



**CHALMERS**

**INSTALLATIONSTEKNIK**

**EFFSYS 2**

*Effektivare kyl- och värmepumpssystem*

Rapport R2010:02

**OPTIMERING AV  
MARKLAGERANSLUTNA  
VÄRMEPUMPSYSTEM FÖR  
KLIMATISERING AV BYGGNADER**

**Per Fahlén, Saqib Javed och Johan Claesson**

Göteborg  
Juni 2010

# OPTIMERING AV MARKLAGERANSLUTNA VÄRMEPUMPSYSTEM FÖR KLIMATISERING AV BYGGNADER

Per Fahlén, Saqib Javed och Johan Claesson

© PER FAHLÉN, 2010

Report R2010:02  
Building Services Engineering  
Department of Energy and Environment  
Chalmers University of Technology  
S\_412 96 GÖTEBORG  
Sweden  
Telephone +46 (0)31 772 1000

ISSN 1652-6007

# OPTIMIZATION OF GROUNDSTORAGE HEAT PUMP SYSTEMS FOR SPACE CONDITIONING OF BUILDINGS

PER FAHLÉN, SAQIB JAVED and JOHAN CLAEISSON  
Building Services Engineering  
Chalmers University of Technology

## Summary

Demand for space heating decreases in the non-residential sector. Many buildings have a daytime cooling demand while there may be a heating demand at night. One efficient solution for these buildings is to use the ground as source, sink or intermediate storage of heat and to raise or lower the temperature to the required level by means of a heat pump. Compared to district heating and cooling, purchased energy may be reduced by a factor 7-8. Ground collector size and geometry is decided by whether the ground will act as source, sink or storage. Optimization of the overall function requires synchronization of ground, heat pump and building but the calculation tools have so far been missing. This report provides results from a Ph.D. project that aims at developing a technique for complete system simulations. So far, the work has resulted in:

- A new ground-source heat pump testing facility including a 9-borehole storage, 3 heat pumps, 5 storage tanks, dedicated loads in terms of an air-handling unit and an underfloor system for heating and cooling.
- A detailed literature review of the current status of analytical solutions to model the heat transfer in borehole systems,
- A conclusion that analytical solutions to model the short-term response of boreholes have been missing and this is the case also regarding the long-term response of the multiple borehole systems.
- New, validated methods to model long-term response of multiple boreholes based on existing analytical solutions
- A new, validated analytical solution to model the short-term response of a borehole system. This method uses Laplace transforms to provide an exact solution of the radial heat transfer problem in boreholes.
- A new, validated numerical solution to model the short-term response of a borehole system by means of a coordinate transformation technique.
- An analysis of the uncertainty of input parameters when studying the thermal response of our laboratory borehole system. Data from thermal response tests have provided values for undisturbed ground temperature, thermal conductivity and borehole resistance values for all nine boreholes.

The main conclusion of the work is that we now have analytical as well as numerical solutions which can easily be integrated in building energy simulation software to optimize the overall performance of a ground-coupled system. Another conclusion is that short test duration yields the largest uncertainty in thermal conductivity estimations but also that variations in the estimated parameters do not affect the borehole field design significantly.

**Keywords:** borehole, fluid temperature, ground-coupled, ground heat exchanger, ground source heat pump, optimization, sensitivity analysis, simulation, thermal response test.

# OPTIMERING AV MARKLAGERANSLUTNA VÄRMEPUMP-SYSTEM FÖR KLIMATISERING AV BYGGNADER

PER FAHLÉN, SAQIB JAVED and JOHAN CLAEISSON  
Installationsteknik, Institutionen för Energi och Miljö  
Chalmers tekniska högskola AB

## Sammanfattning

Värmebehoven har minskat inom lokalsektorn. Många byggnader har dagtid ett kylbehov medan det kan finnas värmebehov nattetid. En effektiv lösning för dessa byggnader är att utnyttja marken som värmesänka, värmekälla och utjämningslager och med hjälp av värmepump höja eller sänka temperaturen till erforderlig nivå. Jämfört med fjärrvärme och fjärrkyla kan den köpta energin sänkas med en faktor 7-8. Markkollektorns dimensionering och geometri bestäms av om marken ska fungera som källa, sänka eller lager. Optimering av totalfunktionen kräver samordning mellan mark, värmepump och byggnad och för detta har lämpliga beräkningsverktyg saknats. Denna rapport behandlar resultat från ett doktorandprojekt som syftar till utveckling av en teknik för kompletta systemsimuleringar. Hittills har arbetet resulterat i:

- En ny laboratorieanläggning för markvärmesystem som omfattar ett 9-håls lager, 3 värmepumpar, 5 ackumulatortankar, specialkonstruerade laster i form av luftbehandlingsaggregat och golvsystem för värme och kyla.
- En detaljerad litteraturstudie beträffande dagsläget för analytiska modeller för värmeöverföring i borrhålssystem.
- En slutsats att analytiska modeller för korttidssvar i borrhål har saknats och att detta gäller även för långtidssvar för flerhålsystem.
- Nya, validerade metoder för att modellera långtidssvar från flerhålsystem baserade på existerande analytiska lösningar.
- En ny, validerad analytisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem. Denna metod använder Laplacetransformer för att ge en exakt lösning till det radiella värmetransportproblemet i borrhål.
- En ny, validerad numerisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem med hjälp av en koordinattransformationsteknik.
- En analys av osäkerheten för beräkningsindata i samband med analys av vårt borrhålssystem. Data från termiska responstester har gett värden för den ostörda marktemperaturen, värmekonduktiviteten och borrhålets termiska motstånd för samtliga nio borrhål.

Som huvudresultat av projektet har vi nu fungerande analytiska och numeriska modeller som lätt kan integreras i energiberäkningsprogram för byggnader för att optimera totalfunktionen för ett marklagersystem. Delresultat från våra responstester visar att alltför kort provtid är den viktigaste osäkerheten för beräkning av markens värmekonduktivitet men också att variationer i de beräknade parametrarna inte har någon avgörande inverkan på dimensioneringen av ett borrhålssystem.

