

## **BYGGNADSIKTEGRERAD UPPVÄRMNING**

**UTVECKLING AV SIMULERINGSMODELL MED TILLÄMPNINGAR SAMT ANALYS AV ALTERNATIVA, FÖRENKLADE OCH SJÄLVREGLERANDE VATTENBURNA GOLVVÄRMESYSTEM I SMÅHUS**

Henrik Karlsson

Carl-Eric Hagentoft

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Byggnadsfysik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

# Innehållsförteckning

## Förord

Sammanfattning	
Inledning	1
<b>Del I Utveckling av simuleringsmodell med tillämpningar</b>	
En unik modellplattform	2
Tre simulerings exempel – bostadshus med mekanisk frånlufts- ventilation och ingjuten golvvärme	5
Ex 1. Termisk komfort – Operativ temperatur	7
Ex 2. Frånluftsvärmepump	8
Ex 3. Test av innovativa idé	11

## Del II Analys av alternativa, förenklade och självreglerande vattenburna golvvärmesystem i småhus

Möjligheter med förenklad golvvärme i välisolerade bostäder	13
Typisk systemuppbyggnad	13
Förenklat robust system	15
Simulering av ett förenklat golvvärmesystem i ett fristående bostadshus	16
Fördjupad analys av förenklade golvvärmesystem	19
Optimerad prognosstyrd framledningstemperatur	20
Exempel på optimerad prognosstyrning:	21
Störning i internvärme – Hur påverkar det innetemperaturen	25
Störning i internvärme – Hur påverkar det värmeförseln	27

Kvantifiering av självregleringens utnyttjandegrad	27
Exempel på självregleringens utnyttjandegrad $\gamma$	29
Slutsatser	31
Bilaga 1. Beskrivning av isoleringsverkningsgraden	33
Bilaga 2. Fördjupad beskrivning av ingående parametrar för kvantifiering av självregleringens utnyttjandegrad	35
Referenser	38

## Förord

Den här rapporten har tagits fram för att illustrera och exemplifiera några av de resultat som kommit fram inom ett forskningsprojekt om byggnadsintegrerad uppvärmning med fokus på golvvärme. Projektet har finansierats gemensamt av FoU-Väst/SBUF och Energimyndigheten.

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, Wäst Bygg, Magdalena Kvernes, NCC, Kent Haglund (tidigare JM) och Pär Åhman, BI. Från Chalmers har Angela Sasic Kalagasidis, Carl-Eric Hagentoft och Henrik Karlsson ingått.

Carl-Eric Hagentoft  
Henrik Karlsson

## Sammanfattning

Projektets syfte är att skapa förståelse och att utveckla verktyg för analysen av hur byggnadsintegrerad uppvärmning fungerar samt att utveckla riktlinjer för dess utformning.

Inom projektet har en avancerad simuleringsmodell utvecklats och validerats. 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 används till att analysera värmesystemets självreglerande förmåga. Vidare har en metod för prognosstyrning av värmetröga golvvärmesystem utvecklats där beräkningsmodellen är essentiell.

Resultat från forskningsprojektet visar att 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 får därmed en lägre investeringskostnad än det traditionella systemet med rumsreglering via termostater.

## Inledning

I ett byggnadsintegrerat uppvärmningssystem tillförs byggnadens behov av värme via ett aktivt inflöde av värme till en del av byggnadens klimatskal. Golvvärme är den i särklass vanligaste tillämpningen av byggnadsintegrerad uppvärmning. Enligt en studie av Energimyndigheten (2001) var upp till 70 % av Sveriges småhusproduktion utrustade med golvvärme. Ur en teknisk synvinkel kan konstateras att det finns både för- och nackdelar med byggnadsintegrerad uppvärmning. Byggnaden och dess klimatskal måste anpassas till de särskilda förutsättningar som ges av golvvärmesystemet för att den tillförda värmen skall komma byggnaden till nytta på bästa sätt.

Den slutliga energianvändningen i den svenska bostads- och servicesektorn utgör ca 36 % av den totala energianvändningen i samhället. Den uppskattade temperaturjusterade slutliga energianvändningen för uppvärmning och varmvatten inom bostads- och servicesektorn uppgick till 78.2 TWh år 2007 (Energimyndigheten, 2009). Enligt Sveriges miljökvalitetsmål: *Den totala energianvändningen per uppvärmd areaenhet i bostäder och lokaler minskar. Minskningen bör vara 20 procent till år 2020 och 50 procent till år 2050 i förhållande till användningen 1995. Till år 2020 ska beroendet av fossila bränslen för energianvändningen i bebyggelsesektorn vara brutet, samtidigt som andelen förnybar energi ökar kontinuerligt.* Enligt EU direktivet om byggnaders energiprestanda (2002/91/EC) skall alla EU stater säkerställa att energianvändningen i alla nya byggnader är ”nära-noll” samt att en betydande del av energin kommer från förnyelsebar till år 2020. Skärpningar i Boverkets byggregler (BBR) är att vänta, 20 % reduktion 2011 och 50 % reduktion 2015. En inte så vågad framtidsutsikt är att nya byggnaderna i framtiden kommer ha betydligt lägre värmeförluster jämfört med dagens samhällskrav enligt BBR. Tillförseln av värme till bostäder kommer att minska vilket innebär att dagens tekniska lösningar kan behöva utvecklas för att möta framtidens behov.

De alternativa energislagen (t.ex. solvärme och lågvärdig spillvärme) förutsätter ofta lågtempererade system med vatten som värmebärare. För att kunna använda dessa krävs god kännedom om byggnadens och de tekniska installationernas egenskaper. Om de inte är "kompatibla" med varandra kan energianvändningen bli hög och inomhuskomforten bristfällig. Kombinationen av en välisolerad byggnad med ett byggnadsintegrerat vattenburen uppvärmningssystem (golvvärme) leder till att framledningstemperaturen är extremt låg – endast några få grader över önskad rumstemperatur. Detta ger fördelar i form av lägre omvandlings- och distributionsförluster i energisystemets genererings- och distributionsskede samt större möjligheter till att utnyttja lågtempererade förnyelsebara energikällor.

# Del I Utveckling av simuleringsmodell med tillämpningar

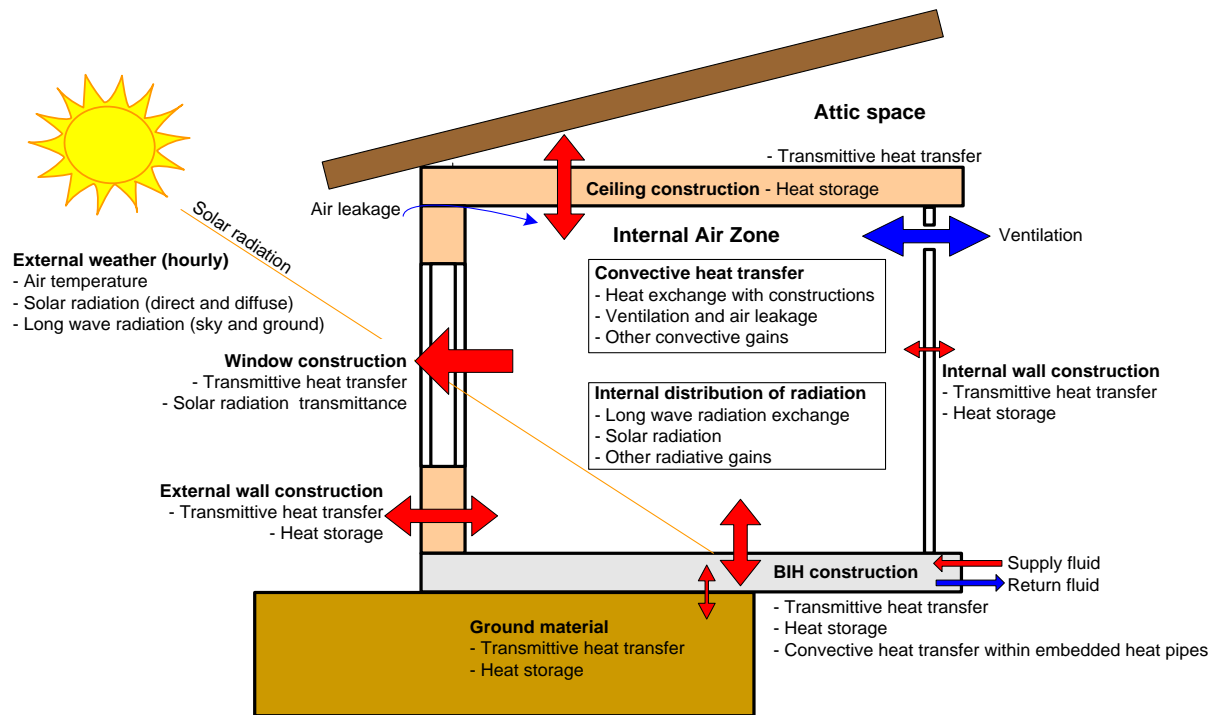
## En unik modellplattform

Simuleringsmodellen har byggts på en plattform, HAM-Tools, utvecklad med hjälp av "International Buildingphysics Toolbox in Simulink" (<http://www.ibpt.org>). Den fritt tillgängliga simuleringsplattformen har tagits fram i ett samarbete mellan Chalmers och DTU. Plattformen och dess ingående modellmoduler kan laddas ner på Internet och moduler kan tillföras, laddas upp fritt, så länge strukturen upprätthålls och en tydlig dokumentation finns tillgänglig. Olika byggnadsfysikaliska förlopp kopplade till värme-, fukt- och lufttransport samt installationstekniska lösningar kan simuleras i detalj. Vi har erfarenheter av modellarbete allt från komfort och fuktsituation i personbilar, emissioner (VOC) upptagning och spridning till rena energibalansproblem i byggnader (Sasic, Hagentoft 2005). Modellerna har validerats (Sasic, 2004) för olika applikationer.

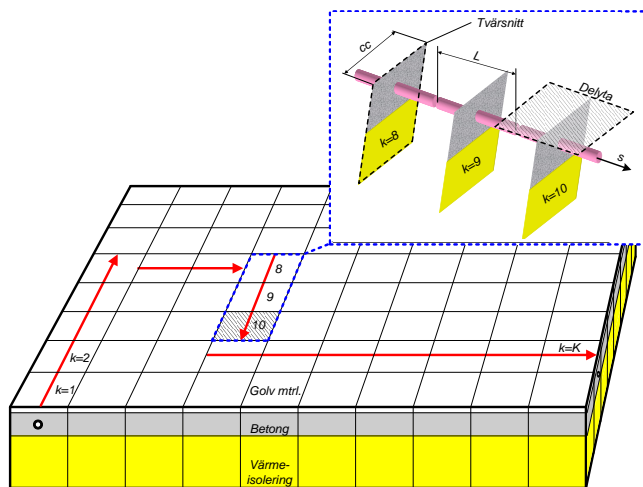
Figur 1 illustrerar de olika komponenter och processer som knyts samman för systemanalys av en byggnadskomponent, rum eller byggnad. Exemplet visar speciellt tillämpningen med golvvärme. Motsvarande simuleringsmodell exemplifieras i Figur 3 där de olika komponenterna kopplas samman till ett dynamiskt system i ett grafiskt användargränssnitt. Anpassningsgraden av varje enskild komponent och hur de kopplas samman är i det närmaste oändlig, moduluppbyggnaden ger en mycket stor flexibilitet då olika byggnadskomponenter, rum eller byggnader studeras.

Speciellt för byggnadsintegrerad uppvärmning med vattenburna och ingjutna värmerör har en unik komponent utvecklats. Under simuleringen hanteras värmeväxlingen mellan det strömmande vattnet och rörens omgivande betong, se Figur 2. Antalet "golvrutor" visar på vilken upplösning som används. Varje ruta växelverkar i sin tur konvektivt med rummets luft och via värmestrålning till rummets alla övriga ytor. På så sätt kan värmeförseln till ett rum beräknas på ett unikt och detaljerat sätt. Tack vare modulsystemet kan flera rum med byggnadsintegrerad uppvärmning beräknas parallellt, studier av hela byggnaden som ett system är därmed möjlig.

Hela simuleringsplattformen är speciellt användbar för att studera funktionen, för en byggnadskomponent, ett rum eller en hel byggnad, över tiden. De dynamiska egenskaperna, t.ex. olika byggnadsdelars förmåga att lagra värme i byggnadens stomme men även i det ingjutna värmesystemet, beaktas för varje delkomponent i modellen. Det yttre klimatet förändras även det över tiden. De tekniska installationerna i byggnaden skall i möjligaste mån klara av att kompensera för dessa variationer. Vid simulering av en byggnad kan både statistiskt, verklig eller syntetisk klimatdata inkluderas i modellen. Bland annat utomhustemperaturen, solens intensitet, lufthastigheten samt luftfuktigheten kan inkluderas i klimatdatan. Vanligtvis är används en upplösning på timnivå för klimatdatan, se Figur 4 för ett exempel.

