



CHALMERS



Experimentell verifiering av förenklade och självreglerande
golvvärmesystem för välisolerade bostäder

HENRIK KARLSSON, SP

CARL-ERIC HAGENTOFT, Chalmers

Experimentell verifiering av förenklade och självreglerande golvvärmesystem för välisolerade bostäder

Författare: Henrik Karlsson, Carl-Eric Hagentoft

© HENRIK KARLSSON, CARL-ERIC HAGENTOFT, 2015

Report 2015:10

ISSN 1652-9162

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Chalmers University of Technology

SE-412 96 Gothenburg

Sweden

Telephone + 46 (0)31-772 1000

Sammanfattning

Tidigare forskning vid Byggnadsfysik, Chalmers har teoretiskt visat på hur golvvärmesystem kan göras enklare, robustare och billigare. Ett självreglerande golvvärmesystem behöver färre komponenter än konventionella återkopplande system.

De simuleringar och analyser som denna experimentella studie baseras på visar på hur man kan dra nytta av internvärme som alstras i byggnader. Genom att endast styra framledningstemperaturen till det vattenburna golvvärmesystemet minskas automatiskt den avgivna effekten från golvet till rummet, vilket motverkar temperaturhöjningar. Denna självregleringseffekt har framgångsrikt verifierats experimentellt inom ramen för detta projekt.

Den experimentella verifieringen av har utförts i SPs laboratorium, Borås. Ett isolerat testrum med tillhörande vattenburet golvvärmesystem har byggts upp i anslutning till en sekundär klimatkammare där utomhusklimat kan simuleras. Testrummet utförs på ett sätt så att det motsvarar ett bostadsrum med en yttervägg och ett fönster som vetter mot utomhusklimatet i sekundärkammaren. Rummet ventileras med en realistisk luftväxling och en realistisk tilluftstemperatur med mekanisk till och frånluft med värmeåtervinning ($\approx 80\%$ temperaturverkningsgrad). Labbförsök har gjorts på både lätta och ingjuten golvvärmesystem, totalt tre olika golvvärmesystem med olika uppbyggnad.

Självregleringsprocessen har studerats under realistiska förutsättningar. Den s.k. utnyttjandegraden γ har analyserats experimentellt med tre olika typer av tester, både med stationära och dynamiska metoder (analys av steg- och pulssvar). Utnyttjandegraden ger ett mått på systemets energieffektivitet. Den anger hur stor del av en internt avgiven värme som återvinns genom att golvvärmesystemet spontant avger mindre värme då internlaster förekommer. För välisolerade hus kan i storleksordningen 80-90% av internvärmens återvinnas på detta sätt.

En enkel kostnadskalkyl för en enplansvilla med ingjutna golvslingor (cc300mm) har genomförts. Den visar att ett konventionellt golvvärmesystem med rumsreglering via trådbundna termostater och med utetemperaturkompenserad framledningstemperatur blir ca 30 % dyrare jämfört med ett förenklat självreglerande golvvärmesystem. Om trådlös kommunikation används (mellan rumsgivare och ställdon) blir det konventionella systemet ca 60-70% dyrare.

En viktig parameter i analysen av golvvärmesystem är den konvektiva värmeöverföringen vid golvytan. Denna har kvantifierats till att ligga mellan 2.3 till 2.5 W/(m²K) vid en realistisk driftssituation för golvvärme i lågenergibostäder och de tre studerade golvvärmesystemen. Noterbart är att jämfört med dimensioneringsförutsättningarna som anges i standard SS-EN 1264-2 är den uppmätta konvektiva överföringen på en betydligt lägre nivå. Standarden anger det konvektiva överföringstalet vid golvytan till ca 5.3 W/(m²K).

Innehållsförteckning

DEL I – Experimentell verifiering av självreglering i vattenburna golvvärmesystem

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Kort summering av tidigare analys	2
1.3	Syfte och mål med detta projekt	3
2	Beskrivning av experimentell verifiering av självreglering	4
2.1	Inledning	4
2.2	Övergripande beskrivning av försöket	4
2.3	Golvvärmefördelare och golvvärmekrets	5
2.4	Värmetillskott	5
2.5	Randvillkor	5
2.6	Testrummet	6
3	Resultat från experimentell verifiering	8
3.1	Beräknad självreglering utifrån system- och byggnadsegenskaper	8
3.2	Stegexcitering	10
3.3	Pulsexcitering	14
3.4	Analys kring den uppmätta utnyttjandegradens nivå	15
4	Kostnadsberäkning av golvvärmesystem	16
4.1	Bakgrund	16
4.2	Förutsättningar	16
4.3	Resultat	17
Del II – Konvektiv ytöverföring		
5	Redovisning av golvytans konvektiva ytöverföring	19
Referenser		27
Bilagor		
Bilaga 1	Beskrivning av testrum och golvvärmesystem	28
Bilaga 2	Mätosäkerhet	34
Bilaga 3	Experimentell bestämning av testrummets värmeförlusttal samt ytterväggen	
	Värmeförluster	36
Bilaga 4	Experimentell bestämning av isoleringsverkningsgrad	42

Förord

Den här rapporten har tagits fram för att verifiera att det går att skapa ett förenklat tekniskt robust vattenburet golvvärmsystem med ingjutna slingor utan rumsstyrning. Systemet baseras på en självreglerande effekt och ska ge tillfredsställande komfort och ge låga investeringskostnader i bostäder med låga värmebehov. Projektet har finansierats av SBUF och medverkande företag. FoU-Väst har deltagit som referensgrupp

Vi vill tacka för det ekonomiska stödet och för det engagemang och arbete som projektgruppen bidragit med under studiens gång. Projektgruppen har bestått av följande industrirepresentanter: Rolf Jonsson, Wästbygg, Martin Jansson, NCC, Anders Malm, LK-Systems, Erik Persson, Thermotech, Patrik Carlsson, Termeco och Anders Ahlquist, Bravida och Pär Åhman, BI. Från SP har Henrik Karlsson ingått och från Chalmers Carl-Eric Hagentoft.

Henrik Karlsson

Carl-Eric Hagentoft

DEL I – Experimentell verifiering av självreglering i vattenburna golvvärmesystem

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Detta projekt är ett uppföljningsprojekt av ett tidigare projekt (som finansierats av SBUF samt Energimyndigheten) vars syfte var studera byggnadsintegrerad uppvärmning. Genom projektet skapades en förståelse för hur dessa kan fungera. Både beräkningsverktyg och designriktlinjer togs fram. Resultaten från projektet finns att läsa i rapporten *Byggnadsintegrerad uppvärmning* av Karlsson och Hagentoft (2011).

Inom detta tidigare projekt utvecklades och validerades en avancerad simuleringsmodell. Med hjälp av modellen kan interaktionen mellan ingjutna rör och dess omgivning analyseras med god upplösning både i rum och tid. Vi bedömer att modellen är världsledande inom sitt område, inte minst avseende den inbyggda flexibiliteten för systemanalyser. Modellen ger förutom returtemperatur och total värmeavgivning t ex svar på i detalj för hur värme fördelas i rummet och vilken termisk komfort som uppnås. Värmelagring och därmed uppkommen tidsfördröjning i den termiska responsen beaktas i detalj med modellen.

Den utvecklade simuleringsmodellen har använts till att analysera värmesystemets självreglerande förmåga, dvs. hur mycket av en "störning" i form av extra internvärme utnyttjas och därigenom reducerar tillfört värme. I takt med att innetemperaturen i ett rum stiger, t.ex. vid extra mycket solinstrålning, sjunker på samma gång värmeavgivningen från värmeslingorna tack vare att temperaturdifferensen mellan det cirkulerande vattnet och innetemperaturen minskar. Med en minskad värmeflödes motverkas därmed den temperaturförändring som den termiska störningen i rummet redan orsakat. På motsvarande sätt ökar värmeflödet från slingorna när temperaturen i rummet sjunker i de fall då temperaturdifferensen mellan vatten och rum ökar (t.ex. efter fönstervädning). Det faktiska resultatet av självregleringen är en form av negativ feedback som alltid motverkar en oförutsedd termisk störning.

Genom att "aktivera" självregleringen (styra vattentemperaturen) säkerställs att värme inte kan tillföras samtidigt som övertemperatur råder i byggnaden. Således är starkt självreglerande system robusta även om de är enkelt uppbyggda med färre komponenter än konventionella återkopplande system.

Då golvvärme tillämpas i välisolerade bostäder blir rumstermostaterna mer eller mindre överflödiga. *Rumsregleringen, dvs. temperaturgivare, signalsystem, ställdon och ventiler, som styr av och påslag av vattenflödet i de ingjutna slingorna kan vid lämplig design rationaliseras bort.* Systemets rumskontroll säkerställs istället tack vare systemets inneboende självreglerande förmåga. En förenklad systemuppbyggnad med färre komponenter är därmed möjlig. Det förenklade systemet bör därför få en lägre investeringskostnad än det traditionella systemet med rumsreglering via termostater.

Sammanfattningsvis bedöms ett förenklat golvvärmesystem ha betydligt lägre investeringskostnad jämfört med konventionella system. Ett förenklat system bygger på:

- Enkel reglering utan rumstermostater
- Konstant vattenflöde
- Varierande eller konstant framledningstemperatur

och kan ge en enkel men *robust teknisk lösning* som:

- Säkerställer utnyttjande av internvärme
- Ger en stabil inomhustemperatur
- Möjliggör uppvärmning med extremt låga systemtemperaturer

1.2 Kort summering av tidigare analys

En enkel formel som anger hur mycket av störningen som tillvaratas ges av:

$$\gamma = -\frac{K_{up}}{\eta \cdot K_{up} + K_e}$$

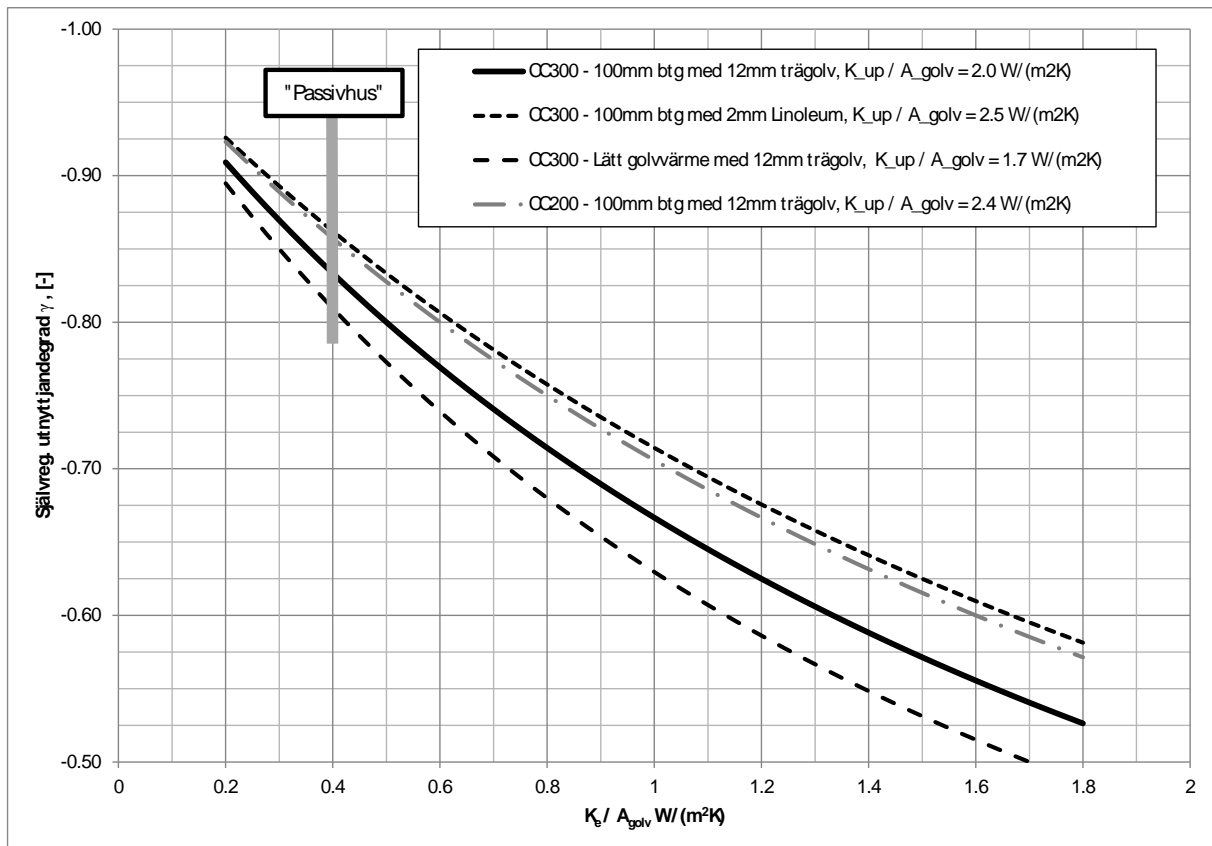
Är γ nära 0 tillvaratas nästan ingen värme ur den termiska störningen, är γ nära -1 tillvaratas nästan all värme genom självreglering. K_{up} (W/K) anger värmekonduktansen för värmeväxlingen i golvvärme-konstruktionen, från framledningstemperaturen längs hela slingan upp till innetemperaturen. Den innefattar: inverkan av att vattentemperaturen avtar längs slingan, värmeledning genom golvkonstruktionens material samt värmeöverföringen vid golvytan (konvektion och värmestrålning). Värdet på K_{up} beror dels på utformningen av golvvärmeslingan: t.ex. hur tätt golvvärmeröret ligger (cc-mått) och golvmaterialens värmemotstånd, och dels på hur stort vattenflödet genom slingan är. Härledning av γ beskrivs i detalj i avhandlingen av Karlsson (2010).

En grundläggande förutsättning för ett energieffektivt golvvärmesystem är att isoleringsverkningsgraden η är nära 1 (dvs. att nära 100 % av den tillförda värmen tillgodogörs byggnaden för uppvärmning). Endast några få procent av den tillförda värmen förloras som en extra värmeförlust på grund av att golvvärmeslingorna är inbyggda i golvplattan.

Ekvationen anger hur byggnaden och golvvärmesystemet skall designas för att den inneboende självregleringsförmågan skall bli kraftfull. Ju lägre värmeförlusterna från byggnaden är, lågt K_e , och ju kraftigare värmeväxlingen är, högt K_{up} , desto mer betydande blir utnyttjandegraden för självregleringen γ . *I praktiken innebär detta att energieffektiva bostäder med små värmeförluster har de förutsättningar som krävs för att uppnå en betydande självreglerande effekt.* I en byggnad med stora värmeförluster kommer en större andel av energiinnehållet i en termisk störning att förloras genom ledningsförluster genom klimatskärmen samt via ventilation och luftläckage. Skulle t.ex. golvbeläggningen ha ett högt värmemotstånd kommer den termiska störningen att ha svårt att påverka värmeväxlingen längs slinga – värmen når helt enkelt inte ner till golvvärmerörens vattenflöde vilket ger en försämrade effekt av självregleringen.

Ett högre värmemotstånd för golvbeläggningen i kombination med en tunnare markisolering ger dessutom en försämrade isoleringsverkningsgrad η för golvvärmesystemet – detta försämrar både självregleringsförmågan γ och golvvärmesystemets energieffektivitet då de extra värmeförlusterna från golvvärmesystemet till marken ökar. Figur 1 visar utnyttjandegraden γ för fyra exempel med varierande

uppbyggnad av golvvärmen/golvet. För bostäder med de lägsta nivåerna av värmeförluster är γ i storleksordningen -0.85, se indikation för "passivhus" i Figur 1.



Figur 1 Exempel för utnyttjandegrad γ för varierande grad av värmeförluster. Beräknad värmeavgivning K_{up} med betongens värmeledningsförmåga ($\lambda=1.2 \text{ W/(mK)}$) och ytöverföringen ($\alpha_c + \alpha_r = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) i samtliga fall. Nivån för "passivhus" skall mer ses som en indikation än ett definitivt värde.

1.3 Syfte och mål med detta projekt

Syftet med projektet är att:

- Testa det föreslagna förenklade golvvärmesystemet med experimentella metoder.
- Göra en kostnadsanalys

Målet med experimentet är att *verifiera*:

- Självregleringens utnyttjandegrad γ
- Skillnaden mellan lätta och tunga golvvärmesystem
- Värmeöverföringen vid golvytan vid låga yttemperaturer och värmebehov

2 Beskrivning av experimentell verifiering av självreglering

2.1 Inledning

Försöken syftar till att mäta förändringen i värmeförsel från golvvärmesystemet när systemet exciteras genom ett kontrollerat värmeförsel i testrummet. Värmeförseln och den efterföljande responsen i värmeförseln är de två nyckelparameterna som kan kvantifiera självregleringen genom utnyttjandegraden γ .

Utnyttjandegraden γ har i denna studie bestämts med 3 olika typer av tester.

1. System- och byggnadsegenskaper

genom att bestämma testrummets och golvvärmesystemets termiska egenskaper i enskilda mätningar kan utnyttjandegraden γ beräknas enligt tidigare känt samband.

2. Stegexcitering

genom att mäta den stationära förändringen i värmeförsel och relatera till den stationära värmestörningen. Den normaliserade förändringen i tillförd värmeeffekt är en direkt mätning av γ .

3. Pulsexcitering

genom att mäta energiinnehållet i pulsstörningen och relatera till mätningen av responsens energiinnehåll. Det normaliserade energiinnehållet i responsen är en direkt mätning av γ .

Målet är att särskilja självregleringens enskilda termiska respons. Detta kräver att övriga randvillkor till systemet är tillräckligt konstanta under mätperioden. Alla förändringar i randvillkor som påverkar testrummets värmebalans kommer att störa extraheringen av självregleringsresponsen. Framförallt förändringar i: framledningstemperatur, omgivande labbhallstemperatur och lufttemperaturen i sekundärkammaren skall därför undvikas. Dessa randvillkor har därför följts upp noga under försöken för att säkerställa tillfredsställande oförändrade nivåer.

2.2 Övergripande beskrivning av försöket

Den experimentella verifieringen av självregleringseffekten har utförts i SPs laboratorium, Borås. Ett isolerat testrum med tillhörande vattenburet golvvärmesystem har byggts upp i anslutning till en sekundär klimatkammare där utomhusklimat kan simuleras. Testrummet utförs på ett sätt så att det motsvarar ett bostadsrum med en yttervägg och ett fönster som vetter mot utomhusklimatet i sekundärkammaren. Rummet ventileras med en realistisk luftväxling och en realistisk tilluftstemperatur med mekanisk till och frånluft med värmeåtervinning ($\approx 80\%$ temperaturverkningsgrad). Värmeåtervinningen sker genom att återföra en anpassad mängd av testrummets frånluft i form av återluft. Effektbehovet vid dimensionerande vinterutomhustemperatur (DVUT) har vid försöken varit omkring 12-13 W/m².

Uteklimatet som råder vid testet kan varieras i den sekundära klimatkammaren som ansluter mot testrummets yttervägg med ett fönster. Tester utförs vid stationär utetemperaturer som skall motsvara DVUT, vilket i detta fall valts till -12.5°C .

Hela testrummet står uppställt i en stor labbhall ($>100\text{m}^2$). Temperaturen i labbhallen regleras med ett luftvärmsystem mot ett konstant börvärde. Temperaturen i labbhallen har varit kring $+20^{\circ}\text{C}$. Det innebär att de sidor av testrummet som vetter mot labbhallen kan betraktas som "inre ytor" med

ringa ledningsförluster då temperaturskillnaden är obefintlig/liten mellan labbhall och testrum. Detta är orsaken till det låga effektbehovet för testrummet.

I testrummet har försök på tre olika golvvärmesystem genomförts – ett lätt system med värmefördelade aluminiumplåtar samt två olika ingjuta system. Uppbyggnaden av dessa tre värmesystem beskrivs mer i detalj i de följande avsnitten. Samtliga golvvärmesystem värmer upp testrummet till temperaturer som är nära den omgivande labbhallen.

Testrummet och de olika golvvärmesystemen beskrivs i Bilaga 1 i detalj.

2.3 Golvvärmefördelare och golvvärmekrets

Utanför testrummet kopplas golvvärmeslingan in i en golvvärmefördelare. I golvvärmekretsen finns en elektrisk värmare med tillhörande reglering som tillför rätt mängd värme till vattenkretsen. En PI-regulator konstanthåller en inställd framledningstemperatur. I golvvärmefördelaren finns även en cirkulationspump och mätutrustning för noggrann mätning av vattenflödet i slingorna. Mätningarna visar att regulatorn och elvärmaren klarar hålla framledningstemperaturen på en mycket jämn nivå, se t.ex. Figur 6. I direkt anslutning till rör genomföringen igenom testrummets vägg har termometrar (av typ PT100) placerats i vattenströmmen för mätning av retur- och framledningstemperaturen. Mätpunkterna har värmeisolerats noga.

Vattenflödet mäts kontinuerligt med en flödesmätare. Mätningarna visar att vattenflödet kan fluktuera några %-enheter under försöken. Detta ger en mindre växling i det uppmätta värmeflödet från golvvärmeslingan. I medel är dock vattenflödet på en jämn nivå under tidsförloppet för ett delförsök. Kontinuerlig mätning av temperaturfallet över vattenslingan samt vattenflödet ger en noggrann mätning av den värme som avges från golvvärmeslingans vatten till golvet i testrummet.

Den "självreglering" som uppstår vid en excitering av en värmekälla i testrummet är inget annat än förändringarna i golvvärmeslingans värmeeffekt när framledningstemperaturen är konstant (eller bestämd av värmekurva). Denna värmeeffekt mäts med liten mätosäkerhet.