**Nyckelord:** borrhål, bergvärme, känslighetsanalys, köldbärartemperatur, mark, markkollektor, markvärmepump, optimering, simulering, termisk responstest.

# Förord

Denna rapport behandlar ett forskningsprojekt som genomförts vid avdelningen för Installationsteknik, institutionen för Energi och Miljö, Chalmers tekniska högskola. Projektet har haft titeln:

## **Optimering av marklageranslutna värmepumpsystem för klimatisering av byggnader**

och har finansierats av 14 företag samt Energimyndighetens forskningsprogram Effsys 2. Energimyndighetens beteckning är:

Dnr: 2006-05266

Beslut: P30477-1

Arbetsnummer: P7

Vi vill tacka alla medverkande för gott samarbete med en förhoppning om en snar fortsättning.

Göteborg

Juni 2010

Per Fahlén, Saqib Javed och Johan Claesson



<b>Innehåll</b>	<b>Page</b>
<b>Summary</b>	<b>ii</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>iii</b>
<b>Förord</b>	<b>iv</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Forskargrupp och projektdeltagare	4
<b>2 Projektets genomförande</b>	<b>7</b>
2.1 Projektplan	7
2.2 Förväntade resultat	8
<b>3 Fallstudier</b>	<b>9</b>
3.1 Småhus med återladdat borrhål	9
3.2 Kontorshus i Lund	11
3.3 Skola i Sandhult	12
<b>4 Resultat</b>	<b>13</b>
4.1 Resultatsammanfattning	13
4.2 Resultatspridning	14
<b>5 Diskussion och slutsatser</b>	<b>21</b>
5.1 Diskussion	21
5.2 Kommersialiseringsmöjligheter	21
5.3 Slutsatser	22
<b>6 Referenser</b>	<b>23</b>





# 1 Inledning

I vår forskning om behov för värme och kyla i olika typer av byggnader har vi noterat en stark förändring av behovsmönstret. I Sverige fanns tidigare huvudsakligen ett större eller mindre värmebehov med värmeflöde i en riktning. Numera har moderna lokalbyggnader i stället en situation där värmeflöde växlar riktning flera gånger per dygn och dessutom kan ha olika riktning i olika delar av byggnaden. Detta innebär helt andra beräkningsförutsättningar för markvärmesystem med värmepumpar där också värmeflödet kan växla riktning i borrhålet flera gånger per dygn. Det innebär samtidigt att borrhålet i stor utsträckning fungerar som ett korttidslager och att värmen som hämtas och lämnas i huvudsak aldrig lämnar själva borrhålet och regionen närmast borrhålsväggen.

I denna rapport behandlar vi ett arbete som bidrar till att lösa de nya problemställningarna. Arbetet har genomförts inom projektet "**Optimering av marklageranslutna värmepumpsystem för klimatisering av byggnader**" och det behandlar *full klimatkontroll, optimal styrning och energilagring* med möjlig tillämpning i ett *totalenergisystem*. Tekniken kan bidra till att *kapa toppar i el-effektbehovet* och involverar *samarbete över teknikområden* (installationsteknik, byggnadsfysik, geoteknik). Nyckelorden i kursiv stil är tagna från Effsys egen SWOT-analys .

## 1.1 Bakgrund

Tekniken med borrhålslager kombinerad med värmepump har en lång tradition, framförallt för att täcka behov för uppvärmning. Allteftersom fler och fler byggnader får stora kylbehov ökar intresset för att utnyttja borrhålssystem både som värmekälla, värmesänka och värmelager. Tekniken utnyttjas kommersiellt och Akademiska Hus fick stora energipriset år 2005 för sitt arbete med detta. En viktig anledning till det ökade intresset är att behovet av köpt värme har minskat dramatiskt inom lokalsektorn. Numera har många moderna byggnader dagtid ett kylbehov nästan hela året. Däremot kan det finnas värmebehov nattetid (en kontorsbyggnad har helt skilda förutsättningar dagtid och nattetid). Figur 1.1 visar utvecklingstendensen i Sverige för hur värmebehoven minskar och el-behovet ökar, framförallt inom lokalsektorn.

Under årets kalla del kan man lösa kylbehovet genom ett ökat intag av uteluft men sommarhalvåret är detta inte möjligt eller också blir luftflödena orimligt stora. Ett alternativ, som blir allt vanligare, är att utnyttja marken som värmesänka, värmekälla och utjämningslager och med hjälp av värmepump höja eller sänka temperaturen till erforderlig nivå för att klimatisera byggnaden. I jämförelse med fjärrvärme och fjärrkyla har andelen köpt energi kunnat sänkas med en faktor 7-8. Den kommersiella potentialen är stor, speciellt i det befintliga beståndet av lokaler och i perspektiv av kommande energideklarationer och energiprishöjningar.

Beroende på byggnaden och dess verksamhet kan antingen kyl- eller värmebehovet dominera eller så har man balans över året mellan dessa behov. Därmed ställs också olika krav på markkollektorns dimensionering och geometri beroende på om marken ska fungera som källa, sänka eller lager. I dagsläget utnyttjar man olika beräkningsprogram för att analysera kollektorsystem och byggnaden. Optimering av totalfunktionen kräver en växelverkan mellan mark, värmepump och

byggnad och detta projekt har syftat till att utveckla en teknik för att hantera denna problemställning. Målet är att kunna genomföra en hel systemsimulering, inklusive möjligheten till vätskekopplad värmeåtervinning, i ett enda paket.

