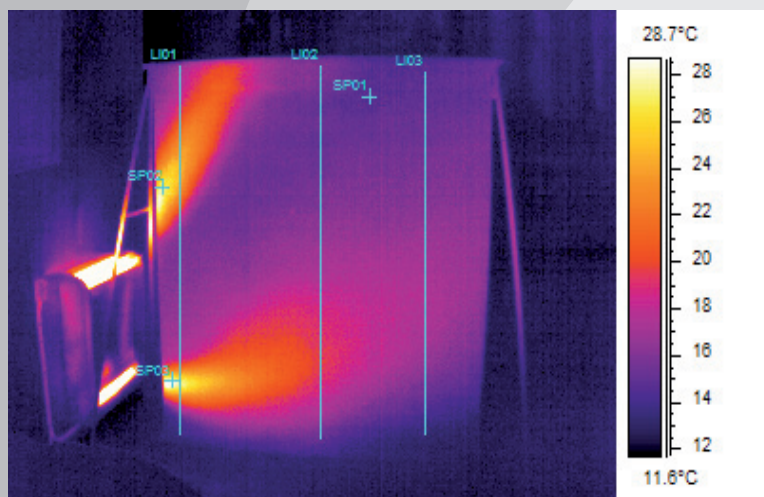


Luft-luftvärmepumpar för skyddsvärme i kyrkor



Tor Broström

Innehåll

Förord	3
Inledning.....	4
Luft/luft-värmepumpar.....	5
Uppvärmningsstrategier	6
Dimensionering	7
Risker med luft-luftvärmepumpar i kyrkor	8
Luftrörelser	8
Försmutsning	9
Komfort.....	9
Temperaturfördelning.....	9
Antikvariska aspekter	10
Pilotprojekt i Ludgo kyrka.....	11
Bakgrund.....	11
Värmeanläggning.....	11
Driftserfarenheter	12
Klimatmätningar och funktionskontroll	12
Temperatur och relativ fuktighet 2007-2008.....	13
Luftrörelser	14
Försmutsning	15
Temperaturgradienter i rummet.....	16
Energibesparing.....	17
Antikvariska aspekter	18
Slutsatser från pilotprojektet i Ludgo kyrka	18
Diskussion	19
Förslag till fortsatt arbete.....	20
Litteratur	21
Bilagor	22

Förord

Upprinnelsen till denna studie var att Rönö församling ville installera två stycken luft-luftvärmepumpar i Ludgo kyrka. Efter ett inledande samråd beslöts att genomföra en pilotstudie i samverkan mellan församlingen, stiftet, länsstyrelsen och länsmuseet. Högskolan på Gotland fick i uppdrag att göra en utvärdering.

En del av klimatundersökningarna har genomförts av Elisabet Lindén och Svante Lindström vid Högskolan i Gävle.

Denna studie har haft ekonomiskt stöd från Energimyndigheten, Riksantikvarieämbetet, Strängnäs stift samt Mål2 Öarna.

Forskningen kring luft-luftvärmepumpar för kyrkor har resulterat i två vetenskapliga artiklar vilka finns med som bilagor till denna rapport.

Convective heating in a medieval church – Effects of air-to-air heat pumps on air movements, particle deposition and temperature distribution. (Publicerad vid konferensen Roomvent 2009 i Sydkorea)

Heat pumps for conservation heating. (Publicerad vid konferensen Nordic Building Physics i Köpenhamn, 2009)

Ett särskilt tack till församlingens representant Sten Mattsson och kyrkvaktmästaren Göran Larsson för deras engagemang och hjälp med praktiska frågor.

Inledning

Luft-luftvärmepumpar har de senaste åren utvecklats mot allt bättre prestanda och lägre priser. En ökad användning i småhus har lett till önskemål om att installera luft-luftvärmepumpar även i kyrkor.

Det har funnits en tveksamhet inför att använda luft-luftvärmepumpar i kyrkor. Det beror delvis på att det saknats kunskap och erfarenhet om hur värmepumparna egentligen fungerar i detta sammanhang och vilka risker som finns.

De skäl som gjort att luft-luftvärmepumpar i allmänhet fått en sån framgång i Sverige är att:

- Energiförbrukningen sänks markant, 50% eller mer
- Investeringen är rimlig i förhållande till besparingen vilket ger en kort återbetalningstid
- Installationen är relativt enkel, det krävs inga större ingrepp

Mot detta ställs de risker och problem som luft-luftvärmepumpar i kyrkor kan medföra:

- Luftströmmar som orsakar försmutsning och drag
- Ojämn temperaturfördelning i kyrkorummet
- Håltagning i väggen
- Utseendemässiga aspekter

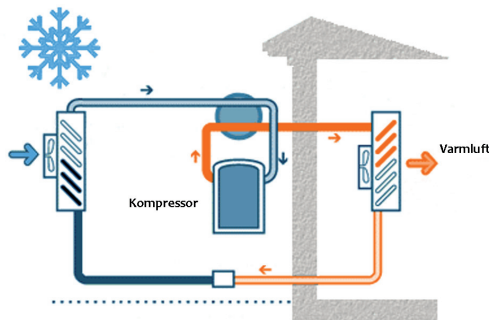
Målet med rapporten är att undersöka om de fördelar som nämnts ovan finns även då luft-luftvärmepumpar används i kyrkor samt att värdera de risker som finns.

Metoden består av sammanställning och värdering av befintlig kunskap samt en ingående värdering av ett pilotprojektet i Ludgo kyrka.

Rapporten inleds med tre grundläggande kapitel om luft-luftvärmepumpar, uppvärmningsstrategier samt dimensionering. Dessa kapitel ger en allmän beskrivning av hur luft-luftvärmepumpar kan användas för skyddsvärme. Därefter följer ett kapitel som beskriver risker förknippade med att använda luft-luftvärmepumpar. Det sjätte kapitlet ger en utförlig beskrivning av det pilotprojekt som genomförts i Ludgo kyrka. Rapporten avslutas med en diskussion och behov av fortsatt arbete.

Luft/luft-värmepumpar

En värmepump tar lågtemperaturvärme från en källa som är gratis, t ex luft, mark eller vatten och "pumpar" upp värmen till en så hög temperatur att den kan användas för uppvärmning eller varmvatten. Det förmånliga med värmepumpen är att man får ut många gånger mer värmeenergi än vad som går åt till att driva värmepumpen. Det egentliga energiutbytet beror på driftförhållanden, typ av värmepump samt uteklimatet.



Figur 1. Schematisk bild av en värmepump

Innedelen har ett eller två utlopp. Ofta kan man med ledskenor rikta luftströmmen.

En luft-luftvärmepump tar värme från uteluften och avger varm luft på insidan. Värmepumpen består av en inedel och en utedel. Utomhusdelen drar med en fläkt in uteluft som kyls av, dvs den avger värme till värmepumpen. Med hjälp av en kompressor höjs temperaturen på värmen. I inomhusdelen överförs värme till rumsluften med hjälp av en fläkt. Mellan delarna går ledningar för el och kylmedel genom ett hål i väg-

gen. Innedelen har ett eller två utlopp. Ofta kan man med ledskenor rikta luftströmmen. Värmefaktorn är det nyckeltal man vanligast använder för att beskriva hur bra en värmepump fungerar. Värmefaktorn är förhållandet mellan avgiven värmeenergi och tillförd energi (el för att driva kompressorn). På engelska används begreppet COP (Coefficient of Performance).

Ekv1

$$COP = \frac{\text{Avgiven värme}}{\text{Tillförd el}}$$

För kommersiellt tillgängliga luft-luftvärmepumpar ligger värmefaktorn typiskt i ett intervall på 2 till 4 [Energimyndigheten 2009].

Den teoretiska gränsen för värmefaktorn, den s.k. Carnotvärmefaktorn, bestäms enbart av ute- och innetemperaturen:

Ekv2

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

- T1 temperaturen inomhus (K)
T2 temperaturen utomhus(K)

Detta innebär att en luft-luftvärmepump kommer att ge lägre effekt ju kallare det är ute. Till slut når man en punkt där värmepumpen slås av och man värmer med en kompletterande energikälla istället. Ekvation 2 innebär också att om man har en låg temperaturskillnad mellan inne- och utetemperatur så är det möjligt att med en särskilt anpassad värmepump få en mycket hög värmefaktor, kanske dubbelt så stor som för en konventionell värmepump [Broström 2008].

Värmepumpens utedel måste vid kall och fuktig väderlek avfrostas med jämna mellanrum. Då körs värmepumpen baklänges. Man tar värme från inneluften för att ta bort isen. Det innebär att det finns en lägsta rekommenderad innetemperatur vilken ligger mellan 8-12 C för de flesta värmepumpar. Om innetemperaturen är lägre än detta rekommenderade värde kan tillverkare inte garantera funktionen.

De flesta moderna luft-luftvärmepumpar har luftfilter som, om de sköts på rätt sätt, minskar partikelhalten i luften.

En del luft-luftvärmepumpar kan användas som avfuktare under sommarhalvåret. Värmepumpen körs då baklänges så att innerdelen blir kallare. Luftfukten kondenserar i värmepumpen och leds ut genom ett hål i väggen. Detta förfarande innebär också att inomhusluften kyls något.

Uppvärmningsstrategier

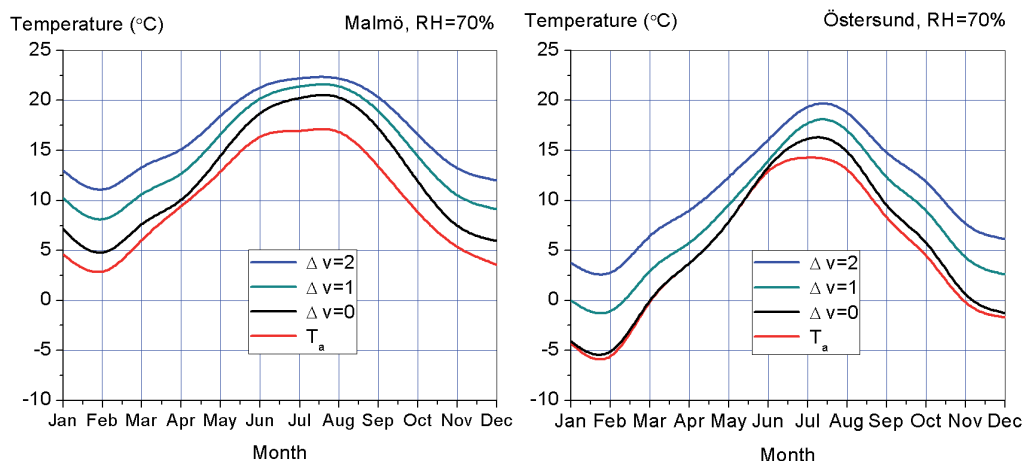
I landsortskyrkorna är intermitterent uppvärmning den rådande strategin sedan lång tid tillbaka, Det innebär att kyrkan värms upp enbart till förrättningar. Där emellan har man någon form av grundvärme eller ingen uppvärmning alls [Broström 1996, Broström et al 2008, Schellen 2002].

Grundvärmen ligger typiskt i intervallet 8-15°C. Ofta är det oklart vad syftet med grundvärmen är; komfort eller bevarande, utan man följer en tradition. I det flesta fall är uppvärmningen inte motiverad av komfortskäl utan för att förebygga fuktproblem. I denna rapport används därför begreppet skyddsvärme för att tydliggöra syftet. Motsvarande begrepp på engelska är :”conservation heating” [Stanforth et al 1994, Schellen 2002].

