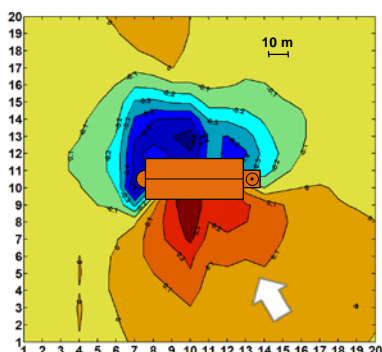


Slutrapport för projekt:

Energibesparing i kyrkor: Luftläckage-, nedsmutsnings- och klimatmätningar

Energimyndigheten: Dnr 2011-002440, Projektnummer 34964-1.



Dec 2014

Högskolan i Gävle



Sammanfattning

Resultaten av föreliggande studie grundar sig på omfattande fältmätningar i svenska kyrkor, men även på utvärdering och validering av teoretiska modeller, där de senare framför allt gäller modellering av luftinfiltration och vädring. Även utveckling av mätmetodik har ingått i studien.

Studien pekar på att svenska kyrkor överlag har ett tätare byggnadsskal än man kanske kan tro, med förhållandevis låg luftomsättning som följd. I de mer otäta kyrkorna kan tätningsåtgärder dock ge märkbara energibesparingar. En grov uppskattning pekar på en besparingspotential av i storleksordningen 10 GWh genom tätningsåtgärder i Sveriges kyrkor, alltså bara genom att tätta luftläckage. Dock bör inverkan på fuktklimatet i kyrkan kontrolleras noga vid ev tätningsåtgärder. En tidigare utvecklad modell för luftinfiltration i byggnader tycks kunna fungera även för kyrkor; en smärre korrektion föreslås som medför bättre överensstämmelse med gjorda fältmätningar. Både den etablerade sk ”blower-door” tekniken och den nyare tryckpulstekniken för täthetsmätning av byggnadsskalet tycks gå att tillämpa på kyrkor, men särskild hänsyn måste tas till störningar i form av vind och termik. Betydande emissioner av försmutsande luftpartiklar tycks ske i samband med förrättningar i kyrkor, särskilt de som inbegriper användning av levande ljus. Den generellt låga grundnivån på luftomsättningen i kyrkor bidrar till att tillfällig vädring efter förrättning ser ut att vara en effektiv åtgärd för att få ut alstrade luftföroreningar; rekommendationer för vädringsprocedurer har utarbetats.

Gällande avsättningen av luftpartiklar och därav uppkommen ytförsmutsning så har detaljmätningar av mikroklimatet närmast ytor påvisat både termodiffusion och luftturbulens som viktiga mekanismer. Minskad ytförsmutsning kan erhållas genom sänkt innetemperatur, undanröjande av köldbryggor i byggnadskonstruktionen och mer ”strömlinjeformade” radiatorer som ger upphov till mindre turbulens. Gällande värmereglering så blir en värmetermostat placerad på en tung yttervägg trög i reaktionen och omgärdad av kallrasluft, varför den bör placeras ett stycke bort från väggen. Risken för ett lokalt avvikande termiskt klimat i bänkkvarteren kan motivera en särskild utformning och placering av värmetermostater i kyrkor.

Summary

The results of the present study are founded on extensive field measurements in Swedish churches, but also on evaluation and validation of theoretical models, especially on modelling of air infiltration in buildings and airing processes. Also some development of measuring techniques is part of the study.

Study results indicate that Swedish churches in general have a more airtight building envelope than might be expected, resulting in fairly low air change rates. In the more leaky churches, tightening measures may however yield fairly high energy savings. A rough estimation points at a saving potential on the order of 10 GWh through tightening measures on the Swedish churches, i.e. only through tightening air leakages. Possible changes in the humidity conditions of the building must however be thoroughly checked in case of building envelope tightening. A previously developed model for assessing the air infiltration rate in buildings seems to work also for churches; a minor correction is suggested that yields better agreement with the performed field measurements. Both the established so-called “blower-door” technique and the newer pressure pulse technique for air tightness measurements of buildings seem practicable to perform on church buildings, but particular attention must be paid to disturbances like wind and stack effects. Considerable emissions of airborne particles seem to occur at services in churches, especially when candles are burnt. The generally low air change rates in Swedish churches contribute to make temporary airing after services an effective measure to enhance evacuation of indoor generated contaminants; recommendations for airing procedures have been developed.

Regarding deposition of airborne particles and thus occurring surface soiling, detailed measurements of the micro climate close to surfaces have pointed at both thermophoresis and air turbulence as important mechanisms. Reduced surface soiling can be achieved by lowering the indoor temperature, reducing cold bridges in the building construction and having more “streamlined” radiators that cause less air turbulence. Regarding heat regulation, a thermostat placed on a heavy outer wall will be slow in reaction and surrounded by cool down draught air, why it rather should be placed at some distance from the wall. The risk of a locally deviating thermal climate in the pews, where people are sitting, may motivate an unconventional design and placing of thermostats in churches.

Inledning

Föreliggande studie behandlar klimat- och nedsmutsningsaspekter vid kyrkor. Luftinfiltration genom byggnadsskalet ägnas stor uppmärksamhet, då denna påverkar både uppvärmningsbehov, komfort och halten försmutsande luftpartiklar i inneluften. Mätmetoder och beräkningsmodeller för luftinfiltration provas och utvärderas, och graden av energiförluster som orsakas av luftinfiltration i kyrkor analyseras. Knutet till luftinfiltration är metoder att identifiera läckpunkter i byggnadsskalet, vilka kan ge vägledning inför ev tätningsåtgärder. Förstärkt luftgenomströmning genom tillfällig vädring kan vara vettigt efter större förrättningar, och studien ger vägledning i hur detta kan gå till. Delstudierna om nedsmutsning handlar om avsättningen av luftpartiklar på invändiga ytor och den gradvisa nedsmutsning av konstförmål, väggmålningar o dy som detta innebär. Exempel på graden av partikelgenerering vid förrättningar ges, och mekanismerna för partikelavsättning studeras i detalj, liksom olika mättekniker för detta. Utformningen av värmeelement för minskad partikelavsättning diskuteras på basis av gjorda mätningar. Lokala variationer i inneklimatet påverkar också värmetermostater och placeringen av dessa kan vara kritisk för möjligheterna till effektiv värmereglering.

Luftinfiltration

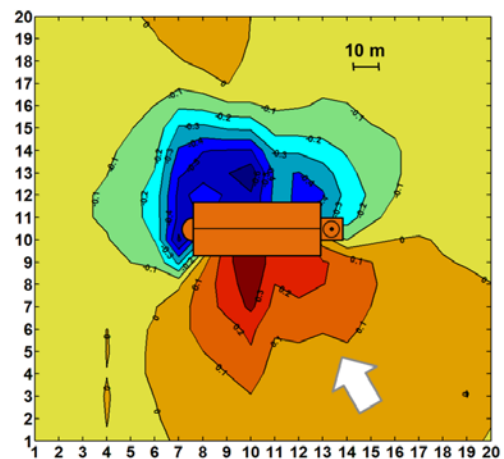
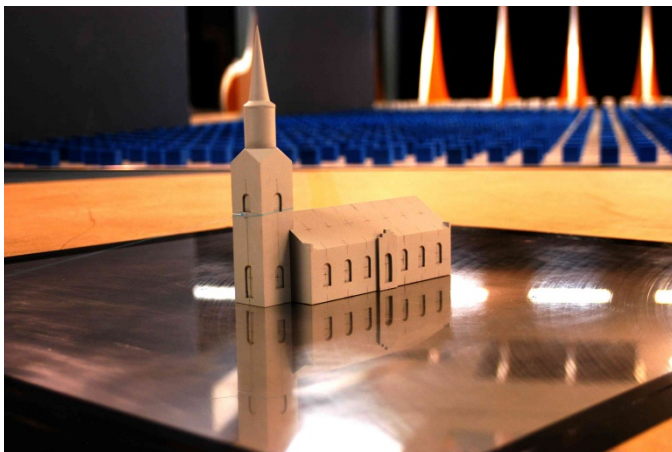
Mätteknik

I naturligt ventilerade byggnader som kyrkor är byggnadsskalets lufttätethet avgörande för den luftinfiltration som uppstår. I projektet har lufttätetsmätning genom standardiserad trycksättning av byggnaden – s k ”blower door”-teknik – provats i åtta kyrkor. Med dubbel fläktuppsättning, som i Fig. 1, tycks denna metod fungera i de flesta (svenska) kyrkor; bara i den mest läckande kyrkan av de i Fig. 9 redovisade nåddes inte riktigt standardiserad trycknivå. Även en nyutvecklade s k tryckpuls-metod, som pilottestades i ett tidigare Spara&Bevara-projekt, har nu provats i större skala, och denna tenderar att ge noggrannare värden.



Figur 1. Täthetsmätning av byggnadsskalet genom: *Vänster*: Trycksättningsfläktar i kyrkport, ”blower door”-teknik; *Höger*: Tryckpuls test med ”Luftkanoner”.

Fältmätningarna har dock visat att båda metoderna är känsliga för vind- och termikorsakade tryckstörningar. Noggranna mätningar bör därför bara företas vid svag vind och liten inne-ute-temperaturskillnad, helst mindre än 5°C. Tryckfördelningsmätningar i HiG:s vindtunnel (Fig. 2) har också visat att de höga kyrkbyggnaderna påverkar det vindinducerade trycket i ett ganska stort område på utsidan av byggnaden. Detta måste beaktas vid val av mätpunkt för uttrycket i mätmetoderna enligt ovan. Som en grov tumregel bör man välja en mätpunkt som ligger minst två byggnadshöjder bort från byggnaden. Föreskrifterna i nu gällande standard för blower-door-mätningar (EN 13829) synes alltför vaga när det gäller dessa störningsaspekter och verkar behöva bli striktare, åtminstone när det gäller höga en-zonsbyggnader som kyrkor.



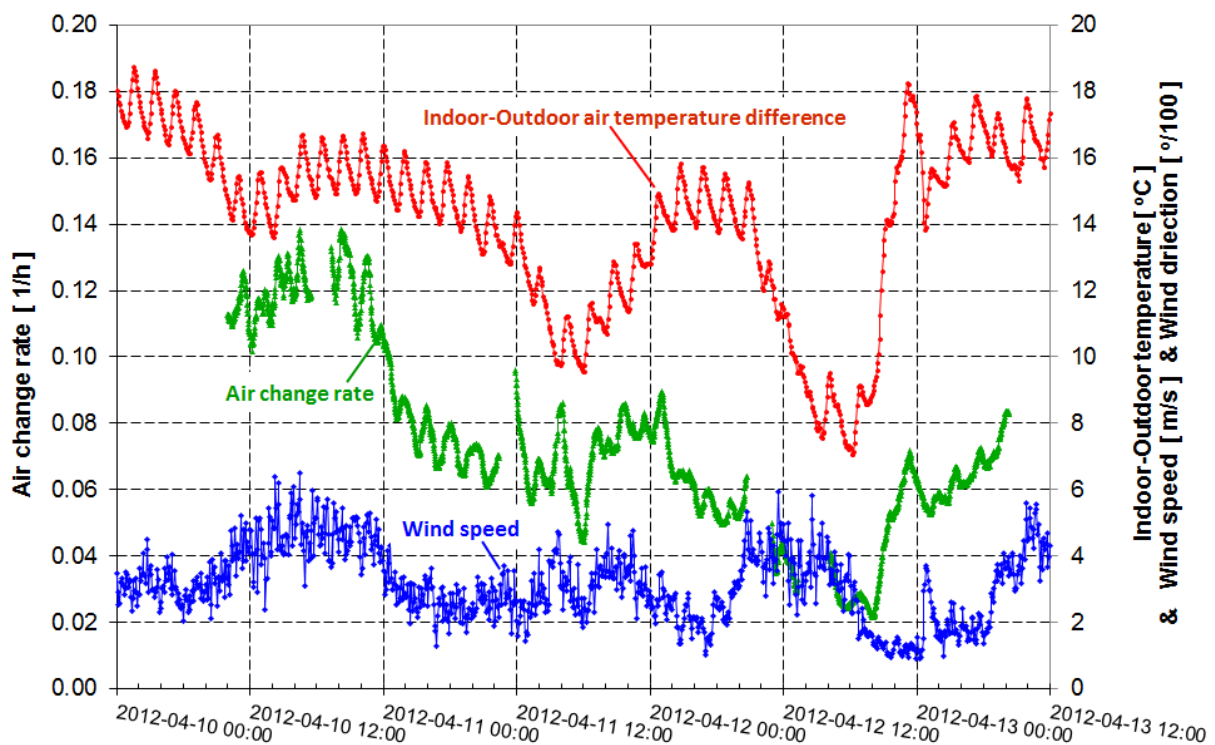
Figur 2. *Vänster*: Vindtunnel med kyrkmodell på en platta med 20x20 tryckmätpunkter. *Höger*: Resultat i form av 2-D-interpolerad tryckfördelning kring kyrkmodellen.

Även luftomsättningsmätningar genom spårgasteknik (Fig. 3) har fungerat bra i gjorda fältmätningar i kyrkor. God omblandning av rumsluften tycks uppstå så fort värmeelement på golvnivå (bänkvärmare och radiatorer) är varma, vilket avsevärt förenklar denna typ av mätningar. I Fig. 3 syns också den vädermast som i samband med spårasmätningarna placerats i närheten av undersökt kyrka för att erhålla lokala väderdata.



Figur 3. *Vänster*: Spårgasanalytator och mätmast i kyrka. *Höger*: Vädermast placerad intill den studerade kyrkan.