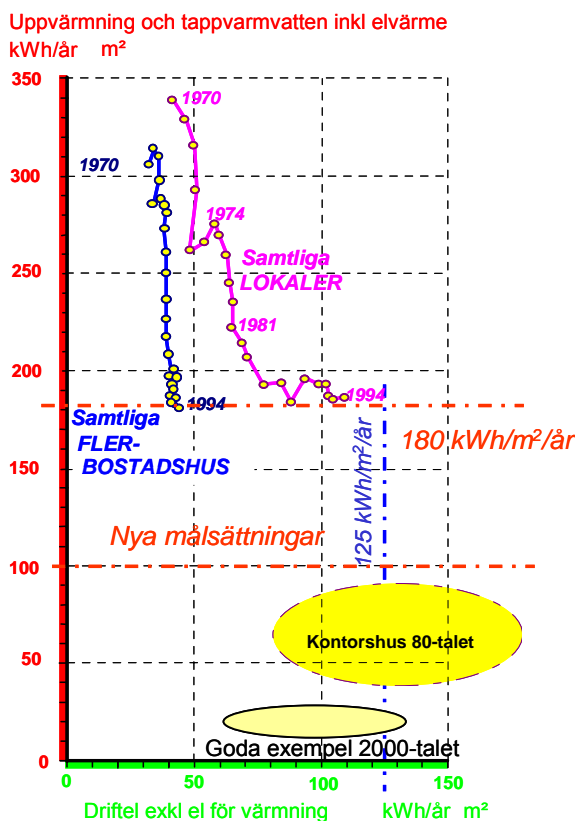
### Trend

- Värmebehov minskar
- El-behov ökar
- Små värmebehov nattetid
- Stora kylbehov dagtid

### Värmeöverskott kräver el till drift av:

- Värmepumpar
- Fläktar
- Pumpar

(mest el kräver ofta fläktdriften)



**Figur 1.1** Förändring av värme- och el-användning i byggnader (Fahlén, 2005; baserat på ett diagram från Enno Abel).

I den pågående, övriga forskningsverksamheten vid avdelningen för Installations-teknik har vi flera projekt som ger underlag för den aktuella studien, t.ex. beträffande effektivisering av pump- och fläktdrifter med hjälp av ny styrteknik, ny kraftelektronik och ny motorteknik (i samverkan med Elteknik på Chalmers), behovsstyrd ventilation, självoptimerande drift av kapacitetsreglerade värmepumpar, återladdning av borrhål med värme ur frånluft och uteluft, frikyla, integrerad vätskekopplad värmeåtervinning (jämför med Figur 3.1) och modellering av byggnadsdelar med hjälp av dynamiska termiska nätverk.

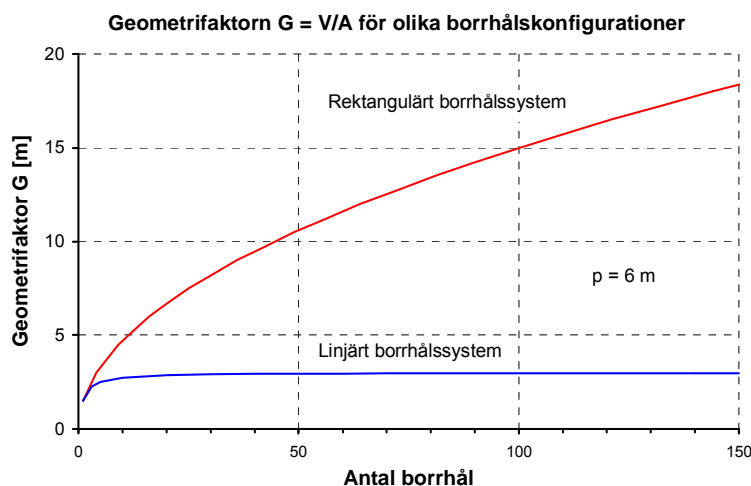
En inledande studie vid avdelningen för Installationsteknik har pekat ut några viktiga faktorer att beakta vid dimensionering av system för kombinerad värme och kyla:

- Byggnadens lastprofil, d.v.s. relationen mellan värme/kyla
- Borrhålens belastning i form av specifikt uttagen värme under vinter [kWh/m/år] och specifikt tillförd värme under sommaren [kWh/m/år]
- Borrhålssystemets geometri karakteriserad av antal borrhål och deras djup, avstånd mellan borrhålen, förhållande längd/bredd (rektangulär eller linjär form)

Man kan urskilja tre huvudtyper av tillämpningar:

- Dominerande värmebehov när det är lämpligt med direkt värmeväxling och en linjär konfiguration
- Dominerande kylbehov när det är lämpligt med direkt värmeväxling och en linjär konfiguration
- Balanserade värme och kylbehov när det är intressant med lagring och därmed en rektangulär konfiguration (se Figur 1.2)

Värmepumpssystemet kopplas i denna typ av tillämpning antingen indirekt med köldbärare (vätskekylaggregat), vilket ger en enkel möjlighet till frikyla, eller som DX-system (reversibel värmepump) och normalt utan frikyla. Det första alternativet är det som används i Sverige medan det andra sättet är vanligt i USA.



**Figur 1.2** Förhållandet (geometrifaktorn  $G$ ) mellan lagringsvolym och omslutande, värmeväxlande area mot marken runt ett borrhålssystem.

## 1.2 Syfte och mål

Projektet har haft två huvudmål, ett akademiskt/forskningsmässigt och ett marknads/tillämpningsinriktat:

*Mål för forskningsprojektet:* Att ge beräkningsverktyg för att kunna genomföra en komplett systemmodellering av en byggnad med markkollectorer och värmepump. Akademiskt mål är en licentiatuppsats.

*Mål för marknadspenetration:* Att identifiera systemlösningar som klarar att klimatisera lokalbyggnader med mindre än  $20 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2/\text{år}$  och  $5 \text{ kWh}_{\text{värme}}/\text{m}^2/\text{år}$  köpt energi för hela behovet av värme och kyla. Lösningarna ska vara konkurrenskraftiga mot alternativet fjärrvärme/fjärrkyla. Ett annat mål är att visa på konkurrenskraftiga alternativ även för flerbostadshus. Målet är att hitta lösningar som i flerbostadshus kan reducera behovet av köpt energi för värme från dagens medelnivå  $150 \text{ kWh}_{\text{värme}}/\text{m}^2/\text{år}$  till  $< 40 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2/\text{år}$ . En viktig faktor för marknadspenetration är tillgång till kompetenta projektörer och beställare. Inom ramen för forskarutbildningen och projektarbetet kommer vi att få en expert på denna typ av system, som i sin tur kan utbilda blivande och idag praktiserande ingenjörer.