2.4 Värmetillskott

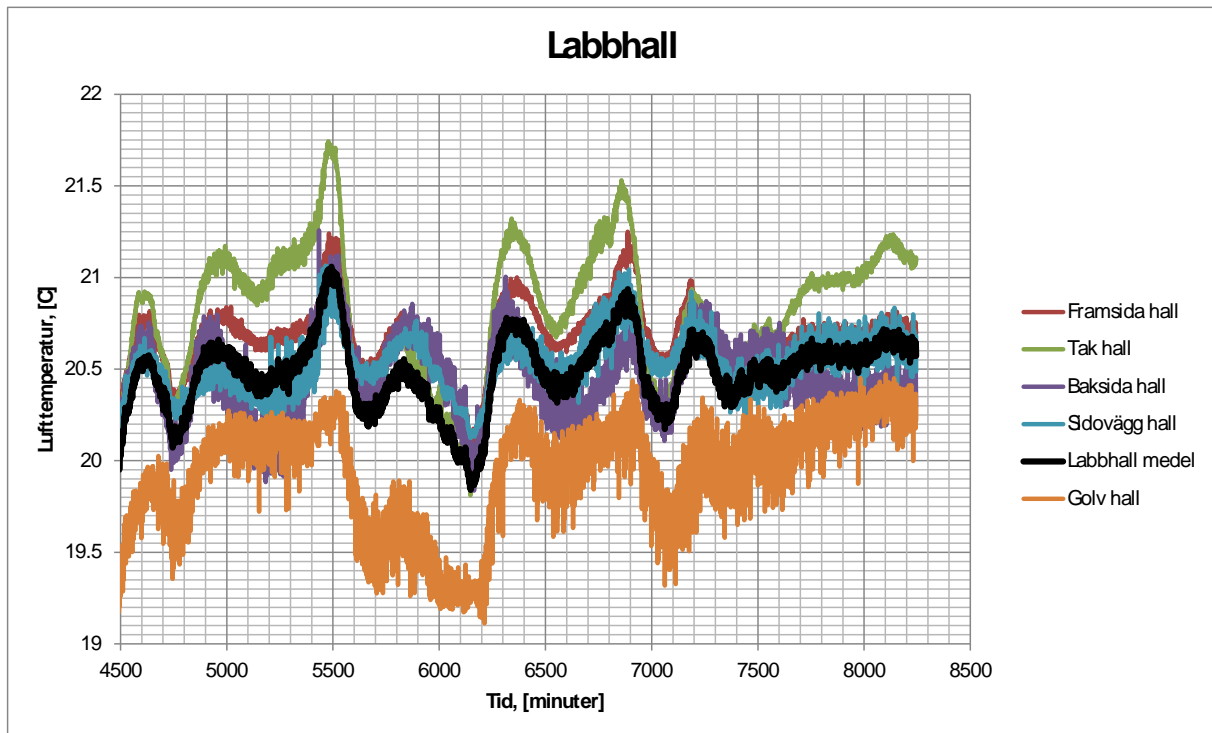
I testrummet har 4st resistansstrådar (varmtrådar) monterats. Tråden har spänts upp tvärs över rummet från vägg till vägg cirka 0.25m till 0.75m höjd från golvet. Ändarna på varmtråden har kopplats ihop med isolerad kopparledning (kalltråd). Tillsammans bildas en seriekopplad slinga som är ansluten till en reglerbar spänningskälla (placerad utanför testrummet). Med påslagen spänningskälla avges värme endast från varmtråden inuti testrummet. Värmen avges jämnt fördelat i testrummet. Mätningen av strömstyrka görs med hög precision med en fast monterad strömshunt i kretsen. Även mätning av spänning över kretsen sker med en i sammanhanget låg mätosäkerhet.

Värmen som avges i testrummet från varmtråden utgör en termisk störning av golvvärmesystemet. Det är denna störning som exciterar självregleringsresponsen. Eleffekten till varmtråden mäts med en liten mätosäkerhet.

2.5 Randvillkor

Som nämnt i detta avsnitts inledning är det nödvändigt att randvillkoren kring testrummet är tillräckligt konstanta under mätförloppet. I labbhallen har lufttemperaturen på samtliga sidor om testrummet loggats under testerna. Temperaturen kan skilja sig mellan olika sidor om testrummet.

När värmesystemet i labbhallen tillför värme syns en periodiskt växlande lufttemperatur i labbhallen. Bedömningen är att så länge medeltemperaturen i omgivningen inte har en nedåt- eller uppåtgående trend under ett test så kan man acceptera viss fluktuation i labbhallens temperatur. Figur 2 visar ett exempel på hur omgivningen i labbhallen varierar under ett pågående test (stegsvar för lätt golvvärme).



Figur 2 Loggning av omgivningens temperatur i labbhallen under stegexcitering av det lätta golvvärmesystemet.

Lufttemperaturen i sekundärkammaren är dokumenterat mycket jämn. Fluktuationer på någon tiondels grad sker kontinuerligt. Det finns ingen uppåt- eller nedåtgående trend då sekundärkammarens kyl- och värmekonvektor reglerar temperaturen.

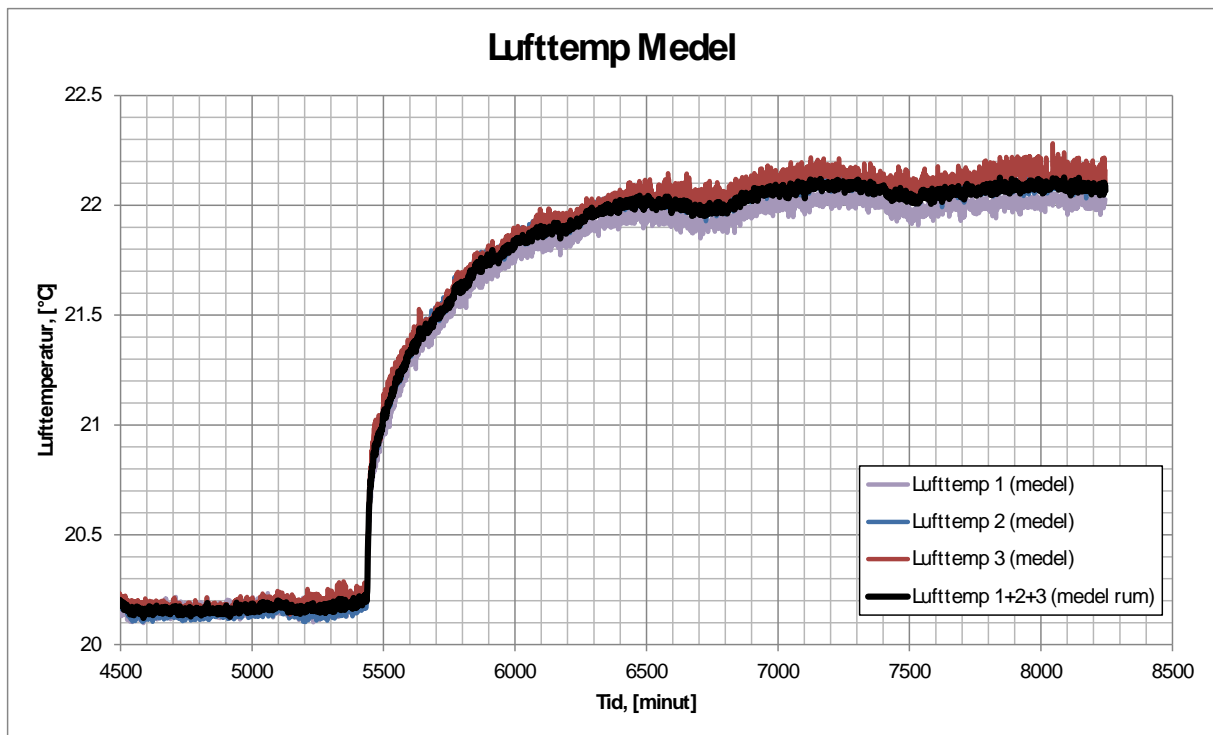
2.6 Testrummet

I testrummet har ett flertal temperaturer uppmätts under försöken.

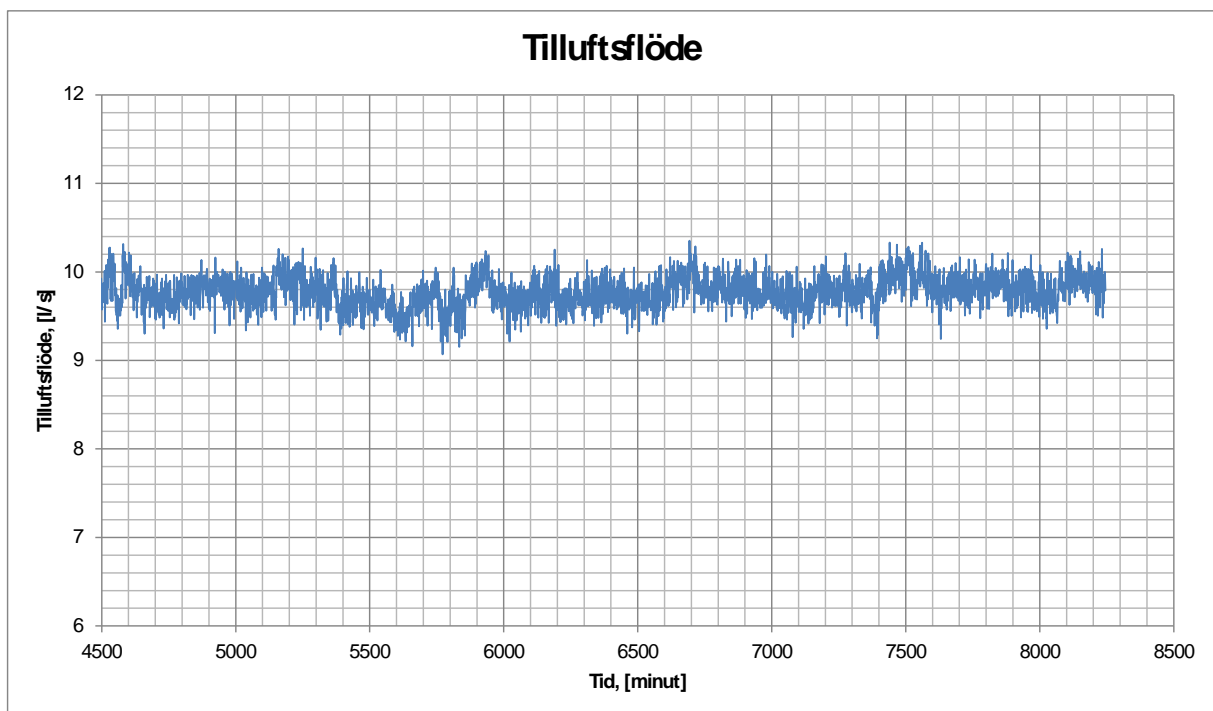
Golvarean har delats upp i 9st lika delar (rektanglar). I varje del har lufttemperaturen uppmätts på 3 höjder – 0.3, 1.2 och 2.0 meter över golvet. Totalt har lufttemperaturen uppmätts i 27st mätpunkter som är jämnt fördelade i testrummets luftvolym. Mätningarna har visat att lufttemperaturen i testrummet är mycket homogen. Som Figur 3 visar är skillnaderna mellan de tre olika mät höjderna mycket små. Även de termoelementen som är placerade nära tilluftsdonet i taket uppvisar samma homogena lufttemperatur.

Vidare har golvtemperaturen uppmätts i varje delarea (9st) samt på väggar, tak och fönsterytor.

Avslutningsvis mäts tilluftflödet till testrummet. Figur 4 visar återigen mätningen av det lätta golvvärmesystemet. Mätningen har gjorts kontinuerligt med ett fast monterat Prantel-rör i tilluftskanelen.



Figur 3 Uppmätt lufttemperatur i testrummet under en stegexcitering av det lätta golvvärmesystemet. Stegexciteringen inleds vid tidpunkt $t = 4437$ min.



Figur 4 Mätning av tilluftsflödet under stegexcitering av det lätta golvvärmesystemet. Stegexciteringen inleds vid tidpunkt $t = 4437$ min.

3 Resultat från experimentell verifiering

3.1 Beräknad självreglering utifrån system- och byggnadsegenskaper

Självregleringens utnyttjandegrad γ kan beräknas utifrån kända termiska egenskaper för testrummet och värmesystemet enligt:

$$\gamma = -\frac{K_{up}}{\eta \cdot K_{up} + K_e} [-] \quad \text{Ekvation 1}$$

Utifrån de tester som genomförts kan γ beräknas för de tre olika golvvärmesystemen. Samtliga system har testats i ett likvärdigt testrum som ventilerats på likvärdigt sätt. Värmeförlusttalet K_e för testrummet är därför det samma för alla tre systemen. De skillnader i självregleringen som påvisas beror helt på skillnaderna i golvvärmesystemens egenskaper, det vill säga i parametrarna: K_{up} och η .

Testrummets transmissionsförluster har uppmätts i en separat stationär mätning, denna mätning redovisas i Bilaga 1. Ledningsförlusterna avser dels förluster till det kalla utrymmet, genom yttervägg och fönster, samt förluster genom övriga ytor som vetter mot den omgivande labbhallen. Ventilationsförlusten bestäms via mätning av tilluftsflödet, tilluftstemperatur (efter inblandning av återluft) samt frånluftstemperaturen. Transmissionsförlusterna (genom samtliga ytor) tillsammans med testrummets ventilationsförluster ger rummets totala värmeförlusttal K_e . I det aktuella testrummet är det ledningsförlusterna som dominerar då värmeåtervinningen (återluft) i testrummet ger relativt låga ventilationsförluster, se Tabell 1. Ledningsförlusten har antagits vara konstant för samtliga tre tester av golvvärmesystemen. Ventilationsförlusten har uppmätts kontinuerligt under försöken, variationen är liten från test till test då inga förändringar i ventilationssystemets inställningar gjorts.

Isoleringsverkningsgraden η anger hur stor del av den till golvvärmeslingan tillförda värmen som avges till rummet – andelen av värmeffluet i golvvärmesystemet som leds uppåt och når golvytan. I Bilaga 4 redovisas mätningar där η bestäms i fallet med det lätta golvvärmesystemet. Mätningarna visar att 89 % av tillförd värme kommer testrummet tillgodo, 11 % är en extra värmeförlust/systemförlust nedåt genom golvkonstruktionen. För de båda ingjutna golvvärmesystemen har inte isoleringsverkningsgraden fastställts. I samtliga fall är tjockleken av underliggande isolering identisk. Vidare appliceras samma stegljudsmatta och trägolv överst i golvkonstruktionen. Isoleringsverkningsgraden för betongplattan med högt placerade golvvärmerör (CC200) bedöms därför vara obetydligt förändrad jämfört med det lätta golvvärmesystemet. När golvvärmeslingan i botten av betongplattan (CC300) utgör den ovanliggande betongplattan en mindre ökning av värmemotståndet ovanför golvvärmeslingan. η har antagits sjunka med 3 procentenheter för denna golvkonstruktion jämfört med den uppmätta nivån för det lätta systemet utan värmemotståndet från betongplattan, se Tabell 1.

I vart och ett av delförsöken har golvvärmesystemets värmeöverföringstal uppmätts, K_{up} [W/K] - som är värmekonduktansen mellan framledningstemperaturen T_{fram} i golvvärmeslingan och testrummets medellufttemperatur \bar{T}_{luft} som beräknas som medelvärdet av de 27 jämnt fördelade termoelementen. Q_{gv} är värmeeffekten som vattnet för in i golvvärmeslingan, se Ekvation 3. K_{up} beräknas enligt Ekvation 2.

$$K_{up} = \frac{\eta Q_{gv}}{T_{fram} - \bar{T}_{luft}} \text{ [W/K]} \quad \text{Ekvation 2}$$

$$Q_{gv} = V_f \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{fram} - T_{retur}) \text{ [W]} \quad \text{Ekvation 3}$$

Isoleringsverkningsgraden η antas i dessa beräkningar vara en konstant systemegenskap, övriga storheter bestäms utifrån en stationär mätning där golvvärmen är i drift. Produkten ηQ_{gv} uttrycker det uppåtriktade värmeflödet från golvvärmslingan som når testrummets golvyta. Detta värmeflöde ställs i relation till temperaturskillanden mellan vattenslingan framledningstemperatur och testrummets medellufttemperatur.

Utan någon värmekälla (ej spänningssatt varmråd) i testrummet är den uppmätta K_{up} 19.2 W/K i fallet med lätt golvvärme. K_{up} är ett prestandatal för golvvärmen som anger hur bra systemet är på att avge värme med temperaturpotential från framledningstemperatur till lufttemperatur. Denna parameter är t.ex. nödvändig för dimensionering av framledningstemperaturen i ett golvvärmsystem. K_{up} / A_{golv} blir i fallet med lätt golvvärme 1.73 W/(m²K). Golvaren A_{golv} är 11.13m².

I avsnitt 5 analyseras skillnaden mellan lufttemperatur (\bar{T}_{luft}) och motstrålande yttemperatur (\bar{T}_r). Vid normal drift av golvvärmen (utan värmestörning) är det en mycket liten skillnad mellan dessa båda temperaturer, se Figur 14. Därför kan man approximativt säga att K_{up} även gäller för temperaturlpotentialen mellan T_{fram} och \bar{T}_r eller mellan potentialen T_{fram} och den ekvivalenta temperaturen (sammanvägning av \bar{T}_r och \bar{T}_{luft}).

I Tabell 1 redovisas beräknade γ -värden för de tre olika golvvärmsystemen. Skillnaden mellan det lätta systemet och det ingjutna CC300 är liten. Bägge systemen har likvärdig värmeavgivningsförmåga K_{up} och därmed även likvärdig självreglering. Det ingjutna CC300 uppvisar är något kraftigare självreglering. Ett sätt att öka värmeavgivningsförmågan K_{up} , är att öka vattenflödet (K_{up} närmar sig asymptotiskt en teoretisk maximal nivå när temperaturfallet över vattenslingan är mycket litet med ett ökat vattenflöde). Dock är vattenflödet i respektive golvvärmslinga likvärdiga för det lätta systemet och det ingjutna CC300 systemet. Flödet är kring 90l/h i bägge fall, se Tabell 1. Dessa förläggningssätt kan därmed sägas ha liknande förmåga att avge värme från det cirkulerande vattnet till testrummet.

Tack vare att PEX-röret i det ingjutna CC200 systemet ligger tätare har detta system en större förmåga att avge värme från rörpositionen till golvytan. Detta avspeglas i värdet på K_{up} . I detta testfall förstärktes även vattenflödet V_f upp till 156 l/h för att ytterligare förstärka värmeavgivningsförmågan. Vi ser att slutresultatet, självregleringens utnyttjandegrad γ , är avsevärt kraftigare för detta system jämfört med de övriga två testade systemen.

Tabell 1 Redovisning av ingångsdata och beräknade γ (enligt Ekvation 1) för de olika delförsöken.

	Lätt system CC300	Ingjutet lågt CC300	Ingjutet högt CC200
η Isoleringsverkningsgrad [-]	0.89	0.85 ¹	0.89 ¹
Transmissionsförlust [W/K]	16.2	16.2	16.2
Ventilationsförlust [W/K]	2.5	2.5	2.6
K_e Värmeförlusttal [W/K]	18.7	18.7	18.8
K_e / A_{golv} [W/(m ² K)]	1.68	1.68	1.69

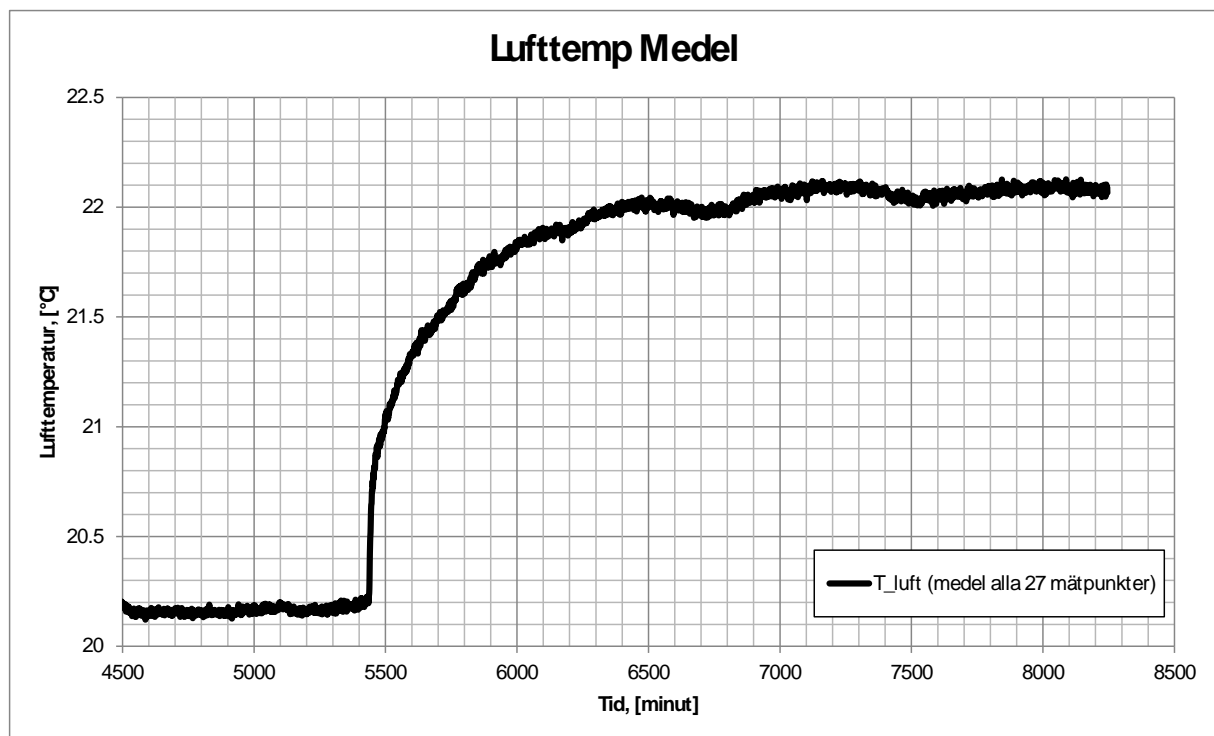
K_{up} Värmeavgivning [W/K]	19.2	19.6	27.9
K_{up} / A_{golv} [W/(m ² K)]	1.73	1.76	2.51
V_f Vattenflöde [l/h]	89.9	92.4	155.9
γ enligt Ekvation 1 [-]	-0.54	-0.55	-0.64

1, antaget värde baserat på uppmätt värde för den lätta golvvärme konstruktionen.

3.2 Stegexcitering

Samtliga tre golvvärmesystem har genomgått detta test där självregleringen exciteras genom införandet av en termisk störning (stegförändring). Syftet är att genomföra en direkt mätning av systemets självreglerande förmåga (γ) samt att visa på dynamiska skillnader i systemens respons. Den direkta mätningen av självregleringen kan sedan jämföras med de beräknade utnyttjandegraderna från föregående avsnitt.