Skyddsvärme innebär att kyrkan värms försiktigt för att förebygga fuktproblem, inte för att ge komfort. Målet är inte en viss temperatur utan att hålla den relativa fuktigheten inom ett givet intervall. Rent tekniskt kan detta lösas på olika sätt:

- Man styr mot en viss grundtemperatur. Det är den vanligaste styrprincipen. Den motverkar alltför höga värden på relativ fuktighet men leder ofta till onödigt hög energiförbrukning.
- Man styr mot en önskad nivå för relativ fuktighet. Termostaten byts ut mot en s.k. hygrostat. Då RF stiger över en önskad nivå slås värmen på och RF sjunker. Denna styrprincip resulterar i en innetemperatur som varierar i takt med utetemperaturen, fast på en något högre nivå, se figur 2.

Luft-luftvärmepumpar kan användas med såväl temperatur- som fuktstyrning. I det senare fallet bör man vara uppmärksam på vilken lägsta innetemperatur som värmepumpen medger.



Figur 2. Den inomhustemperatur som krävs vid skyddsvärme för att upprätthålla en konstant relativ fuktighet på 70% i Malmö respektive Östersund. Δv anger olika grader av fuktbelastning (se bilaga 2).

En lägre grundtemperatur ger alltid en energibesparing, även om kyrkan värms upp regelbundet. [Harrysson 2004]. En alltför låg grundtemperatur ger risk för fuktrelaterade skador.

Dimensionering

Att välja rätt effekt för värmepumpen har avgörande betydelse för funktion och lönsamhet. I detta avsnitt diskuteras principer för dimensionering. I en bifogad artikel [Broström, 2008] ges en mer ingående behandling av dimensioneringsfrågan vilken för projektören kan tjäna som ett underlag.

I det typiska fallet har kyrkan redan ett fungerande värmesystem. Luft-luftvärmepumpen anpassas efter grundvärmebehovet. Befintligt system används vid anvärmning inför förrättningar.

Värmepumpen ska alltså dimensioneras för att täcka effektbehovet vid skyddsvärme eller grundvärme. Den typen av uppvärmning kräver en relativ jämn och låg effekt med låga lufttemperaturer. Det är villkor som passar mycket bra för värmepumpar. Effektbehovet beror på typ av byggnad, uteklimat samt fuktbelastning [Broström, 2008]. Bilaga 2 visar hur effektbehovet varierar under året för några olika platser i Sverige.

Det är inte lönsamt att försöka täcka det totala effektbehovet med en värmepump. Intermittent uppvärmning innebär att man har en värmeanläggning med hög effekt och kort utnyttningstid. Den ideala värmekällan för intermittent uppvärmning ska ge en hög effekt till låg kostnad. Värmepumpar har en hög fast kostnad och en låg energikostnad. Det passar dåligt för intermittent uppvärmning, den korta drifttiden gör att det tar orimligt lång tid att betala igen den höga investeringen.

Risker med luft-luftvärmepumpar i kyrkor

Den huvudsakliga utgångspunkten för denna studie är att man i de inledande diskussionerna har identifierat ett antal möjliga risker med att använda luft-luftvärmepumpar i kyrkor. Det följande är en allmän beskrivning och diskussion av dessa risker. I följande kapitel behandlas dessa risker med avseende på pilotprojektet i Ludgo kyrka.

Luftrörelser

All uppvärmning, i alla typer av byggnader, medför någon form av luftrörelser. I kyrkor, med sina höga rum, stora fönster och ofta dåligt isolerade väggar, kan det uppstå mycket kraftiga luftrörelser. Luftrörelserna försämrar komforten och bidrar till försmutsning av väggar och föremål [Camuffo et al 2006].

Luftvärmepumparna avger värme genom en värmefläkt. Helt klart är att det uppstår kraftiga luftrörelser i närheten av utloppen. Frågan är hur luftrörelserna i stort påverkas och vilka effekter det kan få.

Då luften värms upp av ett värmelement stiger den uppåt. Vid kontakt med kalla ytor kyls luften av och sjunker mot golvet. Ofta används konvektorer för att motverka kallras vid fönster och kalla väggpartier. Även om den grundläggande fysiken är enkel så är det i praktiken svårt att förutspå vilka luftrörelser som kommer att uppstå till följd av ett visst värmesystem i en viss byggnad.

Det pågår runtom i Europa en intensiv diskussion om hur olika typer av värmesystem påverkar luftrörelser i kyrkor [Schellen 2002, Camuffo et al 2006]. Definitionsmässigt medför luftvärmesystem och konvektorer alltid luftrörelser, det är så de fungerar. I Tyskland där man har lång erfarenhet av luftburen värme finns många exempel på att luftburen värme inte behöver medföra skadliga eller störande luftströmmar. Å andra sidan finns det gott om exempel på att vanliga radiatorer kan orsaka mycket kraftiga luftströmmar i kyrkorumen.

En erfaren projektör kan konstruera ett värmesystem som, efter injustering, kan minimera men inte eliminera luftrörelser. Problemen med luftrörelser är som störst vid uppvärmning då man använder mycket höga värmeeffekter. Mer sällan är det problem vid grundvärme då värmeeffekten är mycket lägre.

I ett försök att få en mer allmängiltig förståelse för vad som orsakar luftrörelser i kyrkor genomför Högskolan i Gävle en undersökning med olika typer av värmekällor. Den undersökningen kommer att vara slutförd 2010. (www.sparaochbevara.se)

Försmutsning

Luften inne i kyrkan innehåller alltid partiklar, t ex damm och sot från ljus. Partiklarna svävar i luften och fastnar på de ytor som de kommer i kontakt med. Ett

fenomen kallat termodiffusion gör att man får en koncentration av partiklar vid kallare ytor. Svärtningen blir därför märkbart värre på kalla ytor [Camuffo 1998, Broström et al 2008].

Svärtningen beror på:

- Hur mycket och hur länge kyrkan är uppvärmd
- Luftrörelserna i kyrkan
- Mängden och storleksfördelningen av partiklar
- Ytans beskaffenhet

Luft-luftvärmepumpar kan å ena sidan tänkas bidra till försmutsning genom kraftigare luftrörelser å andra sidan har de inbyggda filter vilket reducerar mängden partiklar.

Vi vet i nuläget inte tillräckligt mycket om hur de olika faktorerna påverkar försmutsningen för att kunna göra en kvantitativ riskbedömning.

Komfort

Kalla eller svala luftrörelser ökar värmeförlusten från kroppen och har på så vis en inverkan på komforten. Effekten beror både på lufthastigheten och temperaturen. Den självklara åtgärden är att ta bort eller minska luftrörelserna. I annat fall får man kompensera med en högre lufttemperatur. Turbulenta luftrörelser, varierande hastighet och riktning, upplevs mer obehagligt än jämna luftrörelser [Fanger 1970].

Eftersom luft-luftvärmepumparna huvudsakligen är avsedda för grundvärme är komfortfrågan i detta sammanhang av underordnad betydelse

Temperaturfördelning

Vid uppvärmning med varmluftsfläktar finns det risk för att det uppstår en ojämn temperaturfördelning både horisontellt och vertikalt. Temperaturfördelningen hänger ihop med luftrörelserna. Paradoxalt nog är det så att låga luftrörelser kan leda till en ojämn temperaturfördelning. Återigen är detta ett område där det är mycket svårt att på förhand bedöma riskerna.

Vid grundvärme med låga effekter är det sällan något problem med temperaturfördelningen i horisontalplanet. Kontinuerlig uppvärmning, även grundvärme, kan ge upphov till en vertikal temperaturskiktning där det är betydligt varmare under taket än vid golvet [Broström et al 2008].

En rimlig hypotes är att luft-luftvärmepumpar, som ju ger viss omrörning, inte försämrar temperaturfördelningen jämfört med konventionella värmesystem.

Antikvariska aspekter

De antikvariska riskerna, dvs att kyrkans kulturhistoriska värden ska förstöras är relaterade till:

- Håltagning genom yttervägg.
- Installationer av värmepumpens innerdel på vägg.
- Uppkomst av luftrörelser och temperaturer vilka inverkar negativt på inneklimatet.
- Placeringen av inne- och utedel kan verka störande ur estetisk och arkitektonisk synvinkel.
- Värmepumpen kan även ge upphov till störande buller.

Vid installationen behöver man borra ett hål genom väggen med en diameter på cirka 5 cm för att få igenom elkablar samt rörledning för köldmediet. Värmepumpens innerdel fästs oftast på väggen vilket kräver mindre håltagningar.

Luftrörelser och temperaturfördelning har behandlats i tidigare avsnitt. Här bör framhållas att placeringen av inledelen ska vara sådan att den varma luftströmmen inte riktas direkt mot känsliga ytor eller föremål.

Placeringen av värmepumpens inne- och utedel har avgörande betydelse för hur installationen uppfattas. Här finns för olika typer av luft-luftvärmepumpar en begränsning på avståndet mellan inne- och utedelen. Tidigare var det avståndet 10-15 m, nu finns det värmepumpar som tillåter upp till 40 m. Ett längre avstånd innebär att man har större frihet vad gäller placeringen av utedelen.

Värmepumpens utomhusdel kan skylas på olika sätt; med en häck, en spalje eller ett plank. Det viktiga är att luftcirkulationen inte störs. Rådgör med tillverkaren i tveksamma fall.

Inomhusdelen placeras ofta mot en yttervägg. Men den kan även placeras mer centralt i kyrkorummet. Förutsatt att luftväxlingen inte hindras kan inledelen byggas in. Ett exempel på detta visas i fig 3.



Frågan om förfulning eller förvanskning diskuteras vidare i den i den avslutande diskussionen.

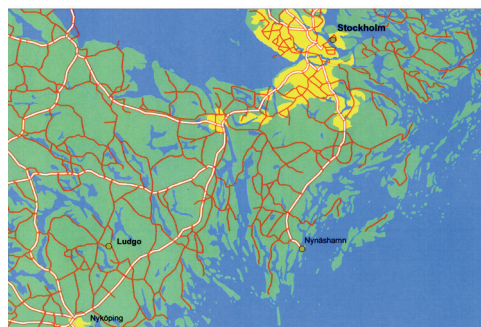
Tystnad kan vara en viktig kvalitet i äldre miljöer som saknar "vanliga" ljud från kylskåp och liknande. Det ljud som uppkommer vid drift är dock inte särskilt störande och kan undvikas genom avstängning av värmepumpen under kortare perioder.

Figur 3: Inbyggd värmepump i Garda kyrka på Gotland.

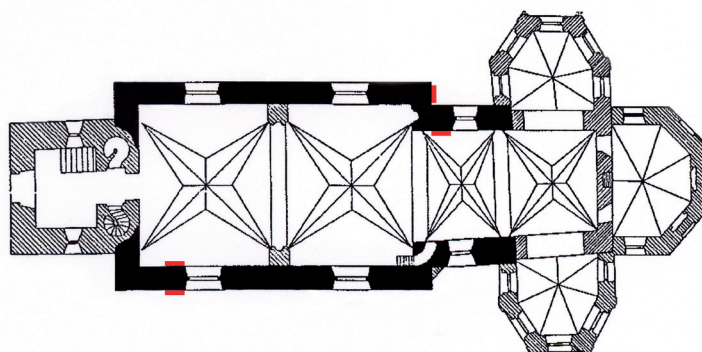
Pilotprojekt i Ludgo kyrka

Bakgrund

I Ludgo kyrka, norr om Nyköping, installerades i maj 2006 två stycken luft-luftvärmepumpar. Syftet med detta var att sänka uppvärmningskostnaden. I samarbete med församlingen, länsstyrelsen och stiftet har Högskolan på Gotland genomfört en studie med följande frågeställningar:



- Hur påverkar denna lösning inneklimatet; Luftrörelser, temperaturfördelning mm, med avseende på bevarande av känsliga föremål och material?
- Hur kan man lösa installationen in- och utvändigt utan att man förstör eller förvanskar byggnadens kulturhistoriska värden?
- Hur mycket energi kan man spara?