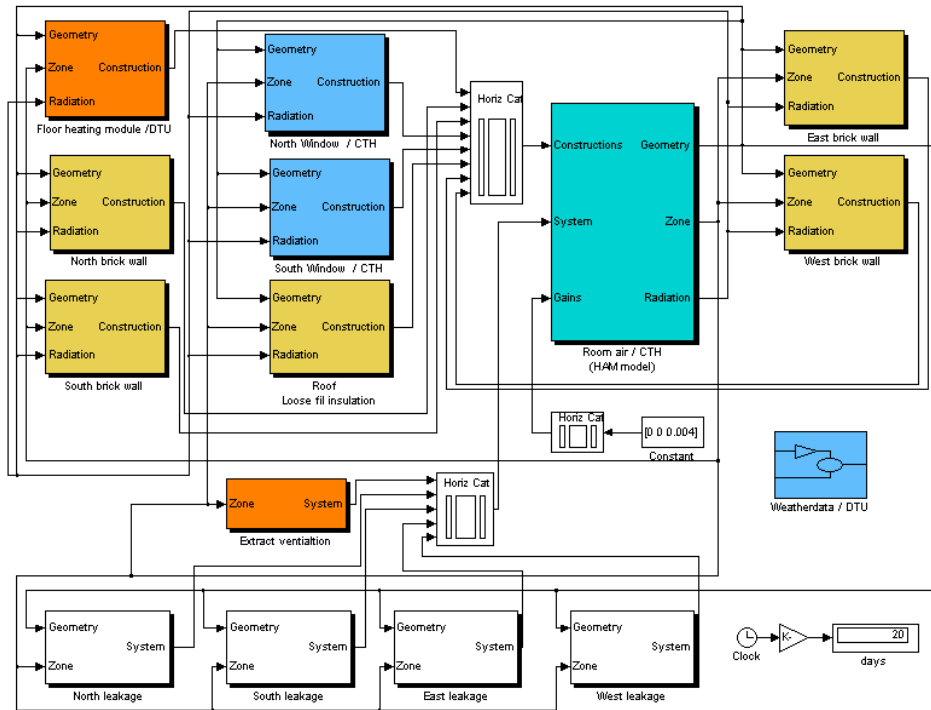


Figur 1 Systemanalys av byggnad med golvvärme.

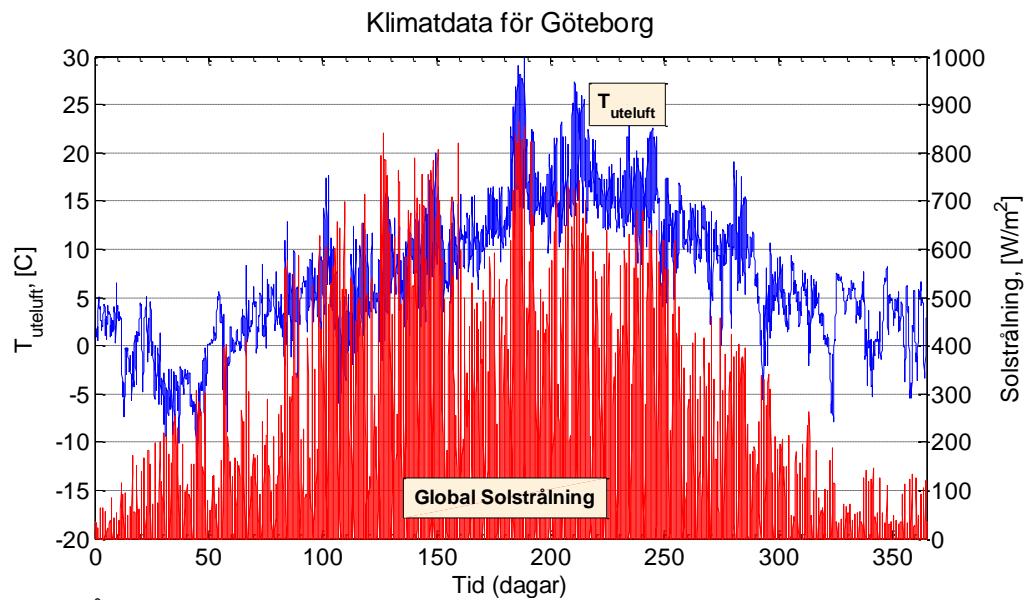


Figur 2 Illustration över hur detaljerat värmerören kan läggas ut i golvet.





Figur 3 Exempel på HAM-Tools grafiska modulstruktur.

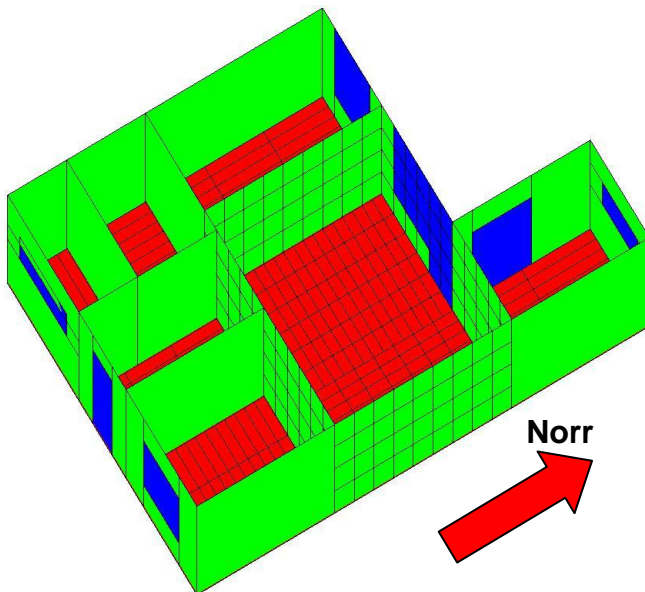


Figur 4 Årsvariationen för uteluftens temperatur samt den globala solstrålningens intensitet mot en horisontell yta.

## Tre simuleringsexempel – bostadshus med mekanisk frånluftsventilation och ingjuten golvvärme

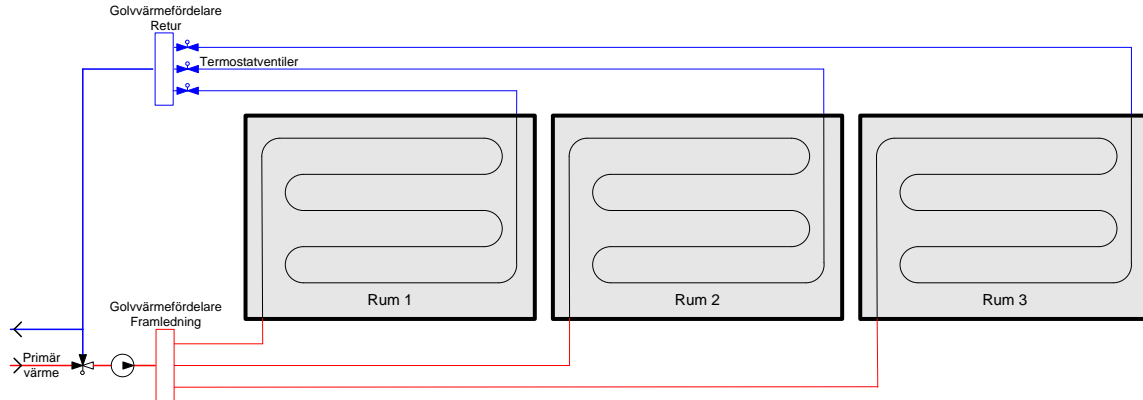
Golvvärmesystemets funktion och den termiska komforten i ett fristående enplans bostadshus har studerats med det beskrivna simuleringsverktyget. Syftet med simuleringsexemplet är att påvisa typiska frågeställningar relaterade till golvvärmesystemets funktion samt att belysa beräkningsverktygets möjligheter.

Byggnadens planlösning illustreras i Figur 5. Husets klimatskärm och installationer är dimensionerande så att den specifika energianvändningen uppfyller de krav som anges i BBR06. Byggnaden har en termiskt lätt stomme uppbyggd av träreglar, utvändigt träpanel samt invändiga gipsskivor. Grundläggningen utförs med hjälp av en 100 mm tjock betongplatta på mark. I våtutrymmet används keramiska plattor som golvmaterial, i övriga rum används en 12mm träparkett. Ett mekaniskt frånluftssystem där ouppvärmd tilluft tillförs sovrummen, vardagsrummet och köket, frånluften tas ut genom badrum, serviceutrymme samt kök. Det totala luftflödet är 40 l/s, detta flöde motsvarar 0.6 luftomsättningar i timmen. Sammanfattningsvis kan sägas att den studerade byggnaden skall utgöra ett relativt tidstypiskt fristående bostadshus.



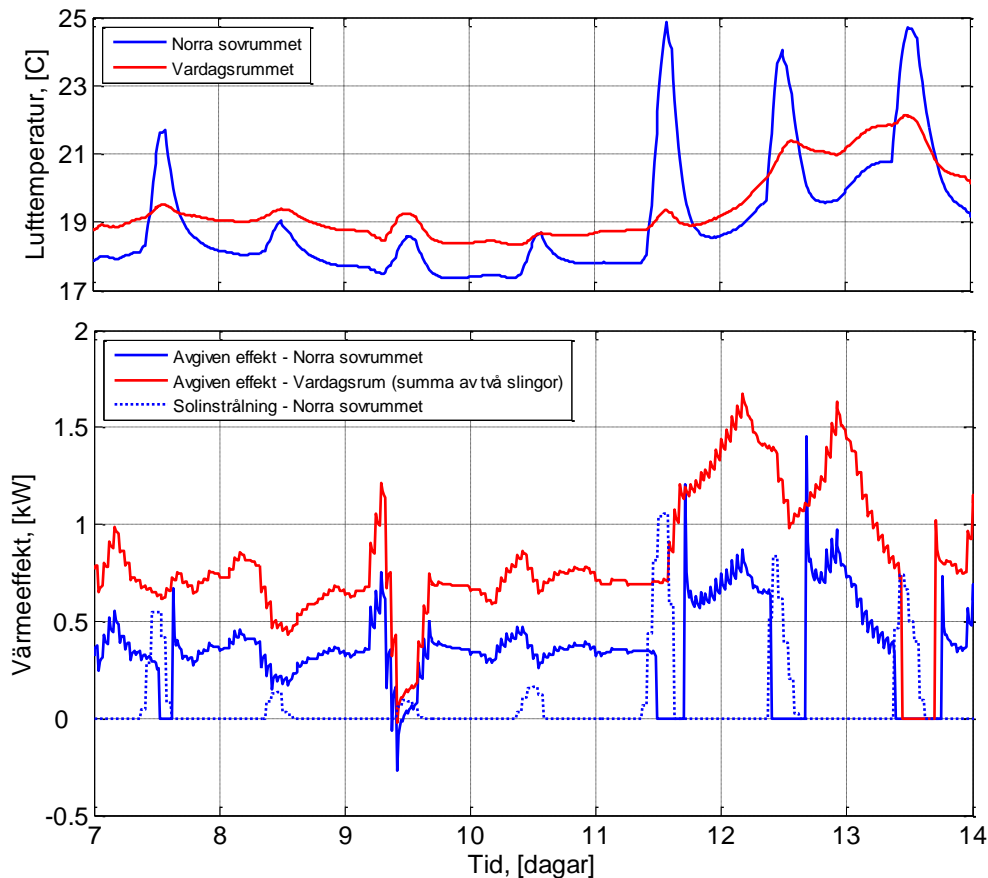
**Figur 5** Trådmodell i 3D som illustrerar byggnadens geometri med tre rum och kök samt badrum och serviceutrymme. Figuren visar även samtliga delar för golv, fönster, inner- och yttreväggar i modellen.

I betongplattan är golvvärmesystemets ingjutna värmeslingor installerade med ett konstant CC-mått mellan slingorna på 300mm. Golvvärmesystemet är uppdelat i åtta golvvärmekretsar som alla är inkopplade till en golvvärmefördelare där en gemensam framledningstemperatur pumpas in i varje individuell krets. För varje golvvärmekrets finns en termostatventil som antingen kan slå av eller på vattenflödet i respektive slinga. Termostatventilerna regleras med hjälp av lufttemperaturen i respektive rum, ett dödband med en övre och en undre lufttemperatur tillämpas för att reglera ventilens av- respektive påslag. En principskiss för golvvärmesystemet illustreras i Figur 6.



**Figur 6 Inkoppling av byggnadens golvvärmesystem till gemensam framledningstemperatur med rumstermostater.**

Den övre delen av Figur 7 visar beräknade lufttemperaturer för två av byggnadens rum då golvvärmesystemet är i drift. Under den simulerade perioden påverkar värmen från solinstrålningen, under klara och kalla dagar, avsevärt lufttemperaturen i sovrummet, se nedre del av Figur 7. Under vissa perioder aktiveras rumstermostaten och slår av vattenflödet till sovrummets slinga. Den avgivna värmeeffekten från vattnet i slingorna till den omgivande betongplattan illustreras i nedre delen av Figur 7.