Inledningsvis var golvvärmen påslagen en lång tidsperiod så att ett stationärt jämviktsläge där lufttemperaturer, yttemperaturer och vattentemperaturer inte förändras med tiden. (Det under denna inledande period parametern K_{up} bestämdes i föregående avsnitt). Den plana nivån till vänster i Figur 5 illustrerar jämviktsläget i lufttemperaturen som råder innan stegexciteringen.

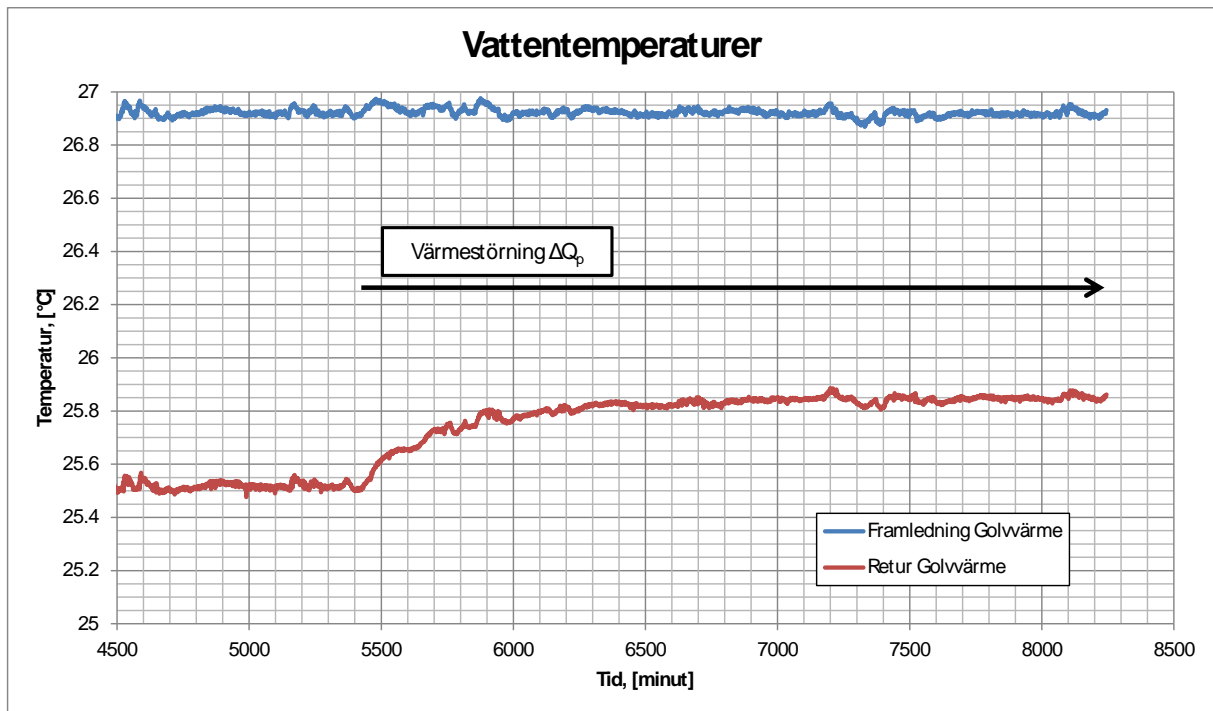


Figur 5 Förändring av luftens medeltemperatur under stegexcitering (Lätt System).

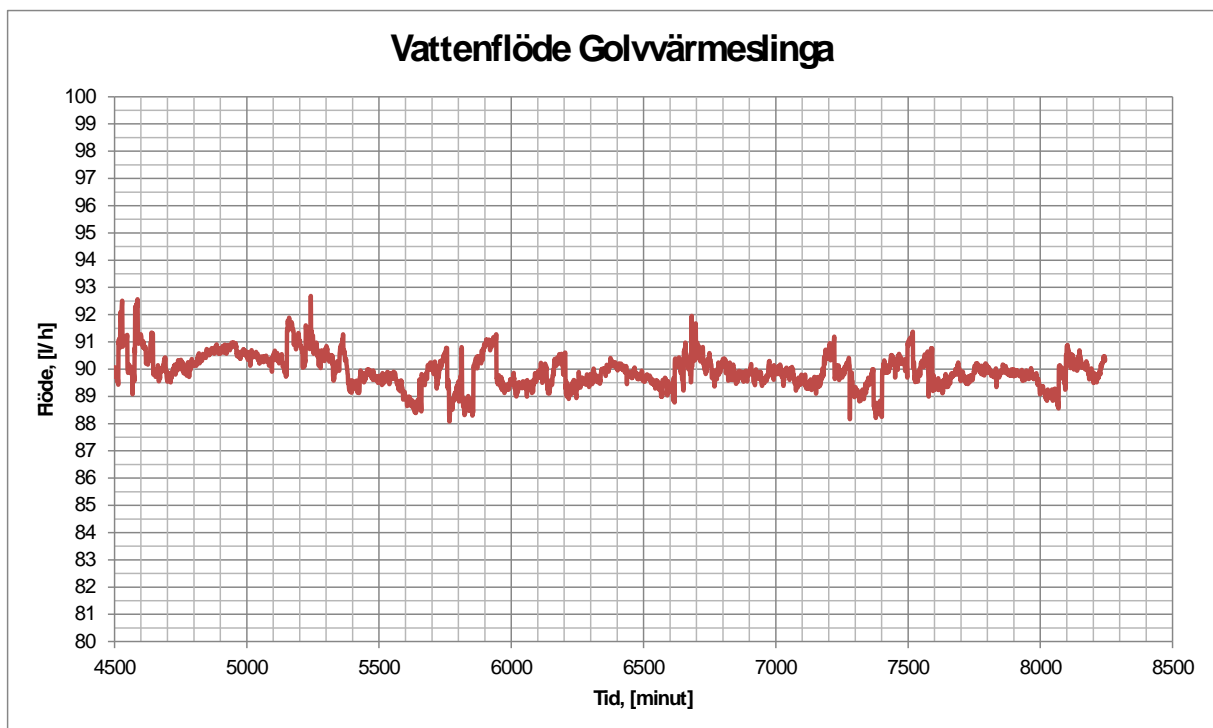
Framledningstemperaturen regleras till en konstant nivå under hela delförsöket. Denna nivå beror på effektbehov och värmeavgivningsförmågan för respektive golvvärmesystem. Det lätta systemet och det ingjutna CC300 har vi tidigare visat har liknande värmeavgivningsförmåga.

Framledningstemperaturen för dessa system bägge system är i medel 26.92°C respektive 27.17°C över hela mätperioden, se Tabell 2. Figur 6 visar vattentemperaturerna för det lätta golvvärmesystemet över hela mätperioden. Framledningstemperaturen är mycket jämn, de variationer som sker beror till största del av en viss fluktuation i vattenflödet som sker under mätserien. Fluktuationerna i vattenflödet V_f syns i Figur 7. För det ingjutna systemet med CC200 är, enligt tidigare redovisning,

värmeavgivningsförmågan K_{up} kraftigare än för de övriga två systemen. Därför är den konstanta framledningstemperaturen i detta fall reducerad till 25.26°C.

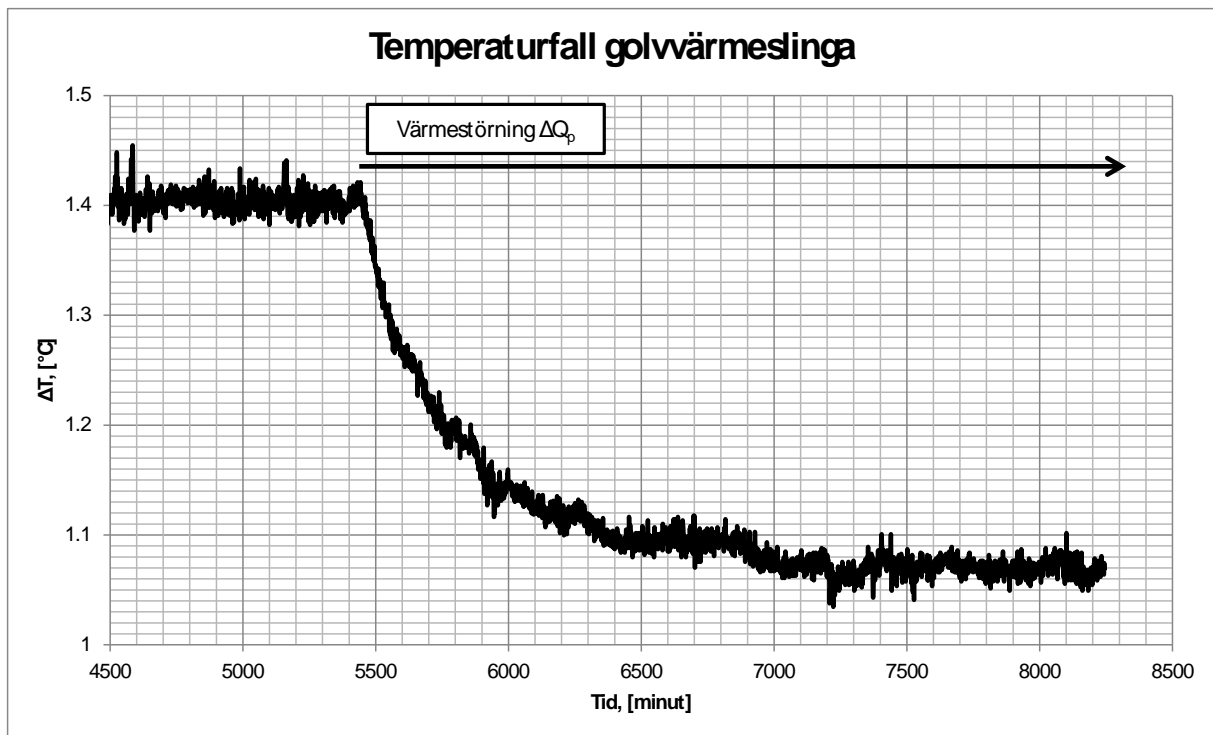


Figur 6 Framledning- och returtemperatur under stegexciteringen (Lätt System).

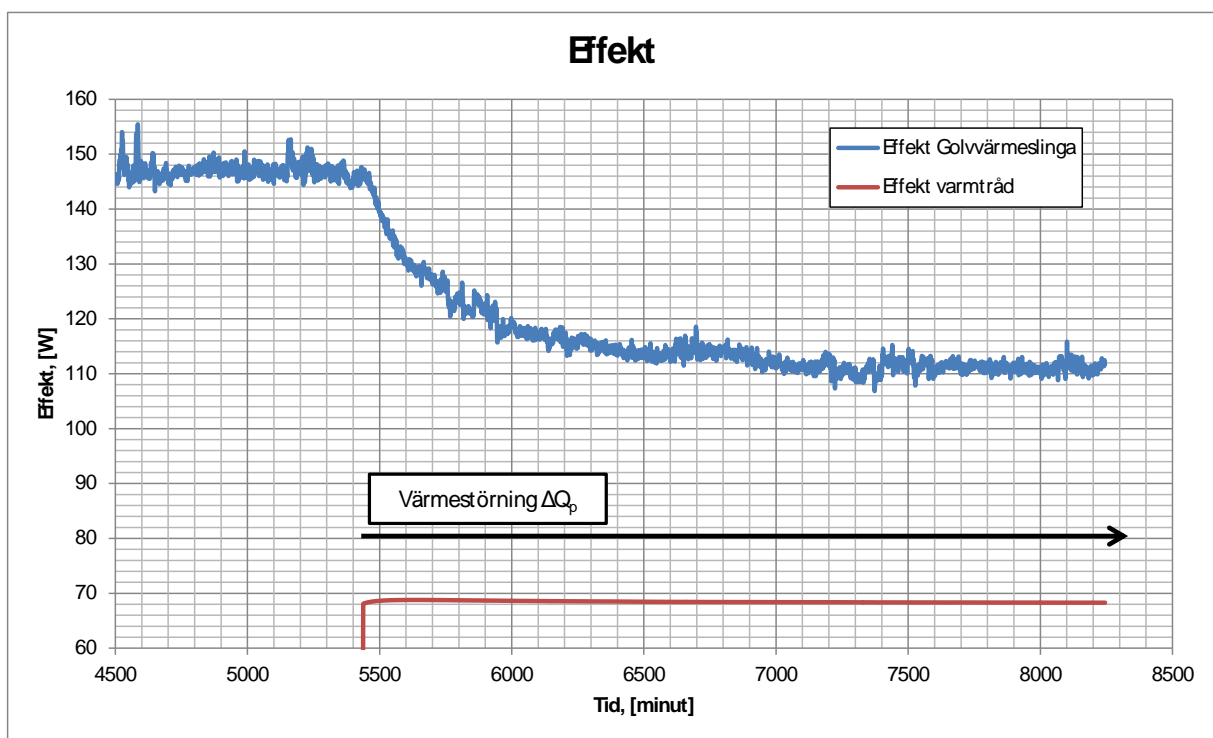


Figur 7 Vattenflöde i golvärmeslingan under delförsöket (Lätt System)..

Returtemperaturen T_{retur} från golvärmeslingan är i ostört läge 25.52°C, detta ger ett temperaturfall ΔT på 1.40°C över golvärmeslingan för den lätta golvärmekonstruktionen, se Figur 8. Sammantaget ger detta en ostörd stationär effekttillförsel via golvärmens Q_{gv} på 147.1W, se Figur 9. Motsvarande värden för de bägge ingjutna systemen återfinns i Tabell 2.



Figur 8 Förändring av golvvärmslingans temperaturfall under stegexciteringen (Lätt System).



Figur 9 Förändring av värmeeffekten tillförd golvvärmslingan samt stegexciteringen från varmtråden (Lätt System).

Försöken är utförda på helt skilda delar av året. Därför är den omgivande temperaturen i labbhallen, där testrummet är placerat, inte exakt på samma nivå för de olika testerna. Att de stationära nivåerna för den tillförda värmen via golvvärmslingan Q_{gv} skiljer sig åt beror främst på att framledningstemperaturerna inte är helt anpassade till olika effektbehov orsakade av små skillnader i omgivningstemperaturen. Skulle omgivningstemperaturen stiga under ett försök innebär det att

effekten till golvvärmen Q_{gv} sjunker, och tvärt om. Så länge den omgivande temperaturen i labbhallen är oförändrad under försöket så kan den kontinuerliga effektavgivningen via golvvärmen relateras till de stationära nivåerna som uppmäts i inledningsfasen av varje test (det vill säga: 147.1 – 156.7 – 163.4 W för de tre olika fallen).

Vi inför nu en störning till testrummet genom att slå på spänningen till varmtråden som löper fram och tillbaka jämnt fördelat i rummet. Effekten ΔQ_p går direkt upp till en nivå strax under 70W, se Figur 9 och Tabell 2. Störningen utgör alltså 41 till 45 % av testrummets rådande stationära värmebehov som tillfullo tillgodoses av golvvärmen då störningen inleds. Systemen "störs" alltså med en nästan perfekt stegexcitering. Under hela tidsförloppet som nu sker fortsätter mätningen av samtliga parametrar. Vi är särskilt intresserade av värmeförseln via golvvärmeslingan Q_{gv} och hur dess stegsvar ser ut, se Figur 9.

I exemplet med det lätta golvvärmesystemet börjar returtemperaturen, med en mycket kort tidsfördröjning, att stiga i golvvärmeslingan vilket ger en succesiv reduktion av effekten till golvvärmeslingan Q_{gv} , se Figur 6, Figur 8 och Figur 9. Cirka 2000 minuter efter stegexciteringens inledning har ett nytt jämviktläge inträtt där temperaturer och värmeflöden åter är konstanta. Skillnaden i värmeeffekt till golvvärmeslingan mellan dessa stationära jämviktslägen betecknas ΔQ_{gv} . Ser vi till det lätta golvvärmesystemet så "självreglerar systemet" med ΔQ_{gv} som uppmäts till -35.9W. Mätningen ΔQ_{gv} motsvarar den direkta mätningen av självregleringseffekten. Relativt stegexciteringens amplitud ($\Delta Q_p=68.5W$) motsvarar ΔQ_{gv} en sänkning av den via golvvärmen tillförda värmeeffekten med 52%. Det betyder att utnyttjandegrad för självregleringens utnyttjandegrad γ är -0.52. Återigen är det lätta systemet och det ingjutna CC300 systemet jämbördiga, se Tabell 2. Den direkta mätningen visar det ytligt förlagda CC200 systemet är avsevärt bättre på att självreglera.

Tabell 2 Resultat från direkt mätning av systemets stegsvar.

		Lätt system CC300	Ingjutet lågt CC300	Ingjutet högt CC200
Ostörd värmeargivning	T_{fram} Framledningstemperatur [°C]	26.92	27.17	25.26
	T_{retur} Returtemperatur [°C]	25.52	25.70	24.34
	ΔT Temperaturfall [°C]	1.40	1.46	0.92
	V_f Vattenflöde [l/h]	89.9	92.4	155.9
	Q_{gv} Effekt golvvärme [W]	147.1	156.7	163.4
Värmeargivning med störning	T_{fram} Framledningstemperatur [°C]	26.92	27.17	25.26
	T_{retur} Returtemperatur [°C]	25.85	26.01	24.62
	ΔT Temperaturfall [°C]	1.08	1.16	0.64
	V_f Vattenflöde [l/h]	89.9	92.4	155.9
	Q_{gv} Effekt golvvärme [W]	111.2	123.3	115.5
	ΔQ_p Eleffekt störning [W]	+68.5	+68.3	+68.6
ΔQ_{gv} Förändring effekt golvvärme [W]		-35.9	-33.3	-47.9
γ Självreglering [-]		-0.52	-0.49	-0.70

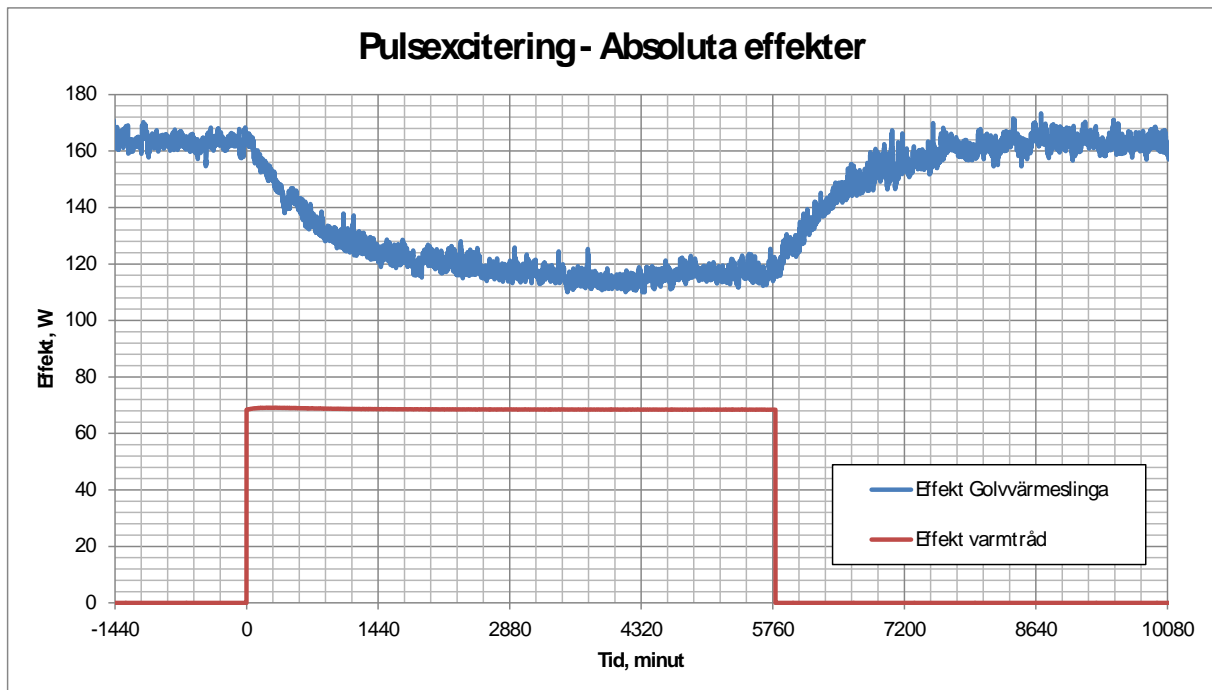
3.3 Pulsexcitering

Golvvärmesystemet med ytligt förlagda ingjutna rör (CC200) exciterades med en värmepuls. En puls kan beskrivas som två efter varandra följande stegexciteringar. Ett steg uppåt då värme börjar avges från varmtråden; en plattå då störningseffekten är konstant; och ett avslutande steg tillbaka till nollnivån då varmtråden stängs av. Det unika med pulsstudien är att pulsen har ett begränsat värmeinnehåll i jämförelse med excitering med steg. Värmemängden i både pulsstörning och pulssvaret från golvvärmesystemet uppmäts i det studerade golvvärmesystemet. Utnyttjandegraden för självregleringen γ är det samma som relationen mellan dessa båda värmemängder enligt följande samband:

$$\Delta E_{gv} = \gamma \cdot \Delta E_p \quad (\text{Ekvation 4})$$

Där ΔE_{gv} är den totala förändringen av tillförd värme till golvvärmeslingan, med andra ord hur mycket värme ur störningspulsen som utnyttjas genom att nedjustera den tillförda värmen över tid. ΔE_p är värmeinnehållet i störningspulsen.

I det aktuella testet är systemet helt i jämvikt innan pulsstörningen introduceras, se inledande sekvens i Figur 10 (då $t < 0$). Vid tidpunkt $t=0$ slås spänningen i varmtråden på och 68.6W värme avges till testrummet. Värmen är påslagen under cirka 4 dygn, innan pulsstörning avslutas. Totalt avges 6.62kWh som pulsstörning från varmtråden (ΔE_p).



Figur 10 Pulsexcitering av det ingjutna golvvärmesystemet med ytliga värmeslingor CC200mm.