I projektets fas I, som redovisas i denna rapport, har fokus varit på forskningsmålen. Tillämnningar och marknadspenetration kommer att behandlas mer i nästa fas.

## 1.3 Forskargrupp och projektdeltagare

Denna rapport behandlar resultat från forskningsprojektet **Optimering av marklageranslutna värmepumpsystem för klimatisering av byggnader**. Forskningsprojektet har genomförts i nära samarbete mellan en forskargrupp vid Chalmers tekniska högskola och 14 företag.

### Forskargrupp

Forskargruppen finns på avdelningen för Installationsteknik vid institutionen för Energi och Miljö i samverkan med Byggnadsteknologi. Följande personer har medverkat:

#### Installationsteknik

Projektledare,  
Huvudhandledare  
Professor Per Fahlén  
031-772 11 42  
[per.fahlen@chalmers.se](mailto:per.fahlen@chalmers.se)

Forskare,  
Doktorand  
Saqib Javed  
031-772 11 55  
[saqib.javed@chalmers.se](mailto:saqib.javed@chalmers.se)

Forskare,  
Handledare  
Johan Claesson  
031-772 19 96  
[johan.claesson@chalmers.se](mailto:johan.claesson@chalmers.se)



### Forskargruppens expertis

Forskargruppen vid Chalmers har en god samlad kompetens inom området. Avdelningen för Installationsteknik har kompetens både inom kylteknik och inom tillämpningen med klimatisering av byggnader. Avdelningen för Byggnadsteknologi har en gedigen kompetens beträffande modellering av energiflöden och temperaturförhållanden i byggnadsdelar och i mark. Det finns också en direkt koppling till parallella aktiviteter inom forskargruppen beträffande tillämpningen av frikyla i livsmedelsbutiker och köpcentra, bl.a. med utnyttjande av markkollektorer.

- Projektledaren professor Per Fahlén har arbetat med värmepumpar och markvärmesystem i 30 år och har även utvecklat avancerade dynamiska beräkningsmodeller för byggnader.
- Professor Johan Claesson har varit huvudförfattare till Markvärmehandboken, vilken blivit ett internationellt standardverk för beräkning av markvärmesystem och lager. Professor Claesson har även utvecklat en teknik med dynamiska termiska nätverk, som även tillämpats i detta doktorsarbete.
- Doktoranden M.Sc. Saqib Javed har en mastersexamen från University of Sydney och har efter sin examen arbetat flera år för York i internationella projekt med stora komfortkylanläggningar, bl.a. i Saudiarabien.

Våra samarbetspartners och finansiärer redovisas nedan:

### **Företag**

- Akademiska Hus, Box 483, 401 27 GÖTEBORG
- Carrier AB, Box 8946, 402 73 GÖTEBORG
- CTC, Division of Enertech AB, Box 309, S-341 26 LJUNGBY
- Fastighetsägarna, Box 12871, 112 98 STOCKHOLM
- Geotec, Box 174, SE-243 23 HÖÖR
- Grundfos AB, Box 333, 431 24 MÖLNDAL
- IVT AB, Box 1012, 573 28 TRANÅS
- Nibe AB, Box 14, 285 21 MARKARYD
- NCC Construction Sverige AB, NCC Teknik, 405 14 GÖTEBORG
- SWECO Theorells AB, Box 340 44, 100 26 STOCKHOLM
- TAC, Jägershillgatan 18, 213 75 MALMÖ
- Thermia Värme AB, Box 950, 671 29 ARVIKA
- Wilo AB, Box 3024, 350 33 VÄXJÖ
- ÅF-Infrastruktur AB, Kvarnbergsgatan 2, 401 51 GÖTEBORG

### **Universitet**

- Donghua University, College of Environmental Science and Engineering, 1882 West Yan'an Road, 200051 SHANGHAI, P.R.of China
- Lunds Tekniska Högskola, Matematisk Fysik, Box 118, S-221 00 LUND

### **Forskningsfinansiär**

- Forskningsprogrammet Effsys 2 för effektivare kyl- och värmepumpssystem  
Statens Energimyndighet, Kungsgatan 43, Box 310, 631 04 ESKILSTUNA



## **2 Projektets genomförande**

Projektet har genomförts i samarbete mellan Chalmers och 14 företag. Chalmers har haft huvudansvaret för genomförandet av forskningsuppgifterna. Företagen har medverkat aktivt, både som diskussionspartners och med data från egna mätningar samt med komponenter till laboratorieinstallationen på Chalmers.

### **2.1 Projektplan**

Projektplanen sammanfattas nedan i punkterna 1-6. De två viktigaste forskningsuppgifterna, som identifierats i en tidigare licentiatuppsats från Installationsteknik, har varit att ta fram:

- En sammanhållen modell av hela systemet markkollector – värmepump - byggnad, som underlättar arbetet med att optimera lösningen för en given tillämpning. När arbetet startade saknades det bra modeller för integration i energiberäkningsprogram för byggnader både för korttidssvar för borrhål, enskilda såväl som multipla, samt långtidssvar för multipla borrhål.
- Ett bra mättekniskt underlag för uppföljning av systemens funktion i detalj och fastighetens övergripande användning av energi och effekt. Underlaget saknades i stor utsträckning när projektet startade och behövs också för att validera beräkningsmodellerna. En stor del av detta arbete kommer att genomföras i nästa fas av projektet.

#### **2.1.1 Sammanställning av tidigare arbeten**

- Litteratursökning via databaser (t.ex. FRIDOC och COMPENDEX).
- Personliga kontakter med branschfolk (fastighetsägare/förvaltare, konsulter, värmepumpstillverkare, brunnsborrare, energiföretag, branschorganisationer som SVEP, provnings- och forskningsinstitutioner som SP, DTI, Cetiat, TNO, LTH, KTH, DTU, etc.).