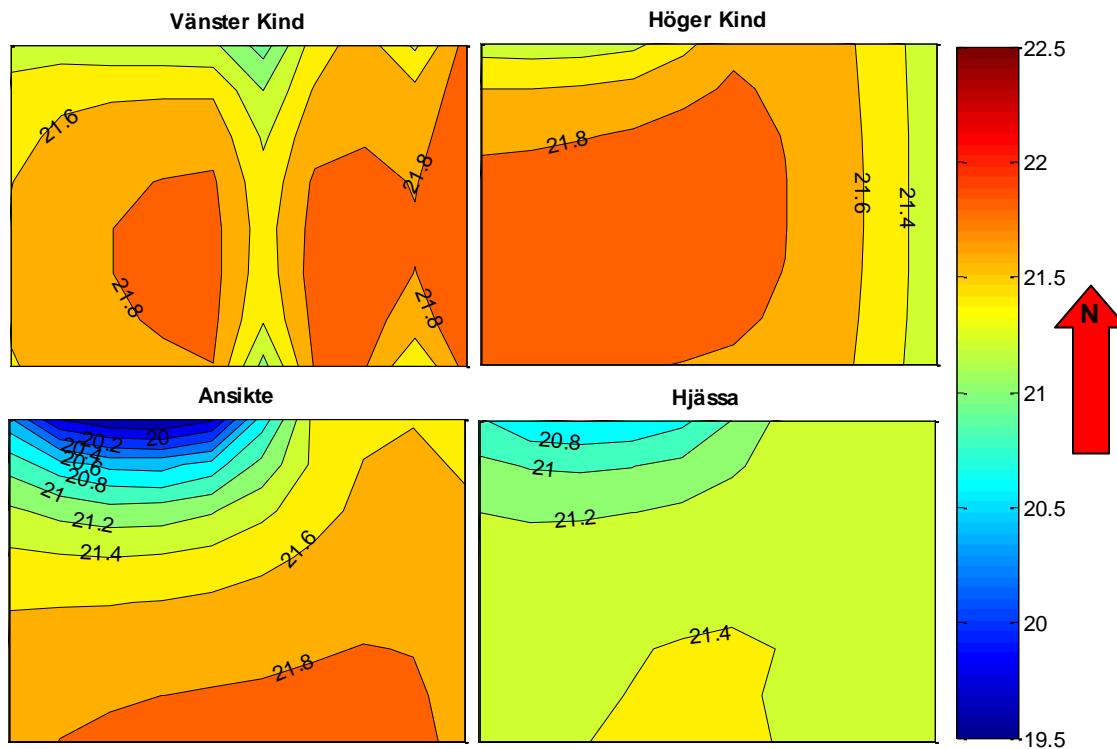


**Figur 7 Beräknade lufttemperatur samt beräknade värmeeffekter till respektive golvkonstruktion i två rum under en januarivecka. Punktlinjen visar solinstrålningen i det norra sovrummet.**

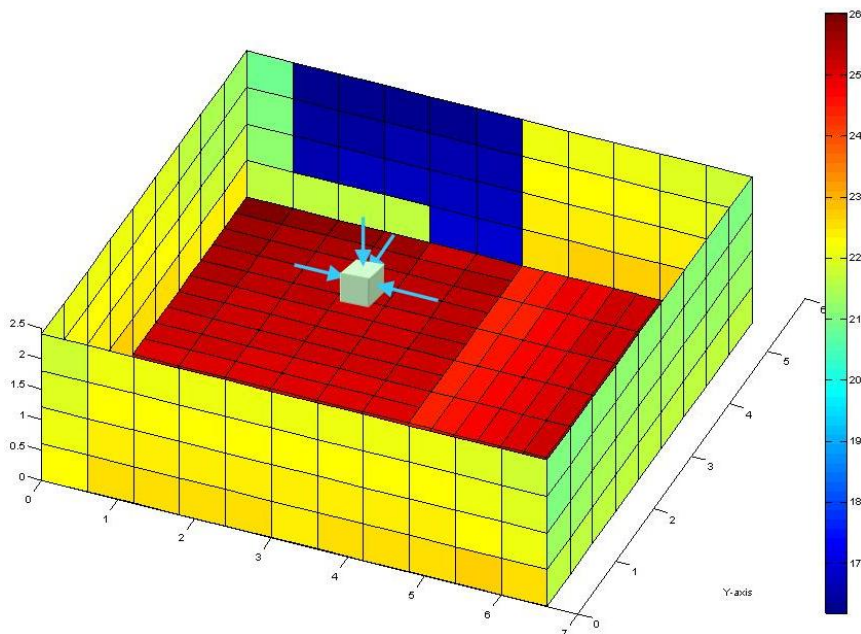
### Exempel 1: Termisk komfort – Operativ temperatur

Upplevelsen av termisk komfort beror av en människokroppens termiska omgivning. Kroppen växelverkar konvektivt med den omgivande luften, via värmestrålning med alla omgivande andra ytor samt genom ledning mot golvet som man är i beröring med. Med hjälp av den framtagna simuleringsmodellen kan den termiska komforten beräknas i detalj, vid känd eller antagna luftrörelser. I modellen görs avancerade beräkningar av värmestrålningsutbytet som är speciellt viktigt vid byggnadsintegrerad uppvärmning. En större del av värmeavgivningen från golvet med värmerör sker just med hjälp av värmestrålning från den invändiga uppvärmda byggnadsytan, golvet i det här fallet.

I komfortmodellen beskrivs huvudets olika delar så att de i princip motsvarar formen av ett rätblock. För huvudets respektive sidor beräknas den operativa temperaturen utifrån yttemperaturfördelningen i det aktuella rummet samt luftens temperatur. Figur 8 illustrerar en ögonblicksbild av den upplevda termiska komforten i alla tänkbara positioner i vardagsrummet (rummet med fönster och en altandörr i Figur 5). Den beräknade yttemperaturfördelningen visas i Figur 9. Komfortberäkningar baseras på den givna yttemperaturfördelningen och lufttemperaturen. Den termiska komforten kan, om man så vill, kopplas samman med byggnadens regleringssystem i simuleringsmodellen.



Figur 8 Beräknad operativ temperatur mot kinder, ansikte och hjässa för olika positioner utmed rummets golv. Ansiktet riktas alltid mot den norra ytterväggen (figurernas övre del är riktad mot den norra väggen).



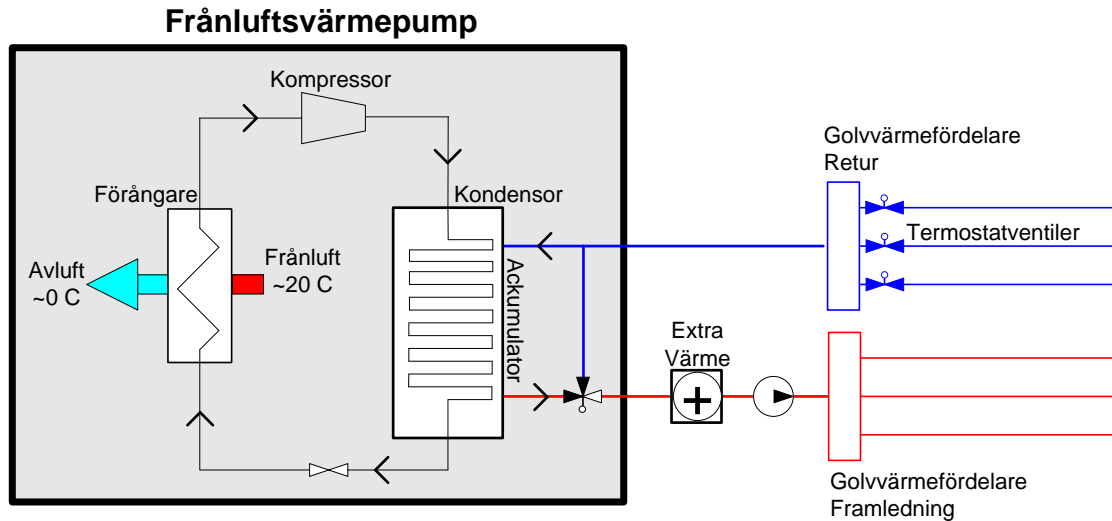
**Figur 9** Ögonblicksbild av ytemperaturfördelningen för rummets golv, väggar och fönster i ett ögonblick då golvvärmsystemet är i full drift. Utomhustemperaturen är i detta fall  $-5.6^{\circ}\text{C}$  medan inomhusluften är tempererad till  $+20.8^{\circ}\text{C}$ .

Exemplet visar att den termiska komforten kan beräknas i valfri position i ett rum. Även förändringar i komforten över tiden är möjliga att studera i detalj. Speciellt intressant är strålningsfenomen från kalla ytor i klimatskärmen t.ex. fönsterytor.

Vetenskaplig referens: Karlsson och Hagentoft (2005) samt Karlsson (2008).

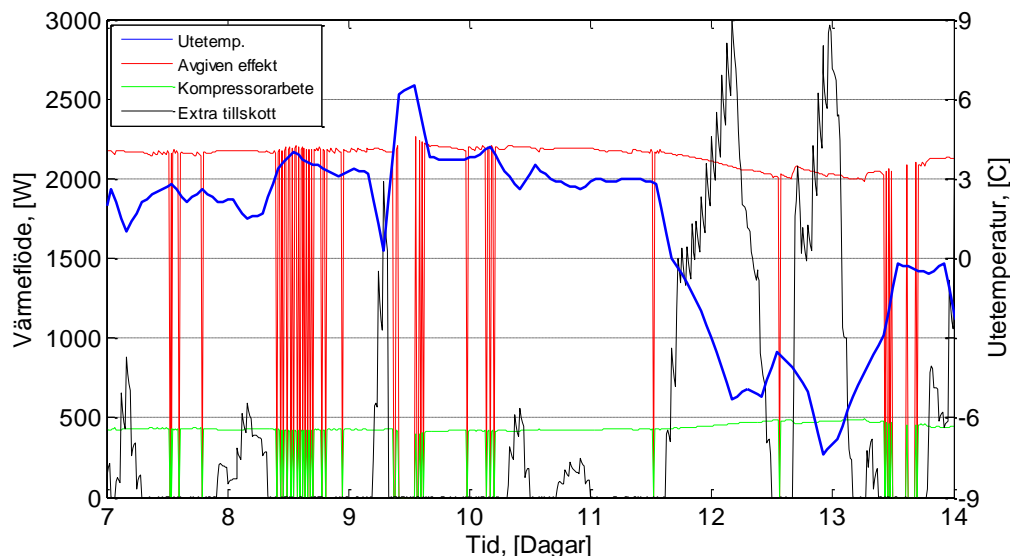
### **Exempel 2: Frånluftsvärmepump**

Det här exemplet visar vad som händer då en värmepump kopplas till frånluften. Systemet drar nytta av den energi som finns i den uppvärmda luft som lämnar byggnaden, se Figur 10 nedan. Värmen nyttiggörs och höjer temperaturen som kommer i retur från golvet. Framledningstemperaturen, dvs. temperaturen på det vatten som strömmar in i golvslingorna, regleras på samma sätt som i grundfallet, vilket innebär att extra värme måste tillföras under vissa perioder för att en viss, av reglersystemet, krävd framledningstemperatur hålls till varje värmeslinga. Å andra sidan kan, under perioder med högre utetemperatur eller innetemperatur (t.ex. pga. solinstrålning), temperaturen vara så hög på vattnet efter värmepumpens värmeavgivning att inget extra värme behöver tillföras.



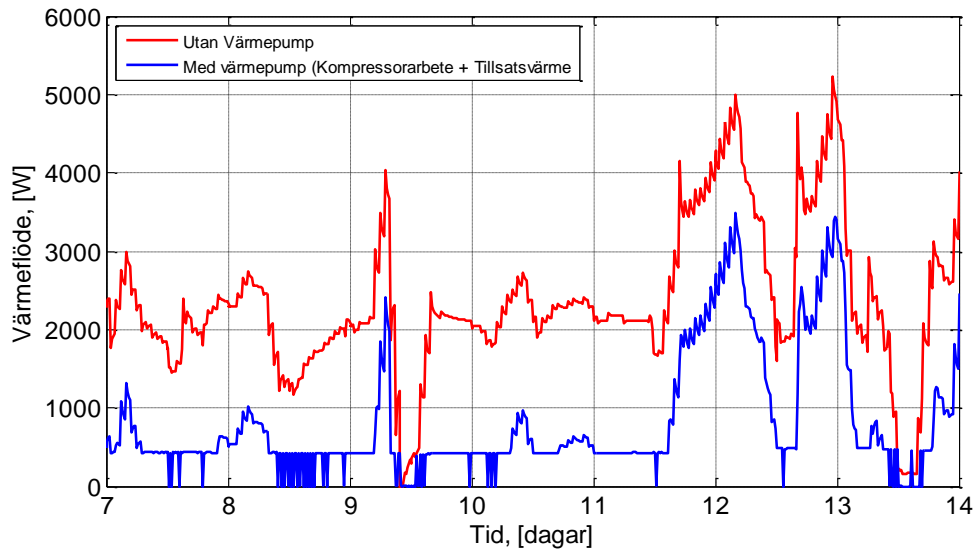
**Figur 10** Principskiss för en frånluftsvärmepump kopplad till ett golvvärmesystem.