Vi ser i Figur 10 att golvvärmeslingans värmeeffekt $Q_{gv}(t)$ påverkas under mer än ett dygn efter det att pulsstörningen försvunnit ($t > 5760$). Det totala värmeinnehållet i självregleringsresponsen är -4.53kWh (ΔE_{gv}). Denna värmemängd beräknas utifrån en ostörd $Q_{gv}(t)$ på 163.4W som gäller före pulsexciteringen och en viss tid efter att värmestörningen stängts av, se Figur 10. Den beräknade utnyttjandegraden för självregleringen γ blir -0.68 enligt de uppmätta värmemängderna och Ekvation

4. Vi har därmed demonstrerat att beräknad γ enligt Ekvation 1 stämmer väl med den experimentellt framtagna γ med hjälp av pulsexcitering.

I de tidigare teoretiska studierna (Karlsson, 2010) beskrivit hur en valfri värmestörning kan beskrivas som en kontinuerlig följd av pulser med olika amplitud och längd. För varje individuell puls gäller det samband som vi här demonstrerat. Oavsett om pulsen är 5min lång eller om den är 4 dygn lång som i vårt experiment.

En lång puls påverkar system på det sätt som vi ser i Figur 10. En kort puls, låt oss anta att amplituden är den samma som i vårt experiment, skulle resultera i en mycket liten förändring i $\Delta Q_{gv}(t)$ som pågår i cirka 2 dygn – d.v.s. lika lång tid som ”svansen” vid $t > 5760$ i experimentet, se Figur 10. Förändringen $\Delta Q_{gv}(t)$, och därmed värmeinnehållet ΔE_{gv} i en kort puls skulle alltså vara mycket svår att mäta med relevant osäkerhet. Men enligt teorin så är värmeinnehållet ΔE_{gv} i självregleringsresponsen fortfarande proportionellt mot γ . Oavsett längd eller form på värmestörningen så kommer alltid 68% av värmeinnehållet att utnyttjas (under förutsättning att det finns ett värmebehov – dvs att $Q_{gv}(t) > 0W$ under hela förloppet).

3.4 Analys kring den uppmätta utnyttjandegradens nivå

De uppmätta utnyttjandegraderna överstämmer inte med vad man kan förvänta sig av ett välisolerat hus med värmeåtervinning (FTX). För välisolerade hus förväntas γ vara inom intervallet -0.8 till -0.9 enligt överslagmässiga beräkningar presenterade i Figur 1. Mätresultaten från testrummet ligger lägre än denna nivå.

De ”inre ytor”, som avgränsar testrummet mot labbhallen, ger inget värmebehov så länge det inte är någon temperturdifferens mellan testrum och labbhall. Så är fallet utan värmestörningen. Detta avspeglas i testrummets låga effektbehov (13-14 W/m²), då bara en yttervägg vetter mot temperaturen -12.5°C. Det låga effektbehovet är alltså till största delen en följd av att det bara finns en yttervägg i testrummet. Det är lätt att tro att det låga systemet skall självreglera kraftig när det är så pass lågt effektbehov (och låg vatten och yttemperatur), vilket uppenbarligen inte är fallet. Testrummets form och isolering är inte tillräckligt fördelaktigt för att uppnå högre utnyttjandegrad.

Testrummet har en ofördelaktig formfaktor med en relativt sätt stor omgivande area i förhållande till den värmeavgivande golvarean. Vidare är U_m -värdet (enligt mätningen) för testrummets hela klimatskal i storleksordningen 0.29 W/(m²K). Detta är ett relativt högt U_m -värde om det jämförs med passivhus och lågenergihus, där U_m -värde i storleksordning 0.15-0.20 W/(m²K) förekommer. Detta bidrar självklart till att K_e är relativt sätt stor. Självklart förväntas inte utnyttjandegraden att nå upp till nivån för ett lågenergihus/passivhus där K_e är betydligt lägre.

När testrummet exciteras med värmestörningen kommer ytterligare ledningsförluster att uppstå genom både de ”inre ytorna” mellan labbhall och testrum (golv, tak, tre väggar och dörr) och ytterväggen. De totala ledningsförlusterna, tillsammans med ventilationsförluster, relateras till systemet värmeavgivningsförmåga vid beräkning av γ . Testrummets värmeförlusttal K_e [W/K] är alltså summan av ledningsförlusterna genom samtliga ytor i testrummet. Detta är av stor betydelse för förståelsen av självregleringen och nivån på γ i det aktuella försöket i testrummet.

4 Kostnadsberäkning av golvvärmesystem

4.1 Bakgrund

I detta avsnitt görs en övergripande kostnadsberäkning på material och arbetskostnader för att installera ett golvvärmesystem. Jämförelsen görs mellan vad som kallas ett traditionellt golvvärmesystem och ett förenklat självreglerande golvvärmesystem. Med traditionellt golvvärmesystem avses ett värmesystem där varje rum/zon utrustas med en termostatgivare som stänger/minskar vattenflödet i rummets golvvärmeslingor då rumstemperaturen påverkas av värmekällor och stiger över termostatens börvärde. Det förenklade golvvärmesystemet har avsiktligt utformats utan rumstermostater och saknar "aktiv" återkoppling från aktuell rumstemperatur i respektive zon i byggnaden. Denna systemförenkling innebär en kostnadsbesparing i både material och arbetskostnader.

Det traditionella systemet har i de flesta fall en utetemperaturkompenserad framledningstemperatur från den primära värmekällan (värmepump, fjärrvärme etc.). Men framledningstemperaturen kan även vara en konstant framledningstemperatur anpassad till värmebehovet vid DVUT. Med konstant framledningstemperatur är systemet helt beroende av återkopplingen från rumstermostaterna. Det skall även påpekas att det traditionella systemet även det är "självreglerande", så länge termostaterna låter vatten passera genom golvvärmeslingorna.

Det förenklade golvvärmesystemet som saknar den "aktiva" återkopplingen från rummet bör utformas med en utetemperaturkompenserad framledningstemperatur. I övrigt sker återkopplingen helt via självregleringsresponsen.

Kostnaderna är hämtade från projekteringen av ett lågenergihus (villa) där golvvärmesystemet är utformat som ett förenklat självreglerande golvvärmesystem. Applicerar vi Ekvation 1 kan utnyttjandegraden γ beräknas till ≈ 0.85 i detta exempel. Detta innebär att självregleringen är betydande för den förenklade systemlösningen.

4.2 Förutsättningar

Vi har genomfört kostnadsberäkningen på en enplansvilla som helt och hållet värms med golvvärme ingjuten i betongplattan. Villan är grundlagd på en platta på mark. Den totala arean som värms upp av golvvärmen är 161m^2 (kostnader fördelas kvadratmeterpris baserat på den uppvärmda arean).

Golvvärmeslingorna monteras i rörhållarskenor som trycks fast i markisoleringen i kombination med buntband där golvvärmerören buntas fast i betongplattans armering. Samtliga golvvärmeslingor är förlagda med ett CC-mått på 300mm. Man kan säga att förläggningen av golvvärmen är att kategorisera som en "typisk" installation av golvvärme i nybyggda villor.

Golvvärmesystemet är uppdelat på två stycken golvvärmefördelare och en gruppfordelare som fördelar ut värme till golvvärmefördelarna. Totalt finns det 11st golvvärmeslingor anslutna till golvvärmefördelarna. För rumsreglering krävs 11st ställdon och 9st rumstermostater samt en basenhet för kommunikation mellan rumstermostater och ställdon. Dessa förförbinds antingen med trådbunden eller med trådlös kommunikation.

Vid kalkylen tillämpas en kostnad på 450kr/h i arbetskostnad för samtliga arbetsmoment.

4.3 Resultat

Uppskattad arbetstid för de olika arbetsmomenten redovisas i Tabell 3. Tillägget för trådbunden rumsreglering är 12 arbetstimmar. Tillägget för trådlös rumsreglering är 4 arbetstimmar.

Tabell 3 Kalkylerad arbetstid för installation av golvvärmesystemet samt rumsreglering.

Rördragning, inkoppling på fördelare, injustering av flöden	12h
Tråddragning för trådbundna termostater av elektriker	8h
Installation och funktionskontroll av termostater och ställdon	4h

Kostnader fördelade på arbete och material redovisas i Tabell 4. Resultaten i Tabell 4 förutsätter att det finns en utetemperaturkompenserad framledningstemperatur inbyggd i värmekällan, vilket motsvarar flertalet av nyinstallationerna idag. Installation av golvvärmerör och inkoppling på fördelare ger kostnaden 247 k/m² för det förenklade systemet. Tilläggskostnaden för trådbunden installation är 81 kr/m² (+33 % jmf med självreglerande). Materialet står för 60 % av tilläggskostnaden. Tillägget för trådlös installation är mer än dubbelt så hög som trådbunden installation, +169 kr/m² (+68 % jmf med självreglerande). Här står materialet för över 90 % av tilläggskostnaden då den trådlösa tekniken är betydligt dyrare samtidigt som installationen är enklare.

Är förutsättningen att det saknas en utetemperaturkompenserad framledningstemperatur skall shuntautomatik läggas till i grundutförandet. Räknar vi att denna kostnad läggs till de tre olika systemlösningarna sjunker den relativa kostnadsökningen för system med rumsreglering till +28 % och +59 %, se

Tabell 5. Läger vi bara tilläggskostnaden för utetemperaturkompenseringen på det förenklade självreglerande systemet så är den relativa kostnadsökningen för rumsreglering istället +14 % och +44 %, se

Tabell 6.

Tabell 4 Resultat av kostnadsberäkningen med förutsättning att värmekällan har en inbyggd regulator för utetemperaturkompensering av framledningstemperaturen.

	Material	Arbete	Total	Ökning jmf med självreglerande	
	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	%
Traditionell lösning trådbunden	262	67	329	+81	+33%
Traditionell lösning trådlös	372	45	417	+169	+68%
Självreglerande	214	34	247	-	-

Tabell 5 Resultat av kostnadsberäkningen med förutsättning att shuntautomatik för utetemperaturkompensering av framledningstemperaturen installeras i samtliga systemlösningar.

	Material	Arbete	Total	Ökning jmf med självreglerande	
	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	%
Traditionell lösning trådbunden	303	67	370	+81	+28%
Traditionell lösning trådlös	413	45	457	+169	+59%
Självreglerande	255	34	288	-	-

Tabell 6 Resultat av kostnadsberäkningen med förutsättning att shuntautomatik för utetemperaturkompensering av framledningstemperaturen installeras i endast det förenklade självreglerande systemet.

	Material	Arbete	Total	Ökning jmf med självreglerande	
	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²	%
Traditionell lösning trådbunden	262	67	329	+41	+14%
Traditionell lösning trådlös	372	45	417	+128	+44%
Självreglerande	255	34	288	-	-

Samtliga kalkyler ovan gäller för ingjuten golvvärme. Installation av lätta system med värmefördelningsplåtar är mer kostsamma i både material och arbetstid. Dock är tilläggskostnaderna för rumsreglering de samma som redovisas ovan för ingjutna system. Slutsatsen för lätta system är att den relativa kostnadsökningen är lägre än de redovisade nivåerna för ingjutna system.

DEL II – Konvektiv ytöverföring

5 Redovisning av golvytans konvektiva ytöverföring

Vid beräkning och dimensionering av golvvärmesystem är ytöverföringen vid golvytan en fundamental parameter. Ytöverföringen kan ske via utbytet av värmestrålning med omgivande ytor eller via värmekonvektion med luften i rummet. Vanligtvis för lågtempererad golvvärme dominerar värmestrålningen över ytöverföring via konvektion. Ju lägre yttemperatur på golvet, ju lägre andel konvektiv värmeöverföring. Värmestrålningen från golvet är jämförelsevis okänsligt för det aktuella yttemperaturintervallet som råder på golvet. Resultaten från mätningen visar att värmeflödet via värmestrålningen utgör kring i storleksordningen 70-75% av golvytans värmeflöde (resterande 25-30% utgörs av värmekonvektionen).

Mätdata från försöken används i detta avsnitt för att kvantifiera ytöverföringskoefficienten α_c (W/(m²K)) vid golvtemperaturer och effektbehov som motsvarar en lågenergibyggning med ett effektbehov på 12.6W/m². Försöken sker vid en utetemperatur på -12.5°C. Vi använder i huvudsak data från mätsekvenser med avstängd varmtråd för att utvärdera α_c . Men vi undersöker även resultatet när varmtråden är påslagen. Här förväntar vi oss att det uppstår ökade luftströmlar kring varmtråden vilket påverkar värmeöverföringen vid golvytan.

Det totala värmeflödet som golvvärmeslingan avger Q_{gv} delas upp i ett uppåtriktat värmeflöde Q_{up} som värmer upp testrummet, samt i ett nedåtriktat värmeflöde som är en förlustterm, som inte bidrar till testrummets uppvärmning. Q_{up} beräknas som tidigare med hjälp av isoleringsverkningsgraden η , se Ekvation 5. Värmeflödet från golvytan delas upp i ett konvektivt flöde Q_{cv} samt i nettoutbytet av värmestrålning vid golvytan Q_{rad} , se Ekvation 7. Strålningsvärmens från golvytan beräknas som grå diffus värmestrålning. Ekvation 7 beskriver nettoutbytet av värmestrålning Q_{rad} för hela golvytan mot rummets övriga ytor.

$$Q_{up} = \eta \cdot Q_{gv} \quad (\text{Ekvation 5})$$

$$Q_{up} = Q_{cv} + Q_{rad} \quad (\text{Ekvation 6})$$

$$Q_{rad} = A_{golv} \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_r^{golv \rightarrow i} \cdot (\bar{T}_{golv}^{golv} - \bar{T}_{yta}^i) = A_{golv} \cdot \alpha_r^{golv} \cdot (\bar{T}_{golv}^{golv} - \bar{T}_r) \quad (\text{Ekvation 7})$$

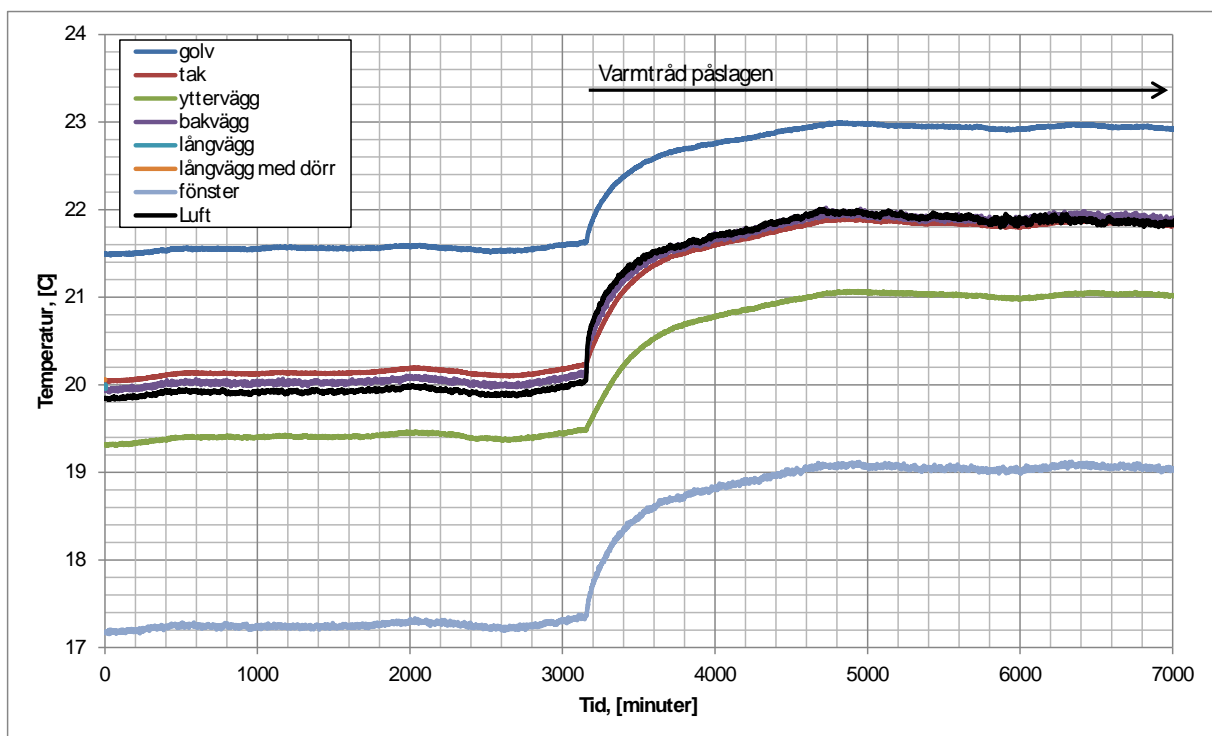
Där ytöverföringskoefficienten $\alpha_r^{golv \rightarrow i}$ för värmestrålning mellan golvet och respektive delyta beräknas enligt:

$$\alpha_r^{golv \rightarrow i} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot (\bar{T}_{golv}^{golv} - \bar{T}_{yta}^i)^3}{\frac{1 - \epsilon_{golv}}{\epsilon_{golv}} - \frac{1}{F_{golv \rightarrow i}} + \frac{A_{golv}}{A_i} \cdot \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i}}$$
$$\alpha_r^{golv} = \sum_{i=1}^n \alpha_r^{golv \rightarrow i} \quad (\text{Ekvation 8})$$

$$\bar{T}_r = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_r^{golv \rightarrow i} \cdot \bar{T}_{yta}^i}{\alpha_r^{golv}} \quad (\text{Ekvation 9})$$

$$Q_{cv} = A_{golv} \cdot \alpha_c \cdot (\bar{T}_{yta}^{golv} - \bar{T}_{luft}) \quad (\text{Ekvation 10})$$

I beräkningsmodellen antas en helt jämn yttemperatur \bar{T}_{yta}^i på varje byggnadsdel (vägg, tak etc.). Från försöken i testrummet erhålls uppmätta yttemperaturer. För att skapa en bild av temperaturfördelningen i testrummet har yttemperaturen i tak, golv, vägg, fönster uppmätts med totalt 30st termoelement. Yttemperaturfördelningen utöver en enskild byggnadsdel har bedömts som jämn vid mätningen. Figur 11 visar medelyttemperaturerna på testrummets byggnadsdelar i fallet med det lätta golvvärmesystemet. Vi ser att tak och innerväggar har en temperatur som ligger mycket nära luftens medeltemperatur på +20.0°C. Tre byggnadsdelar avviker. Självklart har golvet den högsta yttemperaturen, utan störningen i rummet är golvet kring +21.5°C. Ytterväggen och fönstrets temperatur är klart under luftens temperatur.



Figur 11 Medelyttemperaturer för testrummets väggar, golv, tak och fönster samt lufttemperaturen i testrummet för mätsekvens med lätt golvvärme.

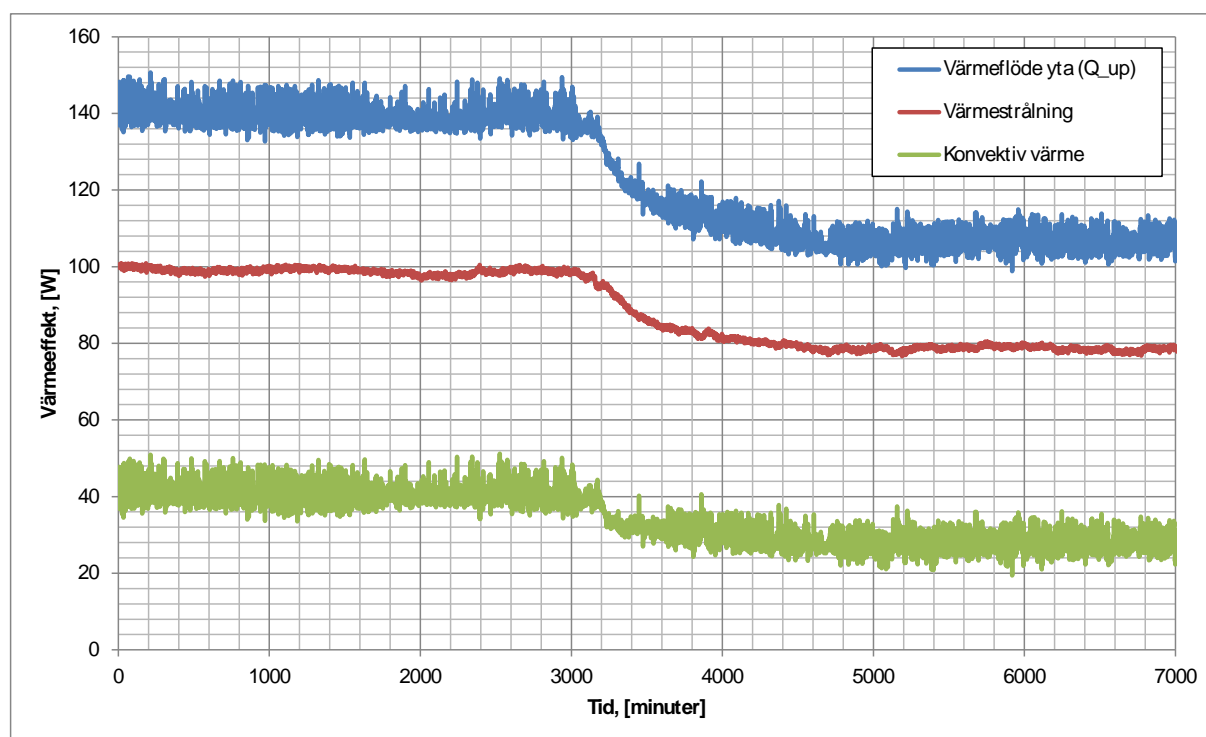
Synfaktorer $F_{golv \rightarrow i}$ mellan golvytan och övriga byggnadsdelar beräknas, se resultat i Tabell 7. Synfaktorn anger hur stor andel varje byggnadsdel utgör av golvytans totala "synfält" och är helt beroende på rummets geometri. Vidare beräknas ytöverföringstalen $\alpha_r^{golv \rightarrow i}$ för värmestrålningen från golvytan enligt Ekvation 7, se Tabell 7. Vi antar att emissiviteten ϵ (långvågig strålning) för samtliga ytor är 0.9. $\alpha_r^{golv \rightarrow i}$ är i stort sätt konstant under de små förändringar av yttemperaturen som sker. Summeras alla delytor som golvytan strålar värme mot så blir den totala α_r^{golv} i storleksordningen 5.5

till 5.6 W/(m²/K) under försöket, enligt Ekvation 8. Kraftigast är värmestrålningen mellan golvet och taket följt av inner och ytterväggar, se Tabell 7. Värmestrålningen till fönstret är relativt liten, trots att fönstret har en låg yttemperatur, då fönstret har så pass liten synfaktor.