Figur 5. Värmepumparnas placering markerade med röda rektanglar.

Värmeanläggning

Den befintlig värmeanläggningen består av elektriska bänkvärmare och väggmonterade radiatorer med sammanlagd en sammanlagd effekt av 26 kW.

Värmepumpar:	2 st. Mitsubishi MFZ-KA35VAH
Effekt:	0,9-6,0 kW
Värmeffaktor:	2,5-3,0 (Energimyndigheten 2009)
Styrning:	Termostat och hygroskop (fr o m januari 2008)
Placering:	Se figur 5 samt nedanstående bilder.

Driftserfarenheter

Erfarenheterna från vaktmästaren och församlingens representant kan sammanfattas med att alla är nöjda. Uppvärmningen har fungerat bra och det har inte varit några driftsstörningar.

Placeringen av värmepumparnas yttre enheter har medfört att snö från taket rasat ner på dem.

Fram till 2007-01-12 användes både värmepumparna och befintliga bänkvärmare för att hålla en konstant grundtemperatur på 12°C. Därefter används enbart värmepumparna vid grundvärme.



Figur 6. Värmepumpens placering ut- och invändigt.



Figur 7. Värmepumpens placering ut- och invändigt.

Klimatmätningar och funktionskontroll

Temperatur och relativ fuktighet har mätts kontinuerligt under hela försöksperioden, från maj 2006 till december 2008.

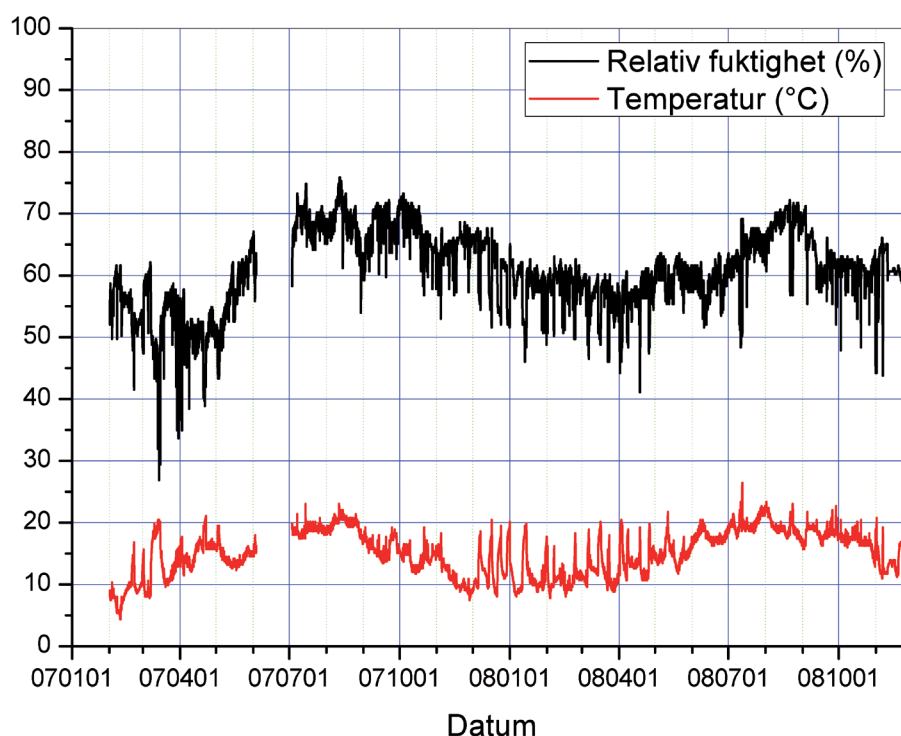
Vid två tillfällen, i februari 2007 samt i februari 2008, gjordes en mer ingående kartläggning av inneklimatet med tonvikt på temperaturfördelning och luftrörelser.

Temperatur och relativ fuktighet 2007-2008

Temperatur och relativ fuktighet i kyrkan från februari 2007 t o m november 2008 redovisas i fig 8. Under 2007 styrdes grundvärmen mot en konstant temperatur. Den styrningen har inte fungerat helt tillfredsställande, grundtemperaturen har varierat för mycket. I januari 2008 installerades en hygrostat vilken styrde den relativa fuktigheten vid grundvärme mot ett börvärde på 60% med en viss tillåten variation. Som framgår av diagrammet har det fungerat bra. Under vintern har grundtemperaturen legat nära eller strax under den av tillverkaren rekommenderade lägsta temperaturen som är 10°C

Vid förrättning höjs temperaturen kortvarigt till cirka 20°C och den relativa fuktigheten sjunker med 10-15 procentenheter.

Under sommarmånaderna då värmen varit frånslagen stiger den relativa fuktigheten över 70%. För att få en säkerhetsmarginal mot mögelangrepp kan man låta fuktstyrningen vara igång även under sommaren. Värme skulle då ha slagits på när RF steg över 60%.



Figur 8. Temperaturer i Ludgo kyrka februari 2007 till november 2008.

Luftrörelser

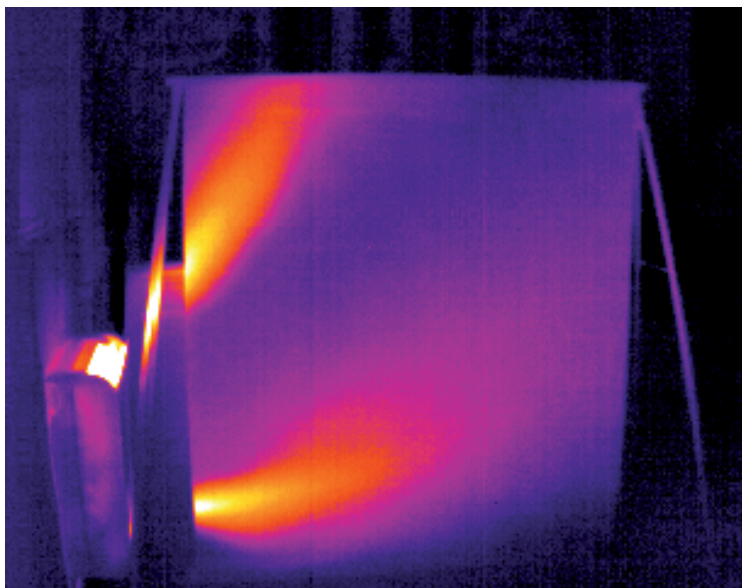
När det gamla värmesystemet gick med full effekt uppstod kraftiga luftrörelser, man fick sätta skyddsglas kring en del stearinljus.

Luftrörelserna bedömdes och mättes vid två olika tillfällen; februari 2007 samt februari 2008. Genomförande och resultat redovisas utförligt i en vetenskaplig artikel, bilaga 2. Här ges en sammanfattning av undersökningarna.

Luftrörelserna har mätts med anemometrar fördelade både horisontellt och vertikalt.



Figur 9. En rökgenerator användes för att visualisera luftrörelserna ut från värmepumparna.



Figur 10. En värmekamera användes för att visualisera luftrörelser och temperaturfördelning alldeles intill värmepumpen.

Bilden visar tydligt de två utgående luftströmmarna samt hur temperaturen fördelas nära värmepumpen. (Rött är varmt, blått är kallt)

Fyra driftlägen jämfördes i undersökningen:

- Värmepump och bänkvärmare
- Enbart bänkvärmare
- Enbart värmepump (Termostat satt till 12°C)
- Ingen uppvärmning (Temperatur > 10°C)

Följande iakttagelser gjordes:

- Det uppstår kraftiga vertikala luftrörelser nära utblåset från värmepumparna. De vertikala luftrörelserna ut från fläkten avtar efter cirka 1,5 meter därefter tar de termiska stigmakrafterna över och luften stiger långsamt uppåt som i en skorsten.
- Då den uppstigande luften kommer i kontakt med valven kyls den av och faller långsamt ner längs med väggar och fönster.
- Inte vid något fönster uppmättes luftrörelser som skulle kunna vara störande.
- Lufthastigheterna i kyrkorummet i stort är måttliga, lägre än 0,2 m/s, vilket med hänsyn till komfort är acceptabelt.
- Om luftströmmen från värmepumpen riktas längs golvet kommer den varma luften, till följd av den s.k. Coanda-effekten, att följa golvet och man får en bättre genomträngning av varmluften.
- Med undantag för en zon nära värmepumpens utblås så är luftrörelserna långsamma och jämna, utan störande turbulens.
- En mätning intill en av de stora tavlorna på den norra väggen visar att lufthastigheterna inte påverkas mycket av de olika driftlägena. Utan uppvärmning var medelhastigheten 0,04 m/s, med uppvärmning var den 0,10-0,15 m/s.
- Värmepumpen gav något lägre lufthastigheter vid tavlan än bänkvärmarna. (Skillnaden är liten och inte statistiskt signifikant)
- Med enbart bänkvärme uppstår annorlunda flödesmönster, jämfört med det värmepumparna ger, där varm luft stiger upp från bänkarna.

Försmutsning

Vid början av pilotförsöket fanns en betydande svärtning av väggarna i kyrkan. Svärtan bildar ett mönster med stora fläckar vilket sannolikt kan hänföras till stora genomgående stenar i muren vilka fungerar som köldbryggor, se figur 11.

Resultat från andra studier [Thatcher et al 2002] tyder på att den ökning av lufthastighet som uppvärmning ger, oavsett hur det går till, har en inverkan på försmutsningen. Hur stor inverkan är beror bl a på storleksfördelningen av partiklar i luften.



Figur 11. Köldbryggor i muren orsakar fläckvis försmutsning.

Skillnaden i lufthastighet mellan olika driftslägen, värmepump eller bänkvärmare, är så liten att man inte kan förvänta sig märkbara skillnader i försmutsningstakt.

Värmepumparnas filter borde minska partikelhalten och därmed reducera försmutsningen.

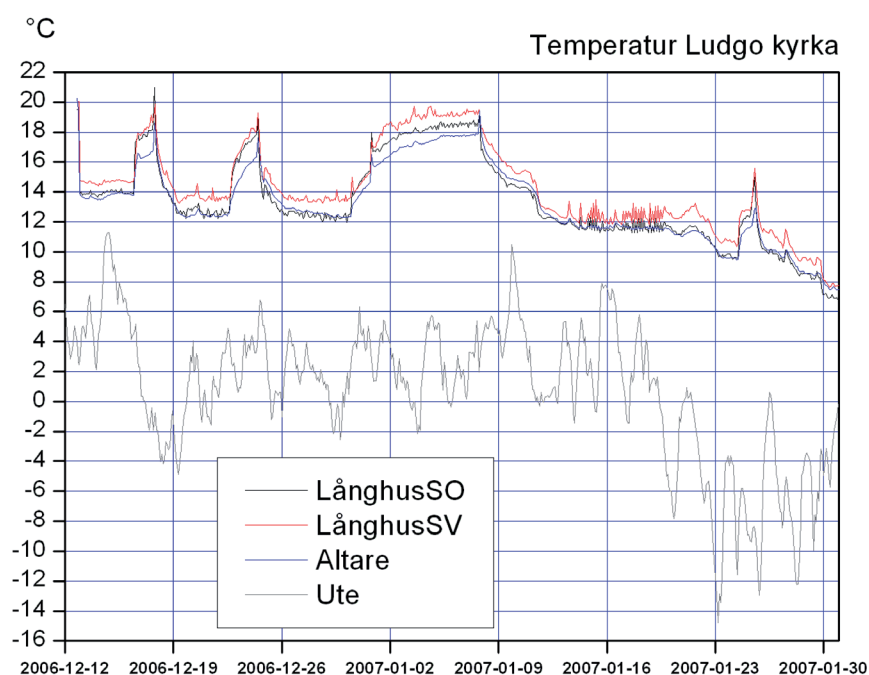
En tillståndsbedömning av några utvalda ytor gjordes av Gabor Pazstor vid Närke Konservatorn AB före igångsättning av värmepumparna [Pasztor & Villanyi 2008].