Figur 11 visar resultaten från en veckas simulering av bostadshuset. Värmepumpens värmetillskott till golvvärmesystemet samt det arbete som krävs för att driva värmepumpens kompressor redovisas. Korta behov av tillsattvärme uppkommer i systemet då reglersystemet kallar på en varmare framledningstemperatur vilket sker då utetemperaturen faller. Den då lite svalare betongplattan, i jämförelse med framledningstemperaturen, absorberar snabbt värme från golvslingorna varpå skillnaden mellan framledning- och returtemperatur blir stor. Effektbehovet under denna period blir då stort. Simuleringen visar även värmepumpens driftstid med av- och påslag. Då värmepumpen är avslagen ”slösar” byggnaden, som helhet, värme genom att värme i den tempererade frånluft går till spillo. En optimerad volym på ackumulatortanken eller genom att temporärt lagra värme i betongplattan skulle minska frekvensen av avslag.

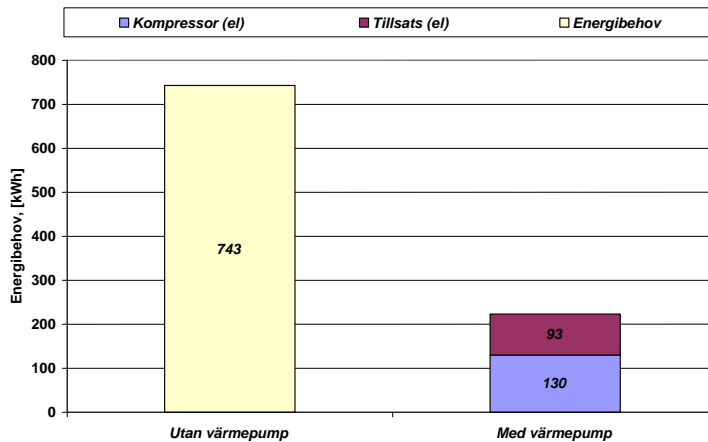


**Figur 11** Exempel på värmepumpens tillskott av värme, kompressorarbete samt tillsattvärme. Den blå linjen visar hur utomhustemperaturen varierar under perioden.

Effekt- och energibehoven för de olika fallen, med värmepumpen och utan värmepump, är redovisade i Figur 12 och Figur 13. Eftersom ingen värme återvinns ur frånluften i grundfallet erhålls en kraftig förbättring av byggnadens energibehov då värmepump används. Samtidigt är kombinationen av lågtempererad golvvärme och värmepump en effektiv kombination. Tack vare den låga framledningstemperatur erhålls ett högt förhållande mellan kompressorarbetet och värmepumpens avgivna värme. Då endast el till värmepumpens kompressor inkluderas blir det så kallade "COP-talet" omkring 5 under den simulerade perioden. Förutom el till kompressorn tillkommer el till golvvärmesystemets cirkulationspump samt till frånluftsfläkten på cirka 100W. Detta gäller för bägge fallen, med eller utan värmepump.



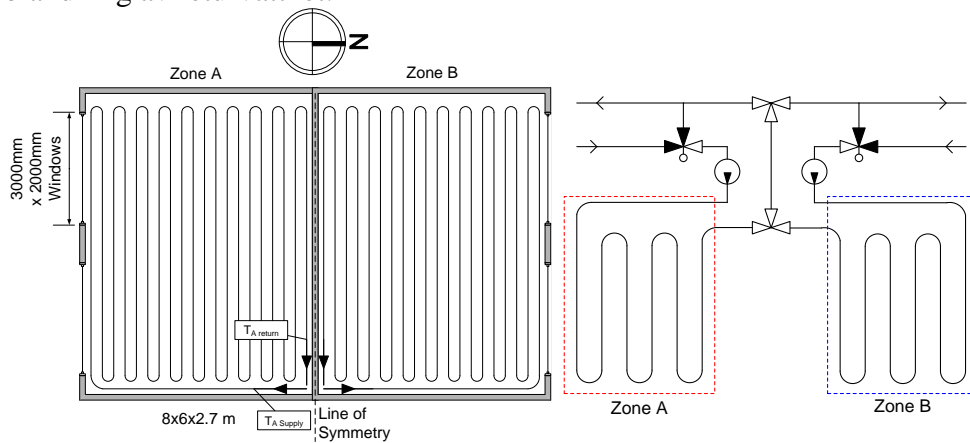
Figur 12 Effektbehov under en januariveckas drift av byggnaden.



Figur 13 Energibehov under två veckors drift (i januari).

### Exempel 3: Test av innovativ idé

I vissa byggnader och lokaler fördelar sig internvärme, såsom solinstrålning genom stora glasade ytor på del av byggnaden, på ett ojämnt sätt. Konsekvensen av detta kan bli att en del av byggnaden behöver värmas medan den andra måste kylas av. Verksamheterna och dess krav kan sätta hinder i vägen för att låta luftutbyte mellan delar av byggnaden reducera detta problem. En innovativ idé för att hantera detta har undersökts med simuleringsmodellen. Idén bygger på att två separata slingor läggs ut i det varmare respektive kallare rummet. För fall 1 studerades alternativet att blanda returvattnet från slingorna innan vattnet återigen pumpas ut i de två slingorna (med samma temperatur). Slingornas placering och vattenblandningsprinciperna illustreras i Figur 14. Som jämförelser har simulering gjorts för fallet (fall 0) med två separata slingor utan blandning av returvattnet.



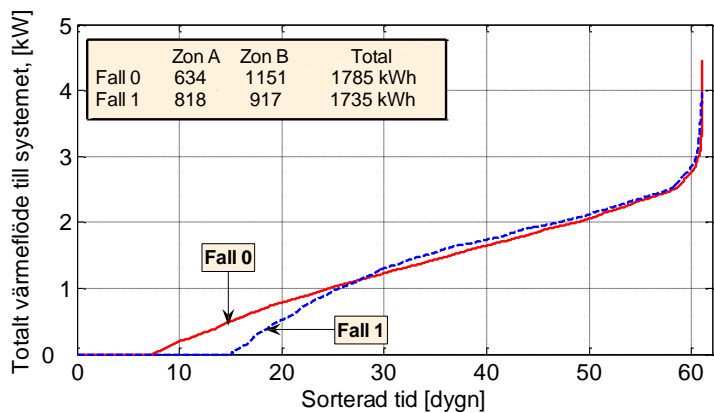
Figur 14 Planlösning och placering av de två rörslingorna för den simulerade byggnaden.

Figur 15 visar varaktighetskurvor för den beräknade samlade uppvärmningen av de två rörslingorna. Vi kan konstatera att det blir en omfördelning av värme från det varma rummet (Zon A) till det kalla (Zon B). Antalet dygn utan uppvärmningsbehov ökar från 7 till 15 dagar. Detta tvingas dock kompenseras med lite högre total tillförsel av värme vid senare tillfällen. Skillnad i värmebehov är bara 50 kWh eller 3%.

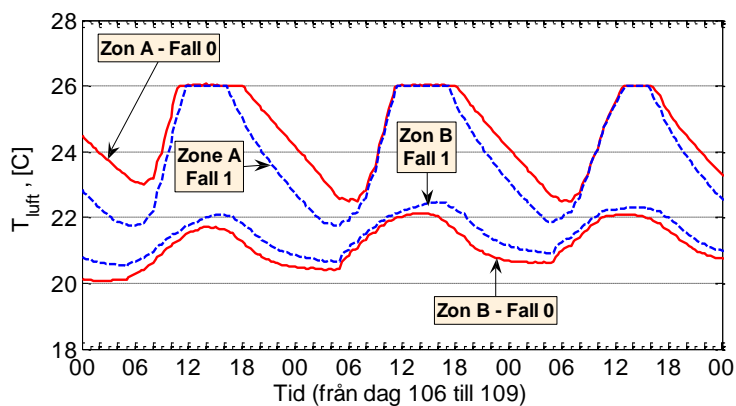
Figur 16 redovisar lufttemperaturen under tre dygn för de två fallen. Vi kan tydligt se att det kalla rummet (Zon B) blir upp till 1,6 °C varmare medan det varmare rummet blir upp till 0,7 °C kallare.

Sammanfattningsvis kan konstateras att det inte finns någon större potential i att fördela värme med hjälp av golvvärmslingorna. Den termiska kontakten mellan rummen blir inte tillräcklig.





**Figur 15** Varaktighetsdiagram som visar fördelningen av det till golvvärmesystemet tillförda värmefflödet (summan av zon A och B). Den infogade texten visar den tillförda energimängden under mars och april månad.



**Figur 16** Innetemperatur (luft) för de två beräkningsfallen och zonerna under tre dygn.

Vetenskaplig referens: (Karlsson, 2007)

## Del II Analys av alternativa, förenklade och självreglerande vattenburna golvvärmesystem i småhus

### Möjligheter med förenklad golvvärme i välisolerade bostäder

#### Typisk systemuppbyggnad

Huvudkomponenten i golvvärmesystem är de i golvkonstruktionen förlagda PEX (tvärbunden polyetenplast) rören för tillförsel av värme. Det ingjutna rörsystemet tillsammans med den omgivande golvkonstruktionen fungera som en stor värmeväxlare samtidigt som det är en del av byggnadens klimatskal. Materialet i golvet (t.ex. betong, avjämningsmassa, golvbeläggning och markisolering) leder huvuddelen av den tillförda värmen från rörsystemet upp till golvytan. För att uppnå ett effektivt och lågtempererat system är det en fördel om golvbeläggningen har ett lågt värmemotstånd, samt att rörslingorna ligger tätt ihop (cc-mått) och relativt nära golvytan. Ju effektivare värmeväxlingen mellan rören och rummet är desto lägre blir systemets vattentemperatur. Eftersom värmeslingorna är placerade inuti byggnadens klimatskal, alltså delvis utanför det uppvärmda rummet, krävs det att värmeisoleringen nedanför/utanför värmeslingorna är av betydande tjocklek. Detta för att motverka den extra värmeförlust som alltid uppstår mot omgivningen, i fallet golvvärme krävs det t.ex. extra markisoleringen.



Figur 17 Illustration av golvvärmesystem. Till vänster ett system ingjutet i en platta på mark av betong. Till höger ett lätt system med frästa spånskivor och värmefördelningsplåtar i aluminium för träbjälklag. (Med tillstånd av Uponor)

Ett golvvärmesystem byggs upp av flera separata slingor som var och en försörjer ett rum eller en del av ett större rum. Tryckförlusterna samt temperaturfallet längs hela slinglängden vid dimensionerande effektbehov avgör utformningen av vattenflöde, slinglängd och rördimension. Slingorna är vanligtvis anslutna till en gemensam värmefördelare vilket ger en enhetlig framledningstemperatur som tillförs systemets samtliga slingor, se figur 18. En cirkulationspump samt injusteringsventiler placerade vid golvvärmefördelarna säkerställer att rätt vattenflöde tillförs systemets slingor.

Till det sekundära systemet (golvvärmekretsen) tillförs värme från ett primärt system (t.ex. fjärrvärme, värmepanna eller värmepump). Golvvärmekretsens gemensamma framledningstemperatur styrs med hjälp av en reglerventil som överför rätt mängd värme från det primära systemet. Denna centrala reglering är ofta framåtkopplad via en värmekurva som anger framledningstemperaturen som funktion av aktuell utomhustemperatur. Framåtkoppling från utomhustemperaturen kräver en givare som mäter utomhustemperaturen.

En återkoppling från det aktuella tillståndet i byggnadens rum kompletterar den centrala regleringen av framledningstemperaturen. Syftet med rumsregleringen är att hålla en jämn och komfortabel temperatur samt att utnyttja den gratisvärme som tillförs byggnaden. I de fall värme, i form av t.ex. solinstrålning, värme från personer eller utrustning, påverkar tillståndet i byggnaden så mycket att temperaturen stiger över en definierad nivå stängs vattenflödet till en eller flera slingor av, helt eller delvis, och därmed justeras även systemets värmeförsel. Denna termostatregering kräver temperaturgivare i byggnadens rum, ett signalsystem för överföring av mätdata samt ställdon och termostatventiler vilka är placerade centralt vid golvvärmefördelaren. Ofta är samtliga rum i byggnaden utrustade med temperaturgivare vilka är förbundna med motsvarande golvvärmeslinga. I en typisk villa kan utrustningen som krävs för en termostatstyrd rumsreglering utgöra ungefär 40 % av den totala investeringskostnaden för ett golvvärmesystem (ingjutit i en platta på mark).



Figur 18 Värmefördelare i ett golvvärmesystem med ställdon och ventiler för rumsreglering.

### Förenklat robust system

I forskningsprojektet har vi ställt frågan: *kan vi utforma golvvärmesystemet på ett förenklat sätt med hänseende till framtidens bostäder med mycket låga värmebehov?*

Resultat från forskningsprojektet visar att 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 får därmed en lägre investeringskostnad än det traditionella systemet med rumsreglering via termostater. Den självreglerande förmågan beskrivs förenklat enligt följande (avslutningen av denna rapport ger en mer fundamental redogörelse och kvantifiering av självregleringens utnyttjandegrad).

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 tillförs 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.