Tabell 7 Beräknade synfaktorer $F_{golv \rightarrow i}$ för värmestrålning från golvytan mot respektive byggnadsdel i testrummet samt beräknade $\alpha_r^{golv \rightarrow i}$ för försöket med lätt golvvärme (utan varmtråd påslagen).

		Tak	Yttervägg	Bakvägg	Långvägg	Långvägg med dörr	Fönster
$F_{golv \rightarrow i}$	-	0.27	0.15	0.17	0.19	0.19	0.02
$\alpha_r^{golv \rightarrow i}$	W/(m ² K)	1.48	0.83	0.94	1.07	1.07	0.10

Golvytans värmebalans under försöket med stegexciteringen redovisas i Figur 12. Det konvektiva värmeflödet från golvytan beräknas som skillnaden mellan det uppåtriktade värmeflödet från golvvärmen och den beräknade strålningsvärmens (Ekvation 6).

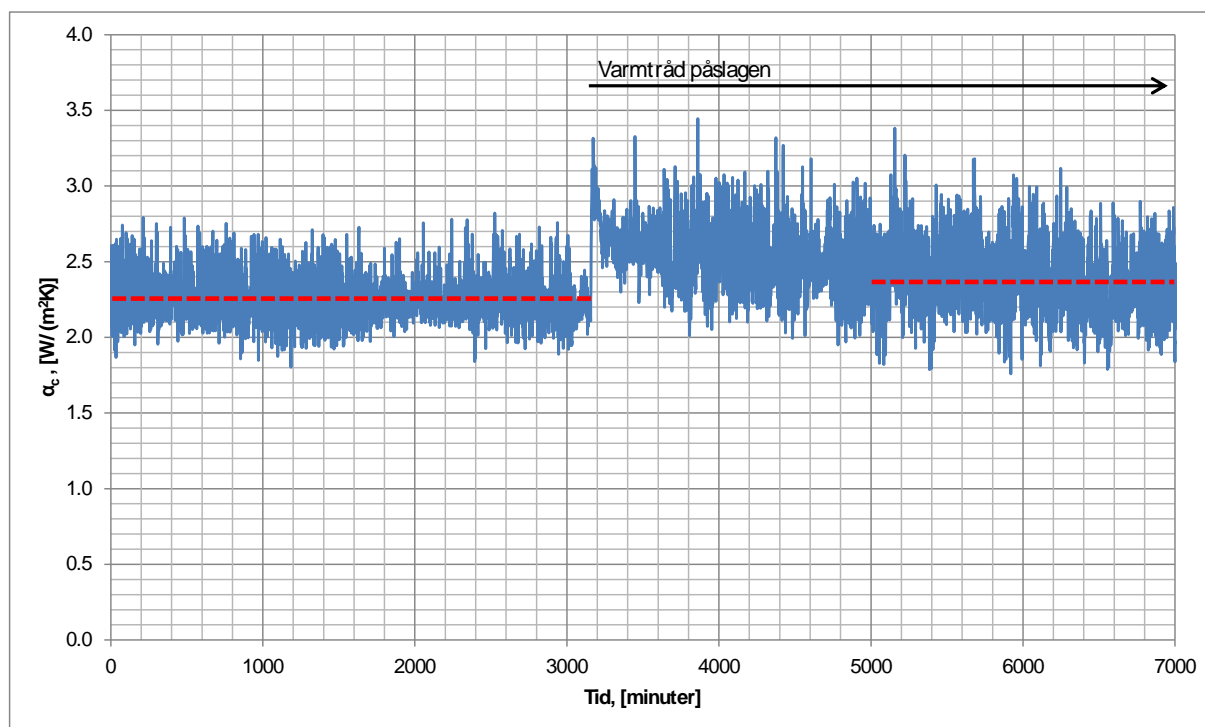


Figur 12 Golvytans värmebalans under testsekvensen.

Den konvektiva ytöverföringskoefficienten α_c beräknas enligt Ekvation 10, se Figur 13. Under den första stationära perioden är medelvärdet av α_c 2.26 W/(m²K). I denna fas påverkas inte lufrörelserna och konvektionen vid golvytan av någon extern faktor förutom förekomsten av lufrörelse längs ytterväggen i testrummet. Någon mätning av eventuella lufrörelser ner längs fönster, ytterväggen eller tilluften i taket har inte gjorts. Inverkan av detta kan ge lokalt högre konvektiv värmeöverföring närmst ytterväggen. Analysen av α_c som genomförts gäller hela golvytan, inkluderat eventuella lokala effekter utmed ytterväggen, fönstret och ventilationen.

Försöket har genomförts för alla tre golvvärmesystemen. I samtliga fall har värmebehovet varit likartat vilket ger att temperaturdifferensen mellan golvytan och luften varit konstant kring 1.6°C, se Tabell 8. Därför förväntas inte några stora skillnader beroende på vilket golvvärmesystem som tillämpats.

Resultaten i Tabell 8 ger heller inga överraskningar. Vidare kan vi visa att de uppmätta konvektiva överföringskoefficienterna α_c överensstämmer väl med modellen enligt Awbi och Hatton (1999), se Ekvation 11 och Tabell 8. Vid beräkningen av α_c enligt Awbi och Hatton har storleken på testrummet applicerats.



Figur 13 Kontinuerlig mätning av konvektiv ytöverföringskoefficient α_c med lätt golvvärme. De streckade röda linjerna anger de medelvärdesbildade överföringskoefficienterna α_c för de två driftfallen med eller utan varmtråd påslagen.

Tabell 8 Konvektiv värmeöverföringskoefficient α_c (utvidgad mätosäkerhet, $k=2$) samt jämförelse med modell enligt Awbi and Hatton (1999).

	Uppmätt α_c W/(m ² K)	$\bar{T}_{yta}^{golv} - \bar{T}_{luft}$	Modell enligt Ekvation 11 W/(m ² K)
Lätt golvvärme CC300	2.3 ±0.44	1.63	2.3
Ingjuten CC300	2.4 ±0.44	1.57	2.3
Ingjuten CC200	2.5 ±0.44	1.64	2.3

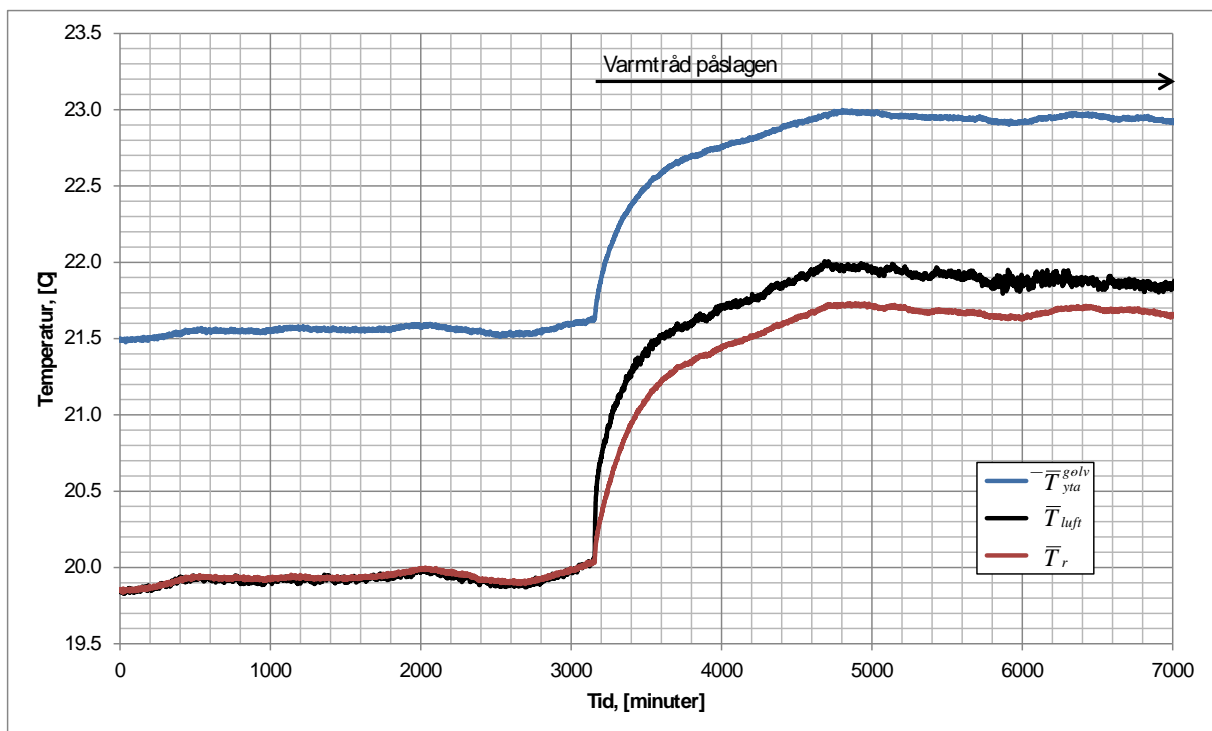
$$\alpha_c = \frac{2.175}{D^{0.076}} \times (\bar{T}_{yta}^{golv} - \bar{T}_{luft})^{0.308}$$

Ekvation 11

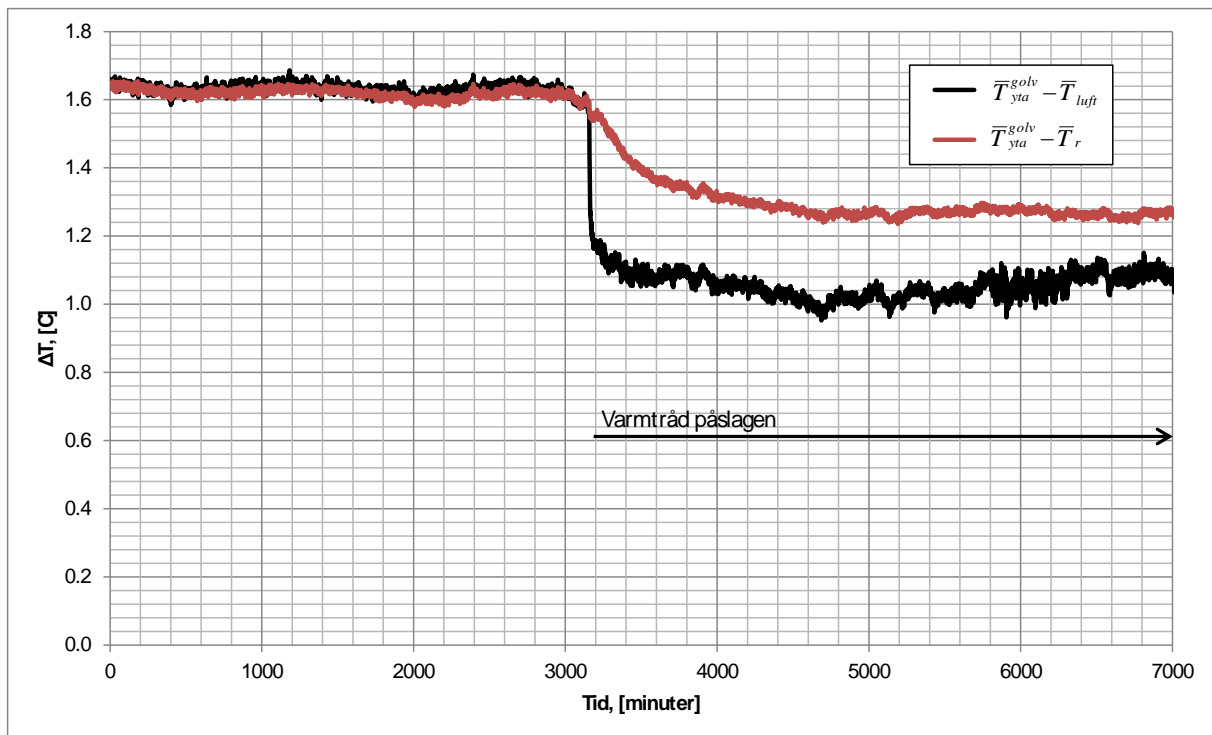
Där D är:

$$D = \frac{4 \cdot \text{omkrets}}{A_{golv}}$$

I Figur 14 redovisas golvets medelyttemperatur \bar{T}_{yta}^{golv} samt medellufttemperatur \bar{T}_{luft} och den viktade motstrålande yttemperatur \bar{T}_r (se Ekvation 9) för testet av det lätta golvvärmesystemet. Vi ser tydligt att \bar{T}_{luft} och \bar{T}_r i stort sätt antar samma nivå när det inte finns någon extra värmekälla i testrummet. Förenklat kan man säga att värmeavgivningen från golvet sker mot en och samma "rumstemperatur". Likande resultat finns uppmätta för de bägge ingjutna systemen. Varmtråden är till största del en konvektiv värmekälla. Det syns tydligt när man studerar förändringen i \bar{T}_{luft} och \bar{T}_r när varmtråden slås på, se Figur 14. Lufttemperaturen ökar avsevärt mer än medelstrålningstemperaturen \bar{T}_r efter påslaget av den konvektiva störningen. Följden blir att temperaturskillnaden mellan golvytan och lufttemperaturen minskar mer än temperaturskillnaden mellan golvytan och medelstrålningstemperaturen \bar{T}_r , se Figur 15.



Figur 14 Lufttemperatur, golvtemperatur och motstrålande yttemperatur för försöket med lätt golvvärme.



Figur 15 Temperturdifferenser mellan golvytan och luften, samt mellan golvytan och övriga ytemperaturer i fallet med lätt golvvärme.

När värme tillförs testrummet via varmtråden konstateras att det konvektiva värmeöverföringstalet ökar något, se högra delen av Figur 13. Tittar vi på perioden efter tiden 5000 min i fallet med lätt golvvärme, när system åter nått en jämvikt, är medelvärdet av α_c 2.39 W/(m²K) (5000-7000min). Denna ökning av α_c sker trots att differensen mellan golvytan och luften ($\bar{T}_{yta}^{golv} - \bar{T}_{luft}$) minskar från 1.63K till 1.06K, se Figur 15.

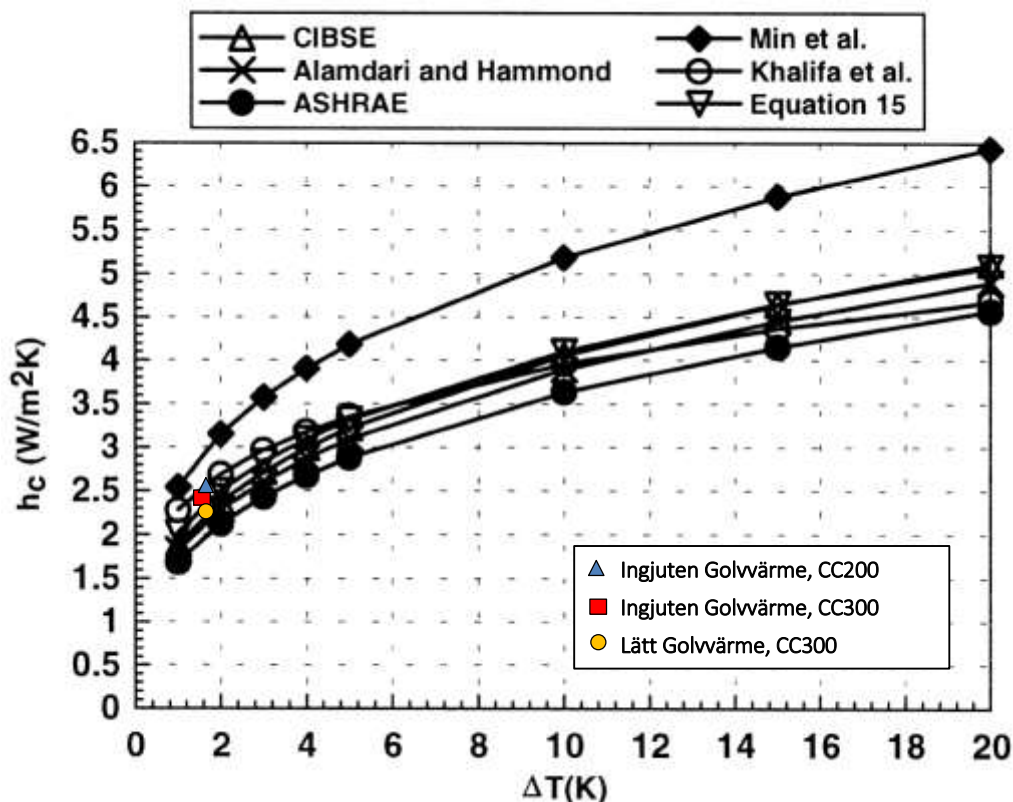
Enligt Awbi och Hattons (1999) modell skall en sådan minskning av temperaturdifferensen ge ett sänkt konvektivt värmeöverföringstal: vi räknar med att α_c sjunker till 2.0 W/(m²K) vid den temperaturskillnad som råder, se Tabell 9. Vi antar att detta beteende beror på att varmtråden skapar luftrörelsen som ökar golvet konvektiva värmeöverföringsförmåga. $\Delta\alpha_c$ betecknar skillnaden mellan uppmätt värde och modellen enligt Ekvation 11. $\Delta\alpha_c$ är alltså en bedömning av inverkan på den konvektiva värmeöverföringskoefficienten orsakad av de luftrörelser som uppstår kring varmtråden.

Bestämning av $\Delta\alpha_c$ har gjorts för samtliga tre golvvärmesystem. Resultaten är likartade och sammanställs i Tabell 9. Skillnaderna mellan de olika försöken ligger dock inom försökets totala mätosäkerhet på ± 0.44 (W/m²K). Vi ser en ökad $\Delta\alpha_c$ för de ingjutna systemen. Detta kan bero på att betongplattans tjocklek har gjort att golvytan är 104mm närmre varmtråden jämfört med det inledande försöket med lätt golvvärme.

Tabell 9 Konvektiv värmeöverföringskoefficient α_c med varmtråden påslagen. I högra kolumnen skillnaden mellan mätning och modell.

	Uppmätt α_c W/(m ² K)	$\bar{T}_{yta}^{golv} - \bar{T}_{luft}$	Modell enligt Ekvation 11 W/(m ² K)	Diff. Mätning – Modell, $\Delta\alpha_c$ W/(m ² K)
Lätt golvvärme CC300	2.4	1.06	2.0	0.4
Ingjuten CC300	2.9	1.03	2.0	0.9
Ingjuten CC200	2.9	0.96	2.0	0.8

Awbi och Hatton (1999) sammanställde resultaten från flera olika studier, se Figur 16. Mätresultaten för α_c (utan varmtråden påslagen) stämmer mycket väl med litteraturkällorna. Utmärkande för den utförda mätningen i testrummet är att realistiska driftförhållanden för ett lågtempererat golvvärmesystem föreligger. Generellt är jämförbara studier utförda med flera gånger högre temperaturskillnad, mellan golvytan och luften, än vad som föreligger i fallet med ett lågtempererat golvvärmesystem. I studien av Awbi och Hatton (1999) har α_c studerats i ett temperaturintervall (ΔT , differensen mellan golvytan och luften) som sträcker sig från $\approx 4^\circ\text{C}$ till maximalt $\approx 30^\circ\text{C}$. Dessa resultat extrapoleras sedan, med hjälp av ett empiriskt utvärderat samband (t.ex. Ekvation 11), utanför mätområdet när α_c för ett lågtempererat golvvärmesystem bedömas/beräknas. I Figur 16 är alltså ”punkterna” under $\Delta T=4^\circ\text{C}$ utanför experimentets faktiska mätområde vad det gäller modellen för Awbi och Hatton (1999). Vår studie visar att extrapoleringen av resultaten fungerar när temperaturdifferenser som är aktuella för lågtempererat golvvärme tillämpas.



Figur 16 Jämförelse av resultat med sammanställningen hämtad från Awbi and Hatton (1999). ”Equation 15” är Awbi och Hattons modell som beskrivs av Ekvation 11.

Standard SS-EN 1264-2 anger randvillkor ($\alpha_c + \alpha_r$) när värmeavgivningen från en golvvärmekonstruktion beräknas med värmeledningsmodeller för ett representativt tvärsnitt (2D

beräkning). Denna beräknade värmeavgivning kan sedan användas som underlag vid dimensionering av framledningstemperatur och vattenflöde i golvvärmesystem.

Standarden anger att total ytöverföring är 10.8 W/(m²K). Motsvarande uppmätta värde för testrummets system anges i Tabell 10. Skillnaden mellan standardens nivå och den uppmätta nivån är relativt stor. Standarden motsvarar ett α_c i storleksordningen ≈ 5.3 W/(m²K). Den största orsaken är att SS-EN 1264-2 utgår från att golvvärmesystemet avger en betydligt högre yteffekt jämfört med testrummets yteffekt vilket leder till högre golvtemperaturer och en förstärkt konvektiv ytöverföring. För att α_c skall uppnå ≈ 5.3 W/(m²K) krävs också en del påtvingad konvektion, det räcker inte med bara naturlig konvektion. Ju lägre värmemotstånd golvbeläggningen har, desto större känslighet medför valet av randvillkor vid golvytan ($\alpha_c + \alpha_r$) för denna typ av beräkning av dimensionerande värmeavgivningsförmåga.

Tabell 10 Total uppmätt värmeöverföringskoefficient $\alpha_c + \alpha_r$.

	Inget värmestillskott i rummet W/(m ² K)	Med värmestillskott i rummet W/(m ² K)
Lätt golvärme CC300	7.7	8.0
Ingjuten CC300	7.9	8.4
Ingjuten CC200	8.0	8.4

Referenser

Awbi, H. B., and Hatton, A. (1999). "Natural convection from heated room surfaces." *Energy and Buildings*, 30(3), 233-244.

SIS (2008). SS-EN 1264-2:2008. "Vattenburet system för uppvärmning och kylning – Del 2: Golvvärme: Bestämning av värmeavgivning med användning av beräkningar respektive provningsmetoder."

Karlsson, H. och Hagentoft, C-E. (2011). "BYGGNADSINTEGRERAD UPPVÄRMNING - UTVECKLING AV SIMULERINGSMODELL MED TILLÄMPNINGAR SAMT ANALYS AV ALTERNATIVA, FÖRENKLADE OCH SJÄLVREGLERANDE VATTENBURNA GOLVVÄRMESYSTEM I SMÅHUS". Chalmers tekniska högskola. Slutrapport SBUF-projekt: 11991.

