar ett bredare grepp. Genom att använda kvalitativ samhällsvetenskaplig metod kan specifika sammanhang och lokalt förhandlade beslut undersökas och förstås. Artikeln utgår från tidigare forskning inom området, där den tekniska grunden för ett riskbaserat förhållningssätt till beslutsfattandet om inomhusklimatet är i fokus. I den fallstudie från ett svenskt museum som redovisas i artikeln utgör de sociala aspekterna av en pågående beslutsprocess kärnan. Analysen visar hur dessa är avgörande för att möjliggöra förändring mot mer hållbara tekniska lösningar. Den kvalitativa fallstudien av beslutsfattande om inneklimat används för att illustrera hur samspelet mellan förväntningar och tidigare erfarenheter från olika yrkesgrupper är avgörande för förvaltningen av inomhusklimatet.

Medan tekniska förutsättningar och den begränsade kunskapen om dessa var i fokus för papper I-III, är det i artikel IV enskilda aktörer och deras upplevda livsvärldar som studeras. Analysen bygger på forskning som kritiserar konventionella föreställningar kring beslutsfattande i organisationer som inte lägger vikt vid beslutsfattandets sociala karaktär. Resultaten visar hur diskussioner mellan sociala aktörer och hur deras respektive prioriteringar förhandlas fram är viktiga inslag i förvaltningen av inomhusklimatet och har en stark inverkan på möjligheten att modifiera det. Subtila men viktiga skillnader i hur olika professionella aktörer tolkar och motiverar mål och medel för kulturarvsförvaltningen visar sig vara viktiga för diskursen om inomhusklimatet. I förhållande till resten av avhandlingen blottlägger denna artikel bristerna med att förminska problemen till att handla om rent tekniska frågor eller att anta att vissa ingångsvärden (t.ex. komfortkrav) är statiska och givna. Sådana ansatser krockar med den förhandlingsbarhet som i praktiken alltid är förhållande, och begränsar bredden av möjliga lösningar på de problem som finns.

Papper V. Making sense of climate risk information: the case of future indoor climate risks in Swedish churches.

Den vanligast förekommande modellen som används för att bedöma klimatförändringarnas påverkan på kulturarv bygger top-down analyser där resultatet är en prognos av framtida risker (exemplifierat i t.ex. Climate for Culture-projektet). I artikel II identifierades de olika typer av osäkerhet som uppkommer i sådana analyser, och det konstaterades att det var en omfattande men oklar mängd osäkerhet i slutresultatet. Den övergripande forskningsfrågan för denna artikel är hur dylika prognoser bör kommuniceras för att vara användbara för beslutsfattare på olika nivåer, med tanke på resultatets komplexitet, osäkerhet och mångtydighet. Tidigare forskning har påpekat både behovet av att kommunicera osäkerheten i riskbedömningar av klimatförändringar samt de många svårigheter som måste övervinnas i analysen. En bättre förståelse för hur komplex och osäker vetenskaplig kunskap tolkas och används av praktiker är nödvändig. Ett första steg är att testa om individer som arbetar med klimatanpassning överhuvudtaget kan använda sig av riskinformationen. Huvudsyftet med artikeln är att utforska och tolka hur den generiska, mångtydiga och komplexa klimatriskinformationen som producerats inom CfC-projektet tolkas av praktiker verksamma inom kulturarvsförvaltning. Syftet är även att utveckla en metodologi för hur man kan välja ut relevanta delar av riskinformationen som produceras av CfC och utvärdera spridningen till en specifik målgrupp. Genom att använda intervjuer studerar jag hur arkitekter och ingenjörer som är involverade i förvaltningen av kyrkor i Sverige tolkar klimatanpassningsrelevant information som producerats i projektet Climate for Culture. Resultaten visar att riskerna tolkades och bedömdes på helt olika sätt av olika individer, i stor utsträckning beroende av deras förförståelse och förtrogenhet med de enskilda riskerna. Omfattningen av förändringen och bristen på skattningar av osäkerhet verkade vara underordnade det övergripande intrycket av informationen som trovärdig och tydlig. Den övergripande slutsatsen är att spridningen av riskinformation, även från forskningsprojekt som i början syftar till att producera kunskap som är relevant för slutanvändare, bör anpassas och testas i samverkan mellan avnämare och forskare.