Förenklat kvantifieras självregleringens utnyttjandegrad av golvvärmesystemets vattentemperatur och byggnadens totala värmeförluster. Välisolerade byggnader med god värmeväxling genom golvvärmesystem uppvisar hög utnyttjandegrad av självreglering. För mycket välisolerade byggnader som t.ex. passivhus, som även har mekanisk till- och frånluft med värmeåtervinning, blir självregleringen extra effektiv. Värmen från en extra internvärmekälla läcker i detta fall inte genom klimatskalet, via ventilation och luftläckage utan kommer istället att interagera med golvvärmesystemet och påverka värmeväxlingen längs värmerören. I fallet passivhus bör uppskattningsvis 90% av energiinnehållet av ett oförutsett värmetillskott kunna utnyttjas genom att värmeflödet till golvvärmesystemets slingor automatiskt nedjusteras via självreglering. Energibesparingen utgörs alltså av att kunna utnyttja en stor del av gratisvärmen på ett robust och enkelt sätt.

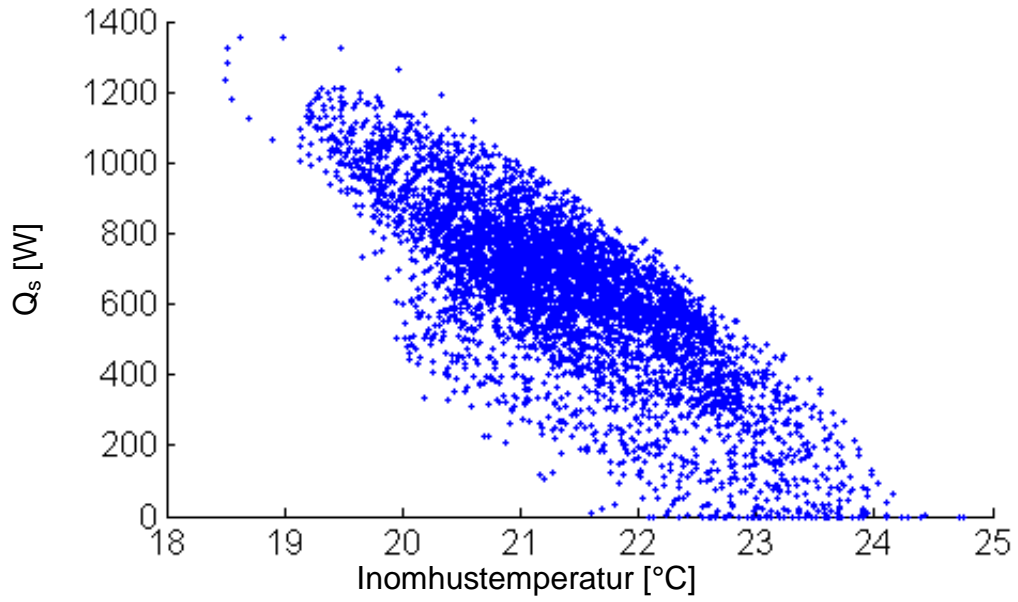
### **Simulering av ett förenklat golvvärmesystem i ett fristående bostadshus**

Idén med det förenklade golvvärmesystemet, utan rumstermostater, analyserades med hjälp av beräkningsmodellerna och redovisades i artikeln Karlsson (2008). Ett fristående bostadshus i ett plan med 7st rum med ingjutna golvvärmeslingor studerades under en uppvärmningssäsong. Byggnaden har mekanisk till- och frånluft ventilation med värmeåtervinning. Byggnaden är termiskt lätt (träregelstomme med invändig gips och utvändig träpanel) förutom den tyngre betongplattan på marken. Under det studerade året är värmebehovet som tillförs via golvvärmen  $30.8 \text{ kWh/m}^2$  för ett väder motsvarande Göteborg.

Simuleringarna visar hur inomhustemperaturen och värmeflödet som tillförs golvvärmesystemet varierar över uppvärmningssäsongen med en mycket enkel reglerstrategi. En konstant framledningstemperatur (+23.1°C) har valts för hela uppvärmningssäsongen.

Resultaten från simuleringen ges av Figur 19 där byggnadens areaviktade medeltemperatur (för samtliga rum) och det totalt tillförda värmeflödet redovisas. Varje punkt i Figur 19 motsvarar förhållandena under en timma. Tyngdpunkten för fördelningen ligger kring +21°C vilket var avsikten med den valda konstanta framledningstemperaturen. Ett tydligt samband mellan den momentana inomhustemperaturen och den tillförda värmeeffekten noteras – sjunker temperaturen stiger värmeeffekten, stiger temperaturen sjunker värmeeffekten.

Den förenklade systemdesignen innebär i princip att värmeförseln trots allt ”stängs av” helt om inomhustemperaturen närmar sig framledningstemperaturen (+23.1°C) vid kraftig solinstrålning eller andra internlast. Under årets kallaste dagar ökar värmeförlusterna och inomhustemperaturen sjunker således. Temperaturfallet motverkas av en tilltagande självregleringseffekt från golvvärmen – med ökad temperaturdifferens mellan vattnets konstanta framledningstemperatur och den sjunkande inomhustemperaturen ökar värmeförseln till systemet. Detta motverkar automatiskt temperaturfallet inomhus.



**Figur 19** Resultat från simulering av ett förenklat golvvärmesystem. Sambandet mellan tillförd värme och inomhustemperaturen (medel för hela byggnaden).

# Fördjupad analys av förenklade golvvärmesystem

## *Inledning*

Primärt är vi intresserade av att svara på frågan hur ett förenklat och självreglerande golvvärmesystem kan fungera. Med förenklad systemuppbyggnad menar vi att vattenflödet i golvvärmeslingorna är konstant (inga rumstermostater) samt att regleringen av framledningstemperaturen är framåtkopplad, dvs. att börvärdet fastställs oberoende av rumstemperaturen. Reglersystemets börvärde fastställs t.ex. utifrån utetemperaturen (med hjälp av en enkel värmekurva), ett förutbestämt schema eller enligt en prognos på värmebehovet (mer sofistikerat).

Vid driften av byggnaden kommer många händelser att påverka värmesystemet. De oväntade händelser som inte beaktas av den avsiktliga regleringen och som därmed skapar värmeöverskott eller -underskott betraktas som termiska störningar. En termisk störning kan t.ex. vara oväntat mycket solinstrålning, värme från aktiviteter i huset eller att ett fönster som öppnas en kort stund för vädring. Störningen kommer per definition inte att hanteras av reglersystemet i det förenklade golvvärmesystemet då aktiv återkoppling saknas - systemets framledningstemperatur kommer helt enkelt att vara oförändrad. Samtliga oväntade termiska störningar kommer verka inom delprocessen som representerar självregleringen. Det är dessa termiska störningar som exciterar systemets inneboende förmåga till självreglering. Självreglering är en systemrespons som uppstår genom att inte förändra vattentemperaturen i värmesystemet då termiska störningar verkar på byggnaden. Det visar sig att då systemet strävar efter att hålla framledningstemperaturen opåverkad kommer som en följd värmeförseln att minska vid en positiv störning (värmeöverskott) samt öka vid en negativ störning (värmeunderskott).

Vi är intresserade av att veta hur effektiv självregleringen är med avseende på temperaturstabilitet i byggnaden men även energimässigt – hur mycket av ett extra



värmetillskott kan man nyttogöra tack vara självregleringen? Eller det omvända, hur mycket kostar det i extra värmetillförsel om tillskottet av värme är mindre än väntat. Dessa frågor kommer att analyseras i rapportens avslutande del där vi definierar ett effektivitetsmått på självregleringsprocessen.

### ***Optimerad prognosstyrd framledningstemperatur***

En byggnads värmebehov över tiden bestäms av variationer i väder (utetemperatur, solstrålning, vind osv.), byggnadens och klimatskalets termiska egenskaper (värmelagring och ledningsförluster), ventilation av byggnaden samt internvärme från personer och utrustning. Det är möjligt att dämpa rumstemperaturens variation genom att anpassa framledningstemperaturen till variationerna i värmebehovet. Hur framledningstemperaturen bör anpassas beror på golvvärmesystemets dynamiska termiska egenskaper.

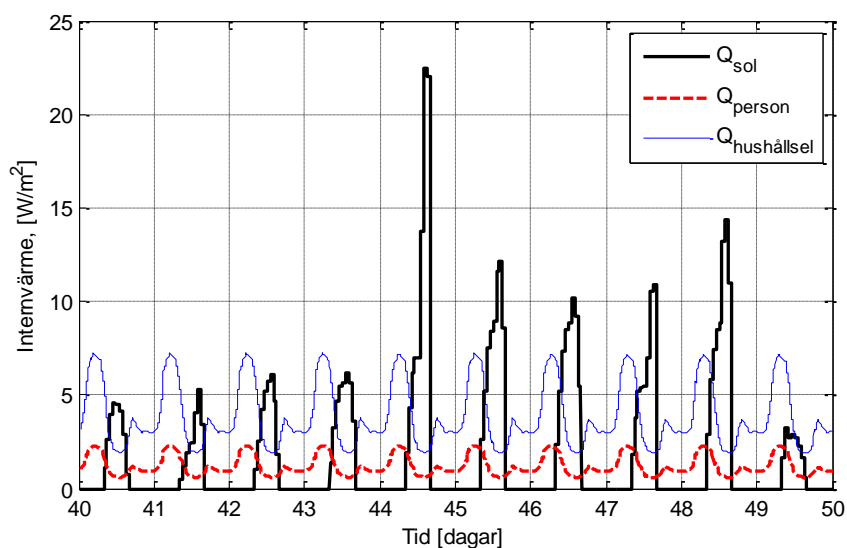
Materialen i ett golvvärmesystem med PEX-rör ingjutna i en betongplatta/bjälklag utgör en stor termisk massa. Värmekapaciteten i materialen som omger golvvärmerören fördröjer värmen att ledas från röret till rummet när värmetillförseln till en golvvärmeslinga justeras. Resultatet är en fördröjning från det att framledningstemperaturen förändras till att värmeflödet vid golvytan förändras. Om inte denna fördröjning beaktas påverkas inte rumstemperaturen förrän en tid efter en förändring i värmebehov. Resultatet blir att det relativt trögreglerade golvvärmesystemet får svårt att korrigera för snabba förändringar i värmebehov.

Inom forskningsprojektet har en metod för optimerad och prognosstyrd golvvärme utvecklats, se Karlsson och Hagentoft (2011A) samt Hagentoft, Karlsson och Sasic Kalagasidis (2008). Regleringsmetodens mål är att eliminera golvvärmesystemets långa responstid genom att i förväg prognostisera värmehovet och på så sätt justera framledningstemperaturen i precis lagom tid innan de prognostiserade förändringarna inträffar. I möjligaste mån hålls inomhustemperaturen inom ett komfortintervall (övre

och undre temperaturer) samtidigt som utnyttjandet av internlaster maximeras. I optimeringsmetoden utnyttjas det prognostiserade värmebehovet tillsammans med golvvärmesystemets och byggnadens dynamiska termiska egenskaper. Metoden beräknar den optimala dynamiska framledningstemperaturen som kontinuerligt tillförs golvvärmeslingan.

### Exempel på optimerad prognosstyrning:

Vi tittar på ett rum under en tidsperiod på 10 dagar. Internvärme från sol, personer och aktiviteter varierar enligt Figur 20. Under perioden varierar utomhustemperaturen  $T_e(t)$  i intervallet  $-15-0^\circ\text{C}$ . Den passiva uppvärmningen räcker under den kalla 10-dagars perioden till för att höja temperaturen (den s.k. friflytande temperaturen) upp till intervallet  $0-5^\circ\text{C}$ , golvvärmen bör alltså höja inomhustemperaturen med resterande  $15-20^\circ\text{C}$  för att uppnå en tillräcklig termisk komfort. Vi kommer att beräkna den optimala framledningstemperaturen/värmetillförseln med tre olika varianter av komfortintervall och restriktioner på lösningarna, se Tabell 1. I fall 1 är komfortintervallet stort, ”optimalt” är i detta fall mellan  $19-23^\circ\text{C}$ . Vidare tillåts inte att vattnet kyler golvkonstruktionen men någon övre restriktion för värmetillförseln finns inte. I fall 2 är målet för optimeringen tuffare satt. I tredje fallet införs en övre begränsning på  $35 \text{ W/m}^2$ .



Figur 20 Variationen i internvärme under de 10 dagarna.