Karlsson, H. (2010). "Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems - supply temperature optimisation and self-regulating effects". Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Bilaga 1 - Beskrivning av testrum och golvvärmesystem

Golvkonstruktion

Golvvärmesystemen har byggts upp inuti en befintlig klimatkammare. Kammarens golv hamnar därmed under de uppbyggda golvvärmesystemen. Kammarens golv är uppbyggt av sandwichelement (isolering och stålplåtar) som vilar på utanpåliggande stålbalkar. Ovanpå sandwichelementen är en golvyta av räfflad aluminiumplåt applicerad. I sandwichkonstruktionen bör det finnas köldbryggor, som lokalt kan ge ett ökat värmeflöde. Inverkan av potentiella köldbryggor har inte studerats i detalj. Dock har testrummets totala värmeförluster uppmätts vilket inkluderar eventuella köldbryggor i hela konstruktionen.

Ovanpå den räfflade aluminiumplåten har två lager EPS-isolering placerats med en total bygghöjd av 150mm. Ovanför denna yta har de olika golvvärmesystemen byggts upp - antingen en gjuten platta eller ett lätt system. Skikten ovan för den gjutna plattan eller det lätta systemet är gemensam för samtliga studerade golvvärmesystem. En 12mm tjock spånskiva används som golvbeläggning, direkt under spånskivan har en stegljudmatta "Decibex" applicerats.

Luften i labbhallen kan fritt cirkulera under testrummet då ett cirka 0.5m avstånd finns ned till labbhallens golv. Golvkonstruktionen vetter därmed mot labbhallens lufttemperatur.



Figur 17 Stegljudmatta placerad direkt ovanpå golvvärmen (gjuten platta eller värmefördelande aluminiumplåtar).



Figur 18 Färdigt golv - 12mm spånskiva.

Tak- och väggkonstruktion

Testrummets tak och väggar som vetter mot den omgivande labbhallen består även det av sandwichelement. I detta fall är de på insidan klädda med 13mm gips (och en underliggande luftspalt). Väggen mot sekundärkammaren består av XPS isolering som på insidan är klädd med 13mm gipsskiva (luftspalt). I ytterväggen är ett fast 3-glas fönster (1470x670mm glasarea) monterat. Sammanlagt uppmättes ledningsförlusterna för yttervägg (inkluderat fönstret) till 2.15 W/K (se Bilaga 3). Fönstrets totala U-värde (U_w) är beräknat till 0.8 W/m²/K (glasdelen har $U_g=0.58$ W/m²/K, uppbyggnad: OTS3-16ar-f-16ar-OTS3+ID) vilket ger ett U-värde för hela ytterväggen på 0.25 W/m²/K

Ventilation av testrummet

I ventilationssystemet finns en varvtalsstyrd fläkt som förser testrummet med tilluft. Testrummet är försätt med ett "tilluftsdon" i taket. Donet består av en EPS-skiva som fördelar ut tilluften åt sidorna (bort från fönstret och ytterväggen). Målet är att tillföra luften utmed taket i donets smala och långa spalter. Därmed uppnås en god omblandning med testrummets luftvolym. Mätningarna har visat på en mycket homogen lufttemperatur i testrummets hela luftvolym.

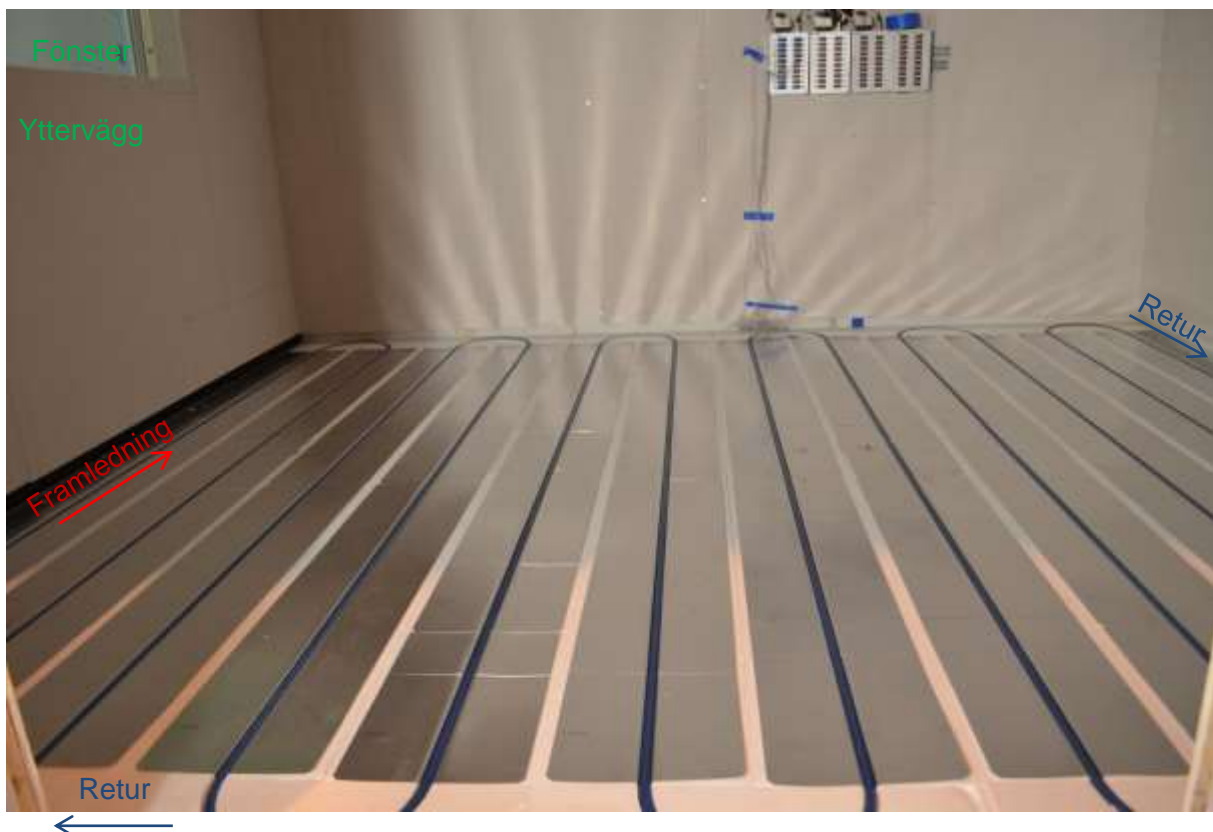
Testrummet är inte försedd med någon frånluftsfläkt. Alltså kommer ett övertryck att råda i testrummet jämfört med sekundärkammaren (kallt klimat) och den omgivande labbhallen. Följden blir att det inte sker någon infiltration av kall luft från sekundärkammaren (eller labbhallsluft) till testrummet. Luften kommer att lämna testrummet i eventuella otätheter i anlutningen kring ytterväggen. En "frånluftslang" har placerats i testrummets bakkant, cirka 2m från golvet. Slangen har diameter 55mm och är löper ut genom väggen utsidan i labbhallen. Här kommer större delen av

frånluften att lämna testrummet. Slangen är placerad så att överluft genom en dörr eller överluftsdon skall simuleras.

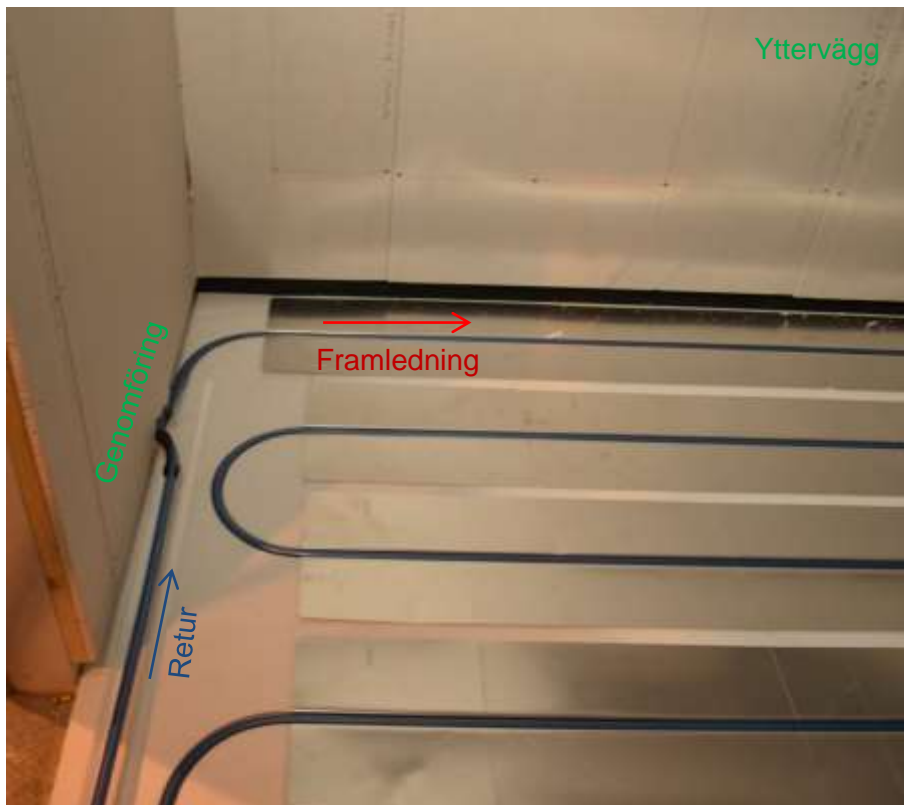
Från sekundärkammaren tas kall luft som blandas med frånluft från kammaren (luften styrs med två justerbara spjäll). Genom ett hål läcker avluften (ur frånluftsflödet) ut i labbhallen. Resten av frånluften blir återluft. Spjällerna är injusterade så att proportionen återluft ger en temperaturverkningsgrad på $\approx 80\%$. Varvtalet på fläkten är inställt så att tilluftsflödet blir kring 10 l/s.

Uppbyggnad lätt golvvärme CC300

Det lätta golvvärmsystemet är förlagt i spårad EPS-isolering. De spårade skivorna utgör det översta skiktet i golvkonstruktionens 70mm EPS-isolering. I dessa spår monteras aluminiumplåtar (0.5mm - Thermotech). Någon typ av värmefördelare är nödvändigt för värmespridningen från PEX-röret i lätta golvvärmekonstruktioner, se Figur 19. De spårade EPS-skivorna ger ett centrum-centrum-mått på 300mm. Dock täcks inte hela golvytan av aluminiumplåtarna då de inte ligger kant-i-kant samt att böjarna ligger i ett område som saknar aluminiumplåt, se Figur 19. Golvvärmsystemet består av ett ensamt PEX-rör (16mm ytterdiameter) som täcker hela golvytan i ett serpentinmönster. Rörslingans framledning går in genom testrummets vägg (mot labbhallen) och löper direkt utmed ytterväggen mot sekundärkammaren (till vänster i Figur 19). Slingans retur är förlagd genom väggen i samma område som framledningen, se Figur 20. Sista $\approx 3.5\text{m}$ av slingan är förlagd utan värmefördelnde plåt enligt Figur 20. Totalt är slinglängden inuti testrummet 37.9m.



Figur 19 Lätt golvvärme med spårad EPS-isolering med värmefördelnde aluminiumplåtar och PEX-rör. Bilden visar förläggningen av testrummets golvvärmslinga. Pilarna indikerar vattnets flödesriktning i golvvärmslingan.



Figur 20 Lätt golvvärme med spårad EPS-isolering med värmefördelnde aluminiumplåtar och PEX-rör. Bilden visar förläggningen av testrummets golvvärmeslinga. Pilarna indikerar vattnets flödesriktning i golvvärmeslingan.

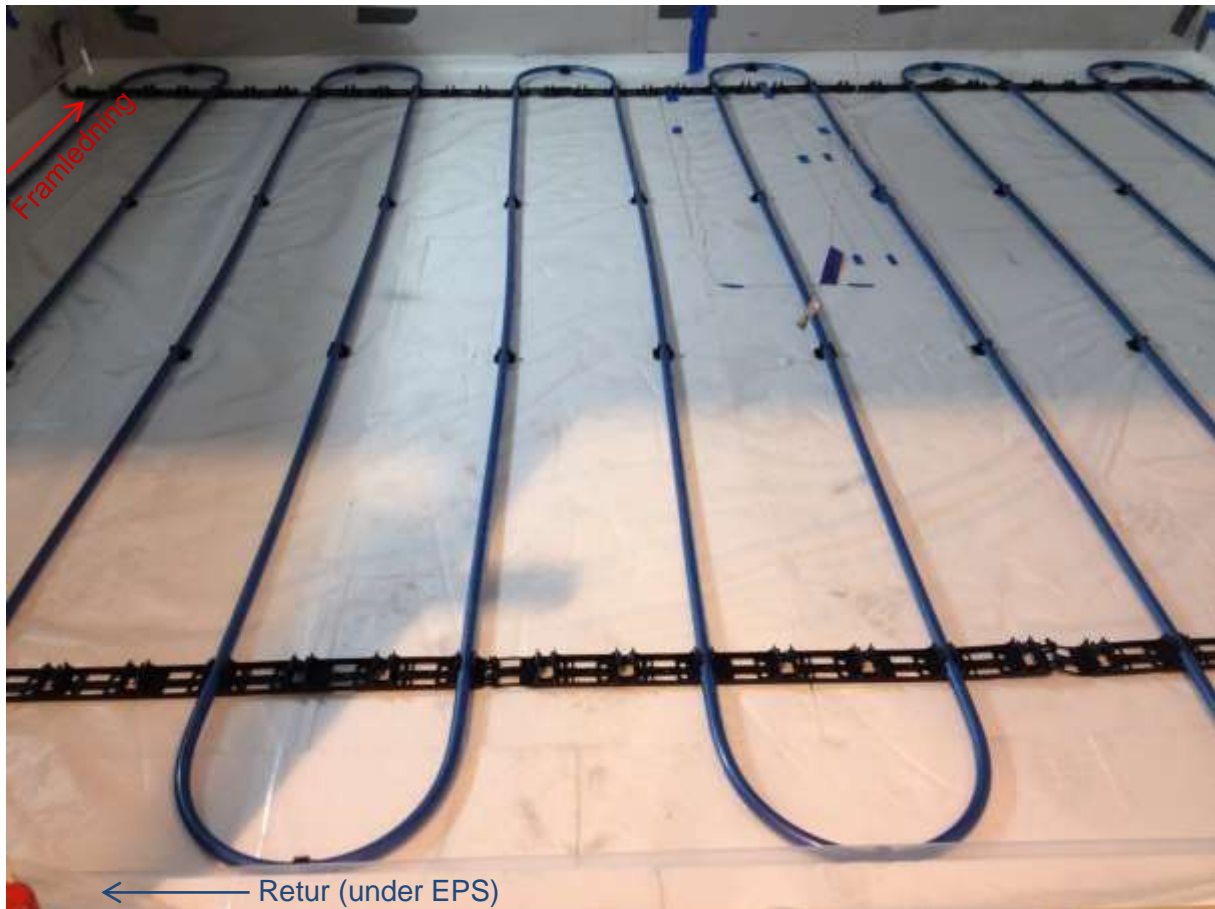
Uppbyggnad ingjuten golvvärme med låg rörposition CC300

Efter genomförda mätningar med det lätta golvvärmesystemet byggdes golvet i testrummet om för tester med de två ingjutna golvvärmesystemen. Efter att värmefördelningsplåtarna avlägsnats vändes den spårade EPS-isoleringen, skiva för skiva, så att den släta "undersidan" ligger uppåt. Värmeisoleringen under golvvärmen är därmed i stort sätt oförändrad för testerna av de tre olika systemen. För att undvika att avjämningsmassa (och vatten) från gjutningen rinner djupare ner i golvet placerades en polyeten plastfilm ovan EPS-isoleringen. På denna yta återmonterades sedan PEX-slingan från det lätta systemet i ett motsvarande mönster, se Figur 21. För att säkerställa positionen under gjutningen fästes PEX-röret mot underlaget med rörhållarskenor och krokar i plast.

De sista $\approx 3.5\text{m}$ (närmst returen) av slingan placerades under det översta lagret av spårad EPS. Slingans totala längd var återigen 37.9m med CC300 med slingan placerad så djupt ner i plattan som möjligt.

Efter detta följde gjutning av en platta i hela testrummet. Plattan gjöts helt i fiberarmerad avjämningsmassa då homogena egenskaper för plattan önskades. Ingen stålarmering användes i plattan då värmekonduktiviteten för stål är 50 W/m/K medan betong ligger mellan ≈ 1.2 till $\approx 1.7\text{ W/m/K}$ (beroende på sammansättning). Förekomsten av stålarmering kan därmed påverka värmeledningen och temperatur fördelningen i stålarmerad betong. Vi ville i möjligaste mån undvika att de mätpunkter som fanns i plattan påverkas av kraftigare värmeledning i armeringen. Värmekonduktiviteten för avjämningsmassan är 0.7 W/m/K , enligt tillverkaren (Weber). Alltså är värmeledningen i en realistisk stålarmerad betongplatta klart bättre än i den platta som använts i dessa labbförsök.

Gjutningen plattan genomfördes sedan i 4 delgjutningar. Då termoelement monterades successivt på olika höjder inuti plattan. Plattans totala tjocklek är uppmätt till 104mm.



Figur 21 Den ingjutna golvvärmeslingan med CC300 i botten av plattan. Ytterväggen skymtar till uppe till vänster i bilden.

Uppbyggnad ingjuten golvvärme med hög rörposition CC200

I samma platta av fiberarmerad avjämningsmassa gjöts även en ytlig golvvärmeslinga in. Plattan innehåller alltså två stycken slingor, en djupt ner i botten samt en ytlig slinga med centrum-centrum-mått på 200mm. Som tidigare nämnt utfördes gjutningen i 4 skikt. Efter gjutningen av det 3:e skiktet monterades den ytliga golvvärmeslingan ovanpå den nya plattan. Även denna slinga är förlagd i ett serpentinmönster. Dock är mönstret vridit 90 grader så att "öglorna" i de bägge slingorna inte löper parallellt. I en planprojicering korsar slingorna varandra endast i punkter.

Det 4:e skiktet i plattan gjöts så tjockt att hjässan på PEX-röret och rörhållarskenorna helt täcks med avjämningsmassa. Därmed är CC200 systemet ingjutit så ytligt/högt som möjligt i plattan. Totalt finns 56.2m PEX-rör ingjutit i CC200 systemet. Hela slinglängden är i kontakt med plattan.

Ovanpå den färdiga plattan återmonterades stegljudsdämparen och trägolvet (spånskivan). Övergolvet är alltså identiskt för de 3 olika golvvärmesystemen.



Figur 22 Inför gjutning av det 4:e och sista lagret i plattan. Bilden visar serpentinförläggningen av det ytliga CC200 systemet. Träreglarna håller endast nere böjarna under (del)gjutning så att PEX-röret ligger fixerat.

Bilaga 2 – Mätosäkerhet

Nedan i Tabell 11 till Tabell 13 redovisas uppskattade mätosäkerheter för de enskilda mätningarna och beräkningarna av självregleringens utnyttjandegrad γ .

Tabell 11 Skattning av mätosäkerhet.

Givare	Storhet	Mätosäkerhet (k=2)	Enhet
Golvvärme framledning	Temperatur	± 0.02	K
Golvvärme retur	Temperatur	± 0.02	K
Differens golvvärmeslinga	Temperatur	± 0.02	K
Spänning varmtråd	Elektrisk spänning	± 0.1	%
Strömstyrka varmtråd	Elektrisk spänning	± 0.2	%
Lufttemperatur (medel i testrummet)	Temperatur	± 0.2	K
Lufttemperatur (medel i labbhallen)	Temperatur	± 0.5	K
Tillufttemperatur	Temperatur	± 0.2	K
Frånlufttemperatur	Temperatur	± 0.2	K
Differenstryck över Prantelrör tilluft	Differenstryck	± 0.66	Pa
Prantelrör tilluft	Luftflöde	± 1.10	%
Vattenflöde i golvvärmeslinga	Volymflöde	± 0.25	%
Förändring labbhalls temperatur	Temperatur	± 0.2	K

Tabell 12 Mätosäkerheter för beräknade storheter och egenskaper (ingår som delposter i beräkning av γ).

Beräknad storhet		Mätosäkerhet (k=2)	Enhet
Eleffekt störning	Q_{el}	± 0.22	%
Effekt golvvärmeslinga – lätt system CC300	Q_s	± 2.1	W
Effekt golvvärmeslinga – ingjutit system lågt rör CC300	Q_s	± 2.2	W
Effekt golvvärmeslinga – ingjutit system högt rör CC200	Q_s	± 3.6	W
Värmeavgivningsförmåga – lätt system CC300	K_{up}	± 4.3	%
Värmeavgivningsförmåga – ingjutit system lågt rör CC300	K_{up}	± 4.2	%
Värmeavgivningsförmåga – ingjutit system högt rör CC200	K_{up}	± 5.2	%
Värmeförlusttal testrum	K_e	± 0.60	W/K
Isoleringsverkningsgrad	η	± 0.024	-

Tabell 13 Mätosäkerheter för både beräknade och direkt uppmätta utnyttjandegrader γ .

Fall	System	Resultat	Mätosäkerhet (k=2)	Enhet
Beräknad	lätt system CC300	-0.54	± 0.016	-
Beräknad	ingjutit system lågt rör CC300	-0.55	± 0.017	-
Beräknad	ingjutit system högt rör CC200	-0.64	± 0.019	-
Direkt mätning stegsvar	lätt system CC300	-0.52	± 0.06	-
Direkt mätning stegsvar	ingjutit system lågt rör CC300	-0.49	± 0.07	-
Direkt mätning stegsvar	ingjutit system högt rör CC200	-0.70	± 0.09	-
Direkt mätning pulssvar	ingjutit system högt rör CC200	-0.68	± 0.09	-

I samtliga fall för de ”direkta mätningarna” (både stegsvaren och pulssvaret) har ett osäkerhetsbidrag för att den omgivande temperaturen i labbhallen förändras under mätperioden beaktats. Detta osäkerhetsbidrag är inkluderat i resultaten i Tabell 13. Det har antagits att labbhallstemperaturen förändrats med 0.2°C mellan ostörd drift och drift under påverkan av störningen. Detta osäkerhetsbidrag är det enskilt största i osäkerhetsbudgeten. För det lätta golvvärmen är totala osäkerheten för utnyttjandegarden $\gamma \pm 0.06$ – bidraget från en förändring i labbhallstemperaturen är ± 0.035 . Alltså, mer än halva osäkerhetsbidraget kommer från uppskattade förändringar i labbhallstemperaturen. För det ingjutna systemet med CC 300mm är bidraget ± 0.037 och för det ingjutna systemet med CC 200mm ± 0.028 .