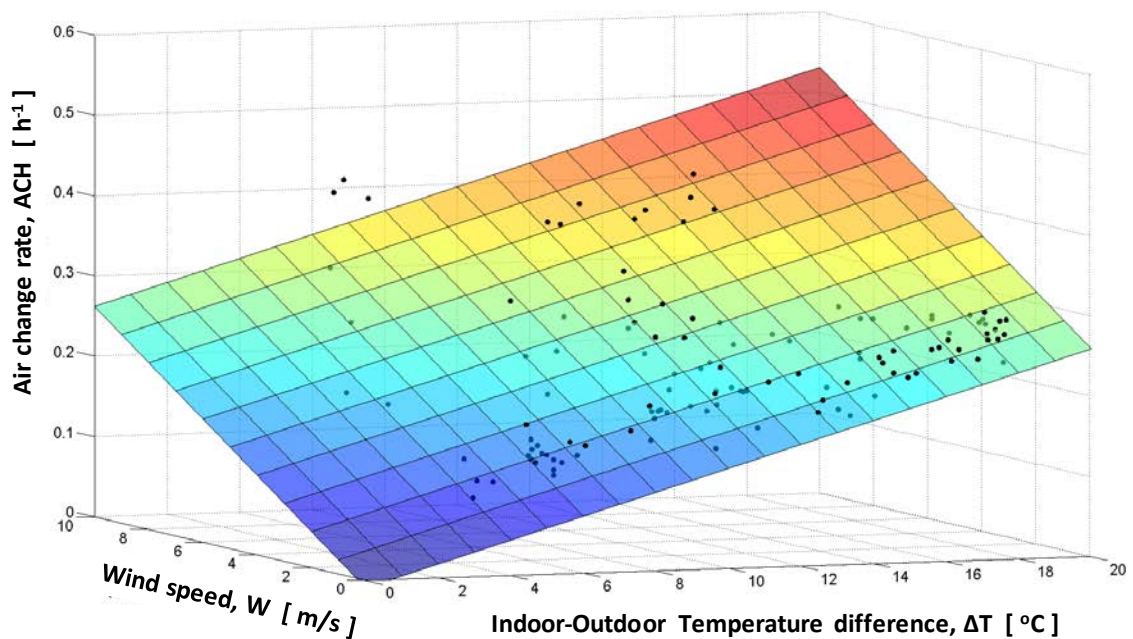
Vid gasavklingningsmätning har tidsvariationen i luftomsättningen kunnat följas, vilket möjliggjort detaljerad analys av hur luftomsättningen beror av drivkrafterna vind och termik (inne-ute-temperaturdifferens), vilket illustreras i Fig. 4. I figuren kan utläsas att luftomsättningen tenderar att samvariera med – framför allt – temperaturskillnaden, men även med vindhastigheten. Mätdata av det här slaget har i projektet bl a utnyttjats för modellering av luftomsättningen, vilket beskrivs längre fram.



Figur 4. Samtidig variation i luftomsättning ("Air change rate"), inne-ute-temperaturskillnad och vindhastighet vid en kyrka. ("Sågtands"variationen i temperaturskillnaden beror på tröghet i innetemperaturregleringen.)

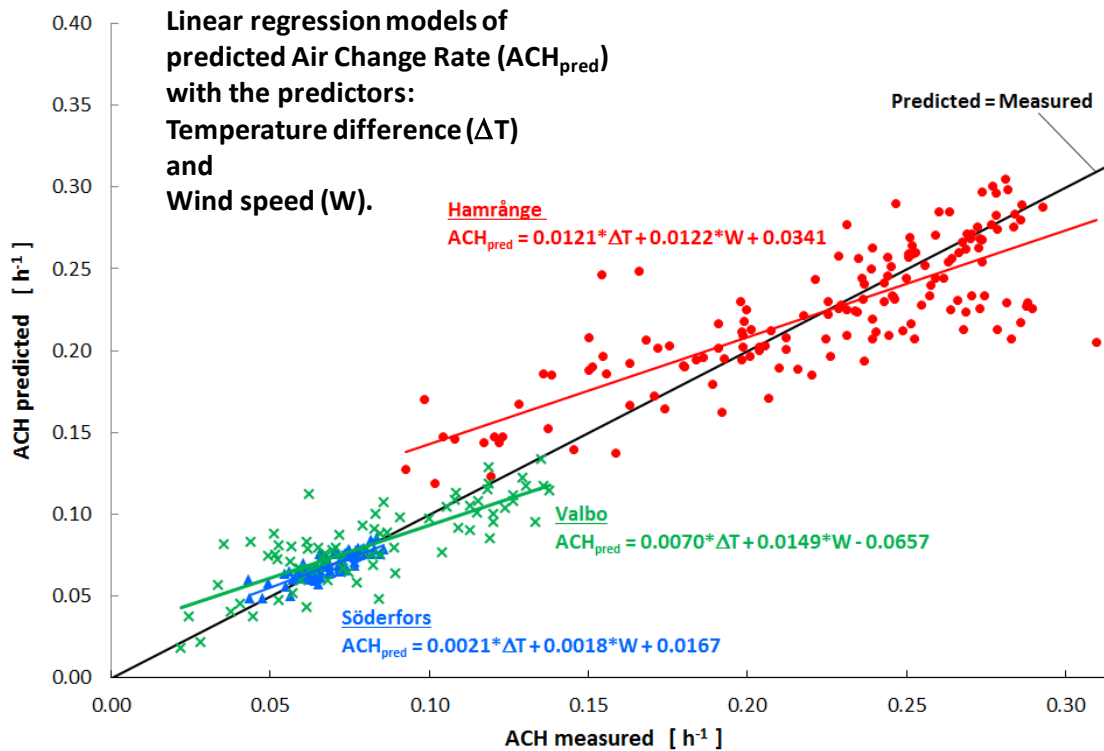
Beräkningsmodeller för luftinfiltration – utvärdering och intrimning

Att kunna göra en skattning av luftomsättningen i kyrkor är av intresse bl a vid energiberäkningar. Som noterades i Fig. 4 så varierar luftomsättningen i kyrkor kraftigt med vädersvängningar och ev variationer i inne-temperatur. Olika beräkningsmodeller för hur luftomsättningen beror av vind och inne-ute-temperaturdifferens har provats i projektet. Den enklaste modellen bygger på linjär regression i två dimensioner (multipel linjär regression, MLR). Detta åskådliggörs i Fig. 5, som skapats utifrån samhörande värden på uppmätt luftomsättning, vindhastighet och inne-ute-temperaturdifferens för, i detta fall, Hamrånge kyrka.



Figur 5. Visualisering av linjär regressionsanpassning, MLR, (2-D) med Luftomsättning som beroende variabel och Vind och Inne-ute-temperaturdifferens som oberoende (input) variabler.

Det anpassade planet i Fig. 5 kan beskrivas med en ekvation som är angiven i Fig. 6 tillsammans med samma typ av MLR anpassningsekvationer för två andra kyrkor. I diagrammet i Fig. 6 jämförs också den (predicerade) luftomsättning som ges av dessa ekvationer med den faktiskt uppmätta. Viss spridning finns i mätpunkterna, men det tycks gå att få en ganska god skattning av luftomsättningen genom att stoppa in väderdata i dessa regressionsekvationer.

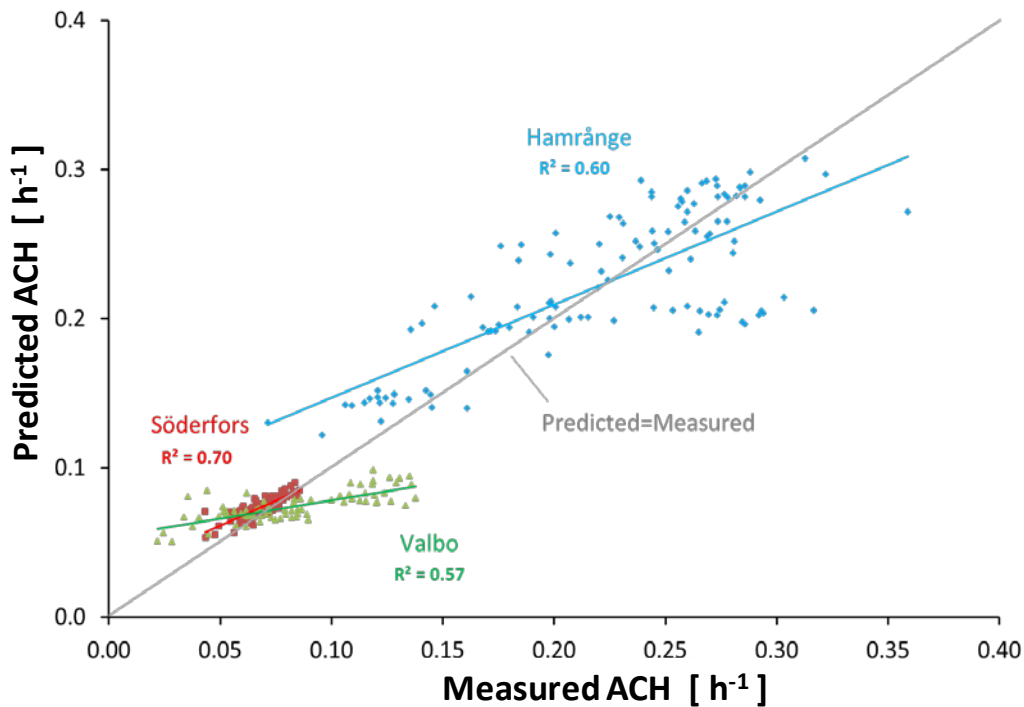


Figur 6. Regressionsekvationerna för luftomsättningen (ACH) i tre kyrkor och jämförelse mellan den (predicerade) luftomsättning som ges av dessa ekvationer och den faktiskt mätta luftomsättningen.

MLR-ekvationerna i Fig. 6 för skattning luftomsättningen är dock framtagna utifrån spårgasmätningar av variationen i luftomsättningen i den individuella kyrkan, så ekvationen för en kyrka gäller bara för just den kyrka. Spårgas- och vädermätningarna behöver också pågå under flera dygn och är inte så lätta att få till stånd i praktiken. Som alternativ till MLR finns några tidigare framtagna *generella* modeller för luftinfiltration, som inte kräver några bakomliggande mätningar av luftomsättningen, men däremot mätning av byggnadsskalets otäthet, vilket typiskt görs enligt den blower-door-metod som beskrivits ovan. Dessutom behöver dessa modeller indata i form av byggnadsdimension, vindutsatthet och trolig fördelning av otätheter i byggnadsskalet. Vid test med egna mätdata av ovan slag har den s k AIM-2-modellen verkat vara den generella modell som verkar mest användbar på kyrkor. Dock tenderar den att överskatta luftomsättningen med ca 25%, varför vi föreslår införande av en korrigeringskonstant, =0.8, vid användning av modellen, åtminstone på kyrkbyggnader. AIM-2-modellens slutekvation blir då:

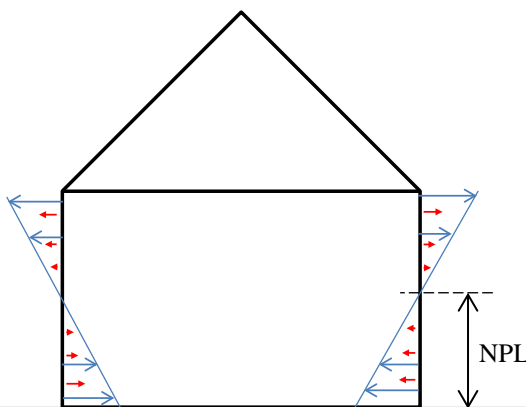
$$Q_{Total} = 0.8 \cdot \left(Q_W^{1/n} + Q_{\Delta T}^{1/n} + \beta(Q_W Q_{\Delta T})^{1/2n} \right)^n$$

där Q_{Total} är infiltrationsluftflödet genom byggnaden, som är sammansatt av bidragen från vindinducerat luftflöde, Q_w , och termikinducerat luftflöde, $Q_{\Delta T}$. Beräkningen av dessa är i sin tur för omfattande för att återges här, men beskrivs i de referenser som återfinns i Appendix. Fig. AIM2 visar, för samma tre kyrkor som ovan, hur luftomsättningsvärden som erhållits med AIM-2-modellen enligt ovan står sig i förhållande till mätta värden. Avvikelsen mellan de två är, som medianvärde, 11%, vilket ter sig lågt nog att vara användbart vid t ex approximativa energiberäkningar.



Figur 7. Jämförelse mellan mätt luftomsättning och den som erhålles med AIM-2-modellen för tre kyrkor.

Ytterligare förbättrad modellering av luftomsättningen i en kyrkbyggnad kan erhållas om nivån på det s k neutrala tryckplanet, NPL, för den aktuella kyrkbyggnaden kan fastställas. NPL är den höjd över marken där den av termik (temperaturskillnad) orsakade inne-ute-tryckskillnaden över byggnadsskalet är lika med noll; se Fig. 8.

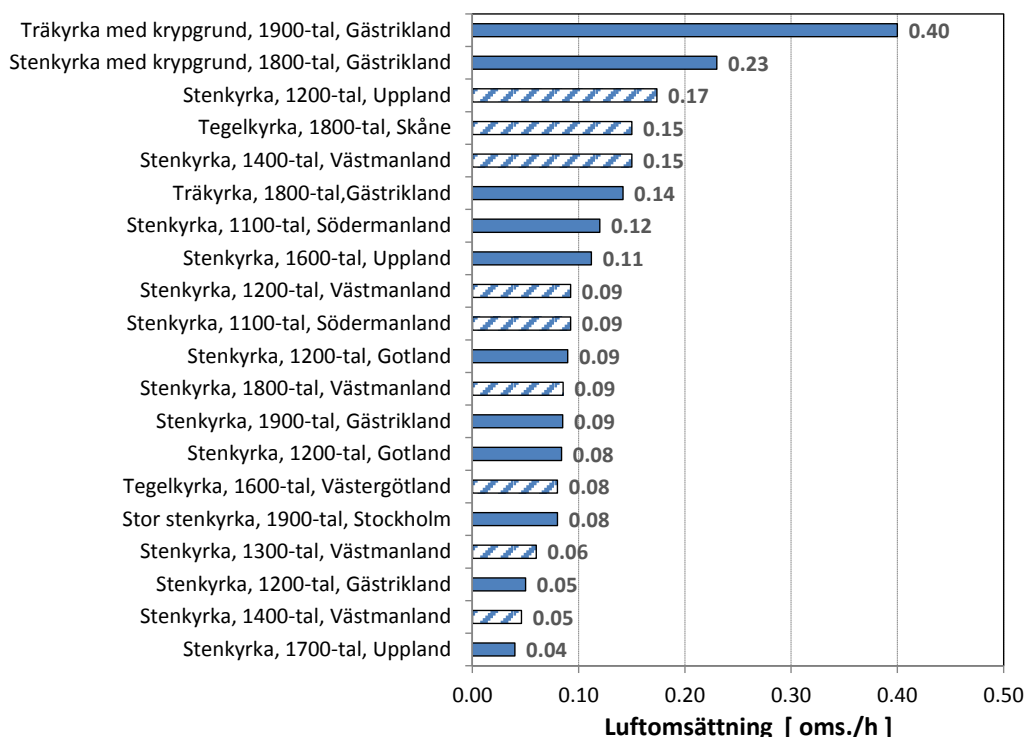


Figur 8. Illustration av den inne-ute-tryckskillnad (blåa pilar) och de luftflöden (röda pilar) som uppstår över byggnadsskalet p g a termik (varmare luft inne än ute) när det är vindstilla. NPL = Höjden för det s k neutrala tryckplanet.