I rapporten konstateras att :

”Under den andra besiktningen kunde vi inte påvisa det minsta okulärt observerbar försämring i kondition eller nedsmutsning i jämförelse mot den tillståndsbild som vi uppfattade förra året.”

Temperaturgradienter i rummet

Med undantag för området närmast värmepumpen får man i kyrkorummet en mycket jämn temperaturfördelning såväl horisontellt som vertikalt. Det gäller för alla fyra driftslägen som undersökts. [Bilaga 1]



Figur 12. Temperaturfördelning i kyrkan.

Fig 12 visar temperaturen i kyrkan från början av december 2006 till slutet av januari 2007. Av digrammet framgår att det inte är några större temperaturskillnader mellan kyrkans olika delar. Den mätare som varit placerad närmast en av värmepumparna visar genomgående en något högre temperatur. Det skiljer dock inte mer än 2°C. Temperaturfördelningen i horisontalplanet vid grundvärme uppmättes i februari 2007, se tabell 1.

Tabell 1: Temperaturfördelningen i horisontalplanet vid grundvärme februari 2007

Nr	Plats	Temp (°C)	RF(%)
1	Framför VP A, 1,5 m från, 1,5 m ovan	8,7	
2	Framför VP B, 1,5 m från, 1,5 m ovan	8,1	57%
3	Mittgång, under ljuskrona	8,5	
4	Bänk norrsida mitt i	-	-
5	Vägg, norrsida, mitt i	7,7	
6	På altarskranket	7,7	54%
7	Bänk sydsida, fram	7,6	54%
8	Utanför orgelläktare	7,7	
9	Värmepumpens utblås	39	
10	Utomhus	-8,0	

Mätningarna visar på en jämn temperaturfördelning i golvplanet. Det finns inga tecken på att värmepumpen orsakar allvarliga övertemperaturer i någon del av kyrkorummet, utom i direkt anslutning till utloppet.

Energibesparing

Värmepumparna ger en betydande energibesparing. I tabell 2 redovisas energiförbrukningen i kyrkan under drygt två år. Totalt ger värmepumparna en energibesparing på drygt 22 700 kWh/år. Detta ska jämföras med investeringskostanden på 85 000 kr.

Tabell 2: Energiförbrukning i Ludgo kyrka

Avläsning	VP förbr (kWh)	VP Ut (kWh)	VP (%)	Direktel (kWh)	Totalt (kWh)
2006-05-02					
2006-10-19	187	561	10%	5246	5807
2007-02-01	4317	12951	37%	22266	35217
2007-05-02	4247	12741	44%	15902	28643
2008-11-08	14891	44673	49%	45935	90608
Hela perioden	23642	70926	44%	89349	160275

VP förbr Den el som används för att driva värmepumpen
 VP Ut Avgiven värme från värmepumpen. Beräknat värde
 VP % Värmepumpens andel av den energi som tillförs kyrkan
 Direktel Elförbrukning för direktverkande el

Antikvariska aspekter

Möjliga problem och risker är:

- Håltagning genom yttervägg.
- Uppkomst av luftrörelser och temperaturer vilka inverkar negativt på byggnad, inredning och inventarier.
- Placering av inne- och utedel kan verka störande ur estetisk och arkitektonisk synvinkel. Värmepumpen kan även ge upphov till störande ljud.

Håltagningen genom ytterväggen har i detta fall gjorts genom befintligt murverk samt putsskikt i form av ett borrarat hål med 5 cm i diameter. Ingreppet har i detta fall inte inneburit någon större förvanskning eftersom inga värdefulla yt-skikt har förstörts.

Den varma luften som blåses ut från värmepumpen kan, om den riktas på fel sätt, orsaka skador till följd av uttorkning. I detta fall finns inga känsliga ytor eller material i närheten av värmepumparna. Generellt kommer all uppvärmning att bidra till svärtning av kalla väggar. Luftrörelserna förstärker detta. En motverkande faktor är att värmepumpen har ett inbyggt filter vilket reducerar partikelinnehållet i luften. Svärtningen som uppstår vid uppvärmning inför en förrättningar, då hela kyrkans värmeeffekt används, är den samma som förut. Det är med nuvarande kunskapsläge omöjligt att skilja ut hur mycket svärtning som uppstår till följd av grundvärme respektive förrättningsuppvärmning.

Värmepumparna påverkar självklart den estetiska och arkitektoniska upplevelsen av den miljö som finns i och kring byggnaden. Värmepumpens inomhusdelar har fått en relativt undanskymd placering vid ytterväggarna, se fig 6 och 7. De utgör inget dominerande intryck i kyrkorummet. Utomhusenheterna har placerats mot respektive vägg utan att försöka dölja dem, se fig 6 och 7. Upplevelsen av dessa installationer beror mycket på var man står.

Ljudet från uteenheterna är hörbart en stilla dag. Innedelarna är så pass tysta att man får gå fram för att höra eller känna om fläktarna är på.

Slutsatser från pilotprojektet i Ludgo kyrka

Slutsatserna från undersökningarna i Ludgo kyrka är att:

- Genom att ersätta direktverkande el med en luft-luftvärmepump för grundvärme har församlingen minskat sin energiförbrukning med drygt 22 000 kWh per år.
- Lönsamheten för investeringen är god.
- Värmepumparna orsakar inte kraftigare luftrörelser än bänkvärmarna.
- Det finns ingenting som tyder på att värmepumparna skulle förvärra förosmutsning eller försämra komforten.
- Värmepumpen ska dimensioneras så att den täcker grundvärmebehovet.
- Värmepumparna måste placeras så att luftströmmarna inte riktas mot känsliga ytor, föremål eller personer.
- Installationerna ska utföras så att åverkan på byggnaden och den visuella inverkan minimeras

Det ovanstående leder till en rekommendation att pilotprojektet i Ludgo avslutas och värmepumparna får sitta kvar. Även i fortsättningen bör man göra en regelbunden uppföljning av värmepumparnas funktion och hur de påverkar inneklimat och byggnad.

Slutsatserna från Ludgo kan förhoppningsvis utgöra en grund för fortsatt utveckling men det bör framhållas att resultaten inte med automatik är överförbara på andra kyrkor. Mer om detta i kapitlet *Diskussion*.

Diskussion

Våra gamla kyrkor är ett exempel på hur man historiskt sett har lyckats med hållbar utveckling. Det är byggnader som under många hundra år har både brukats och bevarats. Mellan brukande och bevarande finns självklart ett ömsesidigt beroende; om byggnaden inte hålls efter kan den inte användas och om byggnaden inte används har man tagit bort det viktigaste incitamentet för underhåll och bevarande. Under den ganska korta tid som kyrkorna har värmts upp, har även uppvärmningskostnaderna blivit en del av den kompromiss som måste göras. På senare tid har vi insett att den energi vi använder för uppvärmning även har en inverkan på det globala klimatet.

En diskussion om uppvärmning av kyrkor i allmänhet och luft-luftvärmepumpar i synnerhet måste föras utifrån ett långsiktigt hållbarhetsperspektiv. Även om kyrkornas användning avtar kommer många kyrkor att behöva någon form av uppvärmning för att motverka fuktrelaterade skador och problem. Den energitillförseln måste ordnas så effektivt som möjligt både för att minska församlingens kostnader och för att minska belastningen på den globala miljön.

Många kyrkor har idag direktverkande el som enda värmesystem. Med hänsyn till ett begränsat nyttjande och församlingarnas ekonomi är ofta, men inte alltid, en konvertering till vattenburen värme och alternativa energikällor orimligt dyr. Att ersätta direktverkande el med en luft-luftvärmepump är en enkel och relativt billig lösning som ger en väsentlig energibesparing. Ur ett rent teknisk-ekonomiskt perspektiv är frågan inte varför man ska byta till värmepump utan varför inte man gör det.

En värmepump är beroende av elkraft och man kan ifrågasätta om det är en hållbar lösning. Så länge värmepumpen ersätter direktverkande el, så ger varje värmepump en minskad elförbrukning och det är bra oavsett var elen kommer ifrån.

Risken för att luft-luftvärmepumpens fläktar orsakar luftrörelser som ökar förosmutsningen av väggar och föremål måste tas på allvar. Upprepade rengöringar kommer gradvis att förstöra originalytorna och stora kulturhistoriska värden går till spillo. Det finns även en ekonomisk aspekt av detta. Kostnaden för att rengöra väggar och tak är hög och ska ställas i relation till energibesparingarna.

Installationerna är i hög grad reversibla. Den enda permanenta åverkan som görs är ett hål genom kyrkväggen med cirka 5 cm diameter. I övrigt kan man snabbt och lätt ta bort en värmepump.

Den vanligaste invändningen mot att luft-luftvärmepumpar är att installationer är fula och att de förstör helhetsintrycket av kyrkan. Det är uppenbart att värmepumpen påverkar byggnadens estetiska och arkitektoniska värden. Frågan är om installationerna är så fula att man bör avstå från en lösning som i övrigt är fördelaktig och om ett sådant ställningstagande är långsiktigt hållbart. Den bedömningen måste göras från fall till fall med utgångspunkt från kyrkans kulturhistoriska värden, praktiska förutsättningar och rådande värderingar. Det finns kyrkor där man av utseendemässiga skäl självklart inte bör installera värmepumpar och det finns kyrkor där det inte är några problem.

Det finns inga grundläggande eller absoluta hinder för att mer allmänt införa värmepumpar för grundvärme i kyrkor, men det bör även fortsättningsvis göras under kontrollerade former och efter samråd med såväl antikvarisk som teknisk expertis.

Värmepumpen är inte en ideal lösning, man får se den som ett reversibelt långtidsprovisorium vilket kan vara den kompromiss som gör att kyrkan kan brukas och bevaras ytterligare någon generation.

Förslag till fortsatt arbete

Kommande installationer av luft-luftvärmepumpar i kyrkor bör följas upp och utvärderas. Det är viktigt att hitta former för ett kunskaps- och erfarenhetsutbyte mellan olika aktörer inom detta område.

För att kunna utvärdera luftrörelser behövs enkla, standardiserade metoder som kan användas i fält.

Det pågår ett forskningsprojekt om luftrörelser och svärtning vid Högskolan i Gävle. Syftet är dels att få en mer generell kunskap om hur värmefläktar påverkar luftrörelser i kyrkor, dels att skapa en bättre förståelse för de mekanismer som påverkar svärtning.

Luft-luftvärmepumparna kan utvecklas mot en mer anpassad design och högre prestanda. Med valbara former, material och färger kan såväl inne- som uteenheterna anpassas bättre till kyrkomiljöerna. Genom att ta fram värmepumpar som är särskilt anpassade för grundvärme vid en låg temperatur kan prestanda höjas betydligt. I båda fallen handlar det om att hitta någon fabrikant som är intresserad av en relativt liten marknad där total kvalitet är väl så viktigt som pris.