#### **2.1.2 Sammanställning av kunskapsläget (analys och syntes)**

- Praktiska erfarenheter och mätresultat.
- Framtida potentialbedömning.
- Befintliga analytiska och numeriska beräkningshjälpmedel
- Modellerings teknik och matematiska hjälpmedel.
- Identifiering av utvecklingsbehov, behov av mättekniskt underlag för validering av modeller och lämpliga vägar för att komma vidare.

#### **2.1.3 Sammanställning av dagens systemlösningar**

- Inventering från kunskapssammanställningen. Gruppering och val av system för vidare studier (modellering och mätning).

#### 2.1.4 Fältmätningar

- Inventering av redan gjorda fältmätningar från kunskapssammanställningen.
- Inventering av behovet för nya mätningar.
- Planering av mätprogram och val av anläggningar (projektering av nya anläggningar pågår och därmed kan mätningar planeras in från början till fas II).
- Montering av mätutrustning.
- Mätning och analys av resultat.

#### 2.1.5 Teoretisk analys

- Utveckling av delmodeller för kollektor, värmepump och byggnadsinstallationer (värmeväxlare, pumpar, fläktar etc., huvudsakligen befintliga modeller).
- Jämförelser mellan beräkning och mätning (i första hand med redan gjorda laboratorieundersökningar).
- Simulering av några alternativa lösningar och olika dimensionering för att få en känslighetsanalys (hur kritiskt är systemval och dimensionering för det tekniskt/ekonomiska resultatet?). Framtida simuleringar bör kunna ta hänsyn till pump- och fläkteffektivitet, styrprincip, möjligheter till regenerering av borrhålslager även med t.ex. uteluft (kall eller varm beroende av behovet), vätskekopplad värmeåtervinning via borrhållssystemet (hög verkningsgrad utan behov av avfrostning vintertid) etc.
- Identifiering av svagheter och styrkor för respektive systemlösning (energi-mässigt, ekonomiskt och ur drift- och underhållssynpunkt).

#### 2.1.6 Rapportering

- Resultat och jämförelser har rapporterats på konferenser och i tidskriftsartiklar samt i en licentiatuppsats (se 4.2). I fas II planerar vi att sammanställa resultaten i form av en beställarhandledning och en projekteringshandledning (i samverkan med deltagande industriparter). Akademiskt har projektet avslutats med en licentiatavhandling i fas I och en doktorsavhandling planeras i fas II.

### 2.2 Förväntade resultat

Huvudfokus i projektets första fas har varit att ta fram en matematisk modelleringsteknik som kan hantera kompletta system för markkollektorer kopplade till värmepumpar för klimatisering av byggnader. Med utgångspunkt från forskningsresultaten räknar vi med att kunna integrera våra nya modeller i praktiska beräkningsverktyg med olika grad av detaljeringsnivå för byggnad, värmepump och marksystem.

Det fortsatta arbetet ska också resultera i fler praktiska erfarenheter från verkliga system, dels för fortsatt validering av modelleringsarbetet och dels för bedömning av tillämpningspotentialen. Det akademiska resultatet har blivit en licentiatexamen samt ett antal vetenskapligt granskade publikationer. Arbetet har också gett en plattform för att gå vidare mot en doktorexamen, främst genom ett utvecklat modelleringsarbete och kompletterande mätningar.



## 3 Fallstudier

I projektet har flera fallstudier planerats. Från två anläggningar finns redovisade mätresultat, ett småhus med borrhålsåterladdning samt ett kontorshus med lager (se nedan). Dessutom har omfattande mätningar gjorts i ett experimentlager i anslutning till Installationstekniks försöks hall på Chalmers. Dessa mätningar samt mätningar från en laboratorieuppställning med "horisontellt borrhål" i en sandlåda på University of Oklahoma finns presenterade i Saqib Javeds licentiatuppsats. I projektets fortsättning finns flera nya anläggningar under byggnad eller på planeringsstadiet (t.ex. köpcentra och en skola, se nedan). Dessutom har forskargruppen tillgång till en stor databas över mätningar som Akademiska Hus genomför samt från några större anläggningar som värmepumpstillverkarna disponerar.

### 3.1 Småhus med återladdat borrhål

Ett småhus i Borås har mätts som direktelhus, med bergvärmepump utan återladdning (5 år) samt med bergvärmepump med återladdning via ett frånluftsbatteri (9 år). Huset är ett typiskt volymhus från 1970-talet och har haft samma ägare sedan huset byggdes. Huset har också varit modellhus i samband med Nutek och Energimyndighetens teknikupphandlingstävlingar på 1990-talet för värmepumpar, FTX-system, varmvattenberedare, intelligenta styrsystem och konvertering från direktel till fjärrvärme. Huset är täthetsmätt och ventilationen återkommande kontrollerad.

#### Allmänt

Plats: Borås

Klimat: Klimatzon 4, årsmedeltemperatur = +5,8 °C

Typ: Fristående 1½-planshus, volymbyggt

Byggår: 1977



#### Byggnad

Uppvärmad yta:  $A_{temp} = 140$  (boyta) +  $10 \text{ m}^2$  (biyta)

Klimatskärm: torpargrund, isolering 12 cm ( $U \approx 0,35 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ), fönster med 2-glas ( $U \approx 2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ), tak isolerat tillnock (varm vind).