Vid fältmätningar i projektet har konstaterats att NPL *kan* mätas, men att det kräver noggrann tryckmätning samtidigt som det är i princip helt vindstilla och någorlunda stor inne-ute-temperaturskillnad. Denna mätning kan alltså vara svår att få till stånd i praktiken. Vål utförd ger den dock vägledning ang fördelningen av otätheter i byggnadsskalet, vilket diskuteras längre fram, och den kan som sagt utnyttjas för bättre infiltrationsberäkningar.

Statistik över kyrkors luftomsättning och därav orsakade värmeförluster

I Fig. 9 är sammanställt mätningar av luftomsättningen i 20 svenska kyrkor, med viss tyngdpunkt på den mellansvenska regionen Västmanland, Uppland, Gästrikland. Det framgår att luftomsättningen kan skilja rätt mycket från en kyrka till en annan. Två kyrkor med ventilerad kryppgrund och trägolv toppar listan med 0.40 resp 0.23 luftomsättningar/timme (oms/h). Annars ligger medianvärdet på 0.09 oms/h, d v s ungefär 0.1 oms/h. Detta är ett lågt värde jämfört med vad vi normalt har i t ex bostäder (typiskt 0.5 oms/h) och större moderna samlings-salar (typiskt 5 oms/h). Luftförsämrande emissioner från t ex besökare och ljusbränning stiger därför ganska snabbt vid förrättningar i kyrkor, men kyrkornas stora rumsvolym och de normalt korta förrättningstiderna gör att luftkvaliteten ändå inte behöver upplevas som besvärande. Dock har vi uppmätt ganska höga koldioxidhalter (>2000 ppm) i slutet av även ganska korta förrättningar i kyrkor när de i princip varit fullsatta. Luften kan då upplevas som ofräsch, utan att vara direkt hälsovådlig.

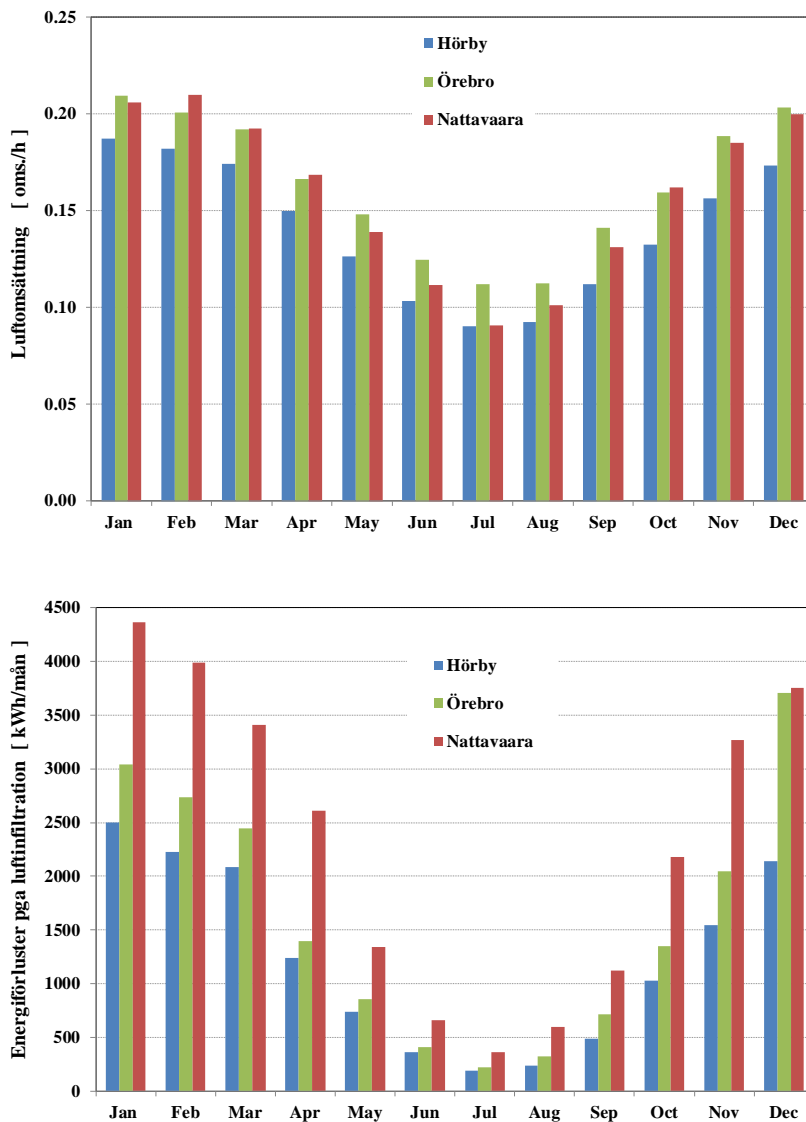


Figur 9. Luftomsättning i 20 svenska kyrkor vid ca 15°C temperaturskillnad inne-ute och svag vind. Approximerat från fältmätningar. Mätningar gjorda av Högskolan i Gävle (fyllda staplar) och Pentiaq AB (streckade staplar).

Den låga luftomsättningen gör också att en kontinuerlig emission av någon luftförorening, t ex från ständigt tända stearinljus, stadigt ökar i koncentration under t ex en hel dags brinntid.

Låg luftomsättning annars positivt ur energisynpunkt – mindre mängder luft behöver värmas upp. Fig. 10 visar hur luftomsättning (överst) och därav uppkommet uppvärmningsbehov (nederst) är beräknat att se ut för en mindre (2600 m³) stenkyrka, hypotetiskt placerad i olika delar av landet. Presenterade data är framtagna genom att använda infiltrationskaraktäristik för en av de kyrkor som detaljstuderats i projektet och som verkat kunna vara en någorlunda representativ stenkyrka. Den ovan nämnda korrigerade AIM-2-modellen för luftinfiltration har sen tillämpats med indata i form av väderstatistik från SMHI (år 2004-2014) för tre olika

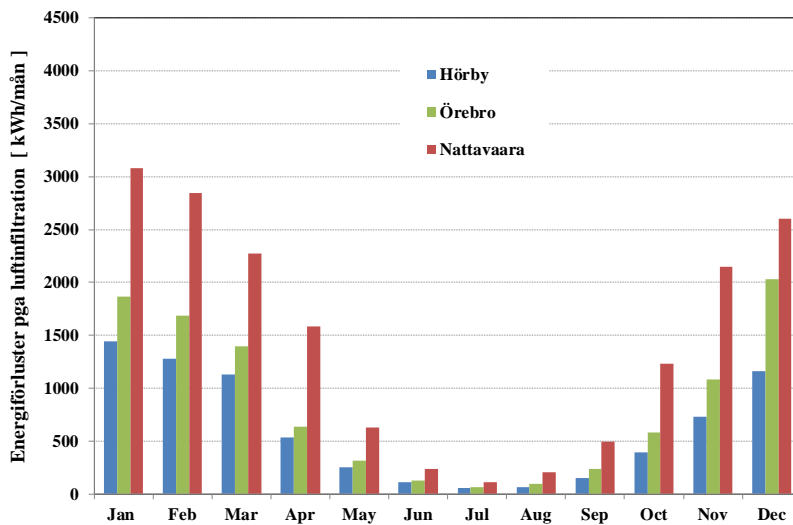
svenska orter, från Nattavaara i norr till Hörby i söder. Beräkningarna gäller för konstant komforttemperatur inne; 20°C. Det framgår att luftomsättningen inte skiljer så mycket mellan de tre orterna, men att energiförlusterna är klart högre i Norrland, rimligen p g a en lägre utetemperatur. Årsförbrukningen för Örebro-kyrkan blir ca 28000 kWh. I ett tänkt fall av tätning av kyrkan så att denna energiförbrukning minskar till hälften kan alltså ca 14000 kWh sparas. Givet att detta är någorlunda representativt för landets 3500 kyrkor skulle den totala besparingen hypotetiskt kunna bli ca $14000\text{kWh} \cdot 3500 = \text{ca } 50 \text{ GWh}$.



Figur 10. Modellerad luftomsättning (överst) och därav uppkommet uppvärmningsbehov (nederst) för en mindre (2600 m^3) stenkyrka, hypotetiskt placerad i olika delar av landet. Gäller vid en konstant innetemperatur av 20°C.

Det är dock vanligt att innetemperaturen sänks under tidsperioder som det inte är förrättningar i kyrkan (intermittent uppvärmning). I Fig. 11 är räknat på samma kyrka som i Fig. 10, men vid ett driftfall där innetemperaturen 20°C gäller under helgen, två dagar i veckan, men sänks till 10°C resterande fem dagar. Jämfört med fallet ovan med konstant 20°C inne har årsförbrukningen därmed sänkts med 40-50%. Besparingspotentialen av byggnadstätning

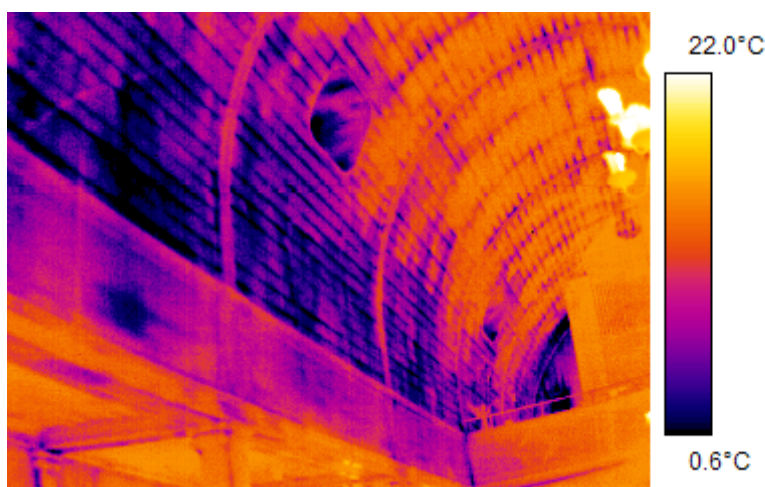
minskar i motsvarande grad, varför en total besparingspotential av i storleksordningen 10 GWh för Sveriges kyrkor synes rimlig.



Figur 11. Som Fig. 10, men vid intermittent uppvärmning med innetemperaturen 20°C två dagar i veckan och 10°C resterande fem dagar.

Identifiering av luftläckagepunkter

I samband med beskrivningen av luftläckagemätningarna ovan nämndes att man med s k blower-door-fläktar kan åstadkomma ett kraftigt undertryck i, som det verkar, de flesta svenska kyrkbyggnader. Detta gäller även högst upp i kyrkbyggnaden, där termiken annars gör att det normalt råder övertryck gentemot omgivningen (se Fig. 8). Med fläktförstärkt undertryck kan man därmed få uteluften att tillfälligt strömma in i byggnaden genom alla förekommande otätheter i byggnadsskalet. Görs detta då uttemperaturen är klart lägre än innetemperaturen så är IR-termografi en effektiv metod att leta otätheter med; se Fig. 12. Med IR-kamera detekteras den temperatursänkning som den kalla inströmmande uteluften orsakar på ytorna kring läckpunkten. Lämpligen fotograferas de invändiga ytorna både innan och under trycksänkningen i byggnaden, så att kontrasten blir tydlig och det blir lättare att särskilja luftläckage från köldbryggor i byggnadskonstruktionen.



Figur 12. IR-termografi som visar yttemperaturen på innertak i träkyrka som tillfälligt är utsatt för forcerat undertryck. Springor med luftläckage framgår tydligt.

Att relatera luftomsättningsdata med vindstyrka och termik, såsom beskrivits ovan (t ex Fig. 4) kan också utnyttjas till att få en indikation på fördelningen av otätheter i byggnadsskalet. Om luftomsättningen visar sig korrelera högt med exempelvis *vindstyrkan*, jämfört med dess korrelation med termiken (inne-ute-temperaturdifferensen), så kan en förhållandevis stor andel av luftläckaget förväntas vara beläget på ytor där vindtrycket blir stort, exempelvis på de stora fasadytorna och de portar och fönster som är belägna där. Omvänt indikerar en förhållandevis hög korrelation mellan luftomsättning och *termik* att en stor del av luftläckagen är belägna på hög och/eller låg höjd i byggnaden, såsom i golv mot kryppgrund eller i innertak mot ett vindsutrymme.

Spårgastekniken som beskrivits ovan för luftomsättningsmätning kan också utnyttjas för läckidentifiering. Som nämnt tenderar luftomblandningen i en kyrksal att bli mycket god, åtminstone så länge värmeelementen är varma. Vid forcerat undertryck i kyrkan, t ex med hjälp av blower-door-fläktar, kan inströmmande uteluft detekteras som innehållande ingen eller mycket låga koncentrationer av den utspridda spårgasen. Istället för spårgas kan man även sprida luftpartiklar, t ex med hjälp av levande ljus, och med en direktvisande, portabel partikelräknare leta efter inläckande luft, vilken innehåller en avsevärt lägre partikelhalt; Fig. 13. En ljusbränning av t ex 10 ljus under ca 10 min verkar normalt räcka för att erhålla tillräckligt höga halter av små ($<0,1 \mu\text{m}$) partiklar. I det fall att inga värmeelement är igång som kan blanda rumsluften verkar det oftast gå att åstadkomma god luftomblandning med hjälp av några kraftfulla omblandningsfläktar utspridda i kyrksalen.



Figur 13. Sökning efter luftläckage med hjälp av portabel partikelräknare.