Litteratur

ASHRAE *Handbook* 2007 HVAC Applications, chapter 21: Museums, Galleries, Archives, and Libraries

Brimblecombe, P. ed. 2003 *The Effects of Air Pollution on the Built Environment. Air Pollution Reviews – Vol.2.* Imperial College Press, London

Broström, T. m fl 2008 *Handbok i hållbar energianvändning för kyrkan.* Verbum förlag, Co-author.

Brostrom, T. 2008 Heat Pumps for Conservation heating. *Nordic Symposium on Building Physics 2008*

Broström, T. 1996 *Uppvärmning i kyrkor – Fukt- och värmetekniska beräkningar för dimensionering och klimatstyrning.* Royal Institute of Technology, Stockholm.

Camuffo, D. et al. 2006 *Church Heating and the Preservation of Cultural Heritage.* Electa

Camuffo, D. 1998 *Microclimate for cultural heritage.* Elsevier science B.V. Amsterdam, The Netherlands. ISBN 0-444-82925-3.

Energimyndigheten. 2009 *Test av luft/luft-värmepumpar.* Energimyndigheten. www.energimyndigheten.se

Fanger P. O. 1970 *Thermal Comfort.* McGraw-Hill, New York

Harrysson, C. 2004 Byggnadsutformning och värmekapacitet. *Bygg&Teknik, nr 5*

Kerschner, R. 2007 Providing Safe and Practical Environments for Cultural Property in Historic Buildings... and Beyond. *From Gray Areas to Green Areas: Developing Sustainable Practices in Preservation Environments, Symposium Proceedings.* The Kilgarlin Center for Preservation of the Cultural Record, School of Information, The University of Texas at Austin.

Klenz Larsen P. 2007 Climate Control in Danish Churches. *Contributions to the conference Museum Microclimates.* The National Museum of Denmark, Copenhagen.

Mosley, R B, Greenwell, D J, Sparks, L E et al 2001 Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol science and technology; Vol. 34;* pp 127-136.

Neuhaus E., Schellen H.L. 2006 Conservation Heating to Control Relative Humidity and Create Museum Indoor Conditions in a Monumental Building. *Proceedings of the 27th AIVC conference -(EPIC2006AIVC) . Technologies & sustainable policies for a radical decrease of the energy consumption in buildings.* Lyon, France, 45-50.

Pasztor G., Villanyi M. 2008 *Besiktningrapport beträffande inventarier i Ludgo kyrka, Rönö församling, Nyköpings kommun, Södermanlands län.* Närke Konservatorn AB

Schellen. H. 2002 *Heating Monumental Churches.* Technische Universitet Eindhoven

Staniforth S., Hayes B. and Bullock L. 1994 Appropriate Technologies for Relative Humidity Control for Museum Collections Housed in Historic Buildings. *Preventive Conservation: Practice, Theory, and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress. London: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC),* 123-128.

Thatcher, T L, Lai, A C K, Moreno-Jackson, R, et al 2002 Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rate indoors. *Atmospheric environment; Vol. 36;* pp 1811-1819.

Bilagor

Bilaga 1

Convective heating in a medieval church – Effects of air-to-air heat pumps on air movements, particle deposition and temperature distribution. (Publicerad vid konferensen Roomvent 2009 i Sydkorea)

Bilaga 2

Heat pumps for conservation heating. (Publicerad vid konferensen Nordic Building Physics i Köpenhamn, 2009)

Foto: Författaren

Convective heating in a medieval church – Effects of air-to-air heat pumps on air movements, particle deposition and temperature distribution.

Tor Broström¹, Elisabet Linden², Svante Lindström², Magnus Mattsson² and Mats Sandberg³

¹Gotland University, Department of Building Conservation, 621 67 Visby, Sweden

²University of Gävle, Department of Built Environment, 801 76 Gävle, Sweden

³KTH Research School, University of Gävle, 801 76 Gävle, Sweden

Corresponding email: elisabet.linden@hig.se

ABSTRACT

In Europe many historic buildings use direct electric heating. Air-to-air heat pumps are an interesting alternative, in particular for conservation heating. However, the convective heating may accelerate soiling of walls and artefacts by increasing the velocity and turbulence.

The objective of the present paper is to discuss the general problem, the methodology for studying air motions and temperature distribution, and to present the results from a case study where air-to-air heat pumps and bench heaters were used for heating in a medieval church. The temperatures, velocities and humidity in the church have been measured for four different heating modes.

The present study does not indicate any major disadvantages of using heat pumps for background heating in stone churches of the studied kind. More detailed long term studies are needed to ascertain the effects over time.

INTRODUCTION

Many historic buildings in Europe use direct electric heating. In order to reduce energy costs and promote sustainability there is an increasing pressure to replace direct electric heating with heat pumps or bio fuels. Heating used to control relative humidity (RH) for preservation purposes is called *conservation heating*. Low indoor temperatures and a stable heating load over most of the year make this a very good application for heat pumps [1].

The general problem is that a heating system (direct electric) providing relatively uniform heating is replaced by a number of convective heaters concentrating the heat input to some locations only. From a cultural heritage point of view there is a concern that this practice may increase air movements and thus accelerate particle depositions on walls and artefacts [2]. Also there may be a risk for damaging temperature gradients in rooms with high ceilings.

The objective of this paper is to discuss the general problem, the methodology for studying air motions and temperature distribution, and to present the results from a case study where air-to-air heat pumps were used for conservation heating in a Swedish medieval church.



Figure 1. Exterior and interior of the medieval church in Ludgo.

Case study

Ludgo church, figure 1, located south of Stockholm is built in stone. The oldest parts are from the 12th century and the church was completed in the 17th century. The church houses a number of valuable and sensitive art objects. The church has been heated intermittently with direct electric radiators, most of them placed under the benches. In between services, the temperature is lowered to about 12°C. In order to reduce heating costs, the parish installed two air-to-air heat pumps, figure 2. The County Board Conservation Authority granted this installation on the condition that it would be evaluated from a preservation point of view.



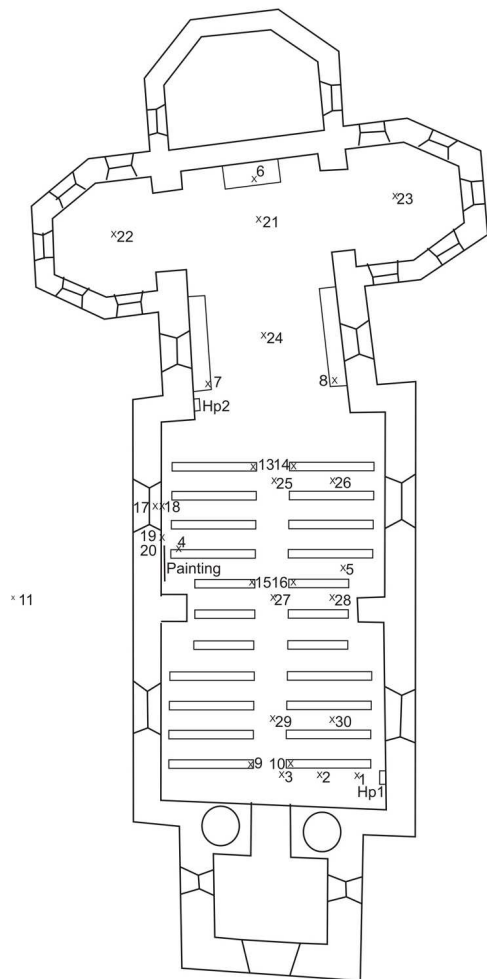
Figure 2. The location of the heat pumps.

METHODS

The measurements were carried out in January 2008 to ensure a high difference between the outdoor and the indoor temperature. Temperature, air velocity and humidity have been measured in 30 points according to table 1 and figure 3.

Table 1. Measurement points in the church.

Point	Measurement	Instruments	Comments
1-4	Temperature, Air velocity	Anemometers	On 10 different heights
5	Temperature	Thermistors	On 7 different heights
6-12	Temperature, RH	Thermistors, RH-sensors	
13-20	Temperature	Thermocouples	
21-30	Temperature, Air velocity	Anemometer	



Four different heating modes were studied:

- Heat pumps (HP) and bench heaters (BH).
- Only bench heaters.
- Only heat pumps. (Thermostat setting 12°C)
- Neither heat pumps nor bench heaters. (Temperature > 10°C)

Two measurement poles, see figure 4a and 4b, were used. One was moved between the points 1-4 to measure the temperature and air velocities close to one of the heat pumps and one of the paintings. The other was permanently located at point 5 to measure the temperature gradient in the room.

In the points 6-12 instruments were placed to log the temperatures and the relative humidity constantly. Point number 11 was located outdoor. Also in point 13-20 constant measurements of the temperature were made, in this case with thermocouples. An anemometer was moved between the points 21-30 to measure the air velocity and temperature.

Figure 3. Drawing of the medieval church and the measurement points.

The air movements and temperatures close to one of the heat pumps were visualized using an infrared camera, AGEMA 570 with a resolution of 320*240 pixels. To be able to record the air temperature and visualize the temperature pattern a thin measuring screen made out of paper was used. The paper attains a temperature close to the local air temperature. The screen was located perpendicular to the convector and parallel with the airflow direction, see figure 5b.

The air movements close to the same heat pump where also visualized by using smoke. The smoke from a smoke generator was injected through the heat pump and photos and a video film were taken.



Figure 4a and b showing the measurement poles at point 2, 4 and 5.

In a previous study [4] the relation between air velocities in a room and deposition rates of particles were reported. The data from these experiments were used to estimate the change in deposition rate resulting from the increase in air speed in Ludgo church due to the use of heat pumps.

RESULTS

The measurements are presented for three different areas in the church: close to the heat pump in the rear of the church, close to one of the paintings and in the church in general.

The heat pump has two air outlets, one can be directed at an angle upwards and the other one is directed horizontally or towards the floor. An example of a visualisation with smoke is shown in figure 5a. Figure 5b shows an example of measurement of the air temperature distribution with a combination of an IR-camera and a measuring screen. From both outlets the air jet penetrates about 3 meters into the church. From there on the buoyancy force dominates and the air stream rises upwards.

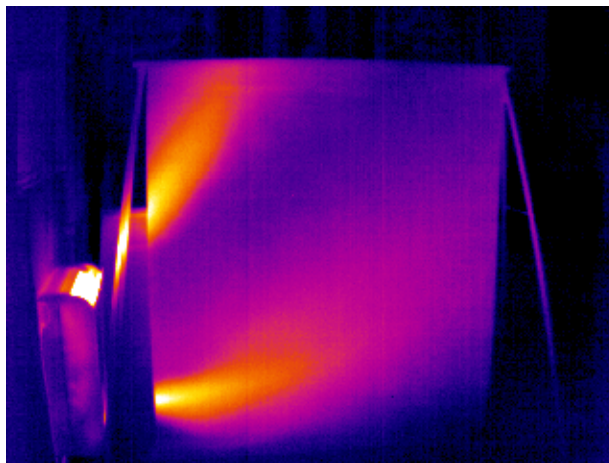


Figure 5a and b showing visualization with smoke and IR-camera close to heat pump 2. Air velocities close to the heat pump (HP1, position see figure 3) are presented in table 2. Measurements for two heating modes; a) heat pumps and bench heaters and b) only bench heaters are presented. The result for the first mode shows a similar pattern as the visualization above. It should be noted that 0.9 m is the lowest height measured. Below this height the behaviour of the air currents are investigated only by smoke visualisation.

Table 2. Air velocities [m/s] close to heat pump 1 for two different heating modes.