#### Installationer

Ventilation: F-ventilation,  $165 \text{ m}^3/\text{h}$  (0,5 oms/h)

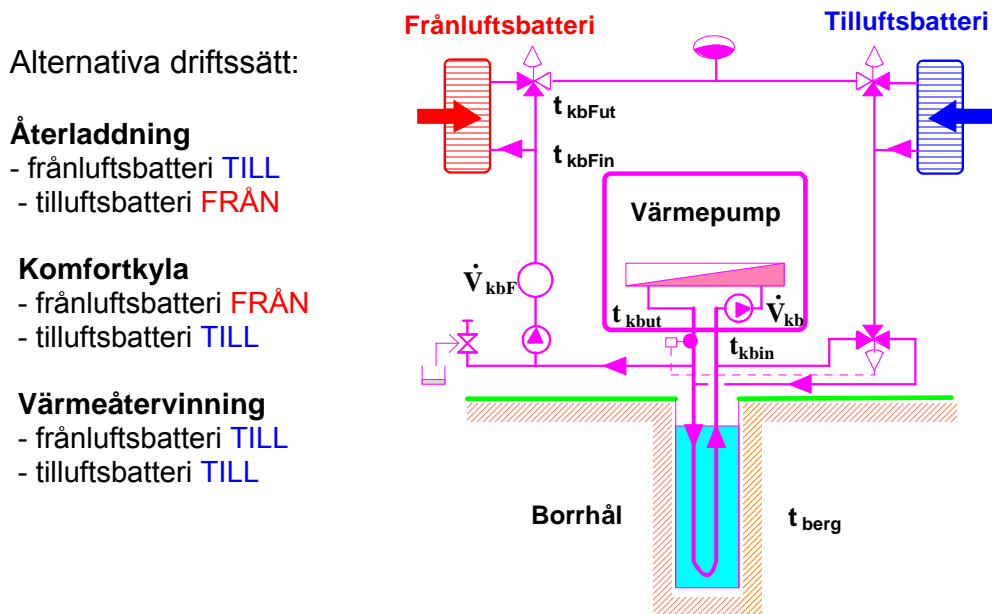
Värme: Direktel, 10,3 kW

Varmvatten: El-beredare, 300 liter, 1,5/3 kW

#### Energi (köpt energi, normalårskorrigerat)

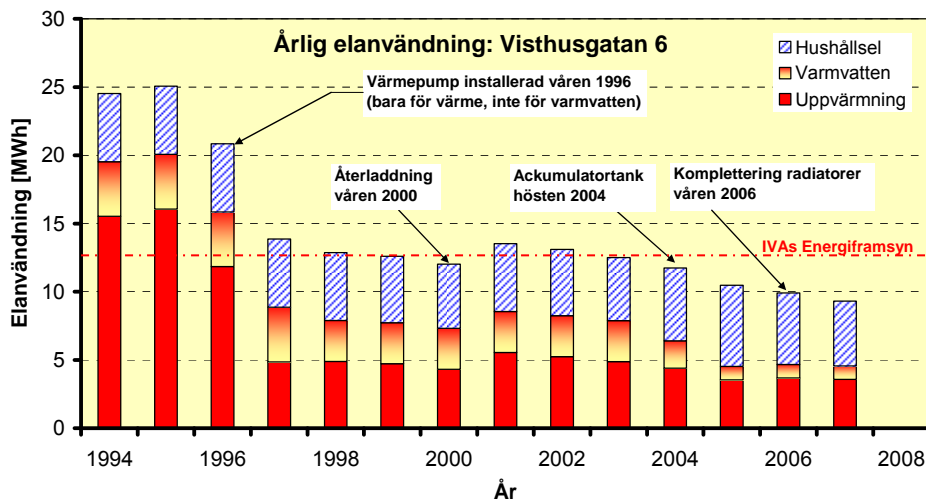
Total el: 25 MWh/år,  $167 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$

Figur 3.1 visar hur värmepumpen och återladdningen är inkopplade mot borrhålet.



**Figur 3.1** Borrhålssystem med integrerad återladdning, frikyla och vätskekopp-  
 lad värmeåtervinning.

Figur 3.2 visar mätresultat från anläggningen. Som framgår av resultaten gav den högre köldbärartemperaturen från återladdningen ingen omedelbar besparing. En förutsättning var att förbättringar gjordes i det interna systemet för att kunna ta emot den ökade effekten från värmepumpen. Efter installation av en specialkonstruerad ackumulatortank 2004 kan återladdningen till fullo utnyttjas och förbättrar resultatet tydligt. I dagsläget har detta 70-tals hus, tack vare en markvärmeanläggning med värmepump, en lägre specifik energianvändning än de omskrivna passivhusen i Lindås.



**Figur 3.2** Årlig köpt energi för värme, varmvatten och el. Hushållselen är nu större än köpt energi för värme och varmvatten.

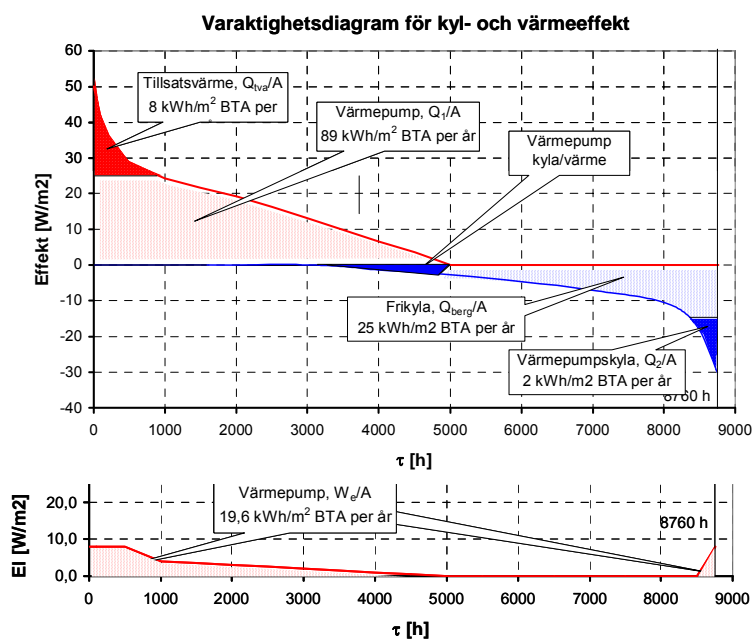
## 3.2 Kontorshus i Lund

Akademiska Hus byggde sin första marklageranläggning för Astronomihuset vid Lunds tekniska högskola. Byggnaden har en klimatiserad yta av 5 300 m<sup>2</sup>, ett ventilationssystem bestående av VAV/CAV med FTX. Uppvärmning sker via konventionella radiatorer och kylningen med hjälp av undertempererad tilluft. Tabell 3.1 redovisar mätdata för den årliga energianvändningen.