I samband med att det neutrala tryckplanet, NPL, berördes ovan (Fig. 8) nämndes att fastställande av denna kan ge vägledning ang fördelningen av otätheter i byggnadsskalet. En NPL-nivå som ligger förhållandevis högt upp, ovanför halva byggnadshöjden, indikerar att en proportionsvis stor andel av byggnadsskalets totala läckarea står att finna högt upp i byggnaden. Detta eftersom det där uppe då räcker med en förhållandevis liten inne-ute-tryckskillnad för att driva ut luften ur byggnaden, medan en större tryckskillnad krävs nertill i byggnaden för att skapa ett insug av samma luftflöde. Omvänt gäller om NPL-nivån ligger på en förhållandevis låg höjd.

Tätningsexempel

I den kyrka som i Figur 9 har störst luftomsättning, och alltså verkar ha det mest läckande byggnadsskalet, har viss tätning av det läckande taket (synligt i Fig. 12) nyligen utförts, och fler åtgärder är planerade. Effekterna av detta avses följas upp framöver.

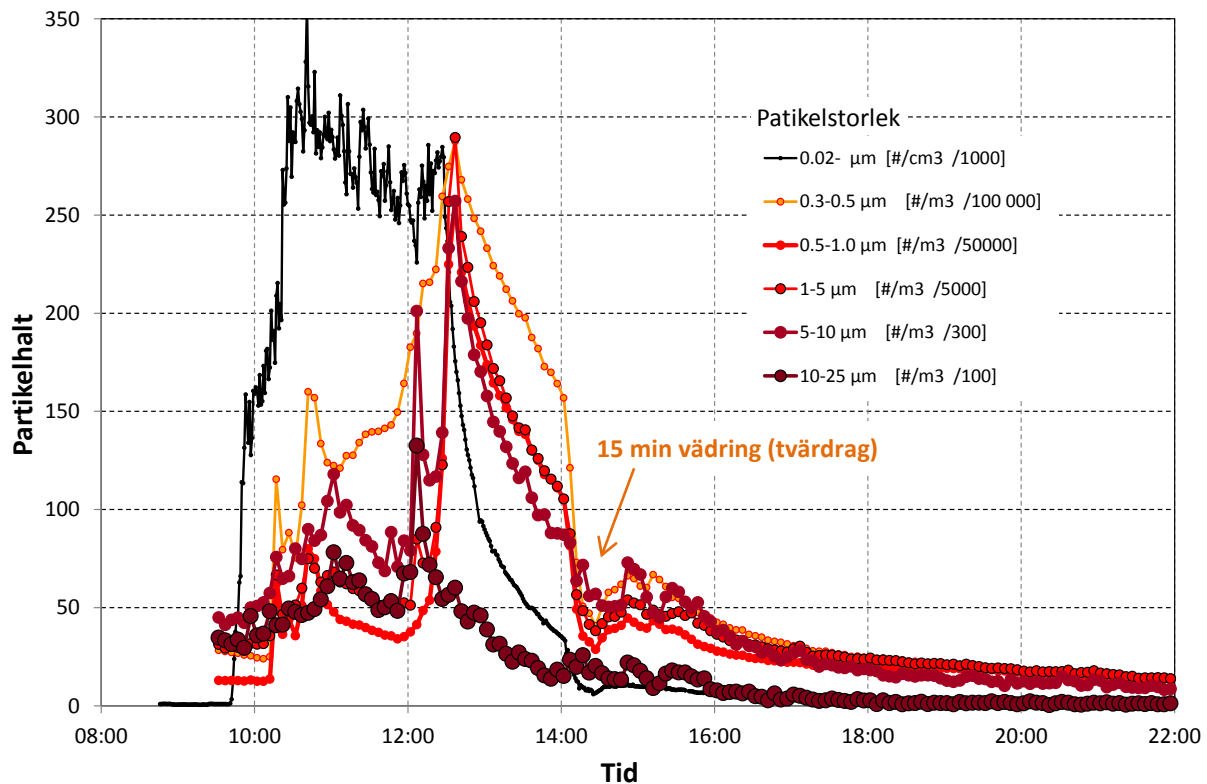
I den kyrka som i Figur 9 har näst störst luftomsättning har läcksökning pekat ut trägolvet mot krypgrund som den största läckpunkten. Experiment med tätning av krypgrundsventilerna vintertid (något som tidigare praktiserats i kyrkan) visade att detta minskade luftomsättningen med ca 40% och energibehovet med ca 10%. Golvet blev samtidigt varmare och mindre dragigt, så det är tänkbart att börvärdet för innetemperaturen samtidigt kan sänkas något med bibehållen komfort, med ytterligare energibesparing som följd. Viktigt att beakta här är dock miljön i krypgrunden, som riskerar att bli för fuktig, med risk för mögel och annan mikrobiologisk tillväxt. Långtidsmätningar i den aktuella krypgrunden har påvisat riskabelt höga fukthalter redan vid öppna krypgrundsventiler, och det ser ut att bli ännu något sämre vid tilltäppning av dem vintertid. Dock tycks riskbetingelserna ändå vara som störst under sommarhalvåret, och det är möjligt att riskbidraget vintertid är försumbart. Problemet med mycket krypgrundsfukt – vilket verkar var ett vanligt problem i svenska kyrkor – ledde till kompletterande experiment med krypgrundstilltäppning under *sommarhalvåret*, en åtgärd som ibland rekommenderas av fuktexperter. Fukthalten i krypgrunden blev då betydligt mer stabil, och de tidigare förekommande perioderna med kondensutfällning uteblev. Dock blev fukthalten alltför hög, så det är tveksamt om sommartilltäppning är att rekommendera. För närvarande pågår test med fuktstyrda spjäll (Fig. 14) placerade i några av krypgrundsventilerna i den studerade kyrkan, där spjällen automatiskt öppnas så fort absoluta fukthalten är lägre utomhus än i krypgrunden. Detta test fortgår och är ännu inte utvärderat.



Figur 14. Fuktstyrt ventilationsspjäll i krypgrundsventil.

Partikelgenerering i kyrkor

I projektet har flera fältmätningar gjorts av den höjning av halten luftpartiklar som uppstår i kyrkor i samband med fr a ljusbränning, men även människors närvaro under en verklig gudstjänst. Ett typiskt förlopp vid en gudstjänst visas i Fig. 15. Särskilt de levande ljusen framstår som stora partikelspridare, med stora mängder av mycket små partiklar som avges medan de brinner, medan större partiklar avges i samband med släckningen. Människors närvaro är framför allt förbunden med avgivning av större partiklar.

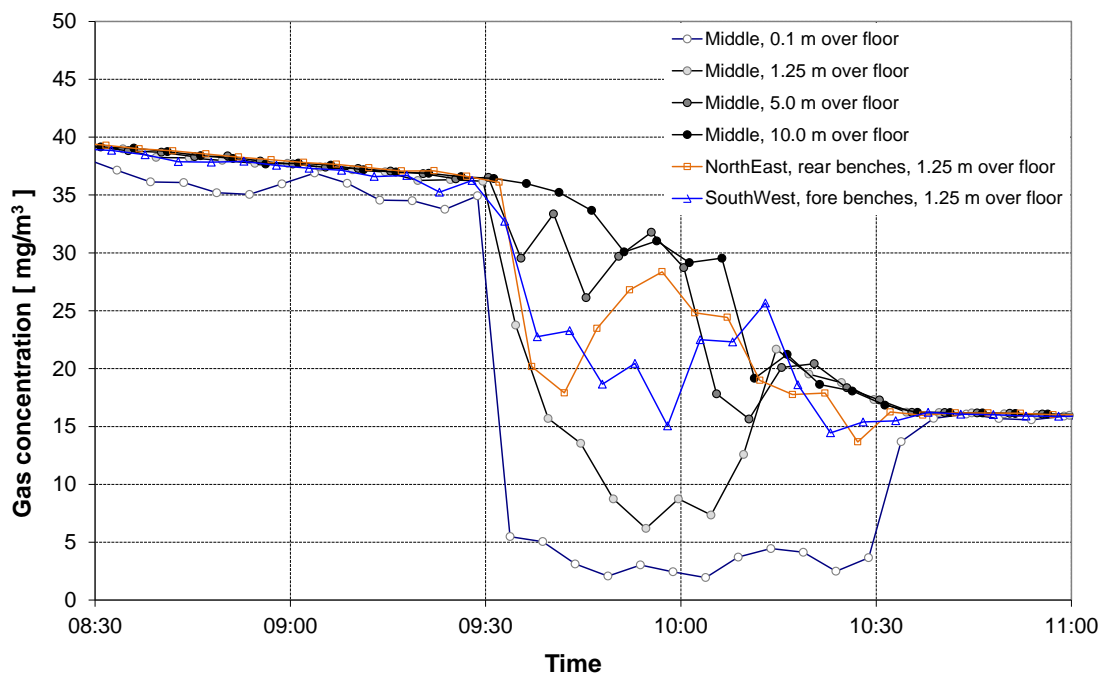


Figur 15. Partikelhalt i rumsluften i en 7800 m³ kyrka i samband med körövning (ca 10:00-10:40) och gudstjänst (ca 11:00-12:00). Stearinljus tänds ca 09:40 (och fler ca 10:20) och släcks mellan ca 12:05-12:20. Vädring (tvärdrag genom två portar) görs mellan ca 14:02-14:17. Totalt ca 80 besökare och 60 stearinljus. (Enheten för partikelhalten är ”antal partiklar per m³ luft”, med justeringsfaktor enligt förklaringsstabelln för att åskådliggöra alla partikelstorlekar i samma diagram.)

Det framgår i Fig. 15 att den partikelhalt som orsakas av människor och ljusbränning är mångdubbelt högre än bakgrunds-nivån. Andra liknande mätningar har givit liknande resultat, så det råder knappast någon tvekan om att människors närvaro och, kanske framför allt, levande ljus utgör betydande partikelkällor i kyrkor. Eftersom luftomsättningen i kyrkor normalt är tämligen låg (Fig. 9) så hinner dessutom de flesta av dessa partiklar avsättas på olika ytor i kyrksalen, medan bara en mindre andel sipprar ut med exfiltrationsluften. I Fig. 15 framgår att en kortvarig vädring – här 15 min – tydligt sänker partikelhalten, varför vädring efter förrättning kan vara ett sätt att minska inneryornas exponering för luftpartiklar; vädring behandlas mer ingående i nästa kapitel.

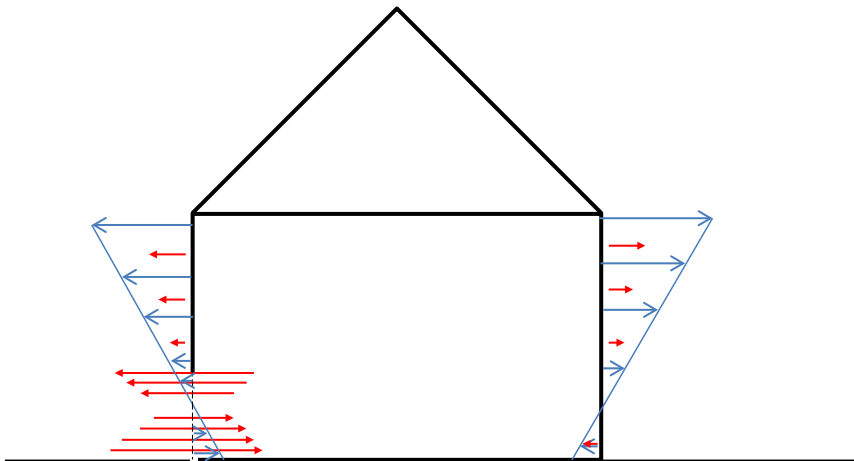
Vädring

Som konstaterades i anslutning till Fig. 15 ovan så sker stora emissioner av luftburna partiklar sker i samband med förrättningar i kyrkor, och en stor andel av dessa avsätts på invändiga ytor. Det noterades också att ett sätt minska problemet kan vara att vädra ut emissionerna efter förrättningen, genom att öppna portar och/eller fönster. I kyrkor är ofta fönstren svåra att öppna, så portöppning torde vara den framkomligaste metoden. Vädring har studerats i projektet genom analys av funna tidigare studier och egna fältmätningar i kyrkor. I fältmätningarna har luftväxlingen under vädring kvantifierats genom spårgasmätningar; se exempel i Fig. 16 nedan.



Figur 16. Spårgaskoncentration i sex mätpunkter i en kyrksal i samband med en timmes vädring (09:30-10:30) via en öppen port. Kall inströmmande uteluft når först mätpunkter på låg höjd medan punkter högre upp utvädras långsammare. Både innan och efter vädringen är rumsluften väl ombländad och den resulterande koncentrationssänkningen är tydlig; denna motsvarar andelen utvädrad luft.

Som figuren ovan antyder så kan luftväxlingen i kyrkan ökas betydligt genom vädring, även om bara en port öppnas. Detta beror på att porten normalt utgör en klart större öppning än summan av alla läck-öppningar (gäller de flesta svenska kyrkor). Det neutrala planet, NPL beskrivet ovan, hamnar då ända nere vid porten (på drygt halva porthöjden) och det uppstår tvåvägsströmning i porten, med uteluft inströmmande i portens nedre del och inneluft utströmmande i dess övre del; se Fig. 17. Denna luftväxling genom porten dominerar normalt över läckflödet genom övriga byggnadsskalet.



Figur 17. Illustration av den inne-ute-tryckskillnad (blåa pilar) och de luftflöden (röda pilar) som uppstår över byggnadsskalet p g a termik (varmare inne än ute) när det är vindstilla och en port är öppen. Jfr. Fig. 8.