Height from floor [m]	Distance from Heat Pump [m]			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 3
	1.4	2.8	4.2	4.2
	Heat pumps and bench heaters			Only bench heaters
5.4	0.28	0.42	0.27	0.10
4.9	0.25	0.36	0.29	0.13
4.4	0.22	0.32	0.29	0.09
3.9	0.24	0.35	0.26	0.10
3.4	0.20	0.32	0.32	0.08
2.9	0.18	0.33	0.31	0.10
2.4	0.14	0.33	0.39	0.08
1.9	0.13	0.29	0.48	0.04
1.4	0.12	0.25	0.70	0.02
0.9	0.31	0.30	0.64	0.03

Table 3. The vertical temperature distribution [°C] in point 5 for four different heating modes

Height from floor [m]	HP + BH	HP	BH	None
5.48	20.2	14.5	19.5	12.5
4.78	20.1	14.3	19.2	12.6
4.08	20.0	14.4	19.1	12.5
3.38	19.9	14.4	19.0	12.5
2.68	19.7	14.4	18.9	12.4
1.98	19.6	14.4	19.0	12.6
1.28	19.7	14.2	19.1	12.5

The vertical temperature distribution can be seen in table 3. The temperature gradient is quite small for all four cases (with the exception for the volume close to the heat pumps). In the horizontal plane, the temperature differences are lower than 1 °C for both the case with no heating and the case with heat pumps.

Air velocities in the church, except for the volume close to the heat pumps, are generally moderate; less than 0.2 m/s.

Measurements in the near-zone of one of the paintings on the north wall, see table 4, show that the air velocity does not change much with different heating modes. With no heating, the mean velocity was 0.04 m/s, with heating the mean velocity was in the range of 0.10-0.15 m/s.

Table 4. Air velocities [m/s] close to one of the paintings on the north wall in point 4.

Height from floor [m]	HP + BH	HP	BH	None
	5.4	0.13	0.10	0.14
4.9	0.13	0.10	0.12	0.05
4.4	0.12	0.08	0.09	0.02
3.9	0.17	0.14	0.12	0.05
3.4	0.16	0.15	0.10	0.03
2.9	0.18	0.13	0.13	0.05
2.4	0.16	0.11	0.13	0.03
1.9	0.16	0.12	0.14	0.04
1.4	0.10	0.08	0.10	0.02
0.9	0.10	0.08	0.10	0.04
Mean	0.14	0.11	0.12	0.04

The important issue, with regard to preservation, is if and how the air movements affect particle deposition. Table 4 shows that heating in general does increase air velocities near the painting, but there is no significant difference between different heating modes.

The increase in air speed caused by heating is likely to enhance particle deposition on surfaces to some extent, as has been shown in some previous studies (e.g. [3], [4]). In the study by [4] the room air speed is well documented and these results were used in the present study to make a rough estimation of how much the air speeds can be expected to influence the particle deposition rate. The previous study [4] was not carried out in a church but in a 14 m³ experimental room with textured drywall surfaces and the air speed was altered by means of mixing fans. The impact of furnishing was also investigated. As shown in Table 4, our measurements indicate a mean air speed of about 0.04 m/s with no heating and about 0.14 m/s when both bench heaters and heat pumps were turned on. Two of the air speeds tested by [4] are close to these values – 0.054 m/s and 0.142 m/s respectively – and are thus suitable for reference. Table 5 shows some of their data on particle deposition rate, including four different particle sizes and two different levels of furnishing (“carpeted” and “fully furnished” resp.). Comparing the lowest measured velocity, no heating, with highest velocity the results from [4] was used to estimate the mean deposition rate for the two furnishing levels as well as the change in deposition rate resulting from the increase in air speed; the calculated data are included in Table 5.

Table 5. Mean deposition rate [h⁻¹] for different particle diameters, D, at different air speeds, V, and different furnishing (C=carpeted, F=fully furnished). Raw data adopted from [4].

D [μm]	V = 0.054 m/s			V = 0.14 m/s			Change [%]
	C	F	Mean of C & F	C	F	Mean of C & F	
0.55	0.13	0.23	0.18	0.18	0.23	0.21	+14
1.00	0.20	0.28	0.24	0.23	0.33	0.28	+17
2.94	1.17	1.46	1.32	1.78	1.93	1.86	+41
8.66	5.55	5.57	5.56	8.83	10.50	9.67	+74

The column labeled “Change” shows the increase in particle deposition rate due to the increase in velocity.

CONCLUSIONS

When the heat pumps were used for heating in the church, much higher air speeds and temperatures were found in the near zone of the heat pumps. The airflow in this area depends on how the air jets from heat pump are directed. It is important to adjust the heat pumps so they are not directed towards people or sensitive artefacts.

In the rest of the church the temperature was evenly distributed and the air speed was low. With respect to comfort the air motions are acceptable. Close to the painting there is a substantial increase in air speed when the church is heated. However, the difference between the different heating modes is relatively small. Using only heat pumps resulted in slightly lower air velocities as compared to bench heating, which is the conventional solution.

The data in table 5 indicate that the higher air speeds that are caused by the heating units result in between 14% (particle diameter 0.55 μm) and 74% (particle diameter 8.66 μm) increase in particle deposition rate, with successively higher rate the larger the particles. The net effect as regards soiling of surfaces thus depends on the particle size distribution of the indoor air. For churches this size distribution is largely unknown but can be expected to vary substantially. In case soot particles from candle burning represent the dominating soiling particles, these are submicronic and can be expected to be less affected by air speed in their deposition on surfaces. If, however, larger particles are dominating soiling, air speed can be an important factor, although its effect on deposition does not seem to be dramatic. Large particles might enter churches through infiltration through the (often leaky) windows, doors, cracks etc., and might also be emitted by visitors. It seems that more data on typical particle size distribution of air in churches is needed in order to get a better idea of the effect of air speed on surface soiling. The data in table 4 does however not indicate that the different heating systems cause a significant difference in room air speed, and thus no substantial difference in soiling could be expected. The heat pumps are equipped with filters which will reduce the amount of particles in the air. A conservator has made ocular inspections of selected surfaces before the heat pumps were installed and after a year and a half. There was no visible soiling during this period.

The overall conclusion is that the air-to-air heat pumps used for conservation heating in this case have no significant negative effects on air motions with respect to preservation and comfort aspects. It should be pointed out that these results are not generally applicable, each building must be considered with respect to the specific conditions.

DISCUSSION

Convective heating is commonly used in monumental buildings like churches and there is pressure to introduce this kind of heating in more buildings. By definition, convective heating will cause air motions which may have a negative effect in terms of comfort and increased particle deposition on valuable surfaces. The general understanding of this phenomenon is limited. We need more general knowledge on how convective heating affects the air motions and how air motions affect particle deposition.

Measurements and visualisations are instrumental in understanding the air distribution in the church. The results from the field measurements in this case allow for a comparison between the four heating modes with regard to airflow patterns and temperature distribution in the church. The visualization of air flows shows how the placement and direction of the heat pumps may influence comfort and risk of soiling valuable surfaces. These are relatively simple tools that can be used in the individual objects for a qualitative assessment.

It should be kept in mind that our room air speed measurements (outside of the near-zone of the heat pumps) are limited to one location in the horizontal plane. Probably the air movements differ to some extent in other places. It is however likely that the strong convective air currents from the heat pumps cause a general increase in room air speed. Additionally, these air currents might also cause more of the particles in the lower part of the church to reach upper zones, which thus might become more polluted, especially as regards larger particles. Deposition of airborne particles on church surfaces occurs also due to several other mechanisms (well explained by [2]), e.g. thermophoresis, and there is poor knowledge in how these mechanisms interact with that of air movements. These issues need to be investigated more in order to be able to better assess the effect of different heating sources on surface soiling in churches. Further, as pointed out by [2], it is the level of air *turbulence* (relative turbulence intensity or standard deviation) rather than the mean air speed that is related inertial particle deposition. Although a higher mean air speed generally causes more turbulence there is no direct relationship, so, if possible, it is desirable that air flow measurements of the present kind include turbulence.

In order to increase the general understanding of air motions in monumental buildings with high ceilings, a multidisciplinary project has been started at University of Gavle. Engineers work together with conservators in order to come up with guidelines for convective heating in historic buildings where both comfort and preservation aspects must be considered.

ACKNOWLEDGEMENT

The present study was carried out with financial support from The Swedish Energy Agency, The Swedish National Heritage Board and The Church of Sweden. The pioneering efforts of Ludgo Parish, mr Sten Mattsson in particular, in installing the heat pumps and facilitating our study are gratefully acknowledged.

REFERENCES

1. Brostrom, T. Heat Pumps for Conservation heating, Nordic Symposium on Building Physics 2008 .
2. Camuffo, D. 1998. Microclimate for cultural heritage. European commission – Environment and climate research programme. ISBN 0-444-82925-3. Elsevier science B.V. Amsterdam, The Netherlands.
3. Mosley, R B, Greenwell, D J, Sparks, L E et al 2001. Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol science and technology*; Vol. 34; pp 127-136.
4. Thatcher, T L, Lai, A C K, Moreno-Jackson, R, et al 2002. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rate indoors. *Atmospheric environment*; Vol. 36; pp 1811-1819.

Heat pumps for conservation heating

*Tor Broström, PhD, Assistant Professor,
Gustaf Leijonhufvud, PhD Student*

*Gotland University, Department of Building Conservation;
tor.brostrom@hgo.se, www.hgo.se*

KEYWORDS: *conservation heating, climate control, heat pumps*

SUMMARY:

Conservation heating is used to control relative humidity in order to better preserve historic buildings and their interiors. The heating load for conservation heating when applied in a Nordic climate was characterized in order to investigate if and how air-to-air heat pumps can be used for conservation heating. Heating for conservation results in indoor temperatures that follow the seasonal variation of the outdoor temperature. Depending on the season and moisture load on the building, the indoor temperature will be 0-10 °C higher than the ambient temperature. The heating load is much smaller and more stable over the year as compared to heating for comfort. In the south of Sweden conservation heating is motivated mainly by preservation aspects, whereas in northern Sweden the potential for energy saving is considerable. Heat pumps in general and air-to-air heat pumps in particular, have properties that match the requirements of conservation heating and can provide a cost effective solution. Heat pumps specially designed for conservation heating could improve the performance radically in relation to standard heat pumps.

1. Introduction

1.1 Background

Climate induced degradation is one of the major threats to historic buildings and their interiors. The best conservation strategy is to act in order to prevent damages. Climate control, when properly used, is an efficient and cost-effective method for preventive conservation. The present paper deals with historic buildings, such as churches, castles and manor buildings where preservation is a primary consideration in determining the proper indoor climate. Climate control in this type of buildings should ideally be a combination of passive control and active measures such as heating, ventilation, humidification, and dehumidification. In practice, heating is often the only kind of active climate control available.

Heating used to control relative humidity (RH) for preservation purposes is called *conservation heating*. Conservation heating is used mostly in temperate climates in buildings that are heated for comfort intermittently or not at all. The effects of conservation heating on the preservation of buildings, interiors and objects has been the subject of a number of investigations, (Staniforth et al 1994, Padfield 2007, Maekawa 2003 and Neuhaus et al 2006)

In Scandinavia a limited number of churches use conservation heating in combination with intermittent heating for services. Background heating, i.e. heating the building to a constant temperature, is used in a wide range of building types even though the objective is seldom clear. Many historic buildings are unheated, but would require some kind of climate control to reduce relative humidity. Other old buildings, for example churches, can no longer be heated due to increasing energy costs. Global warming may increase the need for conservation heating in some regions. A number of warm and humid summers and autumns during the last ten years have caused mould in buildings that have been without problems for hundreds of years.