Tabell 3.1 Årlig energianvändning i Astronomihuset i Lund.

Årlig energianvändning	MWh/år	kWh/ m <sup>2</sup> /år
<b>Värmebehov</b>	515	97
<b>Värmetillförsel</b>		
Värmepump	475	89
Tillsats	40	8
<b>Kylbehov</b>	155	29
<b>Värmebortförsl</b>		
Frikyla	130	25
Värmepump (v+k)	15	3
Värmepump (k)	10	2
<b>El</b>		
Kompressor	104	19.6
Pumpar	7	1.3

Figur 3.3 nedan ger en översiktsbild av förhållandena mellan köpt värme (fjärrvärme), köpt el samt frikyla och gratisvärme.



Figur 3.3 Exempel från Astronomihuset i Lund. Den dominerande andelen av behoven för värme och kyla täcks av marklagret (prickade ytor).

### 3.3 Skola i Sandhult

En skola i Sandhult utanför Borås har konverterats till värmepump med ett begränsat antal borrhål med återladdning. Skolan ska nu kompletteras med fler och större värmepumpar samt 11 nya borrhål. Planeringen är försenad men vi avser att få med denna anläggning i fas 2.

Fastigheten ägs av Borås stads Lokalförsörjningskontor och har en befintlig värmepumpsinstallation från 2008. I en energideklaration från 2009-07-06 gjord av Borås Energi&Miljö finns utgångsvärden för köpt energi (se Figur 3.4). Skolan består av en gammal byggnad, en mellandel, en gymnastiksal samt en separat förskola (kulvertansluten).

Olja: 119 MWh/år

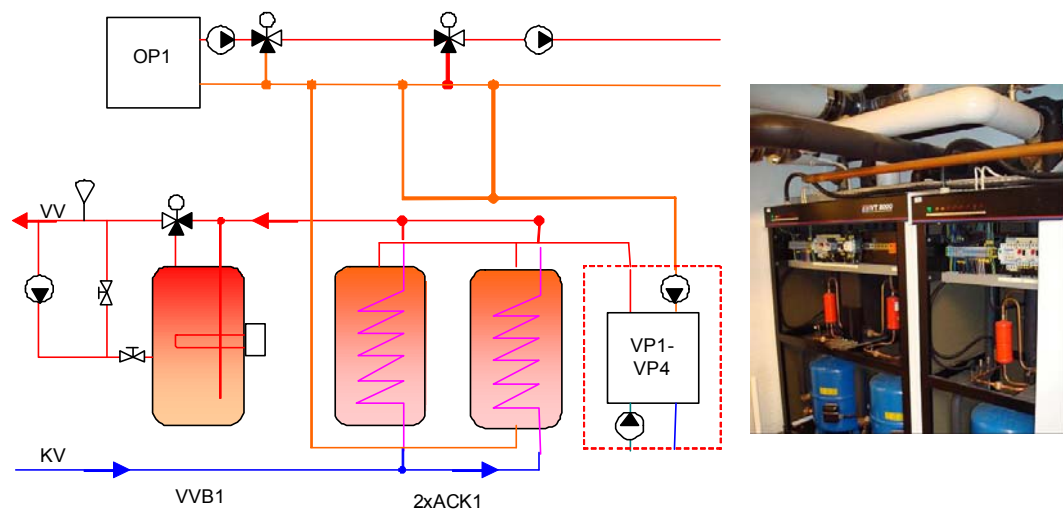
El: 171 MWh/år  
(fastighet + verksamhet)

El: 128 MWh/år  
(värmepump + spetsel)



**Figur 3.4** Skola i Sandhult med data för årlig mängd köpt energi.

Figur 3.5 visar hur värmepumparna (1 till 4) i den befintliga installationen dockats till tankar för värme och varmvatten.



**Figur 3.5** Inkoppling av värmepumpar till befintligt system (kommer att byggas om till nästa år).

## 4 Resultat

Huvuddelen av resultaten finns redovisade och diskuterade i Saqib Javeds licentiatuppsats "**Design of ground source heat pump systems - Thermal modelling and evaluation of boreholes**" (Building Services Engineering, Thesis for Lic.Eng., D2010:02, 116 sidor, Chalmers University of Technology.) Göteborg. Nedan följer några huvudresultat.

### 4.1 Resultatsammanfattning

Projektplanen omfattade kunskapssammanställning, analys, systemlösningar, fältmätningar, samt ett omfattande teoretiskt modelleringsarbete.

#### **Kunskapssammanställning**

Saqib Javeds licentiatuppsats innehåller en detaljerad litteraturstudie beträffande dagsläget för analytiska modeller för värmeöverföring i borrhålssystem.

#### **Analys**

Licentiatuppsatsen innehåller också en noggrann analys av de olika analytiska modellernas tillämpningar och begränsningar. Huvudresultatet är att ingen av de tidigare modellerna klarar att modellera dynamiken i borrhålets närområde vid dygnsvisa variationer av inlagring och uttag av värme. Däremot fungerar de för enskilda borrhål och för långa tidsförlopp.

#### **Systemlösningar**

De system som hittills byggts i Sverige har likartade koncept med enkla U-rörskollektorer, central köldbärarpump med injusterade flöden till enskilda borrhål, kylfunktion via värmeväxling mellan borrhålets köldbärare och byggnadens kylvattenkrets. Vid installationstekniks laboratorium har ett experimentlager byggts där varje borrhål har en egen varvtalsstyrd pump. I projektets fortsättning kan det vara intressant med en samverkan med KTH på kollektorområdet och att studera nya principer för den hydrauliska kopplingen och driftsoptimering (pågående projekt hos Installationsteknik på Chalmers).

#### **Fältmätningar**

Fältmätningresultat finns från en villa och en kontorsbyggnad (se avsnitt 3). En ny laboratorieanläggning för markvärmesystem med nio borrhål har genererat ett stort mätunderlag från responstester.