För bestämningen av den konvektiva ytöverföringskoefficienten α_c har den totala mätosäkerheten uppskattas till $\pm 0.44 \text{ W/m}^2\text{K}$ (med täckningsfaktor $k=2$). Det är bidraget från temperaturskillanden mellan golvet och lufttemperaturen som bidrar med störst osäkerhet (25 %). Därefter är det isoleringsverkningsgraden η (22 %), emissiviteten ϵ för golvytan (12 %) samt temperaturskillanden mellan golvet och taket (12 %). Den antagna osäkerheten i temperaturdifferenser inkluderar även eventuella temperaturfördelningar i luften och de olika ytorna i testrummet (främst den uppvärmda golvytan).

Tabell 14 Mätosäkerheter för skattning av total mätosäkerhet för α_c

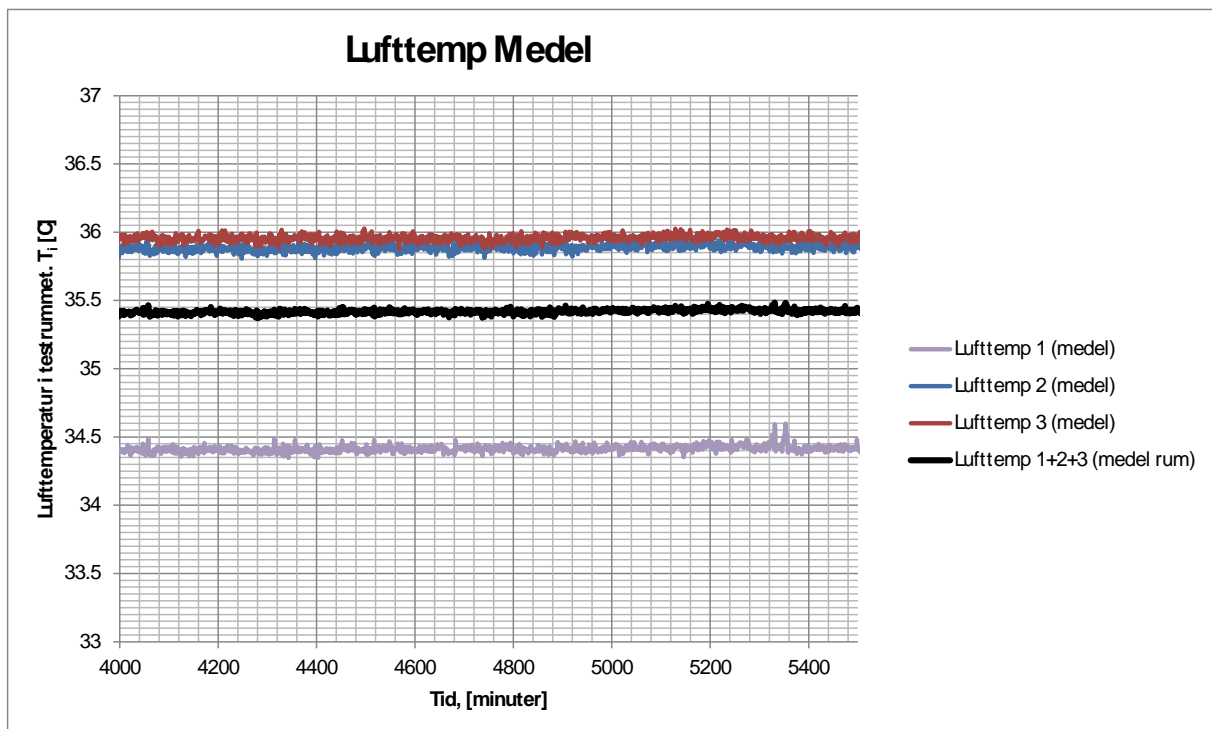
	Mätosäkerhet (k=2)	Fördelning	Enhet
Temperaturdifferenser:			
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{luft}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{tak}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{yttervägg}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{bakvägg}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{långvägg}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{långvägg med dörr}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
$\Delta T (T_{\text{golv}} - T_{\text{fönster}})$	± 0.15	Rektangulärt	K
Övrig data:			
Emissivitet, ϵ	± 0.05	Rektangulärt	-
Isoleringsverkningsgrad, η	± 0.024	Normal	-
$Q_{\text{golvvärme}}$	± 2.1	Normal	W
Total mätosäkerhet:			
Konvektiv värmeöverföringskoefficient, α_c	± 0.44		W/(m ² K)

Bilaga 3 – Experimentel bestämning av testrummets värmeförlusttal samt ytterväggens värmeförluster

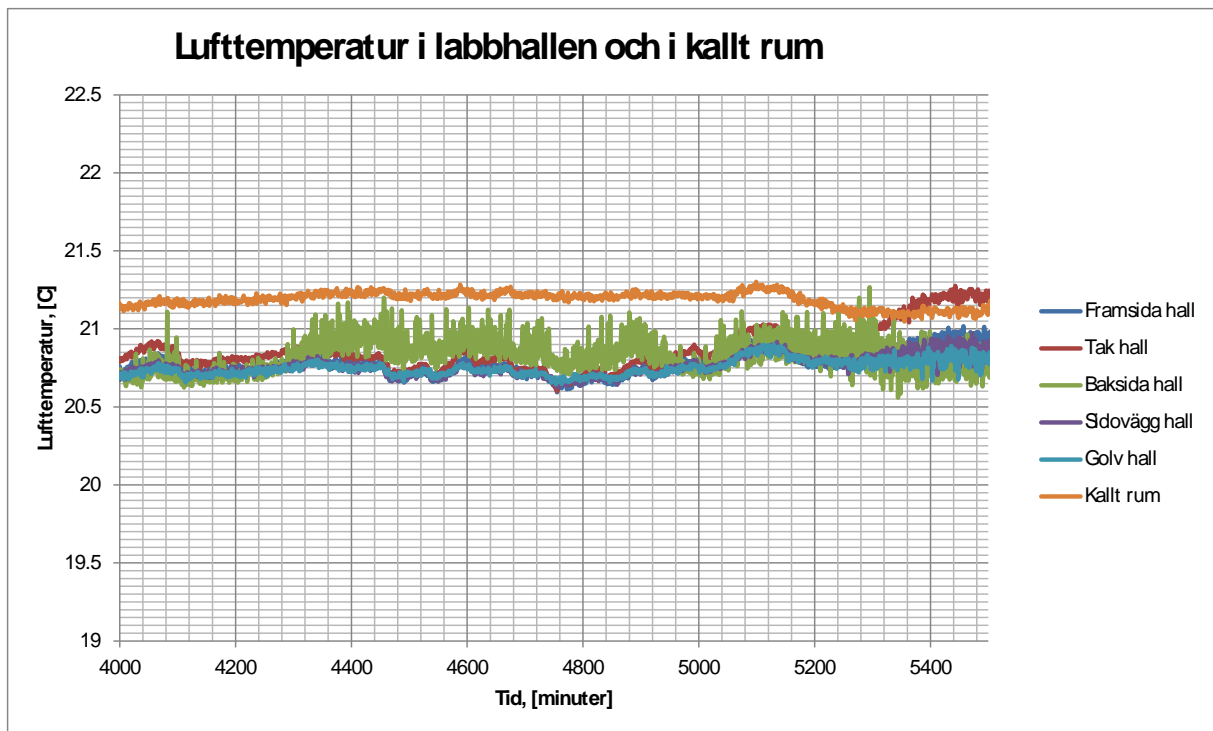
Syftet med detta delförsök är att bestämma testrummets värmeförlusttal. Golvvärmen är helt avstängd samtidigt som effekten till varmtråden i testrummet är på en konstant nivå ($Q_{el}=236\text{W}$, se Figur 26). Ventilationen i rummet är avstängd, försöket ger därför transmissionsförlusterna genom testrummets hela klimatskärm. Försöket ger både förluster till omgivningen i labbhallen och till det kalla rummet (bakom ytterväggen och fönstret). Förhållandena som rådde under försöket redovisas av Figur 23 till Figur 26. I den studerade perioden 4000-5500 minuter från försökets inledning är randvillkoren relativt konstanta, viss fluktuation i labbhallstemperaturen sker dock alltid. Perioden 0 till 4000 minuter är en transient period där värmen fördelar sig i konstruktionen tills ett stationärt tillstånd råder.

Värmeförlusttalet redovisas för varje minut under mätperioden i Figur 27. Medelvärdet under perioden är 16.20 W/K . Värmeförlusttalet beräknas enligt följande:

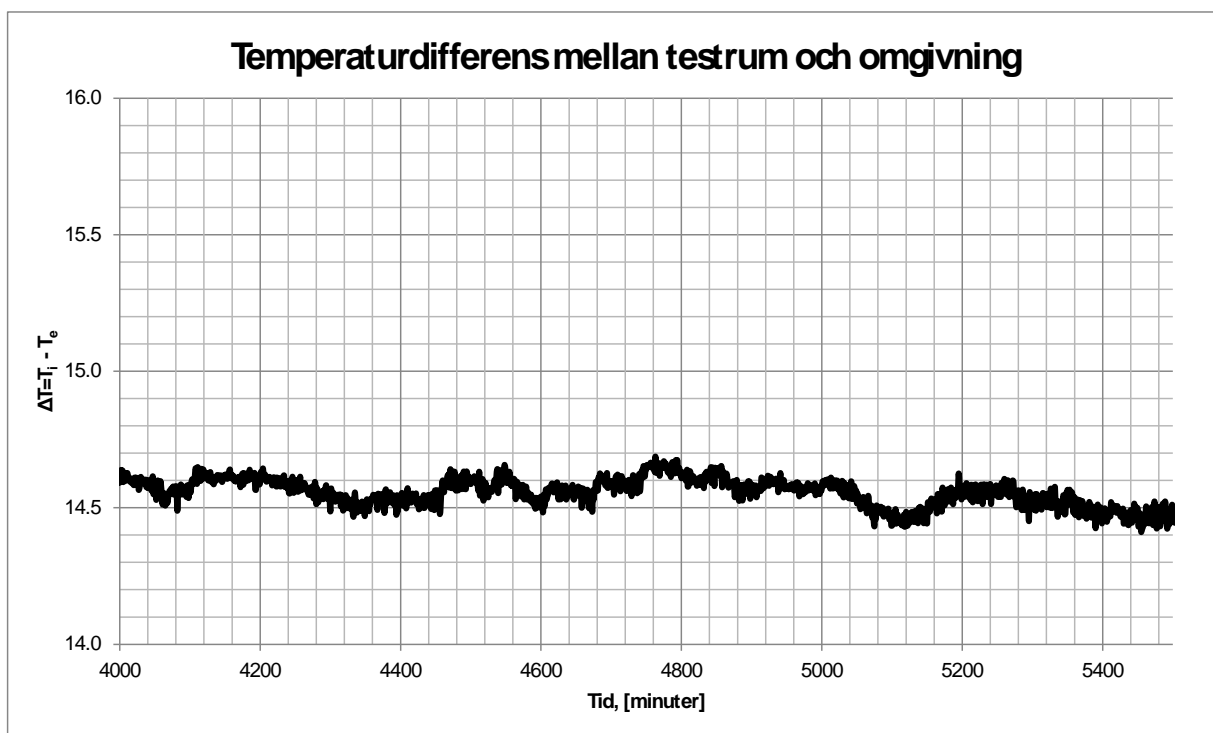
$$K_{trans}^{tot} = \frac{Q_{el}}{\overline{T}_{luft} - \overline{T}_{omgivning}}$$



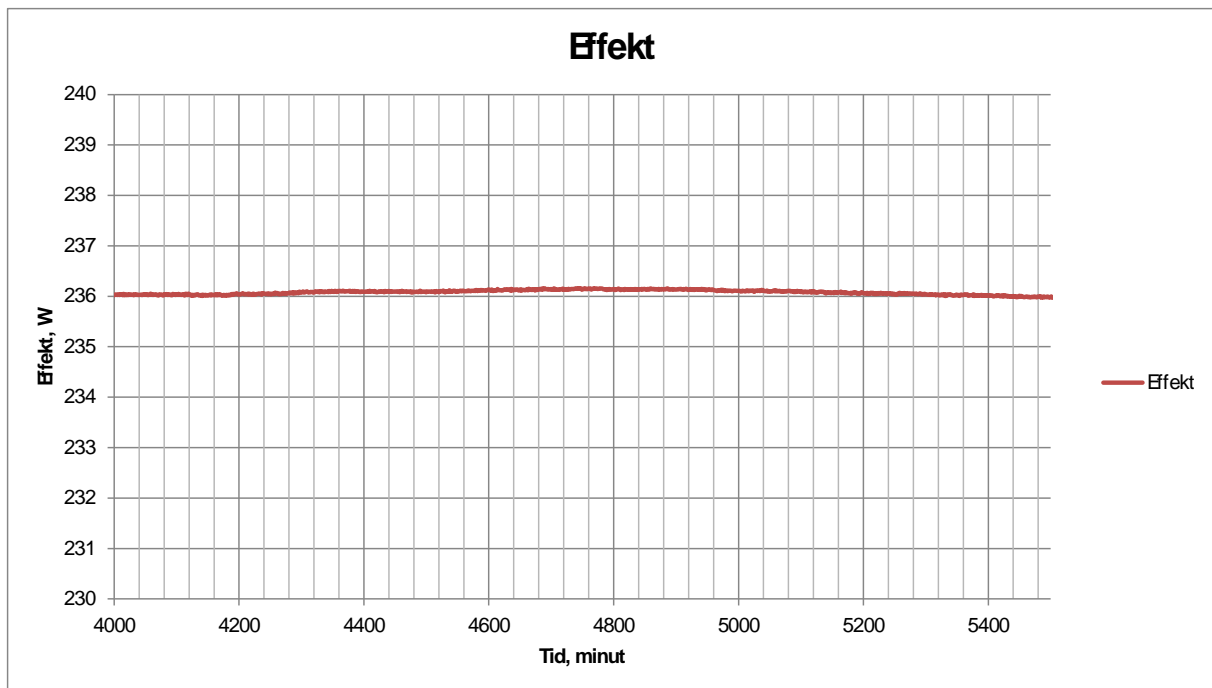
Figur 23 Lufttemperatur i testrummet under stationär period.



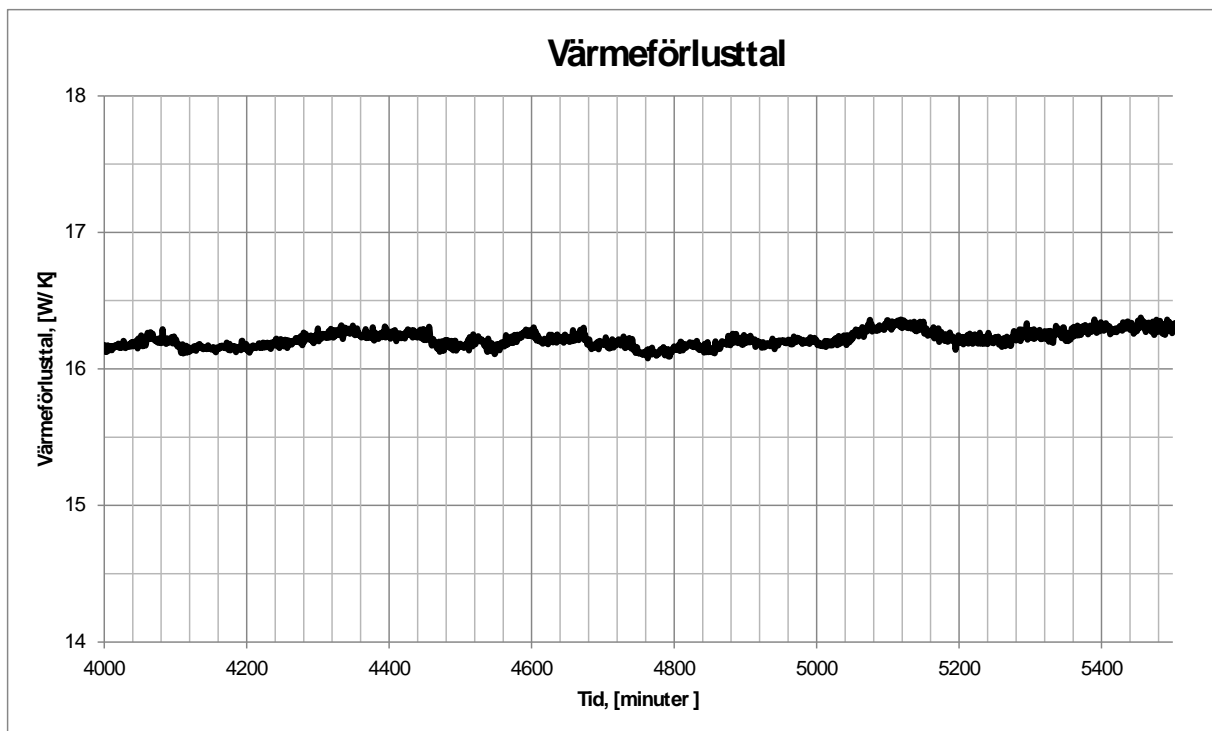
Figur 24 Lufttemperatur i omgivningen till testrummet under stationär period.



Figur 25 Medeltemperaturdifferensen mellan 27 mätpunkter i testrummets luft och sex mätpunkter i omgivningen (labbhall och kallt rum).



Figur 26 Tillförd eleffekt till varmtråd under stationär period.



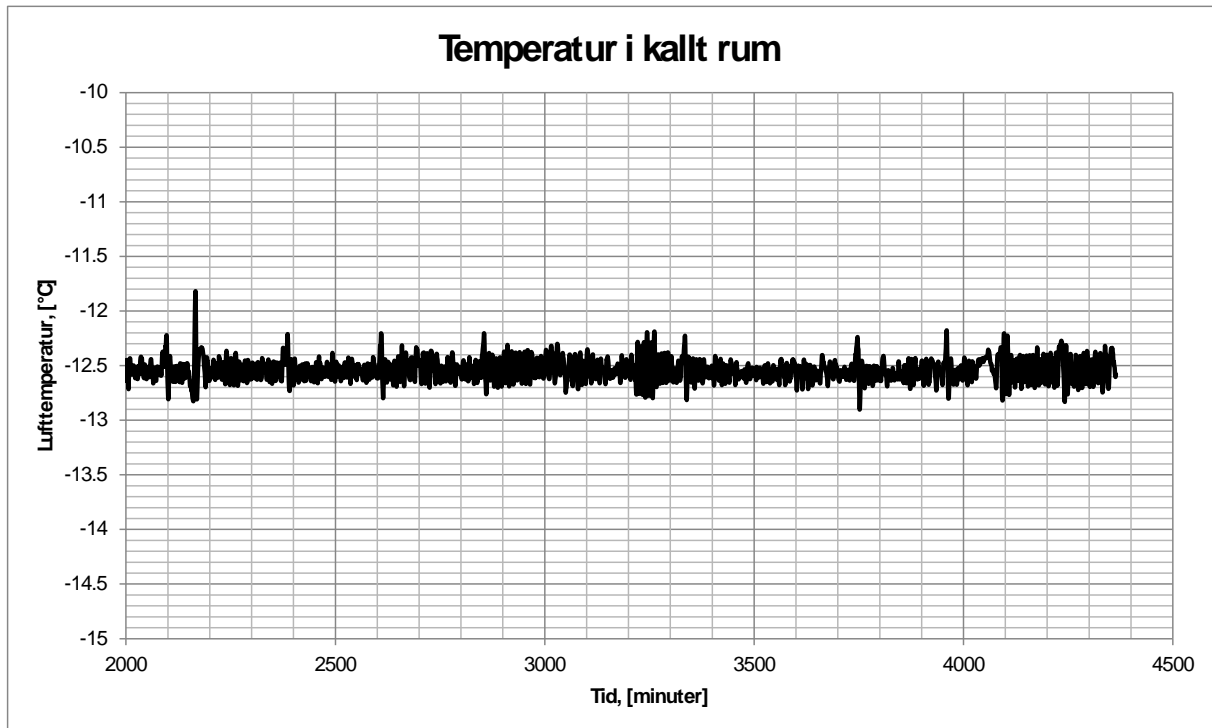
Figur 27 Beräknat värmeförlusttal K_{trans}^{tot} under stationär period (en minuts upplösning).