Conservation heating is becoming more common in Scandinavia and national policies for conservation heating have been discussed. There is a growing pressure from building owners to use relatively cheap air-to-air heat pumps for conservation or background heating. It has become clear that the consequences of and requirements for conservation heating in a Nordic climate are not well understood. Engineers, conservators and policy makers need scientific facts, methods and verified solutions in order to use conservation heating in a responsible manner.

1.2 Objectives

The primary objective of this paper is to investigate, from an engineering point of view, if and how air-to-air heat pumps can be used for conservation heating. In order to do this, the heating load for conservation heating when applied in a Nordic climate must be characterized in a general way, not only for individual objects. This analysis will also add new and relevant information about conservation heating in general when applied in a Nordic climate.

2. Indoor climate criteria for preservation

One major problem in controlling the indoor climate in historic buildings is to specify the appropriate climate. For museums, the research and development on climate specifications is summarised in ASHRAE handbook (2007). There is a continuous development and discussion about climate specifications which is well reflected by the contributions to the conference on Museum Microclimate in Copenhagen 2007. Often the museum requirements are too strict for historic buildings; this is due to the use of the building or to economic limitations. The present paper does not intend to extend the knowledge or discussion about climate requirements. The following is a description of the general requirements for conservation heating.

An upper limit for RH is needed in order to prevent biodeterioration; mould, insects etc. Mould and other fungi depend on a combination of relative humidity and temperature (Krus et al 2007). At normal room temperatures the limiting RH is around 80%, the colder it gets, the higher RH can be allowed without any risk for mould growth. In Scandinavian historic buildings mould growth occurs mostly in late summer and early autumn when it is both warm and humid. Insects have optimal conditions between 20 and 35°C and RH above 70% (Child 2007). In defining the upper limit for RH one should take into account microclimates that may occur in parts of the building; in corners behind furniture etc.

The moisture content in wood and other hygroscopic materials depends on the surrounding relative humidity. As the moisture content varies, the materials will shrink and swell. In order to avoid damages, such as cracking, flaking and peeling, variations in relative humidity must be limited.

Salt damages are due to the crystallization of salt on the surface or inside porous materials. Repeated cycles of varying RH can be detrimental if crystals are formed and dissolved. The critical levels depend on the types of salt involved.

All organic materials degrade with time, the rate of degradation increases with temperature and RH. This means that, if we have a choice, cool and dry is generally better than warm and humid. Conservation heating increases temperature and reduces RH. The effects on degradation would tend to offset each other, but in some cases conservation heating could accelerate degradation (Padfield 2007).

In the following calculations, a set value for relative humidity of 70% has been used. This represents a minimum requirement for conservation heating that would give a stable indoor climate and a margin with respect to biodeterioration.

3. Conservation heating

The basic principle of conservation heating is to control the temperature in a building in order to keep relative humidity within given limits. Hygrostats are used to control the heat input, this is a reliable solution based on commercially available technology. The result is that the indoor temperature will follow the seasonal variations of the outdoor temperature throughout the year as shown in fig 1.

There are some limitations to the use of conservation heating. When the RH is too low, the temperature can only be reduced to the level set by the ambient temperature and/or the temperature of the interior surfaces. In the winter, conservation heating may result in uncomfortably low temperatures, even below 0°C. In the summer time conservation heating may result in uncomfortably high temperatures.

Assuming that the humidity by volume inside the building is the same as on the outside, the temperature required to maintain a specified relative humidity can easily be determined. In most buildings however, the humidity by volume is higher inside than outside. For buildings in general this can be related to the use of the building, but in many historic masonry constructions moisture is continuously added from the walls, (Broström 1996, Klens Larsen 2007). The evaporation from the walls increases with indoor temperature.

$$v_i = v_a + \Delta v \quad (1)$$

v_i Indoor humidity by volume (g/m^3)

v_a Ambient humidity by volume (g/m^3)

Δv Humidity added from the building structure (g/m^3)

The indoor temperature required to maintain a given relative humidity depends on the specified relative humidity, the ambient humidity by volume and the vapour added from the building

$$T_i = f(\phi_{is}, v_a, \Delta v) \quad (2)$$

T_i Indoor temperature ($^{\circ}\text{C}$)

ϕ_{is} Set value for the indoor relative humidity

A set value or range for RH should be defined by a conservation specialist, in this case 70% is used. The ambient vapour concentration depends on time and location. The humidity added to the indoor air depends on the building construction and the weather. A typical range of Δv from 0 to $2 \text{ g}/\text{m}^3$ was used in the following calculations.

4. The heat load for conservation heating

The indoor temperature resulting from conservation heating was calculated based on climate data for two different locations in Sweden. Malmö in the south of Sweden has a mild coastal climate with a high RH most of the year. Östersund, located in the middle of Sweden has an inland climate, colder and drier than Malmö. Weather data for 2007 were used, provided by the Swedish Meteorological and Hydrological Institute.

4.1 Temperatures resulting from conservation heating

The indoor temperature required to maintain 70% relative humidity was calculated for a range of Δv based on monthly average values for the ambient climate in Malmö and Östersund, fig 1.

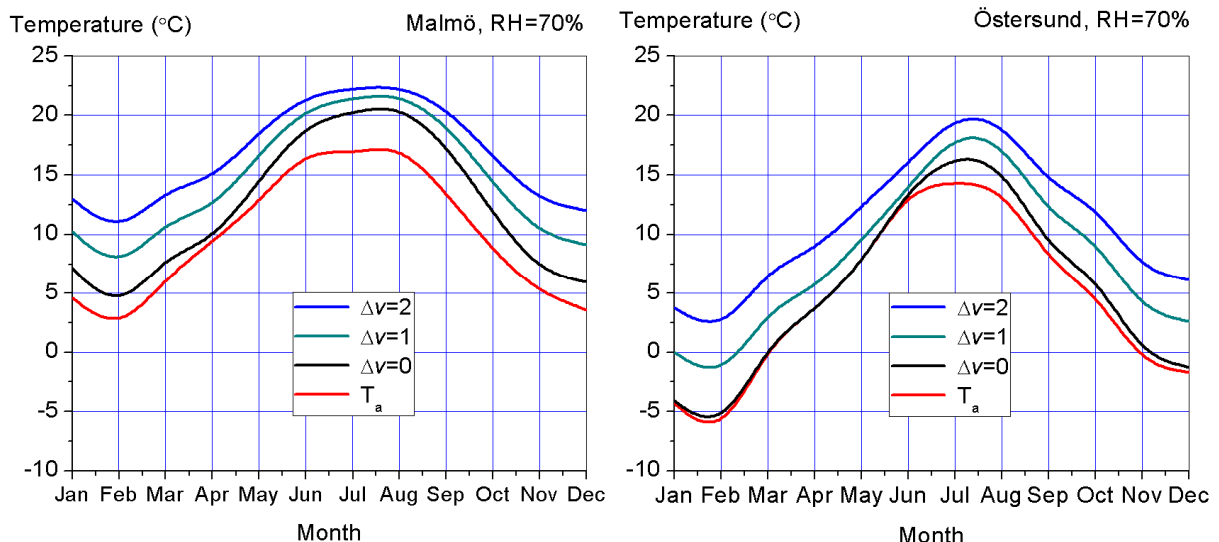


FIG. 1: Indoor temperatures resulting from conservation heating at 70% RH for Malmö (left) and Östersund (right) at varying values of Δv . The outdoor temperature is included for reference.

The calculated indoor temperature follows the variation of the outdoor temperature. In Malmö the indoor temperature is in the range of 3- 23°C and in Östersund -6 – 20°C. Sub zero temperatures indoors are not necessarily a problem from preservation point of view, many castles and churches are left unheated in the winter without any problems.

Comfort in the buildings using conservation heating would be low in the winter, limiting the use of the building and increasing demands on intermittent heating systems for comfort. In the summer time the monthly average for the preservation temperature in Malmö reaches 22°C, which indicates that at times it will be too warm for comfort. In Östersund, summer heating would generally not be a comfort problem.

The amount of moisture added from the building has a significant influence on the temperature levels required.

4.2 Energy demand

To design heating systems in general, we need to determine energy demand and heating load variation over the year. For heat pumps in particular, this is crucial both for technical and economic reasons which will be explained in the following chapter. Rules of thumb and know how related to heating for comfort are not applicable, other design criteria must be used.

The heating power for conservation is indicated by the difference between the indoor temperature and the ambient temperature. By multiplying the temperature difference with the heat loss coefficient for a building, we get the heating power. Thus the monthly averages would give a relative indication of the monthly energy demand of a building.

The temperature difference, $(T_i - T_a)$ required to maintain 70% RH was calculated for a range of Δv and compared to the temperature difference resulting from background heating with a constant indoor temperature 10 °C, fig 2.

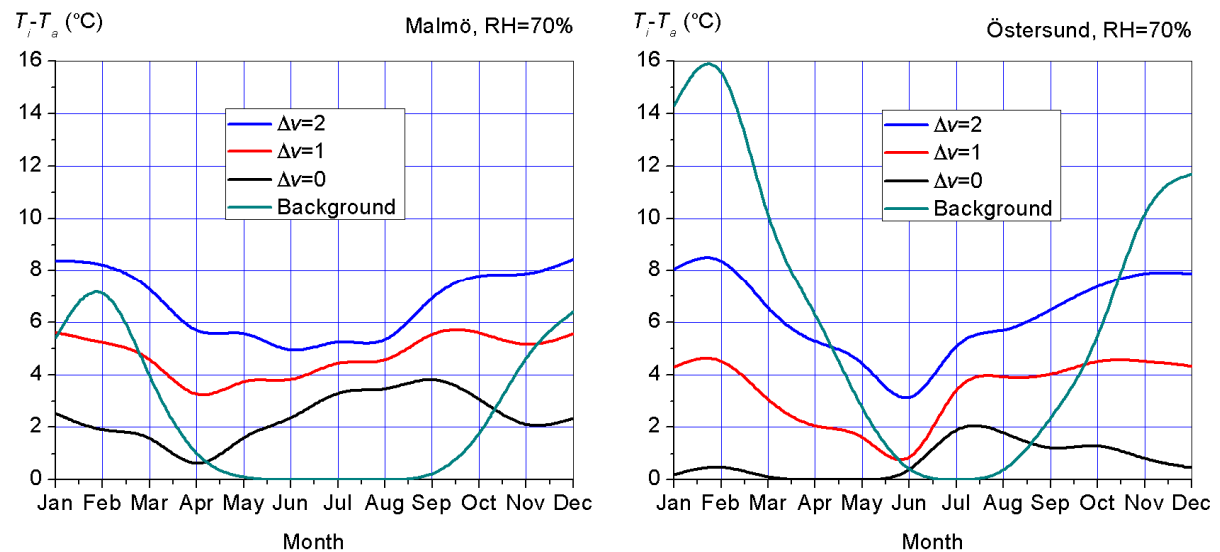


FIG. 2: The temperature difference $(T_i - T_a)$ for conservation heating compared to background heating with a constant indoor temperature 10 °C.

It can be seen that the heating load for conservation heating is much more stable over the year as compared to low temperature background heating. The winter heating loads for both locations are remarkably similar. In Malmö, conservation heating would be needed throughout the year for all ranges of Δv . In Östersund, a dry building with $\Delta v = 0$ would need conservation heating only a few months.

Table 1 shows the annual energy consumption, expressed as an annual average temperature difference, for conservation heating and background heating. It can be seen that conservation heating in southern Sweden does not necessarily lower the energy consumption as compared to background heating. In northern Sweden, conservation heating can give significant energy savings as compared to background heating. The moisture added to the indoor air from the walls is a very important parameter from an energy point of view.

TABLE. 1: The average annual temperature difference $\overline{(T_i - T_a)}$ for conservation heating and background heating. The annual energy demand is proportional to this temperature difference.