Vid vädringsmätningar med en öppen port har god överensstämmelse erhållits med följande ekvation för luftomsättningen, n [omsättningar/timme]:

$$n = \frac{C_e}{f} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} g \right)^{1/2}$$

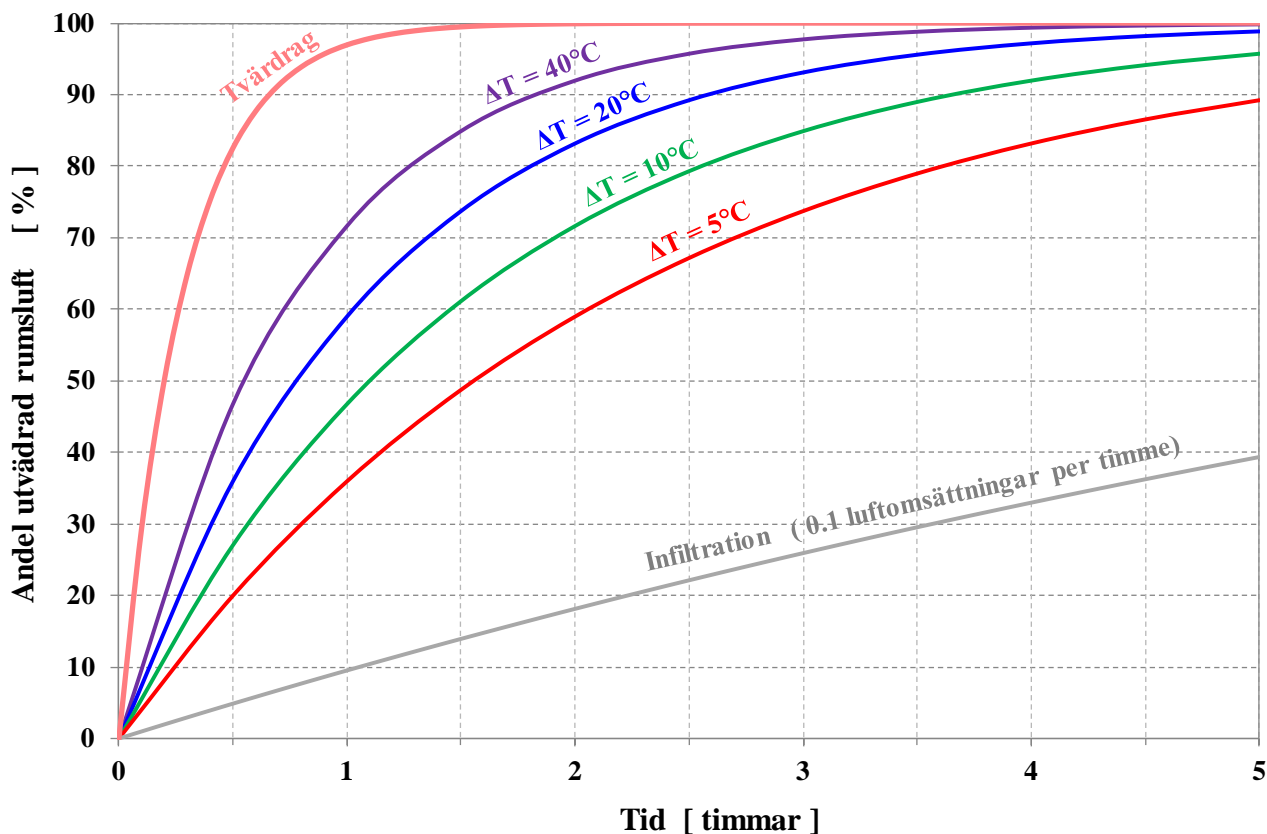
där ΔT är temperaturskillnaden inne-ute; T är medeltemperaturen i [Kelvin]; $g=9.81 \text{ m/s}^2$; C_e är en empirisk konstant som varierat lite vid olika studier, men legat kring 0,15, vilket överensstämmer bra med våra mätningar; f är en geometrikonstant för den aktuella byggnaden som beror av byggnadsvolymen, V [m^3], och den öppna portens bredd, b [m] och höjd, h [m] enligt:

$$f = \frac{V}{b \cdot h^{3/2}}$$

Om luften måste passera två portar – vilket varit fallet i gjorda fältförsök – så används måtten på den minsta porten. Andelen utvädrad rumsluft, E , efter en viss tid, t [timmar], ges slutligen av:

$$E = (1 - e^{-n \cdot t}) \cdot 100 \quad [\%]$$

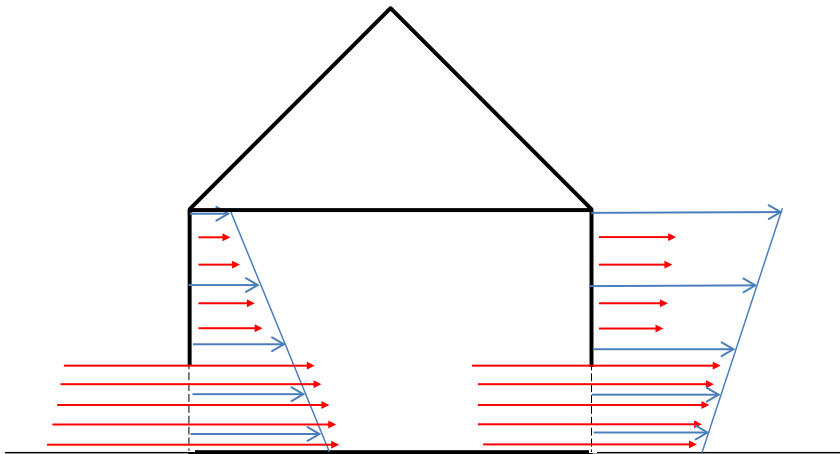
Av ekvationerna ovan kan man skapa diagram som det i Fig. 18, i vilket man snabbt kan skatta hur snabb utvädringen blir, och alltså få en fingervisning om hur länge det kan vara vettigt att vädra. Diagramkurvorna är beroende av byggnadens geometrikonstant, f , vilken beräknas ganska lätt enligt ovan. Tre alternativa diagram, för byggnader med andra geometrikonstanter, visas i Appendix i slutet av rapporten.



Figur 18. Typiskt utvärdringsdiagram, som ger andelen utvädrad rumsluft efter en viss tid vid en viss temperaturskillnad inne-ute (ΔT). Gäller termikdriven vädring i kyrka med geometrikonstanten $f = 500$ (t ex kyrkvolum ca 3000 m^3 och en port $\text{å } 2 \times 2 \text{ m}$). Även utvärdringstakten vid typiskt infiltrationsflöde (utan öppnade portar eller fönster) är inlagd, liksom vid tvärdrag genom två portar (bakgrundsvind 3 m/s riktad mot ena fasaden, kyrkvolum 6000 m^3 och två portar med bredd= 2.00 m och höjd= $2.08 \text{ m} \rightarrow f=500$).

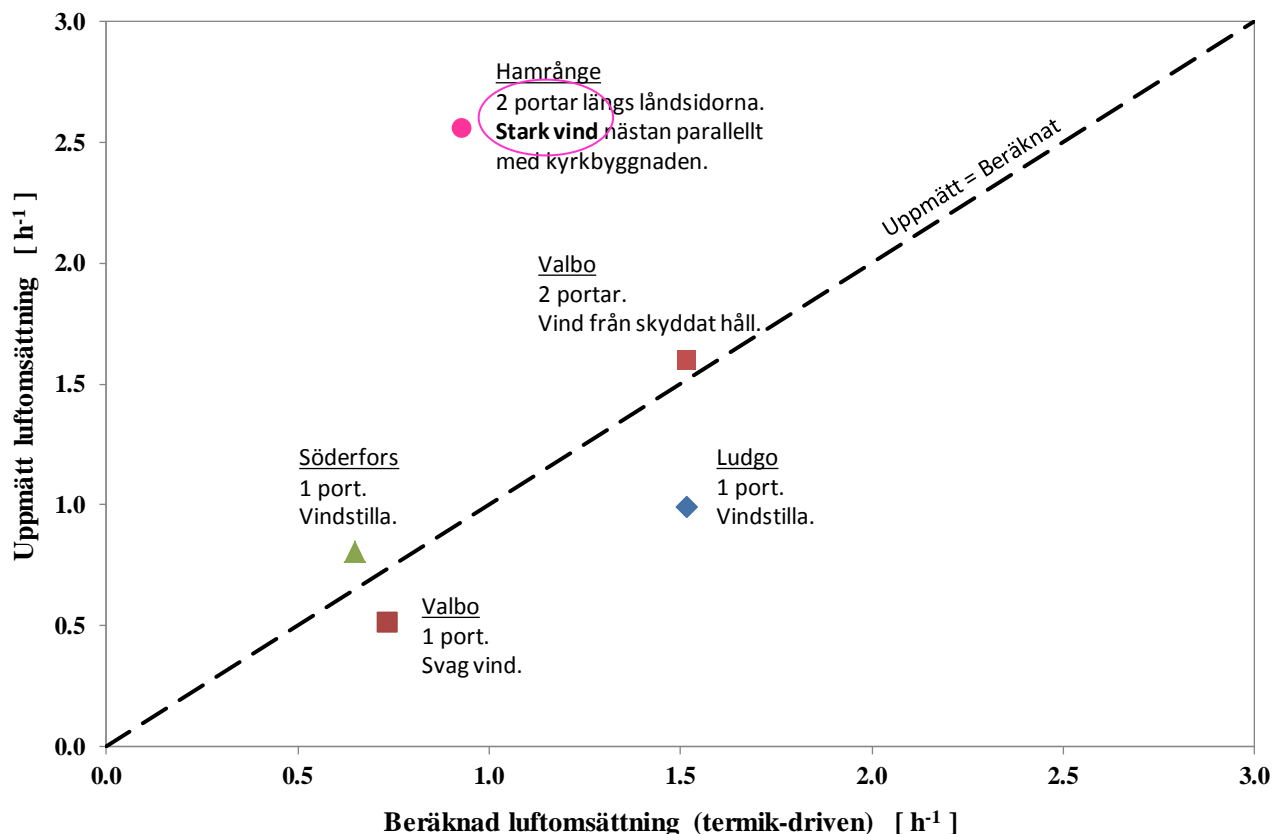
I Fig. 9 ovan noterades att ett typiskt värde på luftomsättningen i kyrkor (med stängda dörrar och fönster) är $0,1$ omsättningar/timme. I Fig. 18 är inlagt vilken utvärdringstakt denna luftomsättning motsvarar. Det framgår tydligt att öppnandet av en port normalt medför en flerfaldigad hastighet av utvärdringen.

Om flera portar öppnas samtidigt adderas deras storleksterm, $b \cdot h^{3/2}$, till nämnaren i beräkningen av geometrikonstant f i ovanstående ekvation. Dock erhålles då en *minimi*-skattning av den utvärdringstakt som erhålles med två eller flera öppna portar (eller fönster), ty normalt föreligger viss vind som orsakar *tvärdrag*, särskilt när portarna sitter på olika fasadväggar. Vid tvärdrag uppstår normalt enkelriktad strömning genom portarna (det strömmar antingen in eller ut genom hela portöppningen), ofta med flerfaldigad utvärdringstakt som följd; se Fig. 19 och exemplet i Fig. 18. Kan tvärdrag åstadkommas så kan alltså utvärdringstakten kortas avsevärt.



Figur 19. Illustration av den inne-ute-tryckskillnad (blåa pilar) och de luftflöden (röda pilar) som uppstår över byggnadsskalet p g a termik och vind när två portar är öppna.

Fig. 20 visar hur uppmätt luftomsättning vs. beräknad termikdriven luftomsättning (enligt ovan) ser ut vid fem utvärderingsexperiment. En stark avvikare från beräknat värde kan noteras då det var stark vind och öppet för tvärdrag, en avvikelse som som alltså kunde förväntas.



Figur 20. Uppmätt luftomsättning vs. Beräknad termik-driven luftomsättning.

Till de emissioner som vädras ut efter en förrättning hör även luftfukt som avgivits från besökare och levande ljus. I kyrkor som redan har oönskat hög innefukthalt kan detta vara välkommet, och risken minskar att fuktig inneluft strömmar upp i en kall vind, där den relativa fukthalten, RF, kan bli rejält förhöjd. Periodvis kan emellertid luftfuktigheten vara

högre ute än inne, och kondensation på förhållandevis kalla ytor inne kan uppstå i samband med vädring. Till hjälp för att bedöma denna risk har i Tabell 1 sammanställts vilken maximal daggpunktstemperatur som kan förväntas uppstå under olika tider på året och på olika platser i landet. Om uteluft som är fuktig nog att ha denna daggpunktstemperatur strömmar in i en kyrkbyggnad och stöter på ytor där som har lägre temperatur så uppstår kondens, alltså vattenutfällning, vilket kan vara skadligt för byggnaden om det sker i stor skala.

Vattensamlingar som bildas på stengolv kan också vara problematiskt – portarna kan ju ställas upp även *innan* en förättning, för att välkomna besökare! Beroende på hur kyrkbyggnaden uppvärms så kan man ofta göra en hygglig uppskattning av hur kalla innerytorna kan tänkas vara inför ett ev vädringstillfälle, och tabellen nedan kan då nyttjas för att bedöma risken för att kondens kan uppstå. Bedömer man att det finns ytor som har lägre temperatur än den man hittar i tabellen för den aktuella månaden så finns kondensrisk, särskilt om det nyligen har regnat och samtidigt är förhållandevis varmt ute.

Tabell 1. Maximal daggpunktstemperatur (°C) för uteluften på fem olika orter i Sverige. (Medelvärde över en tioårsperiod (2004-2014) av maxvärden som registrerats månadsvis.)

	Gävle	Hörby	Göteborg	Nattavaara	Örebro
Jan	3.2	5.5	8.2	-0.7	4.3
Feb	2.3	5.5	9.4	-0.4	3.4
Mar	3.2	7.9	15.8	0.4	5.2
Apr	8.5	10.1	21.7	2.9	9.4
May	12.9	15.4	23.0	9.7	13.6
Jun	16.2	17.2	24.9	14.1	15.2
Jul	18.6	19.6	25.5	16.7	17.4
Aug	18.8	19.3	24.0	16.0	17.6
Sep	13.9	14.8	19.5	11.0	12.7
Oct	10.3	12.3	14.7	6.6	10.2
Nov	7.0	9.2	10.7	2.1	7.1
Dec	3.9	6.7	8.3	0.5	5.1

Vid vädringstillfället direkt efter en förättning råder oftast komforttemperatur i kyrkan, och våra fältmätningar antyder att även de invändiga ytorna bör ha hunnit komma ganska nära rumsluftens temperatur även vid intermitterent uppvärmning. En stenvägg kan ligga ett par grader lägre i temperatur och ett stengolv förmodligen ytterligare någon grad lägre. Men vid jämförelse med värdena i Tabell 1 så verkar det vara sällan som kondensrisk uppstår vid vädring efter en förättning. Ett undantag är Göteborg (Västkusten), där uppenbarligen avsevärt högre utefukthalter uppstår än på övriga orter.