Papper VI. Standardizing the indoor climate in Swedish churches: opportunities, challenges and ways forward.

Standarder och riktlinjer anses vara nödvändiga för kunskapsöverföring av både praktiker och forskare inom kulturarvsområdet, men hur de används och hur effektiva de är för att underlätta hållbar förvaltning är inte beforskat. Den övergripande frågan som behandlas i denna artikel är hur vetenskapliga resultat och best practice om inneklimatstyrning kan spridas till slutanvändare. Standardisering av inneklimatstyrning i historiska byggnader har nyligen tagit en ny riktning med framställning av standarder och riktlinjer som fokuserar mer på beslutsprocesser än resultat och kravnivåer. Målet med artikeln är att utforska och diskutera hur de senaste standarderna för bevarandeklimat i allmänhet och den nya Europeiska standarden för uppvärmning av kyrkor i synnerhet kan användas av den svenska kyrkan för att underlätta hållbar förvaltning av kyrkorna. Artikeln inleds med att de specifika tekniska och organisatoriska förutsättningarna för kyrkobyggnader i Sverige identifieras för att förstå behov och utmaningar för standardisering. Intervjuer med ingenjörer och antikvarier inom svenska kyrkan används tillsammans med analyser av inneklimatet i ett stort antal svenska kyrkor. Resultaten visar att utvecklingen av procedurstandarder löser några av problemen som finns med konventionella resultatorienterade standarder, genom att öppna upp för en bredare uppsättning lösningar. Befintliga riktlinjer är emellertid svåra att tillämpa och integrera i rådande kyrkoförvaltning på grund av organisatoriska hinder och begränsade resurser

inom Svenska kyrkan. Det föreslås att generiska riktlinjer måste anpassas till specifika sammanhang för att vara användbara. Huvudslutsatsen är att för att förbättra standardiseringen är det nödvändigt att utvärdera i vilken utsträckning riktlinjer och standarder används, hur de används och hur detta påverkar förvaltningen.

I förhållande till övriga artiklar i avhandlingen försöker jag i denna artikel att överbrygga och integrera det positivistiska, tekniska och lösningsorienterade synsättet i artikel I-III med det epistemologiska perspektivet från artikel IV och V, vilka använder samhällsvetenskapliga perspektiv för att förstå de inblandade problemen. Genom att titta på standarder som ett av många instrument för kunskapsdelning och genom att erkänna vikten av en bättre förståelse för de ramar som omgärdar och formar beslut, utvidgas diskussionen om vilken roll standarder för inneklimat spelar för beslutsfattande. Ett antal konkreta framåtsyftande förslag föreslås för både framtida användare och utvecklare av standarder.

Slutsatser

Resultaten av avhandlingen bidrar till en utvidgad problemdefinition och en bättre förståelse av gapet mellan forskning och praktik avseende klimatstyrning i historiska byggnader. Artiklarna I-III ger en bakgrund och en teknisk förståelse för frågorna, men det är i huvudsak de tre slutliga artiklarna(IV-VI) som bidrar till en mer nyanserad förståelse av gapet mellan forskning och praktik. Resultaten pekar på ett behov av att omdefiniera problemet. Enbart teknisk-naturvetenskaplig kunskap räcker inte för att uppnå hållbar framtida klimatstyrning. Den tekniska forskningen måste kompletteras med forskning om hur kulturarvet faktiskt förvaltas. Medan alla artiklar på olika sätt bidrar till en djupare förståelse för hur beslut fattas och åtgärder vidtas beträffande förvaltningen av inomhusklimatet i historiska byggnader, är det särskilt i fokus i artikel IV och VI. Dessa artiklar visar hur en studie av det specifika sociala och materiella sammanhanget är avgörande för att förstå hur förändring kan komma till stånd. Artikel II och V visar hur osäkerhet kring beslut om inomhusklimat kan hanteras och kommuniceras för att stödja klimatanpassning. Det kommer att förbli viktigt att minska osäkerheten i modellerna, men det är avgörande att osäkerhet kan hanteras och kommuniceras på ett bättre sätt. Slutligen föreslås i artikel VI, som bygger på och syntetiserar de tidigare artiklarna i avhandlingen, hur beslutsprocesser avseende inneklimatstyrning kan stödjas med förbättrade standarder för att underlätta en mer hållbar förvaltning.