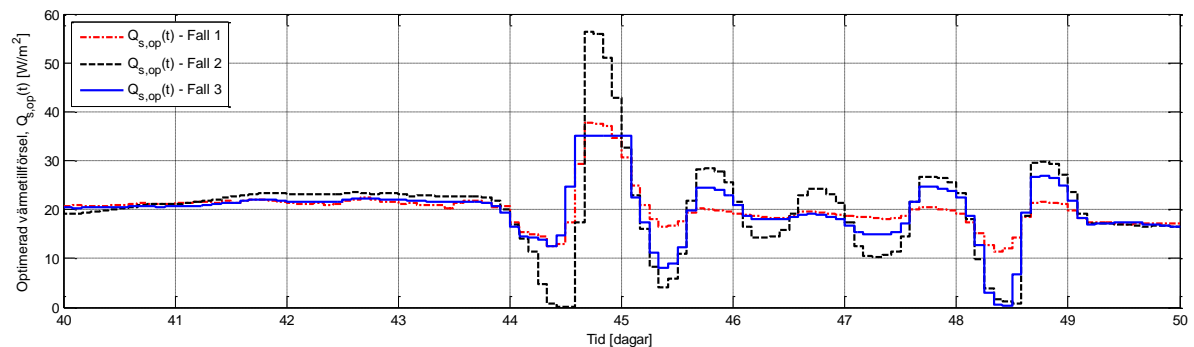
**Tabell 1. Tre fall med varierande restriktioner för det accepterade temperaturintervallet tillförd effekt.**

	Min temp [°C]	Max temp [°C]	Max effekt [W/m <sup>2</sup> ]
Fall 1	19	23	-
Fall 2	20	22	-
Fall 3	20	22	35

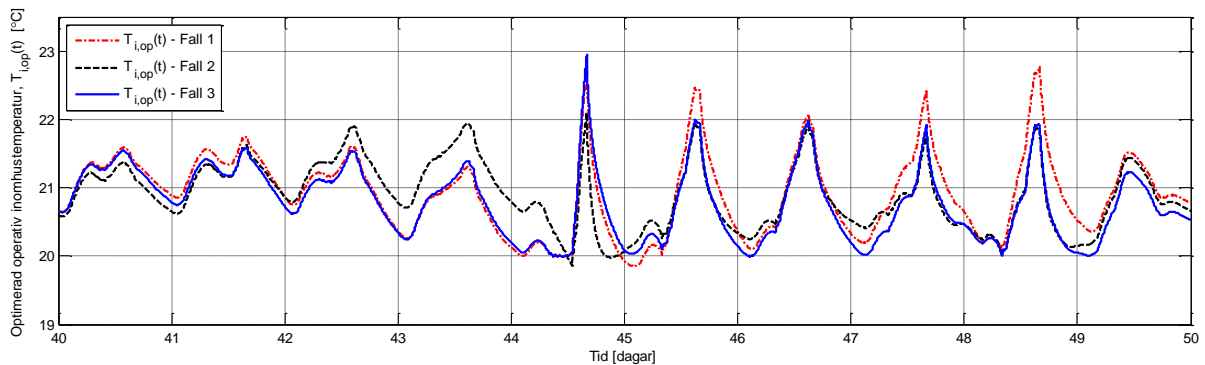
Inledningen på den studerade perioden är relativt händelsefattig, i samtliga fall tillförs cirka 20 W/m<sup>2</sup> relativt konstant, se Figur 21. Under det 44:e dygnet på året inträffar en hastig köldknäpp med kallt och klart väder, denna händelse speglar funktionen av prognosstyrningen. Kombinationen av kyla och solinstrålning ger en tydlig variation av värmebehovet över dygnet, den friflytande inomhustemperaturen pendlar med 5°C mellan dag och natt. I fall 1 är systemet proaktivt och sänker värmeförseln i förväg så att inomhustemperaturen är cirka +20°C mitt på dagen, se 44:e dygnet i Figur 22. Detta görs för att undvika att inomhustemperaturen senare skall stiga över komfortintervallet då systemet har prognostiserat att solinstrålningen snabbt kommer att höja temperaturen under eftermiddagen. I fall 1 är den högsta inomhustemperaturen +23°C, vilket är precis inom det önskade komfortintervallet. När solen går ner samtidigt som temperaturen utomhus faller snabbt ökar snabbt värmebehovet. För att undvika undertemperatur inomhus ökas värmeförseln redan under eftermiddagen då inomhustemperaturen fortfarande är hög på grund av solinstrålningen. Under kvällen dag 44 ”laddas” golvplattan med värme för att klara den kalla natten. Men plattans tröghet och vetskapen om att det kommer en efterföljande dag med mer solinstrålning gör att tillförseln trappas ner under natten, den ”inladdade” värmen avges nu sakta till rummet. På så sätt utnyttjas gratisvärmens från solen optimalt då ingen övertemperatur uppkommer under dagen (ej över +23°C i fall 1).

Optimeringen verkar hela tiden för att finna den ”gyllene medelvägen” så att inomhustemperaturen varken blir för hög eller låg under någon tidpunkt under optimeringshorisonten. Optimeringsalgoritmen ser hela tiden framåt i tiden, det är inte

bara den nästkommande tidpunkten som prioriteras. På detta sätt kan man ”ta höjd” för vad som kommer att ske längre fram i tiden.



**Figur 21** Resultande värmetillförsel till golvvärmeplattan under 10 dagar.



**Figur 22** Beräknad inomhustemperatur som en följd av den optimerade prognostiserade framledningstemperaturen.

I fall 2 är komfortintervallet 20-22°C vilket kräver en striktare reglering av värmeförseln. Risken att hamna utanför komfortintervallet ökar jämfört med det första fallet. Detta syns tydligt i Figur 21 där värmeförseln helt stängs av under förmiddagen för att för att undvika övertemperatur senare på eftermiddagen under dag 44. Prognosstyrningen låter temperaturen sjunka till botten av komfortintervallet (+20°C) innan solen värmer upp rummet, se Figur 22. Detta räcker nästan till för att dämpa den väntade temperaturstegringen till under +22°C. Den optimerade prognosstyrningen har under förutsättningarna gjort allt för att hålla temperaturen inom komfortintervallet – den gyllene medelvågen räcker här inte riktigt till (i detta fall hade det krävts ett litet tillskott av kyla för att tvinga ner temperaturen under +22°C - att kyla är dock inte tillåtet i detta

exempel). Då värmeförseln till plattan varit avstängd under ett par timmar måste systemet snabbt ladda in mycket värme i plattan för att klara av köldknäppen senare under natten. Värmeförseln ökar från noll till cirka  $55 \text{ W/m}^2$  på någon timma.

I fall 3 är värmeförseln begränsad inom intervallet  $0\text{-}35 \text{ W/m}^2$  samtidigt som komfortintervallet fortfarande är  $20\text{-}22^\circ\text{C}$ . Detta innebär att värmesystemet tappar en del av sin förmåga att snabbt tillföra värme i jämförelse med förutsättningarna i fall 1 och 2. Detta syns tydligt på den nya optimala värmeförseln. Systemet kan i exemplet inte stänga ner värmeflödet helt, på det som sker i fall 2 under förmiddagen dag 44, eftersom värmeeffekt är begränsad för att efteråt snabbt ”ladda upp” betongplattan. Resultatet är att komfortintervallet överskrids med cirka  $+1^\circ\text{C}$ .

De framräknade effektbehoven som redovisas i ovan exempel ska därefter omvandlas till en i tiden given framledningstemperatur. Genom att bestämma denna temperatur som funktion av tiden kan självregleringseffekten utnyttjas då avvikelser från de prognostiserade värdena på utetemperatur och internvärme uppstår.

## STÖRNING I INTERNVÄRME – HUR PÅVERKAR DET INNETEMPERATUREN

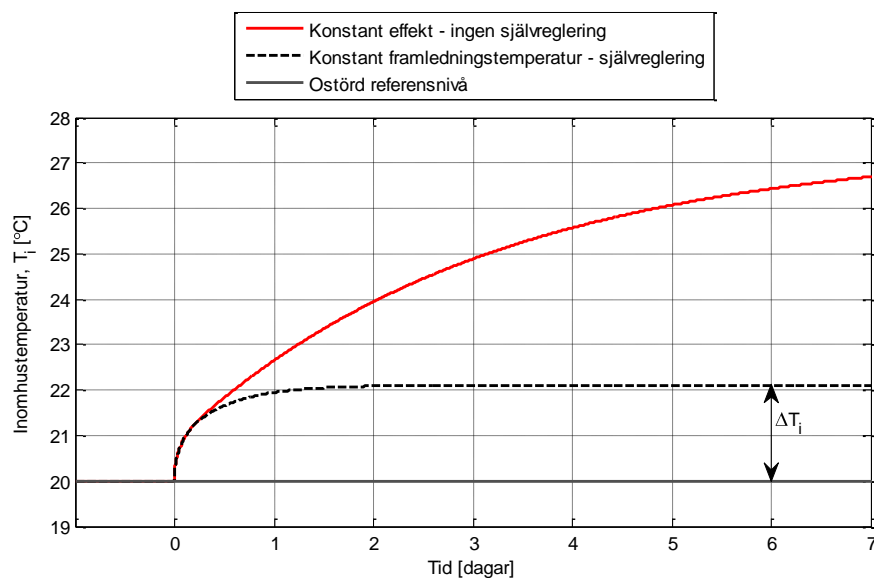
Det föregående avsnittet visade hur framledningstemperaturen kan anpassas så att inomhustemperaturen i möjligaste mån hålls inom ett komfortintervall. Men vad händer med inomhustemperaturen när verkligheten visar sig vara annorlunda jämfört med vad prognoserna förutsagt? Det är nu självregleringen kommer in i bilden. Flertalet av exemplen i detta avsnitt samt definitionen av självregleringen är hämtade från artikeln av Karlsson och Hagentoft (2011B).

Figur 23 visar ett beräkningsexempel med en konstant termisk störning i tillförd effekt i ett 12.6 m<sup>2</sup> stort rum uppvärmt med vattenburen golvvärme. Till rummets golvvärmeslinga tillförs vatten med temperaturen 28.7°C vilket vid rådande förhållanden ger 350W värmeavgivning längs slingan varav 336 W tillförs rummet (14 W utgör en extra förlust till marken under golvplattan). Utan några störningar är systemet injusterat så att inomhustemperaturen är +20°C. Vid tidpunkten 0 aktiveras en störning (internvärme) på +100W. Om vi tänker oss att regleringssystemet fortsätter att tillföra 350W till golvvärmeslingan, reagerar inomhustemperaturen på störningen enligt den heldragna röda linjen i Figur 23. Här sker (per definition) ingen som helst självreglering. Efter lång tid (mer än en vecka) stagnerar inomhustemperaturen på en stationärt förhöjd nivå. Den termiska massan i rummet samt värmeförlusttalet ger rummets tidskonstant som beskriver längden på detta dynamiska förlopp. Tunga och välisolerade byggnader ger långa förlopp/tidskonstanter. Det aktuella rummet har lätta och välisolerade träregelväggar med invändig gips, betongplatta på mark, träparkett, ingjuten golvvärme samt en balanserad mekanisk ventilation med värmeåtervinning. I fortsättningen benämns exemplets konstruktion med referenskonstruktionen/rummet.

Med en framåtkopplad framledningstemperatur kommer värmeförseln från golvvärmen att vara självreglerande. Den streckade svarta linjen i Figur 23 visar tidsförloppet för det självreglerande fallet. Då temperaturökningen motverkas av

självregleringen är den stationära temperaturökningen betydligt tydligt lägre än i det föregående fallet.

Vidare ser vi att det inte är någon skillnad mellan de olika fallen under de första timmarna, se Figur 23. Alltså kan inte självregleringen påverka inomhustemperaturen omedelbart, det tar en viss tid innan självregleringen börjar motverka temperaturförändringen. Hur lång denna tid är beror främst på golvvärmslingans placering i betongplattan samt plattans tjocklek. Är slingan ingjuten djupt ner i golvet tar det längre tid än om slingan är placerad nära ovanytan. Under den inledande fasen är det värmelagring i byggnadens stomme, möbler etc. som avgör hur snabbt temperaturen stiger. Det är viktigt att särskilja på självreglering och värmelagringen/värmetrögheten för att ge en rättvis kvantifiering av ett systems självregleringsförmåga.



**Figur 23 Temperaturförändring orsakad av en konstant +100W störning vid tidpunkt 0.**

Den stationära förändringen av inomhustemperaturen  $\Delta T_i$  på grund av en konstant störning  $\Delta Q$  och självregleringens motreaktion ges av ekvation 1. Värmeförlusttalet  $K_e$  anger summan av samtliga ledningsförluster (inkl. grundkonstruktionen), ventilations- och luftläckageförluster. Självregleringsutnyttjande-graden betecknas  $g$  (-) medan  $h$  (-) anger golvvärmekonstruktionens globala isoleringsverkningsgrad, se bilaga 1. Observera att både  $g$  och  $h$  är enhetslösa samt att  $g$  är negativt:  $-1 < g < 0$  (definitionen av  $g$

redovisas i det efterföljande avsnittet). Den första delen av uttrycket beskriver störningens bidrag till temperaturförändringen medan den andra delen  $g \times h$  beskriver en temperaturjusterande inverkan orsakad av självregleringsprocessen. Den maximala stationära temperaturavvikelsen orsakad av en långvarig konstant termisk störning reduceras alltså med faktorn  $g \times h$ .

$$\Delta T_i = \frac{\Delta Q}{K_e} (1 + \gamma \cdot \eta) \quad (1)$$

## STÖRNING I INTERNVÄRME – HUR PÅVERKAR DET VÄRMETILLFÖRSELN

### Kvantifiering av självregleringens utnyttjandegrad

Vi fortsätter med exemplet från föregående avsnitt. Någon timma efter tidpunkten 0 börjar värme från störningen gradvis nå ner till de ingjutna slingorna. Då detta sker börjar värmeavgivningen från vattnet att avta vilket leder till att slingans returtemperatur gradvis stiger. Blandningsventilen som styr framledningstemperaturen, genom att blanda returvatten från golvvärmeslingan med det varmare vattnet från den primära kretsen, måste nu agera för att upprätthålla den önskade framledningstemperaturen. Den omedelbara följderna är att mindre varmt vatten överförs till golvvärmeslingan och därmed en minskad värmeförlust till golvvärmeslingan. Den stationära förändringen i tillförd värmeeffekt  $\Delta Q$  motsvarar i referensrummet en konstant sänkning på cirka 75W vilket skall jämföras med störningen på 100W.