Det är även tänkbart att vädring innebär införsel av alltför *torr* luft, särskilt kalla vinterdagar, vilket kan vara skadligt för fukt känsligt material (träsprickor, färgflagning, taveldukssprickor, etc). Det står dock klart att i kyrkor med intermitterent uppvärmning blir den sänkning i relativ fukthalt som uppstår i samband med de plötsliga uppvärmningstillfällena avsevärt större än den som uppstår vid tillfällig vädring. Och även i en ständigt komfortvärmad kyrka, som inte har några ständiga större inre fukt källor, bör luftinfiltrationen ha gjort att den absoluta fukthalten inne inte avviker så mycket från den utomhus, varför luftutbyte däremellan inte bör medföra någon större förändring i innefukthalten. Däremot kan viss uttorkning ske vid vädring i kyrkor som har ett tillskott av fukt från t ex kapillärt uppsuget vatten från mark eller läckage i byggnadsskalet. Innefukthalten kan då råka bli lagom hög under vintern, med tanke

på fuktkänsliga inventarier, och invädrad uteluft kan påtagligt sänka inneluftens fukthalt. Preliminärt verkar dock den förhållandevis korta vädringstiden göra att risken för skadligt låg fukthalt uppstår är liten.

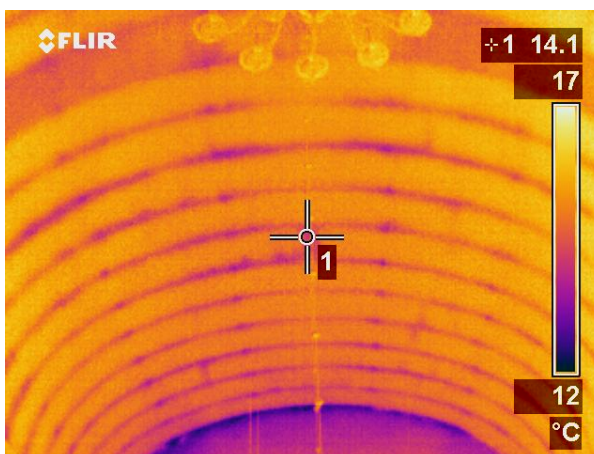
Den energiförlust som uppstår under tillfällig vädring – p g a utvädrad varm luft – är i storleksordningen 5 till 50 kWh, och alltså förhållandevis liten i sammanhanget.

Särskilt i samband med tätning av kyrkors byggnadsskal, för att t ex spara energi, kan det vara viktigt att få till stånd verksamma vädringsrutiner. Beräkningsmodellen enligt ovan kan då vara till hjälp.

Mikroklimat och försmutsning vid invändiga ytor

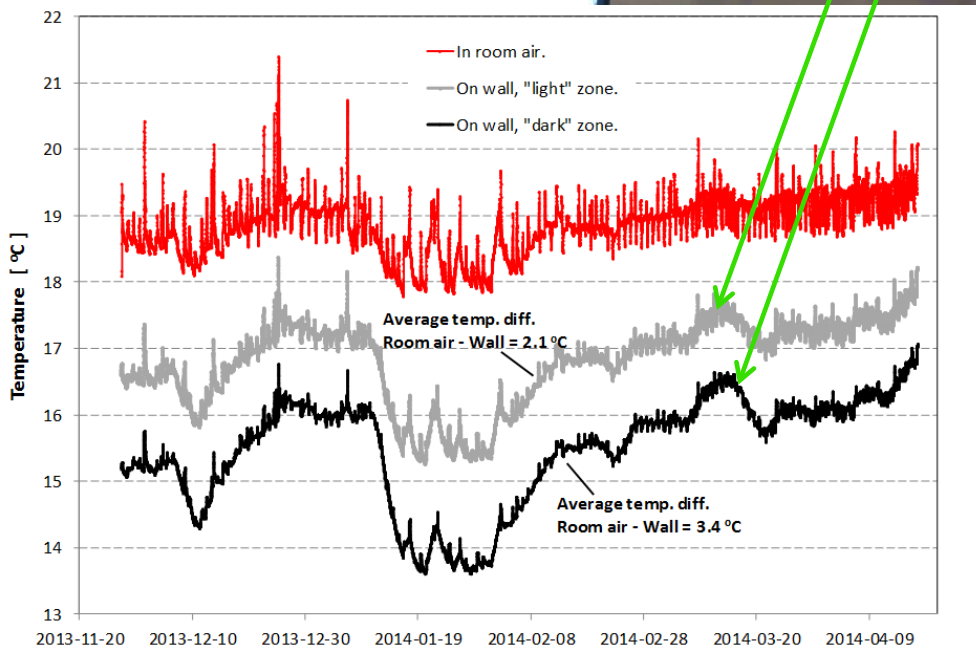
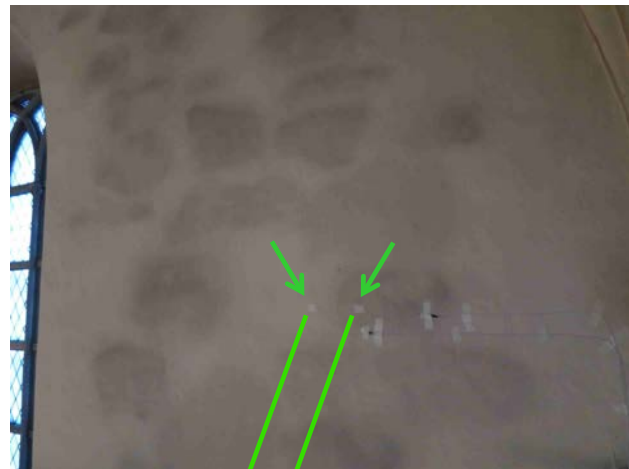
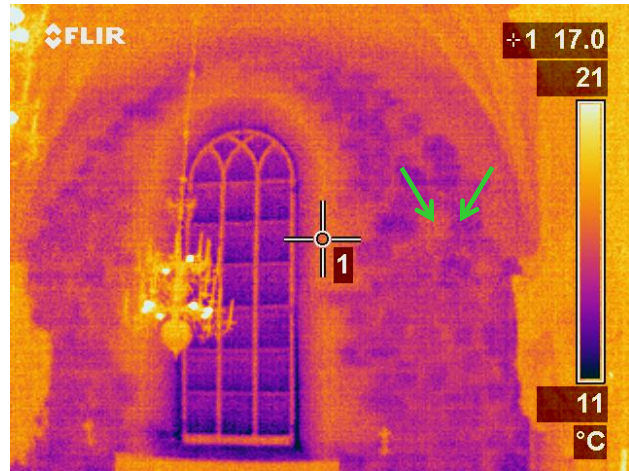
Ett välkänt bevarandeproblem för konstföremål är den gradvisa avsättning av luftburna partiklar som alltid sker i varierande grad på föremålens yta. Partikelavsättningen medför en nedsmutsning av föremålen som förtar deras konstnärliga värden. Med tiden kan rengöring bli aktuell, men detta är en mödosam och kostsam åtgärd, som också i någon mån förstör originalytan. I kyrkor gäller problemet även vägg- och takytor, vilka i sig kan vara konstnärligt utsmyckade. En i detta sammanhang viktig mekanism för partikelavsättning verkar vara s k termodiffusion (eller termofores). Fenomenet uppstår så snart en yta har lägre temperatur än omgivande luft. Den temperaturgradient som då uppstår i luften nära ytan (gradvis kallare ju närmare ytan man kommer) orsakar en nettotransport av luftpartiklar mot ytan och därmed ökad partikelavsättning. Två exempel på fenomenet visas nertill.

I Fig. 21 visas hur svarta ränder uppstått i taket p g a tilläggsisolering på vinden som gjort takstolarna där till köldbryggor. Församlingen är nu inriktad på att komplettera med isolering även på takstolarna.



Figur 21. Randmönstrad försmutsning av tak, orsakad av kalla ytor som uppstått p g a takstolar på vinden som fungerar som köldbryggor mellan isoleringen. IR-termografi uppe till höger.

Ett annat exempel på termodiffusion visas i Fig. 22, där stora stenar bakom vägghypsen fungerar som köldbryggor och orsakar fläckvis försmutsning. Två närliggande punkter på väggen, som klart skilde sig i svärtningsgrad, valdes ut för långtidsmätning av yttemperaturen. Diagrammet visar hur dessa yttemperaturer samt lufttemperaturen (på samma höjd över golvet) varierat under ett vinterhalvår. Det framgår att yttemperaturen ständigt varit lägre på den mest svärtade punkten än på den minst svärtade. I genomsnitt har skillnaden mellan yt- och lufttemperatur – vilken är drivkraften för termodiffusion – varit $3,4^{\circ}\text{C}$ vid den mest svärtade punkten och $2,1^{\circ}\text{C}$ vid den minst svärtade. Det verkar alltså räcka med denna förhållandevis lilla skillnad i temperaturdifferens för att en tydlig svärtningskillnad ska uppstå med tiden. Diagrammet antyder att kyrkan ständigt är uppvärmd till komforttemperatur. Det är sannolikt att en sänkning av innetemperaturen minskar nedsmutsningstakten genom att temperaturdifferenserna minskar.



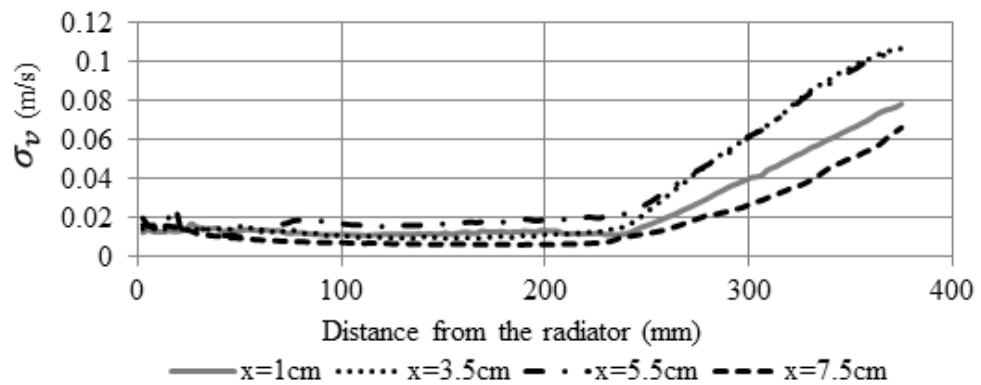
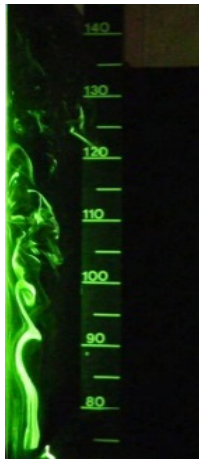
Figur 22. Fläckvis försmutsning på putsad stenvägg, orsakad av att stenarna bakom putsen fungerar som köldbryggor. Långtidsmätning av yttemperaturen på två ställen med olika svärtningsgrad. IR-termografi uppe till höger.

Fig. 23 visar exempel på svärtning över en radiator i en stenkyrka. Figuren visar tydligt på två fenomen som ofta kan observeras vid radiatorer: svärtningen uppstår framför allt en bit (typiskt ett par dm) ovanför radiatorn, samtidigt som det finns vertikala stråk med accentuerad svärtning. I den högra bilden kan skönjas att de vertikala stråken uppstår rakt över vägginfästningarna till radiatorn.



Figur 23. Accentuerad svärtning över radiator i stenkyrka.

IR-termografering av ytan över radiatorer där dessa försmutsningsfenomen kunde iakttagas pekade inte på ett direkt samband mellan yttemperatur och försmutsning, utan andra mekanismer än termodiffusion verkar tillkomma. Med avsikt att studera detta närmare gjordes två olika experimentella studier av mikroklimatet vid radiatorer. Det första gjordes i laboriemiljö i ett mindre provrum, där så kallad "Particle Image Velocimetry", PIV-teknik kunde tillämpas. Tekniken bygger på datoranalys av fotografier av rökpartiklar som tillsätts rumsluften och som följer med luftströmmarna. Med laserspaltbelysning och snabb bildfrekvens kan dynamiken i strömningsmönstret fångas över ett 2-dimensionellt område, och flera olika mått på strömningskaraktäristiken kan beräknas. I Figur 24 illustrerar den vänstra bilden luftströmningen över den testade radiatorn. Det framgår att luften strömmar tämligen jämnt och parallellt med väggen (så kallad laminär strömning) ett stycke upp, varpå omslag till turbulent strömning sker och strömningsmönstret blir mer kaotiskt. Diagrammet till höger visar hur luftturbulensen (standardavvikelsen för lufthastigheten) förändras med avståndet (vertikalt) från radiatorns topp. En tydlig, plötslig ökning av turbulensen tycks ske ca 250 mm över radiatorn. Det synes troligt att den initiala lugna, laminära strömningen är orsak till det avsevärt renare väggpartiet just över radiatorer, som noterades i Fig. 23, medan den turbulenta strömningen högre upp förstärker partikelavsättning och försmutsning.



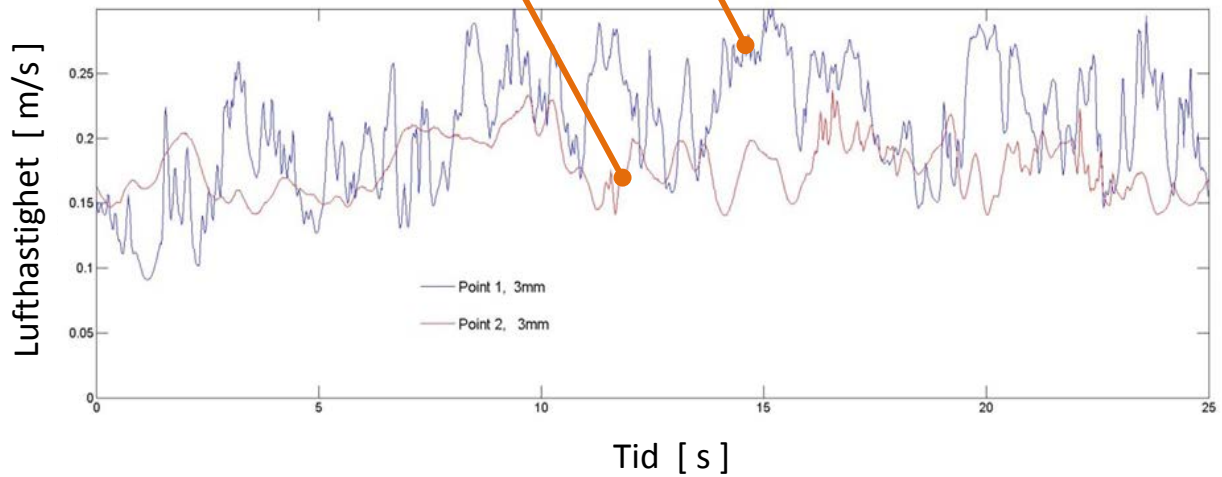
Figur 24. *Vänster*: Rökvisualisering av luftströmningen över en radiator (toppen av radiatoren synlig längst ner, väggen till vänster). *Höger*: Förändring i luftturbulens (standardavvikelsen för lufthastigheten, σ_v) med avståndet (vertikalt) från radiators topp, på fyra olika avstånd (x) från väggen.