I artikel VI skisseras några praktiska förslag till framtiden för standardisering av inneklimatstyrning. Förutom dessa förslag finns det också några konsekvenser för ytterligare forskning. Det finns krav från två motsatta riktningar på forskning som avser att vara relevant för kulturarvsförvaltning: För det första måste den uppfylla de akademiska standarder som är utmärkande för traditionell disciplinär vetenskap, för det andra ska den vara relevant för att lösa problem i samhället. För att uppnå sistnämnda finns ett standardrecept bestående av mer interaktion mellan forskare och beslutsfattare / praktiker, delaktighet av stakeholders i forskningsdesignen och satsningar på spridning av forskningsresultat. Emellertid är sådana processer som länkar produktionen och leveransen av klimatvetenskaplig kunskap med användarnas krav komplexa och svårhanterliga. De kräver gott om resurser och tid. Ansträngningar för att uppnå sådan samproduktion, och som syftar till att stänga gapet mellan inomvetenskaplig krav och samhällsrelevans, risker att anklagas för att sakna akademisk legitimitet och kräver dessutom mer resurser än konventionell, disciplinär

forskning. Det är ofta metodologisk virtuositet som legitimerar disciplinär forskning.

Tvärvetenskapliga förhållningssätt kan inte konkurrera i det avseendet, men har istället potential att hitta nya sorters svar med den samhällsrelevans som efterfrågas. Forskningen får emellertid inte vara så skraddarsydd för användarkraven att den förlorar sin kritiska blick. Detta är inte bara relevant för samhällsvetenskap och humaniora, men också för naturvetenskap. Min slutsats av artikel III och V är att osäkerhetsaspekten nedtonades i Climate for Culture-projektet i sådan utsträckning att metoden förlorade en del av sin legitimitet. Med forskning inom klimatförändringsområdet, som är en så het potatis i den allmänna samhällsdebatten, är det viktigt att den underliggande forskningen uppfattas som legitim. Jag föreslår därför att framtida forskning antingen borde ha som primärt fokus att försöka minska osäkerheten, eller att slutanvändare engageras i tvärvetenskapliga förhållningssätt när resurserna och engagemanget är tillgängliga för att "gå hela vägen". Att göra något mellanliggande kan göra att resultaten av det specifika forskningsprojektet betvivlas av slutanvändarna och på lång sikt ifrågasätta hela det vetenskapliga projektet.

Denna avhandling har gett en bredare och bättre förståelse för förhållandet mellan vetenskap och praktik avseende inneklimatstyrning i historiska byggnader. Förutom det vetenskapliga värdet hoppas jag att argumenten i denna avhandling är relevanta för ett brett spektrum av yrkesverksamma som är inblandade i förvaltningen av kulturarv, såsom arkitekter, ingenjörer, beslutsfattare, chefer, konservatorer och energiexperter, och att dessa yrkesverksamma tillsammans med forskare på området kommer att diskutera vidare hur en övergång till mer hållbara metoder faktiskt kan uppnås. På något sätt kommer det alltid att finnas ett mellanrum mellan vetenskap och praktik, och målet kan inte vara att helt stänga det. Men vi måste sträva efter att bättre förstå och navigera i detta mellanrum för att underlätta en hållbar förvaltning av historiska byggnader.

Publikationslista

Tidskriftsartiklar

Eskola, L. *et al.* (2015) 'Airtightness, air exchange and energy performance in historic residential buildings with different structures', *International Journal of Ventilation*, 14(1), pp. 11–26. doi: 10.1080/14733315.2015.11684066.