Detta sker på cirka 1.5 dygn. Jämfört med tidsförloppet för rummet utan självreglering eller termostat nås den stationära nivån betydligt snabbare när självregleringen är aktiv. Det snabbare förloppet beror på att golvvärmeslingorna tar upp en stor del av störningens tillskottsvärme (genom en reducerad värmeavgivning) som annars hade åtgått till uppvärmning av betongplattans nedre/inre delar. Utan golvvärmeslingornas självreglerande effekt tillåts hela betongplattan att värmas upp till den högre



temperaturnivå vilket tar betydligt längre tid. Med självreglering kan man säga att temperaturförändringen i golvet till större del sker vid ytan ovanför rören samt mellan rören.

För en tidsbegränsad godtycklig störning justerar alltid självregleringen den till golvvärmeslingan tillförda värmemängden i proportion till systemets självregleringsutnyttjandegrad vilken betecknas  $\gamma$ , se ekvation 2. Är t.ex. energiinnehållet i en tidsbegränsad termisk störning  $\Delta E = +1\text{kWh}$  nedjusteras den tillförda värmemängden  $\Delta E_s$  med  $-0.70\text{kWh}$  då  $\gamma = -0.70$ .

Faktorn  $\gamma$  erhålls genom ett relativt enkelt samband, se ekvation 3. Självregleringen säkerställer att en på förhand kvantifierbar andel av störningens energiinnehåll utnyttjas genom en nedjustering av den tillförda energimängden.

$$\gamma = \frac{\Delta E_s}{\Delta E} \quad (2)$$

$$\gamma = -\frac{K_{up}}{\eta \cdot K_{up} + K_e} \quad (3)$$

En grundläggande förutsättning för en energieffektiv golvvärme är att isoleringsverkningsgraden  $\eta$  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.

$K_{up}$  (W/K) anger värmekonduktansen för värmeväxlingen i golvvärmekonstruktionen, från framledningstemperaturen längs hela slingan upp till innetemperaturen.  $K_{up}$  innefattar: inverkan av att vattentemperaturen avtar längs slingan, värmeledning genom golvkonstruktionens material samt värmeöverföringen vid golvytan (konvektion och värmestrålning).  $K_{up}$  motsvarar UA-värdet för ”värmeväxlaren” med temperaturdifferensen mellan framledning- och inomhustemperaturen som drivande potential. Värdet på  $K_{up}$  beror dels på utformningen av golvvärmeslingan: t.ex. hur tätt golvvärmeröret ligger (cc-mått) och golvmateriallets värmemotstånd, och dels på hur stort

vattenflödet genom slingan är. Bilaga 2 redovisar en beräkningsmetod för att kvantifiera  $K_{up}$ .

Ekvation 3 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  $\gamma$ . 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 klimatskalet samt via ventilation och luftläckage. Skulle t.ex. golvbeläggningen ha ett högt värmemotstånd så 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  $\eta$  för golvvärmesystemet – detta försämrar både självregleringsförmågan  $\gamma$  och golvvärmesystemets energieffektivitet då de extra värmeförlusterna från golvvärmesystemet till marken ökar.

### **Exempel på självregleringens utnyttjandegrad $\gamma$**

Här ges fem olika exempel för att visa hur  $\gamma$  påverkas av både golvkonstruktionen och byggnadens värmeförluster. Samtliga illustrerade exempel gäller referensrummet på 12.6 m<sup>2</sup> rum. Referenskonstruktionen har cc-mått 300 mm, 42 m slinga monterad i botten av en 100 mm betongplatta, 250 mm markisolering under betongplattan, 12 mm parkettgolv enligt Figur 27 och Figur 28. Tabell 2 visar de olika golvvärme konstruktionernas termiska egenskaper. Skillnaden mellan de två första kolumnerna i Tabell 2 visar hur den totala värmeväxlingen påverkas av vattenflödet i golvvärmeslingan. För den andra konstruktionen reduceras vattenflödet till 0.01 l/s, i övrigt är konstruktionen oförändrad. I

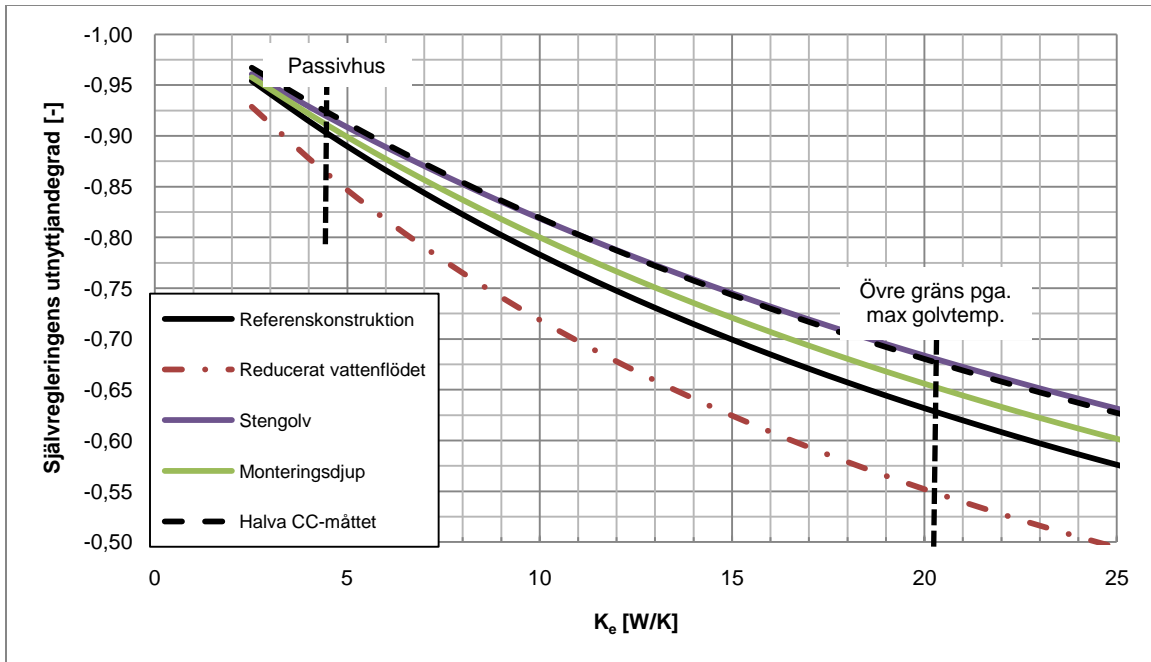
fall 3 ersätts 12 mm parkett med ett stengolv. I fall 4 monteras golvvärmeslingan nära betongplattans yta, i övrigt samma som referensfallet. I det sista fallet halveras cc-måttet till 150 mm och det finns nu två golvvärmeslingor som vardera förses med 0.025 l/s vatten ( $K_{up}$  för respektive slinga i rummet kan summeras).

**Tabell 2 De olika golvvärmekonstruktionernas termiska egenskaper ( $K_{up}$  är i referensfallet beräknat med  $A_{golv} = 12.6 \text{ m}^2$ ,  $V_f = 0.05 \text{ l/s}$ ,  $cc = 300 \text{ mm}$  och  $L = 42 \text{ m}$ ).**

	$\alpha_{up} \cdot L$	$K_{up}$	$\eta$
	[W/K]	[W/K]	[-]
Referenskonstruktion	35.7	32.7	0.971
Reducerat vattenflödet	35.7	23.8	0.971
Stengolv	46.1	41.4	0.980
Monteringsdjup	40.1	36.4	0.975
Halva CC-måttet	44.7	40.1	0.971

Då grundplattan är välisolerad visar beräkningen relativt höga värden på  $\eta$ , en liten skillnad noteras för stengolvet och vid förändring av monteringsdjupet. Frånvaron av parkettgolvet gör att värmen lättare leds upp till rummet.  $K_{up}$  i Tabell 2 visar att stengolvet och golvet med cc-mått 150 mm kommer att ha den högsta självreglerande förmågan, sämst blir det fall där vattenflödet reduceras.

Samtliga 5 fall redovisas i som funktion av byggnadens totala värmeförlusttal  $K_e$ . Figur 24 kvantifierar alltså självregleringen beroende på isoleringsgrad, ventilations- och läckageförluster för exempelrummet med  $12.6 \text{ m}^2$  golvarea. Vid variationen av  $K_e$  är golvvärme- och grundkonstruktionen oförändrad för var och en av de fem olika golvkonstruktionerna – förändringen i  $K_e$  (horisontell axel i Figur 24) är alltså orsakad av förändringar i klimatskalets övriga komponenter eller värmeförluster via ventilation av rummet.



**Figur 24** Självutnyttjandegraden som funktion av exempelrummets värmeförlusttal  $K_e$  för 5st olika golvvärmekonstruktioner.

För att ytterligare förklara Figur 24 tänker vi oss att byggnaden är lokaliserad i klimatzon III (Säve, DVUT=-12.9°C) samt att  $4\text{W/m}^2$  tillförs från internvärme vid en innetemperatur på  $+20^\circ\text{C}$ . Om rummet skall uppfylla FEBYs Kravspecifikation för Passivhus (2009) får rummets värmeförlusttal  $K_e$  inte överskrida  $4.7\text{ W/K}$ . Vid så välisolerade bostäder ligger värdet på  $\gamma$  i området kring  $-0.9$ . Självregleringen är alltså väldigt betydande för välisolerade bostäder. BBR18 (Boverket, 2011) anger att yttemperaturen på ett golv bör kunna begränsas till  $+26^\circ\text{C}$ , med denna nivå definerar den övre gränsen på skalan i Figur 24. Värmeförlusttalet  $K_e$  kan inte vara större än  $20.8\text{ W/K}$  (effektbehov på  $54\text{ W/m}^2$ ) då golvttemperaturen samtidigt är begränsad till  $+26^\circ\text{C}$ . Självregleringen  $\gamma$  är vid den övre gränsen är reducerad till området:  $-0.52$  till  $-0.67$ .

## Slutsatser

I detta projekt har ingjutna golvvärmesystem i bostäder studerats. Unika dynamiska simuleringsmodeller har utvecklats som kan beräkna temperaturer och värmeflöden för systemet bestående av byggnad, golvvärmesystem, reglersystem, väder och brukare. Med hjälp av modellerna kan nya och gamla systemlösningar analyseras och jämföras. Målsättningen är att ta fram analysverktyg för enkla, robusta och energibeständiga

systemlösningar. Härmed kan man undvika dyra tekniska lösningar som inte löser några problem utan snarare skapar nya istället.

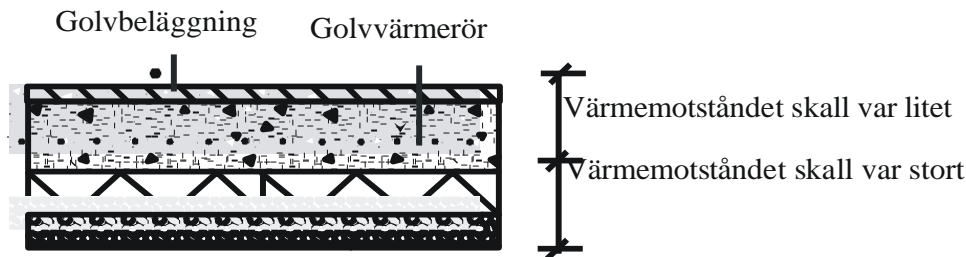
Vi har fördjupat studien mot förenklade och robusta golvvärmesystem som kan finnas i framtidens energieffektiva bostäder. Värmetillförseln i dessa golvvärmesystem kommer (förutom att vara låg) även att till stor del vara självreglerande. Begreppet självreglering avser värmesystems inneboende förmåga att justera värmetillförseln till golvvärmeslingan orsakad av en termisk störning. Värmetillförseln minskar vid en positiv störning (t.ex. internvärme) och ökar vid en negativ störning (t.ex. fönstervädning). Självregleringens robusthet säkerställer att värme från olika internvärmekällor utnyttjas genom att automatiskt nedjustera tillförseln till värmesystemet. Rumstermostater med tillhörande utrustning blir mer eller mindre överflödigt. För välisolerade bostäder med värmeförluster liknande passivhus-standard uppgår självregleringens utnyttjandegrad till cirka 90 %.

En metod för att prognosstyra och optimera framledningstemperaturen har även utvecklats. Målet med prognosstyrning är att i möjligaste mån styra värmetillförseln så att inomhustemperaturen ligger inom ett fördefinierat komfortintervall. Den optimerade prognosstyrningen finner den ”gyllene medelvägen” – lagom mängd värme tillförs, väl avvägt i förhållande till vad man tror kommer att ske med värmebehovet i framtiden och med hänsyn taget till systemets och byggnadens värmetröghet.