Under experimenten med PIV-teknik enligt ovan framkom svårighet att mäta riktigt nära väggytan, framför allt p g a ljusreflexion. Kompletterande mätningar med sk varmrådsanemometri gjordes därför över en radiator monterad på en tung stenvägg, där svärtningsmönster liknande de i Figur 23 kunde iakttas; se Fig. 25. En särskild varmrådsanemometer togs därvid fram (högra bilden) som kunde mäta lufthastigheten i en miljö med stora temperaturgradienter och -fluktuationer, något som annars är problematiskt vid varmrådsmätningar. Parallellt med lufthastigheten mättes även lufttemperaturen, och med små sensorkroppar kunde snabba fluktuationer fångas.



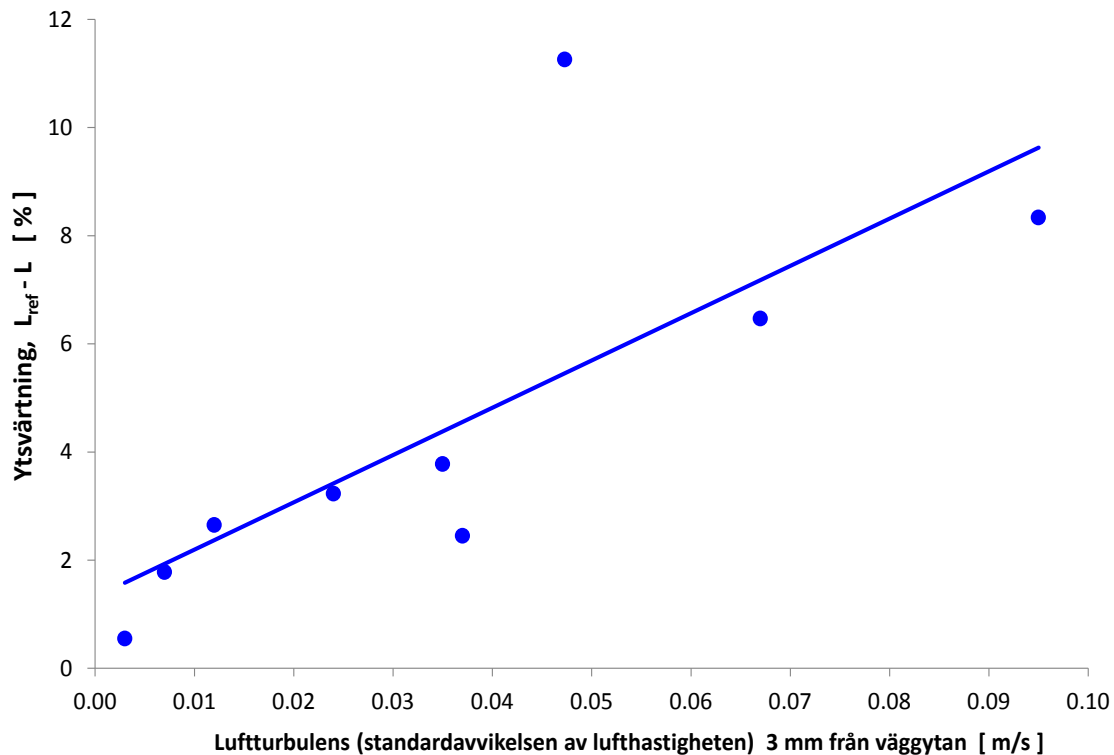
Figur 25. Mätning av mikroklimatet över en radiator.

Förutom lufthastighets- och temperaturmätningar mättes även ytornas svärtningsgrad med en spektrofotometer, Fig. 26. Nio olika ställen, med olika grad av visuell svärtning, valdes ut för mätning av ytsvärtning och lufthastighets- och temperaturgränsskikt. Fig. 26 visar ett exempel på lufthastighetsfluktuationerna nära väggytan på två ställen med klart synbar skillnad i ytsvärtning. Det framgår att lufthastigheten överlag är högre och klart mer turbulent vid stället med mest svärtning.



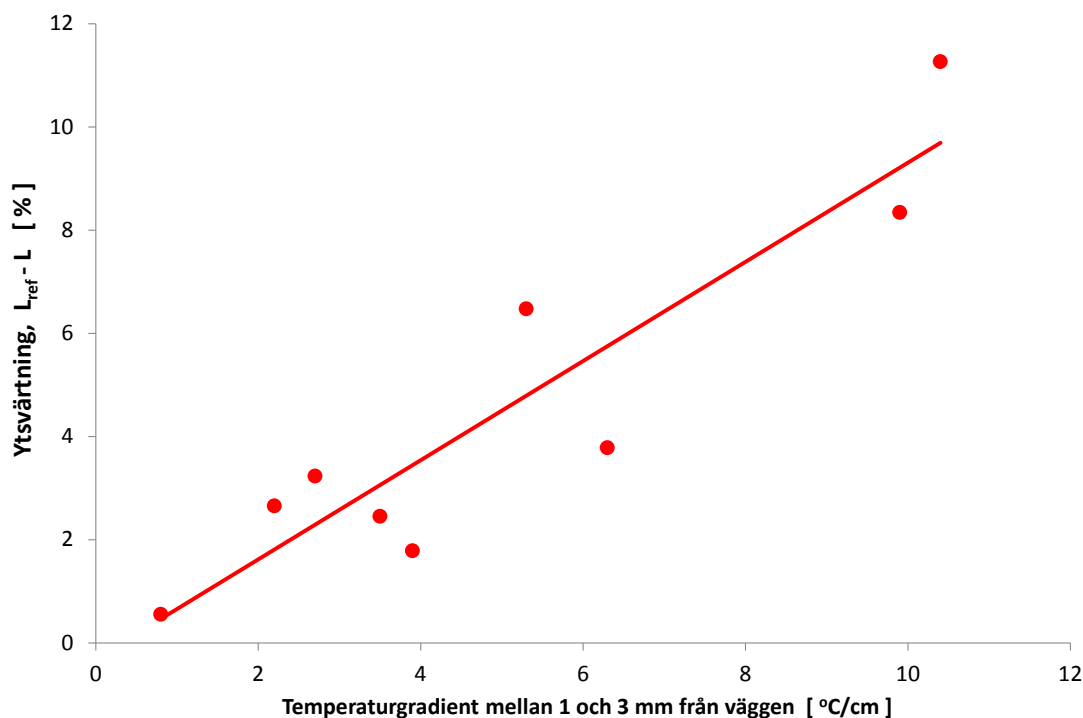
Figur 26. Mätning av ytsvärtning med spektrofotometer och exempel på lufthastighetsfluktuationer 3 mm från väggytan på två olika ställen med olika svärtningsgrad.

I Fig. 27 är sammanställt hur graden av luftturbulens (standardavvikelsen av lufthastigheten) 3 mm från väggytan förhåller sig till uppmätt ytsvärtning på de nio utvalda mätställena på väggen. Förutom en avvikande punkt på det mest svärtade stället visar Fig. 27 på en ganska klar tendens för ökad luftturbulens att orsaka mer ytsvärtning.



Figur 27. Luftturbulens vs. Ytsvärtning i nio punkter över en radiator.

Den uppvärmda luftströmmen över en radiator är varmare än den intilliggande väggen. Nära väggytan råder därför en temperaturgradient (temperaturförändring med avståndet), varför partikelavsättningen på väggytan i någon mån borde bero på den tidigare beskrivna mekanismen termodiffusion. Fig. 28 visar hur uppmätt temperaturgradient förhåller sig till ytsvärtningen i samma nio punkter som i Fig. 27. Även här syns ett ganska tydligt samband, med en större temperaturgradient knuten till mer ytsvärtning. Det är därmed inte helt klart om det är luftturbulensen eller temperaturgradienten som har mest inverkan på ytsvärtningen. Ökad luftturbulens ökar i sig temperaturgradienten vid en yta, samtidigt som turbulensen förser luftskiktet närmast ytan med partiklar från huvudluftströmmen. Kraftig luftturbulens kan också göra att större luftpartiklar ”slungas” (av sin tröghet) in mot ytan. Sammantaget finns alltså flera mekanismer som bidrar till att luftturbulens nära ytor orsakar partikelavsättning, med en gradvis ökande nedsmutsning som följd.

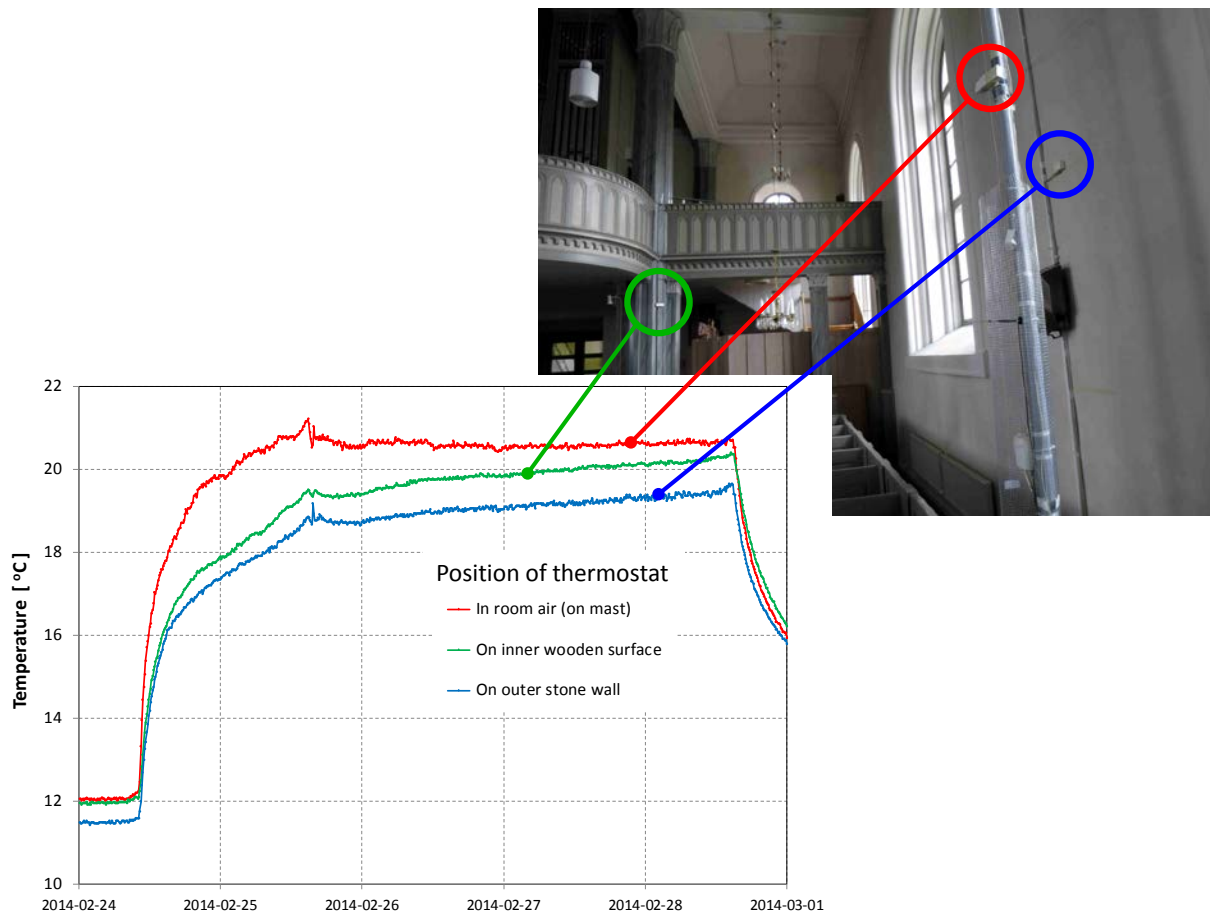


Figur 28. Temperaturgradient vs. Ytsvärtning i nio punkter över en radiator.

De stråk av accentuerad svärtning som i Fig. 23 noterades uppstå över radiatorinfästningar kunde observeras även vid mätningarna i Fig. 26, och kunde då också konstateras vara förbundna med ökad luftturbulens. Det verkar som att till synes små konstruktionsdetaljer som är i vägen för den uppåtkonvekterade, varma luften vid en radiator kan trigga igång turbulent strömning på ett tidigt stadium, med ökad partikelavsättning som följd. Detta pekar på att det kan vara vettigt med en strävan mot mer strömlinjeformade radiatorer och infästningar (i vertikal led), och att hålla fritt från andra föremål vid radiatorn som kan störa luftströmmen. Så fort det uppstår varierad svärtning över en yta med homogen bakgrundsfärg, som i exemplen ovan, så medför ovan beskrivna svärtningskontraster att ytan framstår som nedsmutsad på ett tidigare stadium än om svärtningen varit mer jämnt fördelad över ytan. Köldbryggor och lokalt förhöjd luftturbulens bör därför undanröjas i den mån det är möjligt.

Placering av termostater

I projektets fältmätningar har observerats att termostaterna för värmeregleringen ibland är placerade på yttervägg av sten. Denna placering torde medföra risk för missvisande temperaturmätning och försämrad reglering. För att prova detta gjordes experiment med tre termostatattrapper (temperaturloggrar inneslutna i små perforerad pappkartonger) som placerades i en större, intermittently uppvärmd stenkyrka på tre olika ställen: (1) på yttervägg av sten, (2) på träklädd pelare och (3) på en smal mätmast av glasfiber; se Fig. 29.