Napp, M. *et al.* (2016) 'Adaptive ventilation for climate control in a medieval church in cold climate', *International Journal of Ventilation*. Taylor & Francis, 15(1), pp. 1–14. doi: 10.1080/14733315.2016.1173289.

Alev, Ü. *et al.* (2016) 'Indoor hygrothermal condition and user satisfaction in naturally ventilated historic houses in temperate humid continental climate around the Baltic Sea', *Architectural Science Review*, pp. 53–67. doi: 10.1080/00038628.2015.1038980.

Leijonhufvud, G. (2016) 'Making sense of climate risk information: The case of future indoor climate risks in Swedish churches', *Climate Risk Management*. Elsevier, 13, pp. 76–87. doi: 10.1016/j.crm.2016.05.003.

Haugen, A. *et al.* (2018) 'A Methodology for Long-Term Monitoring of Climate Change Impacts on Historic Buildings', *Geosciences*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 8(10), p. 370. doi: 10.3390/geosciences8100370.

Leijonhufvud, G. and Broström, T. (2018) 'Standardizing the indoor climate in historic buildings: opportunities, challenges and ways forward', *Journal of Architectural Conservation*, 24(1), pp. 3–18. doi: 10.1080/13556207.2018.1447301.

Wessberg, M., Vyhliđal, T. and Broström, T. (2019) 'A model-based method to control temperature and humidity in intermittently heated massive historic buildings', *Building and Environment*. Pergamon, 159, p. 106026. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.024.

Konferensbidrag

Wessberg, M., Leijonhufvud, G. and Broström, T. (2016) 'An evaluation of three different methods for energy efficient indoor climate control in Skokloster Castle', in de Bouw, M. *et al.* (eds) *second international conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings*. Flanders Heritage Agency, pp. 144–150.

Leijonhufvud, G. and Broström, T. (2016) 'Standardizing the indoor climate in Swedish churches: opportunities, challenges and ways forward', in de Bouw, M. *et al.* (eds) *second international conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings*. Flanders Heritage Agency, pp. 35–42.

Wessberg, M., Broström, T. and Vyhliđal, T. (2017) 'A method to determine heating power and heat up time for intermittent heating of churches', in *Energy Procedia*. Elsevier B.V., pp. 915–920. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.09.720.

Broström, T., Wessberg, M., and Leijonhufvud, G. (2019) 'Better safe than sorry? – Climate control for mould prevention' in *4th international conference for Integrated Pest Management (IPM) for Cultural Heritage*. Swedish National Heritage Board.

Avhandling

Leijonhufvud, Gustaf . (2016) 'Decision making on indoor climate control in historic buildings: knowledge, uncertainty and the science-practice gap'. Diss. Göteborg : *Göteborgs universitet*. Available at: <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/45415>

Standards

EN 15759-1 Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship. November 2011.

Handbok

Broström, T och Klenz Larsen, P. Climate control in historic buildings. Uppsala universitet 2015.

Rapporter

Leijonhufvud, G and Broström, T. (2015) 'Kyrkobyggnader och klimatförändringar'. In *Svenska kyrkans utredningar 2015:1: Gemensamt ansvar – en utredning om fastigheter, kyrkor och utjämnningssystem*, pp. 64-91. Stockholm: Ineko.

Examensarbeten

Hörnsten, H. (2015) 'Gamla uppvärmningssystem – En undersökning av kulturmiljövårdens förhållningssätt till åldrade uppvärmningssystem'. *Examensarbete i kulturvård, Uppsala Universitet*.

Eriksson, R. (2016) 'Fuktstyrning av inomhusklimatet på Skoklosters slott. En utvärdering av avfuktning, skyddsvärme och fuktstyrd ventilation'. *Examensarbete i byggnadsteknik, Uppsala universitet*.

Berefelt, E och Olsson, L (2017). 'Utvärdering av olika metoder för fuktstyrning i kyrkor'. *Examensarbete i byggnadsteknik, Uppsala universitet*.

Håkansson, J. och Thor, H. (2018) 'Simulering av klimatstyrning i Härnevi kyrka'. *Examensarbete i byggnadsteknik, Uppsala universitet*.