	$\overline{(T_i - T_a)}$ for conservation heating			$\overline{(T_i - T_a)}$ for background heating		
	$\Delta v=0$	$\Delta v=1$	$\Delta v=2$	$T_i=8$	$T_i=10$	$T_i=12$
Malmö	2,4	4,7	6,8	1,6	2,6	3,7
Östersund	0,73	3,4	6,4	5,2	6,7	8,2

4.3 Heating power

To determine the optimal heating power of the system in relation to the heating load, a higher resolution than monthly averages is required. Since most historic building have a relatively high inertia with regard to temperature and humidity variations it was assumed that daily averages would be relevant in this case. The preservation temperature was calculated in the same way as in the previous cases, but based on daily average climate data. For design purposes the results are presented as load duration graphs, fig 3.

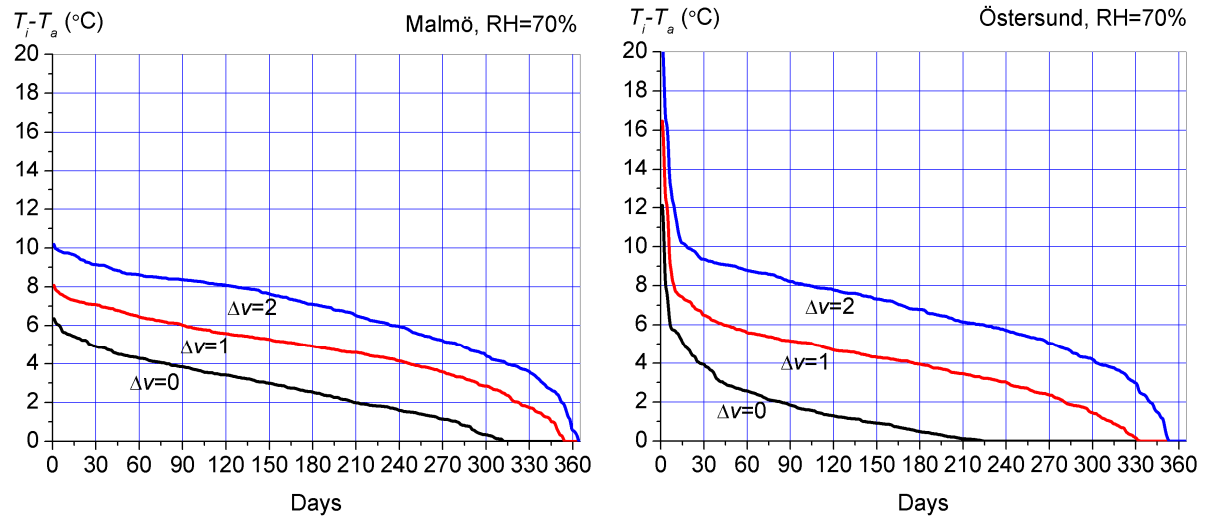


FIG. 3: Load duration graphs based on the temperature difference $(T_i - T_a)$ required to maintain RH at 70%.

The load duration graph shows the maximum heating load, the time variation of the load and the energy demand over the year (as the surface under the curve). The load duration graph is a tool to find the optimal design of a heat pump, which will be explained in the next section.

The extreme values on the high end for Östersund are associated with a few very cold days. Since risk for mould is nonexistent, they could be disregarded in determining the maximum heating power.

The utilization factor is the ratio between actual energy produced over the year and the amount of energy produced if the system was running at full power the whole year. For Malmö and Östersund, the utilization factor would be 20-25% for comfort heating. For conservation heating it is in the range of 40-60%.

5. Air-to-air heat pumps for conservation heating

In the last years, air-to-air heat pumps have increased their performance to cost ratio dramatically. In combination with a relatively simple and unobtrusive installation, this makes them an interesting option for conservation heating. An additional benefit is that some air-to-air heat pumps can be used for dehumidification in the summer.

As shown above, the heating load for conservation heating is quite stable over the whole year. The ideal working conditions for a heat pump is a continuous and stable heat load. From a technical point of view this will enhance efficiency and makes the heat pump last longer. From an economic point of view, the heat pumps need a stable load to pay off a relatively high investment. For this reason, heat pumps in Scandinavia are generally not designed to cover the maximum load, as this leads to high investment costs and low utilization. The heat pump is designed for a base load, the top load is provided by an auxiliary heat source with lower cost per kW, typically direct electric heating. Consider the top curve in the left graph of fig 3. If a heat pump is designed to cover 80% the maximum load, it would cover around 95% of the energy demand.

The optimal combination of heat pump and auxiliary heating is determined by comparing the power cost and the energy cost for both heat sources:

$$C = C_F + C_E \tau \quad (3)$$

C Annual cost per kW

C_F Annual fixed cost per kW

C_E Cost per kWh

τ Utilization time

The intersection of the cost lines for the heat pump and the auxiliary heat source define the optimal relation between the two heat sources, fig 4. By superimposing the lines on the load duration graph, we can determine the right heating power for the heat pump and the electric heaters to minimise the total heating cost.

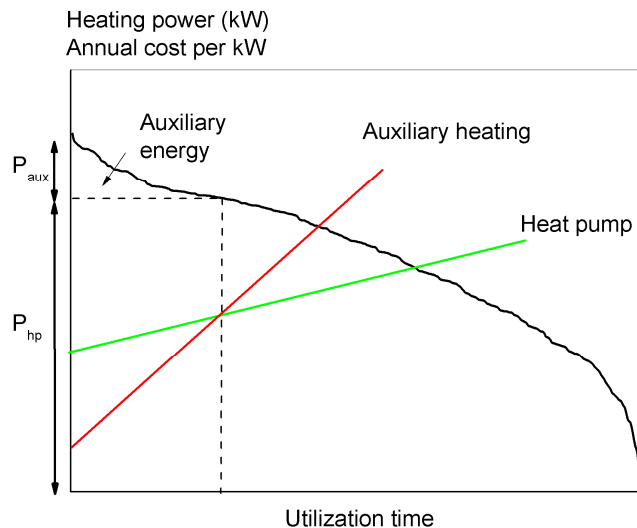


FIG. 4: By superimposing the cost lines for a heat pump and direct electric heating on a load duration graph, the optimal heating power for the heat pump P_{hp} and auxiliary power P_{aux} can be determined.

Thermodynamically conservation heating is a good match for heat pumps because their efficiency increases as the indoor temperature decreases. The coefficient of performance (COP) for a heat pump is defined as

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (4)$$

Where

Q is heat produced (J)

W is work added (J)

For the ideal Carnot process the COP depends only on the temperature levels on the hot and cold side of the heat pump:

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

T₁ temperature of the heat sink (indoor air) (K)

T₂ temperature of the heat source (outdoor air) (K)

The performance of the ideal heat pump will improve radically as the difference between the heat source and the heat sink decreases. Even though this is an ideal process, the Carnot process sets the ultimate limit and potential for heat pumps. In practice COP may reach 60-70% of the Carnot value. Theoretically a heat pump designed and optimised for conservation heating could reach COP values around 10; this is yet to be investigated in practice.

Commercially available air-to-air heat pumps typically have COP-values in the range of 1,5 – 4,0 depending on the outdoor temperature and the load. These heat pumps are optimised for normal room temperatures, and can be operated at room temperatures down to 8-10°C. At lower indoor temperatures, defrosting becomes a problem.

Two pilot studies have been started with the objective to investigate if and how commercially available air-to-air heat pumps can be used for conservation heating. The objects are the church in Ludgo south of Stockholm and a vernacular 18th century dwelling house on Gotland. In the church, the main incentive was to save energy. The second building has severe moisture problems; mainly algae and insects. The results so far can be summarised as follows:

- The heat pumps provide a cost effective alternative to other heat sources. They are reliable and there have been no technical complications.
- The heat pumps are controlled by thermostats with a lowest temperature of 10 C. This is because defrosting cannot be guaranteed at lower temperatures. One company has introduced a hygrostatic control module which will be added on one of the heat pumps.
- It is not possible to see if the COP is higher due to lower indoor temperatures. Laboratory testing is on the way.
- Dehumidification was used in the dwelling house. Technically it works fine, but the control algorithms are not adjusted to conservation heating.
- With air-to-air heat pumps the heat is supplied by convection from a limited number of point sources. Investigations of resulting temperature distribution and air movements will be presented in the near future.

6. Conclusions

The present paper has related the heating load for conservation heating in a Nordic climate to the properties of heat pumps. The heating load is characterised by a low temperature difference ($T_i - T_a$) and a relatively stable heating load over the whole year. The results provide rudimentary tools for engineers to design conservation heating systems. This is a first step, further studies should take into account transient effects, dynamic indoor climate requirements, more representative data for the ambient climate and a wider geographical distribution. Simulations and detailed field studies are needed to better understand conservation heating.

Depending on the use of the building, conservation heating may have to be limited for comfort reasons. It gets cold in the winter and warm in the summer. In southern Sweden, conservation heating would mainly be motivated by preservation, whereas in the northern part energy conservation would also be a factor.

Heat pumps in general, and air-to-air heat pumps in particular, have properties that match the requirements of conservation heating. They can provide a cost effective solution for conservation heating. Heat pumps designed and optimised for conservation heating could significantly increase the performance in relation to standard heat pumps. Air-to-air heat pumps may not be the ideal long term solutions for historic buildings, but in many cases, they could enable the use and preservation of the buildings until more appropriate solutions have been developed.

The results also show that there is an economic potential in controlling the moisture transport into the building by improving the structure and controlling ventilation and/or infiltration. Clearly there is a need for integrated solutions based on a combination of passive and active measures for climate control

Another application for conservation heating, which is becoming more common, is winter heating of summer houses. There is a huge potential for energy saving by using heat pumps and replacing thermostats by hygrostats.

References

- ASHRAE Handbook (2007) HVAC Applications, chapter 21: Museums, Galleries, Archives, and Libraries
- Bratasz L., Camuffo D. and Kozłowski R. (2007). Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions. *Contributions to the conference Museum Microclimates*, The National Museum of Denmark, Copenhagen.
- Broström, T. (1996). Uppvärmning i kyrkor – Fukt- och värmetekniska beräkningar för dimensionering och klimatstyrning. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Child, R. (2007). Insect damage as a function of climate. *Contributions to the conference Museum Microclimates*, The National Museum of Denmark, Copenhagen.
- Klenz Larsen P. (2007). Climate Control in Danish Churches. *Contributions to the conference Museum Microclimates*, The National Museum of Denmark, Copenhagen.
- Krus M., Kilian R. and Sedlbauer K. (2007). Mould growth prediction by computational simulation on historic buildings. *Contributions to the conference Museum Microclimates*, The National Museum of Denmark, Copenhagen.
- Maekawa S., and Franciza T. (2003) Sustainable Climate Control for Historic Buildings in Hot and Humid Regions, *Management of Environmental Quality: An International Journal* Vol. 14, No. 3.
- Neuhaus E., Schellen H.L. (2006). Conservation Heating to Control Relative Humidity and Create Museum Indoor Conditions in a Monumental Building. *Proceedings of the 27th AIVC conference - (EPIC2006AIVC) . Technologies & sustainable policies for a radical decrease of the energy consumption in buildings*, Lyon, France, 45-50.
- Padfield T. (2007) *Conservation Physics*. <http://www.padfield.org/tim/cfys/>
- Staniforth S., Hayes B. and Bullock L. (1994). Appropriate Technologies for Relative Humidity Control for Museum Collections Housed in Historic Buildings. *Preventive Conservation: Practice, Theory, and Research*. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress. London: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC), 123-128.