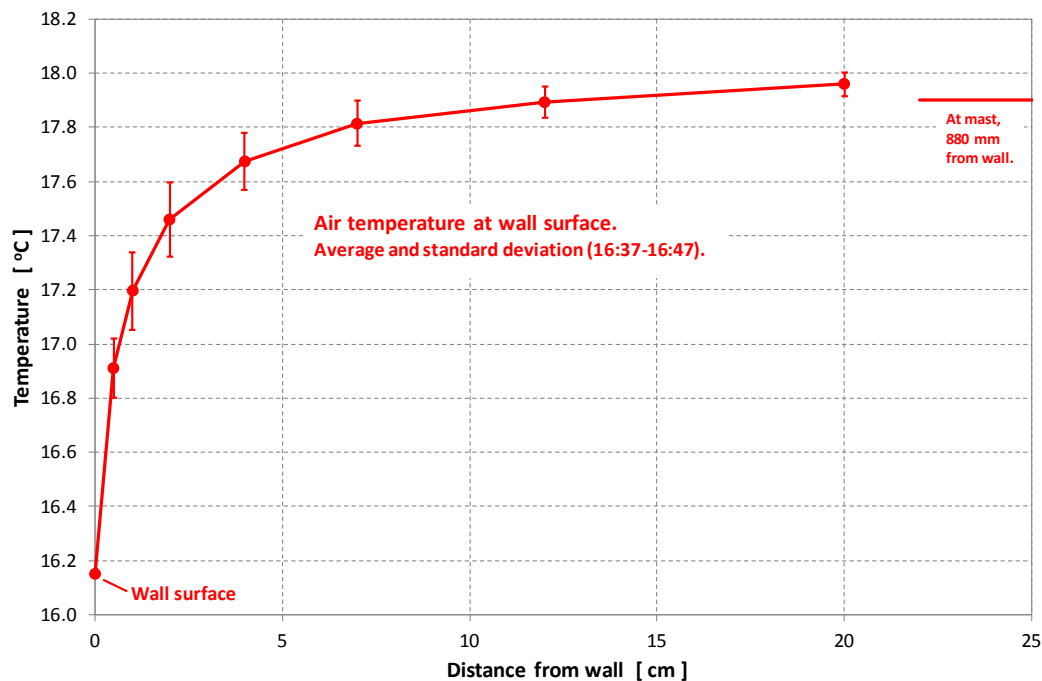


Figur 29. Termostatattrapper placerade på tre olika ställen i en kyrka, och responsen hos dessa på ett plötsligt uppvärmningsförlopp.

Figuren visar också temperaturresponsen för dessa termostatattrapper vid plötslig uppvärmning till komforttemperatur. Experimentet gjordes i slutet av februari och det faktum att ytan på ytterväggen är kallare än rumsluften avspeglas i att mätvärdena från termostatattrappen placerad där hela tiden ligger lägre än från de båda andra termostatattrapperna. Innan komfortuppvärmningsfasen börjar visar den ca 0.5°C lägre temperatur, och under uppvärmningsfasen visar den periodvis mer än 2°C lägre temperatur än den termostatattrapp som är placerad på masten, mer fritt i rumsluften. Den termiska trögheten i stenväggen orsakar uppenbarligen en fördröjning i temperaturresponsen hos termostatattrappen placerad på denna. En termostat med sådan placering borde således orsaka en icke-representativ innetemperaturmätning och fördröjd temperaturåterkoppling, vilket torde minska förutsättningarna för effektiv temperaturreglering. Termostatattrappen på den lättare innerytan av trä verkar visa ungefär samma temperatur som den mast-placerade vid fortfarighetstillstånd, men uppvisar också en tydlig fördröjning i responsen på en plötslig temperaturförändring.

Det är uppenbart i Fig. 29 att den kallare ytterväggen kyler ner en termostat placerad på denna. Väggkyllan kan dels överföras genom direkt ledning via de termostatdelar som har kontakt med väggen, men även genom strålning och, sist men inte minst, genom konvektion gentemot luften i det kallras som uppstår längs väggen. I HiGs tidigare studier har noterats att kallrasflödena tenderar att bli mycket stora längs höga kyrkväggar, vilket motiverade en särskild studie av temperaturgränsskiktet vid en kall kyrkvägg. Fig. 30 visar uppmätt lufttemperatur på olika avstånd från väggen intill platsen för vägg-termostatattrappen i Fig. 29. Det framgår att väggen kyler luften i ett skikt som sträcker sig några cm ut från

väggen. En termostat placerad på väggytan där hamnar alltså innanför detta temperaturskikt och bör i hög grad påverkas av den kalla luftströmmen. Figuren antyder att man med en termostatplacering minst ca 5 cm ut från väggen radikalt minskar inverkan av kallrasen.



Figur 30. Lufttemperatur på olika avstånd från en kall kyrkvägg, 3 m över golvet. Takhöjd: 10 m. Temperatursensorer: 0,5 mm guldöverdragna termistorer.

Publiceringar

- Hayati A., Mattsson, M., Sandberg. 2014. Evaluation of the LBL and AIM-2 air infiltration models on large single zones: Three historical churches. *J. Building and Environment*. Vol. 81, pp. 365-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.013>.
- Sattari A, Sandberg M. 2014. PIV visualization of air flow over a wall-mounted radiator. Conference proc: Roomvent 2014, 13th SCANVAC International Conference on Air Distribution in Rooms, pp230-236, São Paulo, Brazil.
- Mattsson, M., Sandberg, M, Claesson L., Lindström, S., Hayati A. 2013. Fan pressurization method for measuring air leakage in churches – wind and stack induced uncertainties. Conference proc: Cultural heritage preservation – 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation (EWCHP), pp 63-68, Bozen, Italy. Ed. A. Troi and E. Luchi. Felix verlag editrice, Milano. ISBN 978-88-88307-26-8.
- Hayati A., Mattsson, M., Sandberg, M, Linden E. 2013. Evaluation of two air infiltration models on a church. Conference proc: Cultural heritage preservation – 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation (EWCHP), pp 47-53, Bozen, Italy. Ed. A. Troi and E. Luchi. Felix verlag editrice, Milano. ISBN 978-88-88307-26-8.
- Sandberg, M., Sattari A., Mattsson, M. 2013. Plaster finishes in historical buildings – measurements of surface structure, roughness parameters and air flow characteristics. Conference proc: Cultural heritage preservation – 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation (EWCHP), pp 69-75, Bozen, Italy. Ed. A. Troi and E. Luchi. Felix verlag editrice, Milano. ISBN 978-88-88307-26-8.

Sattari A. 2014. Particle Image Velocimetry (PIV) Visualization and Measurement of Air Flow Over a Wall-Mounted Radiator. J Building and environment. (Submitted).

Sandberg M, Mattsson M, Wigö H, Hayati A, Claesson L, Linden E, Khan M A. 2014. Wind and air infiltration phenomena at buildings analyzed with reference to measurements at a historical church. J Building and environment. (Submitted).

Under bearbetning:

Mattsson M, Lundström H, Sattari A, Sandberg M. 2015. Particle deposition mechanisms on the wall above a radiator.

Hayati A., Mattsson, M., Sandberg, M. 2015. Intentional airing of churches for contaminant evacuation after services.

Mattsson M, Sandberg M, Lindström S. 2015. Strategies for crawlspace ventilation – an experimental field study.

...och fler planeras...!

Appendix

Referenser till AIM-2 modellen för luftinfiltration

Walker IS, Wilson DJ. AIM 2: The Alberta air infiltration model. University of Alberta, Department of Mechanical Engineering Report 71. 1990.

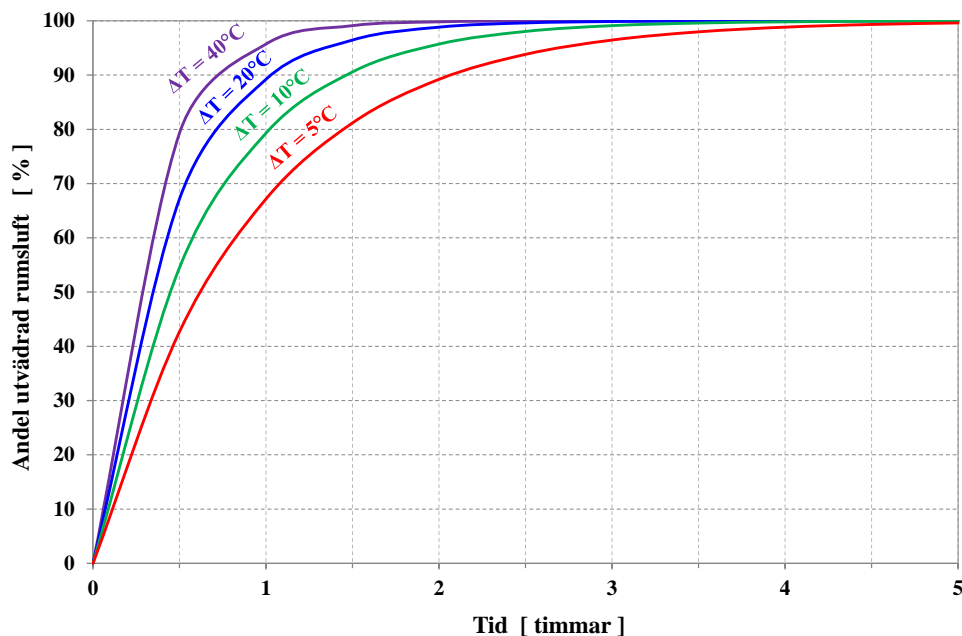
Walker IS, Wilson DJ. Field validation of algebraic equations for stack and wind driven air infiltration calculations. HVAC&R Research. 1998;4:119-39.

Utvädringsdiagram

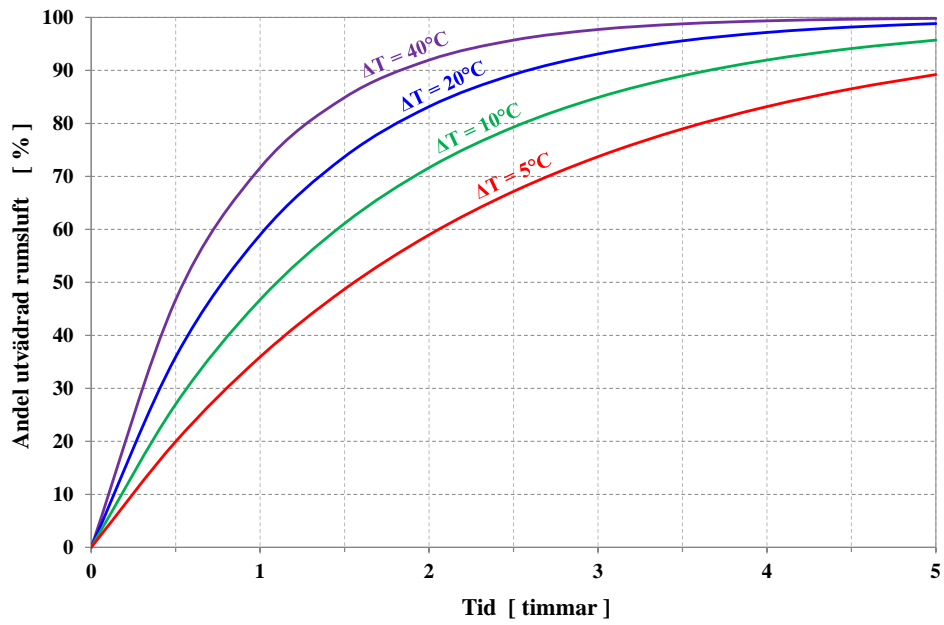
Utvädringsdiagram som kompletterar det i Fig. 18. Diagrammen ger andelen utvädrad rumsluft för en kyrka med en öppen port efter en viss tid vid en viss temperaturskillnad inne-ute (ΔT). Diagrammen gäller för olika byggnaders geometrikonstant, f , som beräknas enligt:

$$f = \frac{V}{b \cdot h^{3/2}}$$

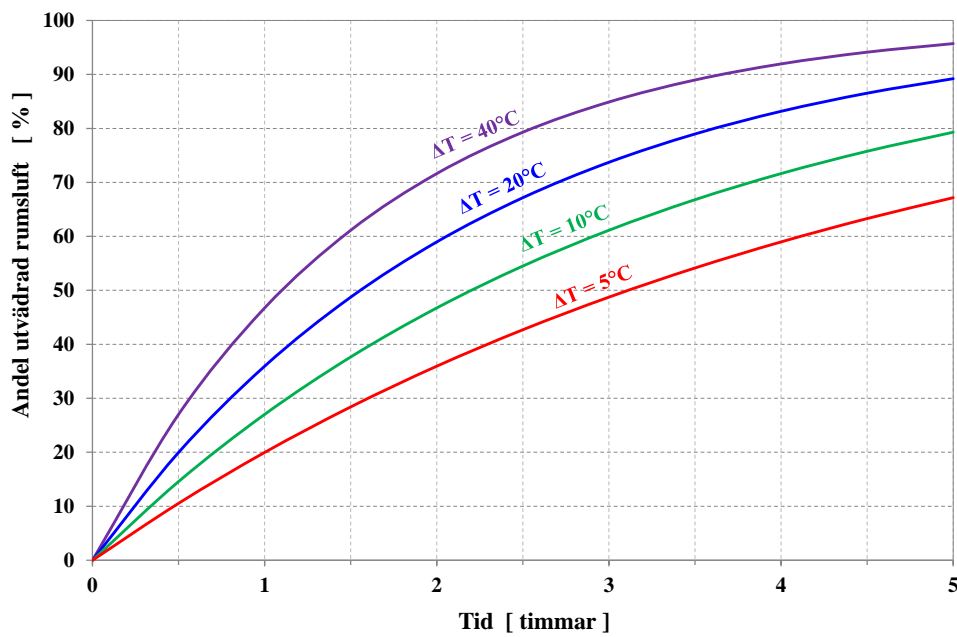
där, V är byggnadsvolymen [m^3], b och h är och den öppna portens bredd [m] resp. höjd [m]. Om flera portar öppnas samtidigt adderas deras storleksterm, $b \cdot h^{3/2}$, till nämnaren i beräkningen av geometrikonstant f i ovanstående ekvation.



Utvädringsdiagram för kyrka med geometrikonstanten $f = 200$.



Utvädringsdiagram för kyrka med geometrikonstanten $f = 500$.



Utvädringsdiagram för kyrka med geometrikonstanten $f = 1000$.