Transmissionsförlust – yttervägg med fönster

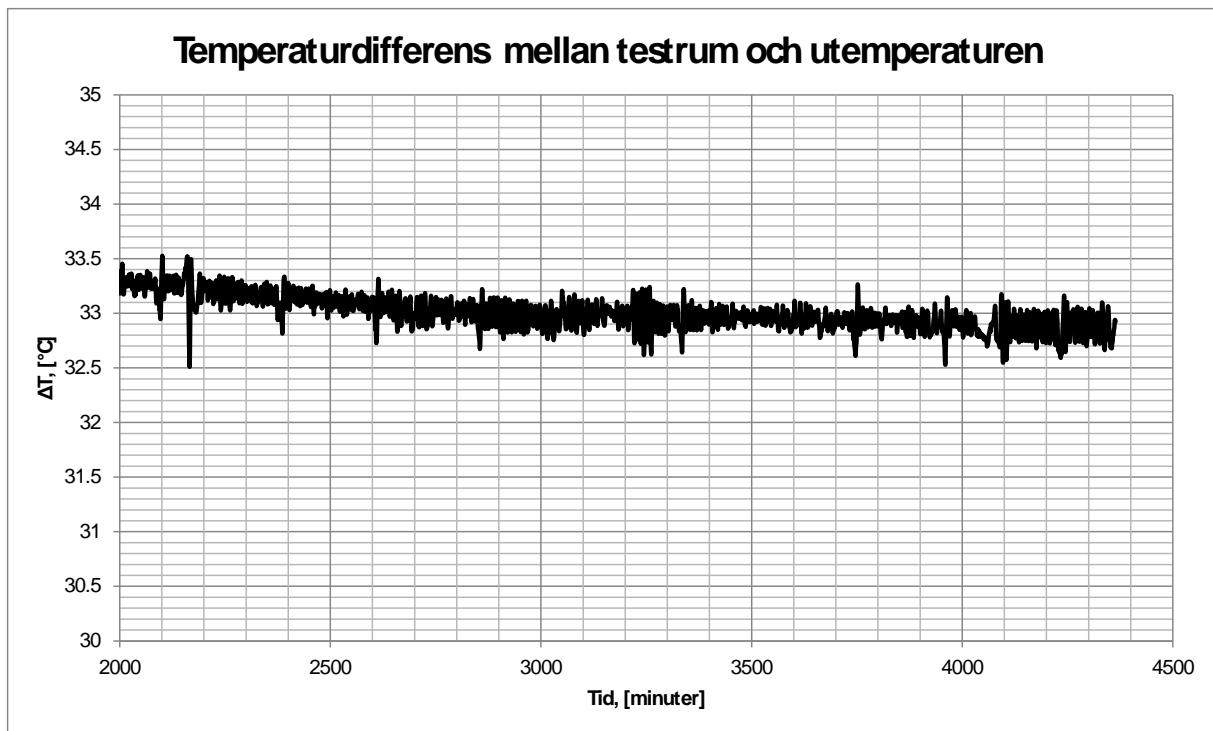
Utifrån tidigare mätning av K_{trans}^{tot} fastställs i detta delförsök värmeförlusttalet $K_{trans}^{vägg}$ genom testrummets yttervägg (vägg med fönster). Temperaturen hålls konstant på -12.5°C i det kalla rummet, se Figur 28. Temperaturen i labbhallen loggas under testperioden. Ventilationen och golvvärmen i testrummet är fortsatt avstängda. Värme tillförs testrummet med en konstant eleffekt (69.9W) till varmtråden, se Figur 31.

$$Q_{el} = (K_{trans}^{tot} - K_{trans}^{vägg}) \times (\bar{T}_{luft} - \bar{T}_{labb}) + K_{trans}^{vägg} \times (\bar{T}_{luft} - \bar{T}_{kall})$$

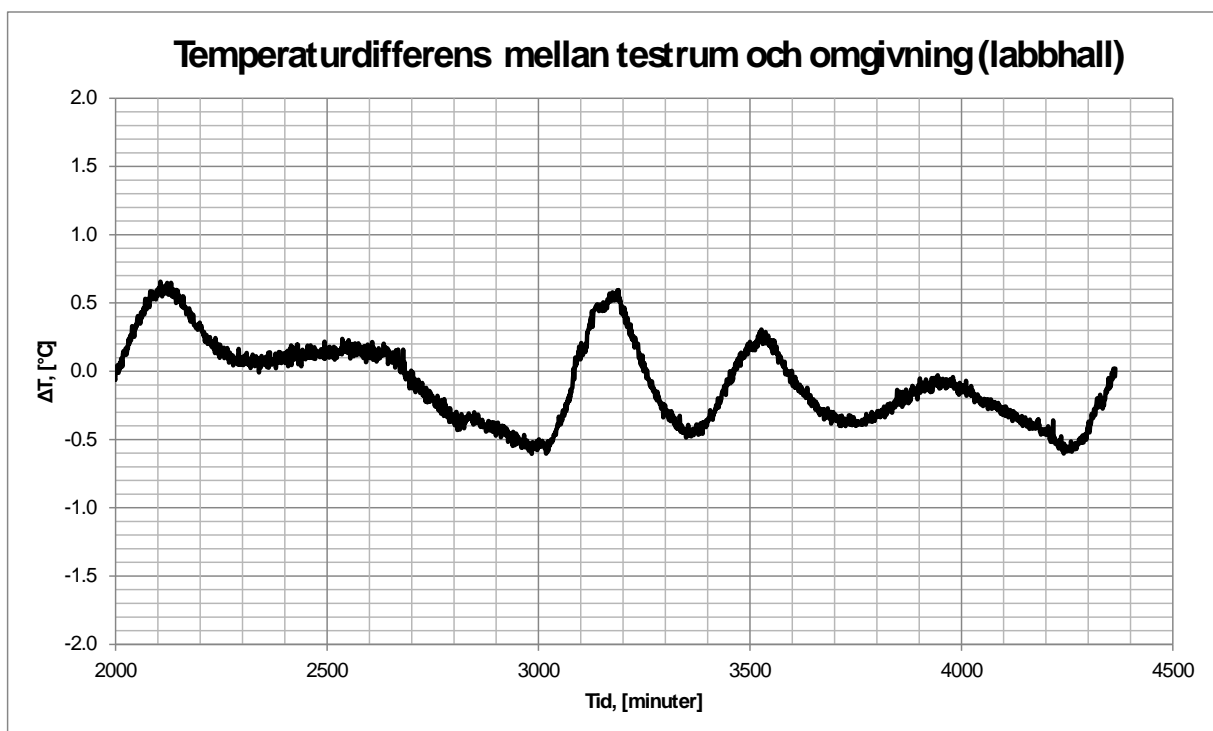
Temperaturdifferensen mellan testrummet och labbhallen är -0.08°C under mätseriens stationära del, se Figur 30. Transmissionsförlusten mellan testrummet och omgivningen under perioden blir därmed kraftigt begränsad. Däremot är temperaturdifferensen mellan testrummet och det kalla rummet hela 33.0°C under samma period, se Figur 29. Med dessa uppmätta randvillkor beräknas medelvärdet av värmeförlusttalet $K_{trans}^{vägg}$ till 2.15 W/K under mätseriens stationära del, se Figur 32.



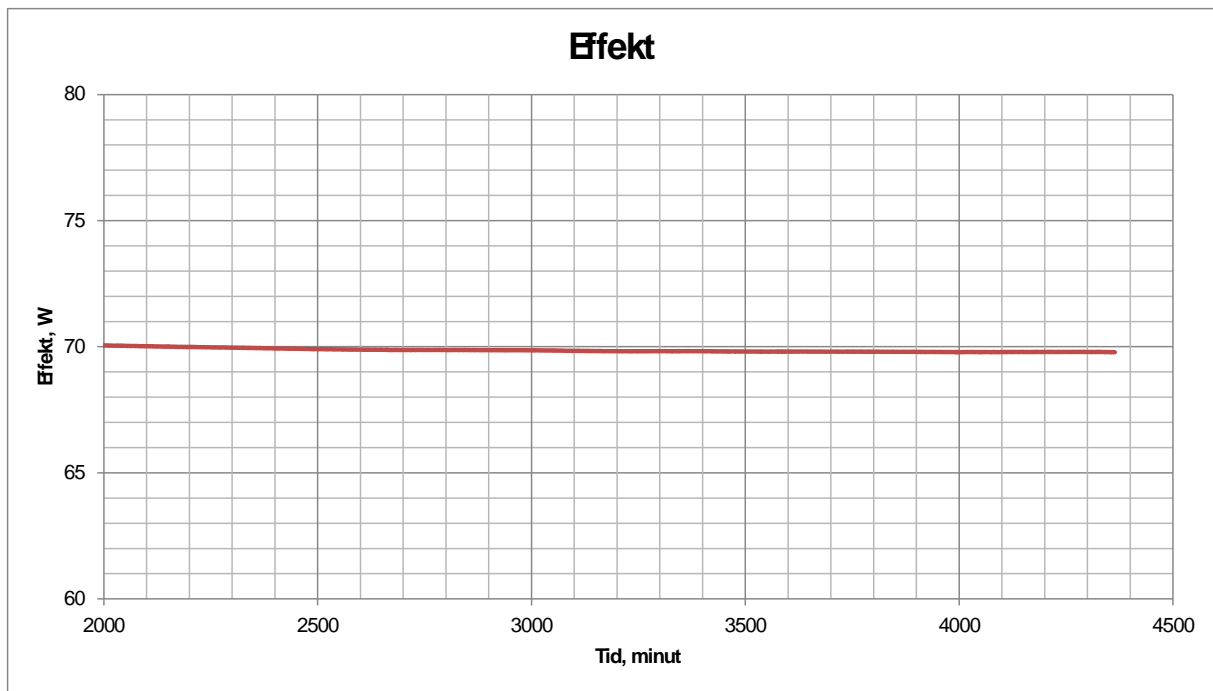
Figur 28 Temperatur i kalla rummet \bar{T}_{kall} som angränsar mot testrummets yttervägg.



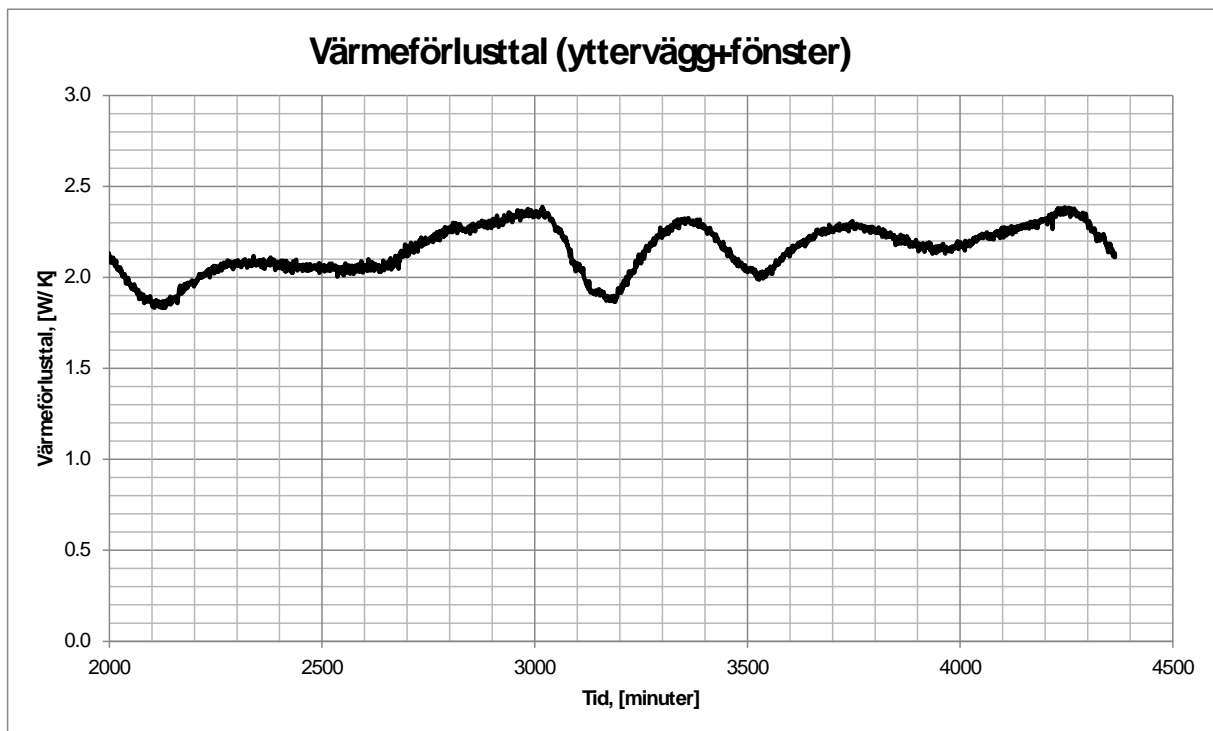
Figur 29 Medeltemperaturdifferensen mellan 28 mätpunkter i testrummets luft och det konditionerade kalla rummet \bar{T}_{kall} .



Figur 30 Medeltemperaturdifferensen mellan 28 mätpunkter i testrummets luft \bar{T}_i och fem mätpunkter i omgivningen (labballen) \bar{T}_{labb} .



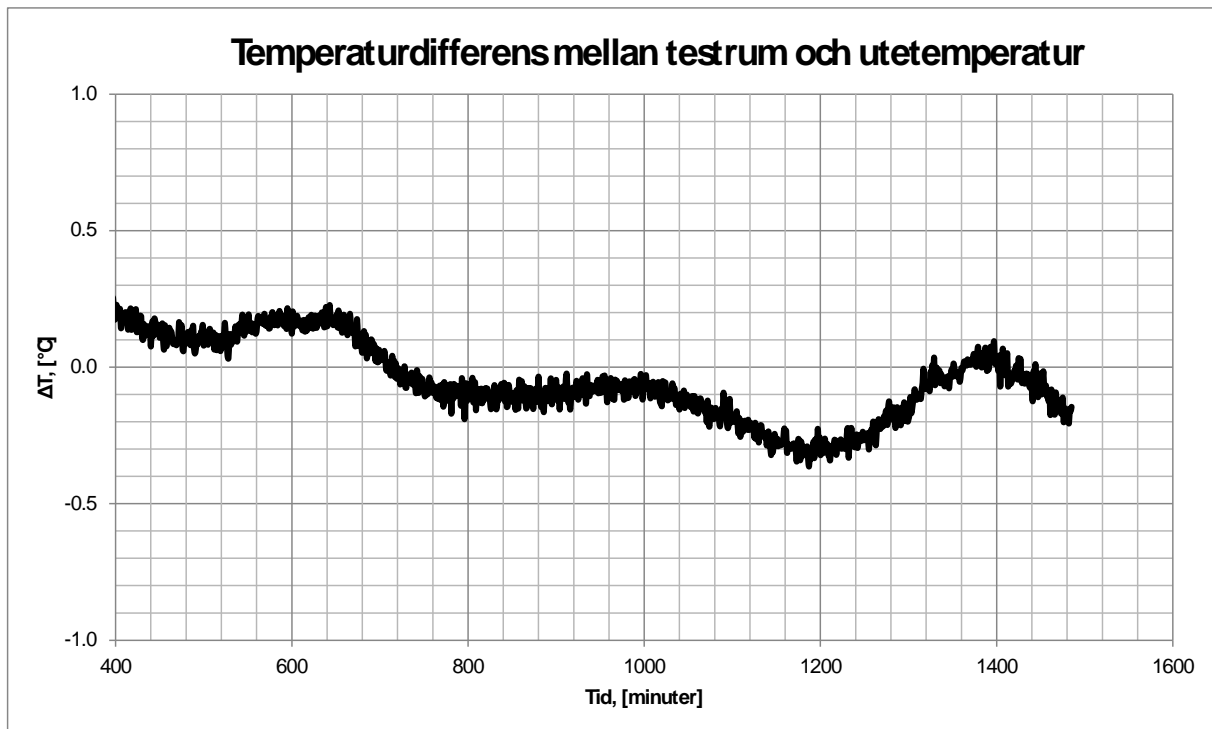
Figur 31 Eleffekt Q_{el} till varmtråden.



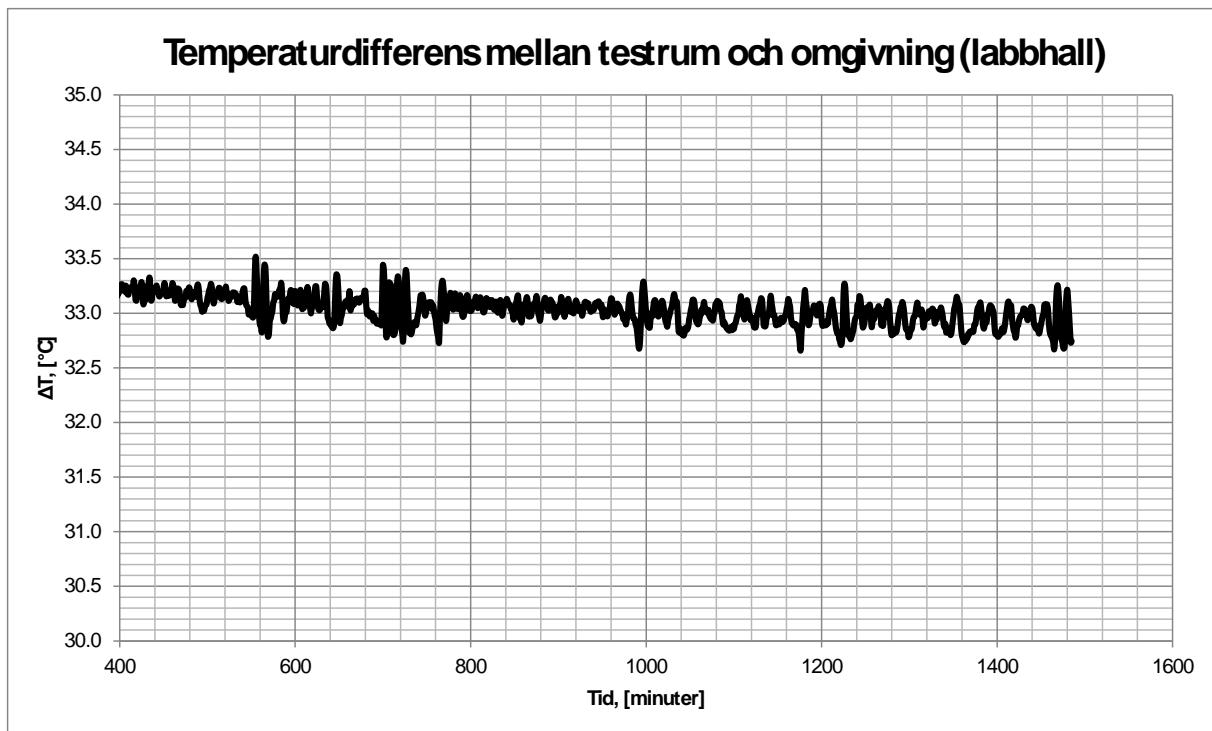
Figur 32 Beräknat värmeförlusttal $K_{trans}^{vägg}$ för ytterväggen och fönstret under stationär period (en minuts upplösning).

Bilaga 4 - Experimentell bestämning av isoleringsverkningsgrad

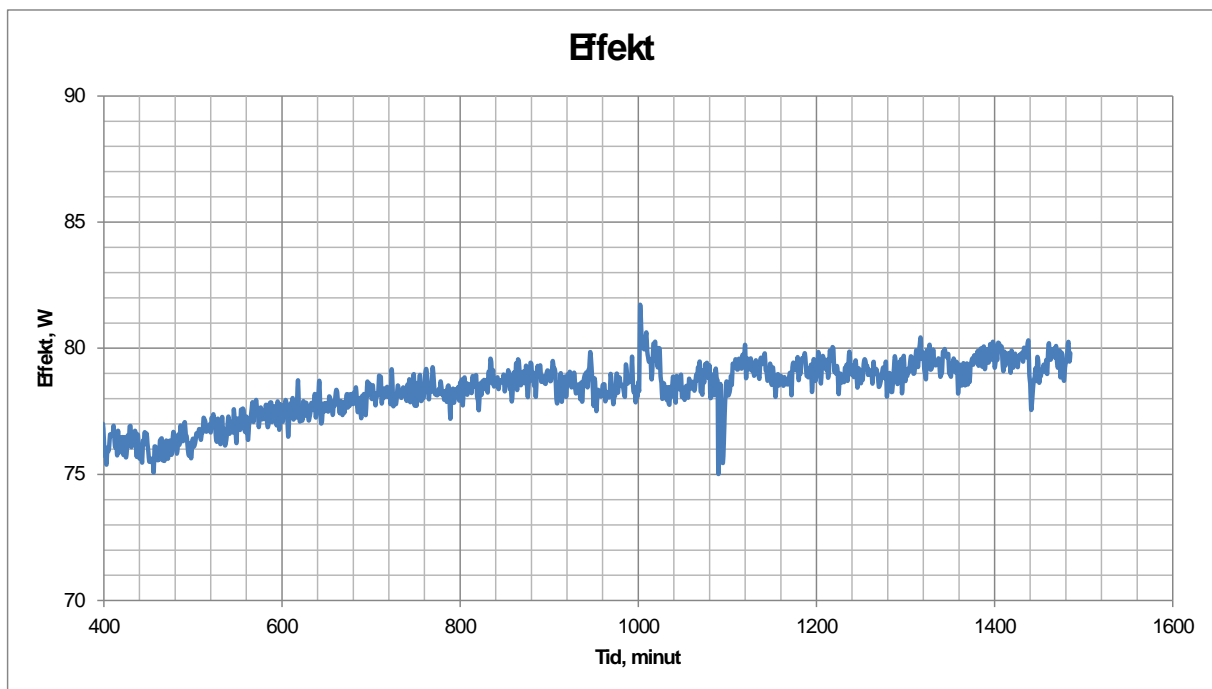
I detta delförsök värms rummet med det lätta golvvärmesystemet istället för med varmtråden. Randvillkoren är de samma som i föregående delförsök. Syftet är att fastställa hur stor andel av vattenslingas värmeeffekt som värmer upp testrummet.



Figur 33 Medeltemperaturdifferensen mellan 28 mätpunkter i testrummets luft \bar{T}_i och fem mätpunkter i omgivningen (labbhallen) \bar{T}_{labb} . Medelvärdet under stationär period är -0.15°C (1000 till 1486 min).



Figur 34 Medeltemperaturdifferensen mellan 28 mätpunkter i testrummets luft och det konditionerade kalla rummet \bar{T}_{kall} . Medelvärdet under stationär period är 32.86°C (1000 till 1486 min)



Figur 35 Värmeeffekt tillförd testrummet via golvvärmslingans vatten. Medelvärdet under stationär period är 79.1W (1000 till 1486 min).

Enkelt antagande: Temperaturskillnaderna mellan testrummet och dess omgivning antas vara samma med både golvvärme och varmtråd. Värmeeffekten som tillförs systemet, under liknande randvillkor, blir då: 69.9W (varmtråd) och 79.1W (golvvärme). Detta innebär att värmeförseln ökar med 9.3W

då golvvärmen används jämfört med att tillföra värmen i varmtråden, som i sin helhet är placerad inne i testrummet vilket i detta fall ger 100% utnyttjande av tillförd värme. Dessa 9.3W är enligt teorin ett ökat värmefflöde genom testrummets golv. Isoleringsverkningsgraden (η) anger andelen, av den till golvvärmslingen tillförda värmen, som kommer testrummet till godo. Baserat på de utförda mätningarna beräknas η till 88.3%.

$$\eta \times \bar{Q}_{gv} = \bar{Q}_{el}$$