## Bilaga 1

### **Beskrivning av isoleringsverkningsgraden**

För att beskriva värmeförlusten från ett golvvärmesystem används en faktor som kallas *global isoleringsverkningsgrad*. Den visar på ett enkelt och kraftfullt sätt vilka faktorer som påverkar värmeförlusten och ger ett mått på hur stor andel av värmen som tillförs golvvärmesystemet som når inommiljön. Uttrycket för isoleringsverkningsgraden är enkelt och ger ett direkt svar på hur effektivt golvvärmesystemet fungerar. Generellt för en grund med golvvärme gäller alltid att grunden skall vara välisolerad under betongplattan och ha ett litet värmemotstånd mellan rören och till inomhusmiljön, se Figur 25.



**Figur 25** Värmemotståndet mellan skiktet där värmeslingorna är placerade och inommiljön ska vara litet, samtidigt som värmemotståndet under slingan skall vara stort för att golvvärme ska bli energieffektivt.

För att den globala isoleringsverkningsgraden skall bli så hög som möjligt gäller följande:

- Grunden skall ha lågt U-värde, d.v.s. vara välisolerad
- Värmemotståndet mellan skiktet där slingan befinner sig och inommiljön skall minimeras.

Om kantbalkens inverkan på den lokala isoleringsverkningsgraden är liten kan den globala isoleringsverkningsgraden för hela golvvärmesystemet beräknas ur följande enkla ekvation:

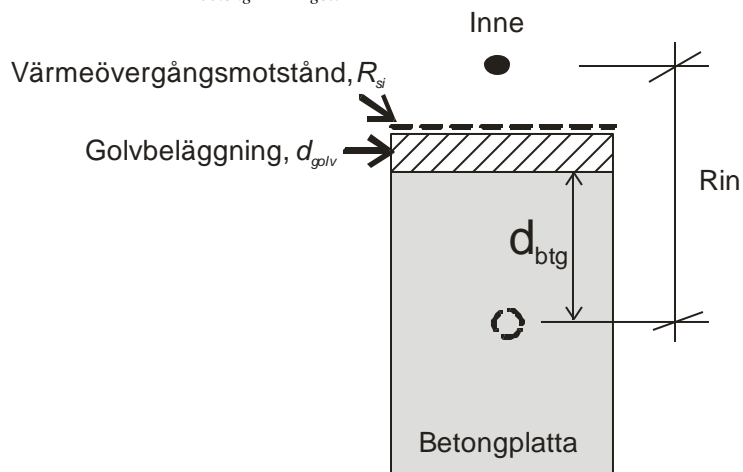
$$\eta = 1 - U_{grund} \cdot R_{in}$$

Där:

$R_{in}$  Värmemotstånd från rörets placering i grunden till inomhusluften Figur 26. ( $m^2\text{°C/W}$ ). Det beräknas som summan av delskiktens värmemotstånd mellan innemiljön och positionen för golvvärmerören.

$U_{grund}$  Grundens U-värde utan golvvärme ( $W/m^2\text{°C}$ )

I Figur 26 visas att  $R_{in}$  är summan av värmemotstånden för betongen, med tjockleken,  $d_{betong}$  golvbeläggningen med tjockleken  $d_{golv}$  och värmeövergångsmotståndet  $R_{si}$ . Motståndet  $R_{in}$  är således summan av motstånden:

$$R_{in} = \frac{d_{betong}}{\lambda_{betong}} + \frac{d_{golv}}{\lambda_{golv}} + R_{si} \quad (m^2\text{°C/W})$$


Figur 26  $R_{in}$  anger det totala värmemotståndet mellan skiktet med rör och inomhustemperaturen.

## Bilaga 2

### **Fördjupad beskrivning av ingående parametrar för kvantifiering av självregleringens utnyttjandegrad**

Förenklat kan vi anta att det finns ett representativt tvärsnitt vars normal är parallell med golvvärmeslingan, se Figur 2. Detta representativa tvärsnitt motsvarar hela golvvärmekonstruktionen längs med slingan i ett enda tvärsnitt. Vi skall använda det representativa tvärsnittet för att beräkna förmågan att leda värme från golvvärmeslingan upp till rummet. Vi benämner värmekonduktansen mellan vattnet i tvärsnittet upp till inomhustemperaturen med  $a_{up}$  (W/m/K) (per löpmeter golvvärmeslinga). För de flesta golvkonstruktioner kan  $a_{up}$  beräknas med hjälp av lämpligt beräkningsprogram för tvådimensionell värmeledning (t.ex. Therm, Heat2, David-32, Comsol) där hela det representativa tvärsnittet beräknas, se Figur 27. Vid beräkningen är det viktigt att ansätta en korrekt värmeöverföringskoefficient för konvektion och värmestrålning vid golvytan. I de exempel som anges här används 9 W/m<sup>2</sup>/K för den samlade effekten av värmestrålning och konvektion vid den uppvärmda golvytan. För beräkning av lätta golvvärmekonstruktioner krävs detaljerade randvillkor, t.ex. kontaktmotstånd för värmeöverföringen mellan PEX-rör och värmefördelningsplåtar i aluminium. Enligt definitionen av isoleringsverkningsgraden finns det också ett mindre värme flöde från golvvärmeröret i riktning mot utomhustemperaturen (genom grundkonstruktionen), värmekonduktansen för detta förlustflöde benämns  $a_{down}$  (W/m/K) och beräknas parallellt med  $a_{up}$ .

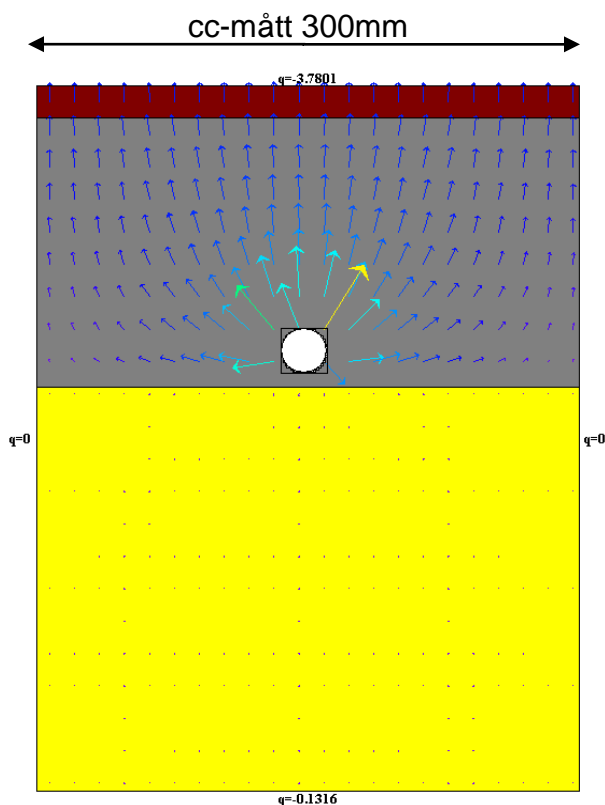
Ekvation 2.1 ger sambandet mellan vattenflöde  $V_f$  (m<sup>3</sup>/s), golvvärmekonstruktion och den totala värmekonduktansen  $K_{up}$ .  $L$  (m) är slinglängden,  $\rho C$  är den specifika värmekapaciteten för vätskan i slingan (J/m<sup>3</sup>/K) och  $l_c$  (m) är den karakteristiska längden som beskriver den exponentiellt avtagande vattentemperaturen längs golvvärmeslingan, se ekvation 2.2. Figur 28 illustrerar ekvation 2.1 för ett exempel med en specifik golvvärmekonstruktion (referenskonstruktionen som används i ett flertal av exemplen). Ett lågt vattenflöde i slingan reducerar värmeväxlingen från vatten till rum, vattenflödet



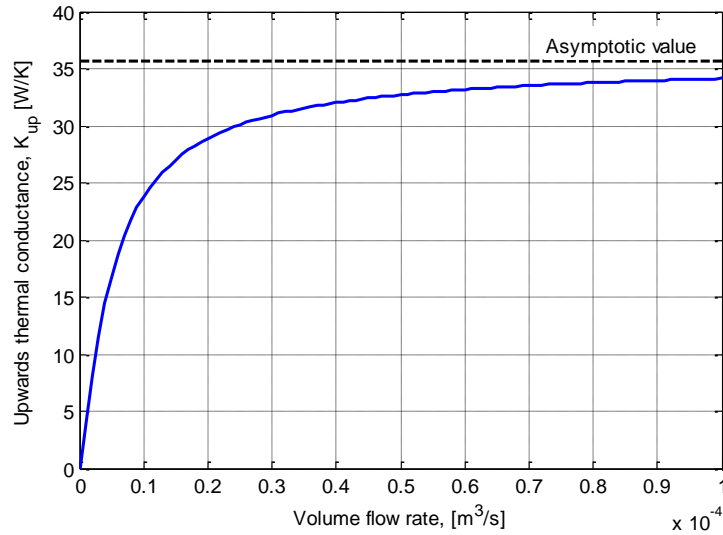
är då så långsamt att vattnet relativt snabbt antar det omgivande materialets temperatur (betongen/avjämningsmassan). Med höga vattenflöden i slingan nås den maximala värmeöverföringen för en given golvvärmekonstruktion. Värdet på  $K_{up}$  närmar sig asymptotiskt  $a_{up} \times L$  för kraftiga vattenflöden. I praktiken begränsas vattenflödet av tryckförlusterna längs golvvärmeslingan vilket leder till ett ökat pumparbete för cirkulationspumpen.

$$K_{up} = h \cdot rcV_f \left( 1 - e^{-\frac{L}{l_c}} \right) \quad (2.1)$$

$$l_c = \frac{rcV_f}{a_{up} + a_{down}} \quad (2.2)$$



**Figur 27** Illustration från beräkningen av värmeöverföringsförmåga  $a_{up}$  och  $a_{down}$  för ett representativt tvärsnitt med cc-mått 300mm, 100mm betongplatta, 14mm parkett, markisolerings. Bilden visar värmeflödet från rör mot inomhustemperaturen och mot den underliggande marken.



Figur 28  $K_{up}$  som funktion av slingans vattenflödet  $V_f$ . Sambandet gäller för en specifik golvvärmekonstruktion:  $a_{up}=0.85$  W/m/K,  $h=0.971$  and  $L=42$  m.

Följande faktorer genererar en kraftfull  $K_{up}$ :

- Golvbeläggning med lågt värmemotstånd –  $a_{up}$  ökar
- Täta slingor (litet cc-mått) –  $a_{up}$  ökar
- Slingor placerade nära golvytan –  $a_{up}$  ökar
- Slingans vattenflöde är stort –  $K_{up}$  närmar sig värdet på  $a_{up} \times L$

## Referenser

### Publicerat inom projektet

Karlsson, H. (2006). *Thermal system analysis of embedded building integrated heating - Numerical model and validation of hydronic floor heating systems*. Licentiatavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

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

Karlsson, H. (2010B). Embedded water-based surface heating, Part 1: Hybrid three-dimensional numerical model. *Journal of Building Physics*, 33(4): 357-392.

Karlsson, H. (2011). Embedded water-based surface heating, Part 2: Experimental validation. *Journal of Building Physics*, 34(2): 143-162.

Karlsson, H. och Hagentoft, C.-E. (2011A). Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings. *Building and Environment*. 46(3), 556-569.

Karlsson, H. och Hagentoft, C.-E. (2011B). Self-regulated water-based floor heating analysed by a response factor method. Submitted to *Building and Environment*.

Karlsson, H., Hagentoft, C.-E. (2005). Modelling of Long Wave Radiation Exchange in Enclosures with Building Integrated Heating, *Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Reykjavik, Island.

Karlsson, H. (2007). An innovative floor heating application - transfer of excess heat between two building zones. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference*, Peking, Kina.

Karlsson, H. (2008). Self-Regulating Floor Heating Systems in Low Energy Buildings. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Symposium on Buildings Physics in the Nordic Countries*, 519-526. Köpenhamn, Danmark.

Hagentoft, C.-E., Karlsson, H. och Sasic Kalagasidis, A. (2008). Floor heating in buildings with small energy demand for heating – Feasibilities for the control of the internal temperature using heating. *Proceedings of the Buildings Physics Symposium in honour of Professor Hugo L.S.C. Hens*, 85-89. Leuven, Belgien.

### Övriga referenser

Sasic Kalagasidis A. (2004). *HAM-Tools An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analysis in Building Physics*. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.

Sasic Kalagasidis, A. och Hagentoft, C.-E. (2005). Byggnadsfysikalisk dimensionering med HAM-Tools. *Väg- och Vattenbyggaren* 2005:5.

Forum för Energieffektiva Byggnader, FEBY (2009). *Kravspecifikation för Passivhus (Version 2009)*.

Boverket (2011). *Boverkets byggregler, BBR 18*.

Energimyndigheten (2001). *Svensk småhusbyggnation 2000/2001*.

Energimyndigheten, (2009). *Energistatistik för småhus, flerbostadshus och lokaler 2009*.