#### **Teoretisk analys**

Arbetet har resulterat i nya, validerade metoder för att modellera långtidssvar från flerhålssystem baserade på existerande analytiska lösningar samt en ny, validerad analytisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem. Denna metod använder Laplacetransformer för att ge en exakt lösning till det radiella värmetransportproblemet i borrhål. Dessutom har vi tagit fram en ny, validerad numerisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem med hjälp av en koordinattransformationsteknik. Vi har också analyserat osäkerheten för beräkningsindata i samband med analys av vårt borrhålssystem. Data från termiska responstester har gett värden för den ostörda marktemperaturen, värmekonduktiviteten och borrhålets termiska motstånd för samtliga nio borrhål.

## 4.2 Resultatspridning

Resultatspridningen redovisas här lite mer detaljerat än övriga resultat eftersom den inte redovisas i licentiatuppsatsen. Den mest direkta spridningen av projektresultat har skett inom projektgruppen. Mycket öppna och givande diskussioner har kunnat föras och detta informationsutbyte har haft ett värde som väl matchar värdet av själva projektarbetet. Vi har även inkluderat en del av resultaten i grundutbildningen på Chalmers, t.ex. information om legionella och dess riskhantering. Dessutom har ett flertal miniseminarier genomförts i anslutning till projektmötena.

### 4.2.1 Projektmöten

Nedan följer en kort sammanställning av presentationer vid projektmötena (mötesprotokoll finns från samtliga möten):

#### 2007-05-16 Chalmers, Göteborg

*Presentationer:*

- Fahlén, Per (Chalmers). Projektpresentation.
- Hellström, Göran (LTH). GSHP installations - Systems and components.

*Diskussioner:*

Effektproblematik, kostnad för spetseffekt, optimering beträffande temperaturnivåer, inverkan på borrhålsprestanda av variationer i markens beskaffenhet, modelleringsproblem, speciella problem för stora system.

#### 2007-10-10 Chalmers, Göteborg

*Presentationer:*

- Fahlén, Per (Chalmers). Projektpresentation (repris för nytillkomna).
- Javed, Saqib (Chalmers). Literature review.

*Diskussioner:*

Lönar sig återladdning, balansering mellan år med olika laster, olika simuleringsprogram.

#### 2007-12-03 Universitetet i Karlstad

*Diskussioner:*

Huvuddelen av mötet ägnades åt ett studiebesök på ett pågående bygge av ett borrhålslager samt att studera och diskutera de tillhörande installationstekniska systemen.

#### 2008-04-10 Chalmers, Göteborg

*Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Project update.
- Javed, Saqib (Chalmers). Laboratory plans.
- Jönsson, Bertil (Boverket). Legionellarisker i rörsystem.

*Diskussioner:*

Studiebesök i Installationstekniks laboratorium, alternativa beräkningsalgoritmer, betydelsen av att begränsa parasiteffekter (pumpar och fläktar), alternativa möjligheter att återfylla borrhål, försegling och kollektorer.

## **2008-10-01 Chalmers, Göteborg**

### *Presentationer:*

- Hellström, Göran (LTH). The duct storage temperature model.

### *Diskussioner:*

Linje- och cylindermodeller, g-funktioner m.m., grundvattennivå, värmekonduktivitet, responstester, nya borrhålssystem (t.ex. IKEA).

## **2008-12-16 Chalmers, Göteborg**

### *Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Modelling of heat pumps.
- Fahlén, Per (Chalmers). Efficiency aspects of heat pump systems.
- Eriksson, Jens (Thermia). Thermias beräkningsmetoder.

### *Diskussioner:*

Frekvens av olika system, laminär/turbulent strömning, kurvanpassningsmodeller, teknisk eller ekonomisk optimering, användning av varvtalsstyrda pumpar, marksystem kontra fjärrvärme/fjärrkyla.

## **2009-03-18 Chalmers, Göteborg**

### *Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Project update.
- Javed, Saqib (Chalmers). Overview from 2008.
- Claesson, Johan (Chalmers). Outlines of a new analytical model.

### *Diskussioner:*

Modeller för enskilda borrhål och borrhålskluster, formfaktorer och avstånd mellan rör i borrhålet, planering av responstester med mera i laboratorieinstallationen.

## **2009-09-09 Chalmers, Göteborg**

### *Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Project update.
- Javed, Saqib (Chalmers). Recapture of recent publications (Effstock).

### *Diskussioner:*

Modellering av värmepump och markvärmväxlare, Matlab-simuleringsresultat för en värmepump, prestandaskillnader med olika köldmedier, ny planerad anläggning i Sandhult, planerade responstester, begränsningar i vissa företagsprogram.

## **2009-12-08 Chalmers, Göteborg**

### *Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Project update.
- Claesson, Johan (Chalmers). Progress with new models.

### *Diskussioner:*

Besök i Installationstekniks nyligen invigda laboratorium, kritiska punkter i samband med termiska responstester (tidsupplösning, flöde, m.m.).

## 2010-03-09 Chalmers, Göteborg

### *Presentationer:*

- Javed, Saqib (Chalmers). Short term response modelling.
- Javed, Saqib (Chalmers). Thermal Response Testing.

### *Diskussioner:*

Variationer från termiska responstester samt avvikelser mellan befintliga analytiska lösningar.

## 4.2.2 Publikationer och projektinformation

Huvuddelen av projektets vetenskapliga resultat finns presenterade i Saqib Javeds licentiat avhandling **Design of ground source heat pump systems - Thermal modelling and evaluation of boreholes**. Under projektets gång har arbetet redovisats vid egna seminarier, företagsseminarier, konferenser, tidskriftsartiklar och i samband med masterskurser på Chalmers (se nedanstående förteckning). Utöver dessa presentationer finns ytterligare konferensbidrag samt några planerade Chalmersrapporter.

1. Javed, S, 2010. Design of ground source heat pump systems - Thermal modelling and evaluation of boreholes. Building Services Engineering, Thesis for Lic.Eng., D2010:02, 116 sidor. (Chalmers University of Technology.) Göteborg.
2. Javed, S, Claesson, J, Fahlén, P, 2010. Analytical Modelling of Short-term Response of Ground Heat Exchangers in Ground Source Heat Pump Systems. 10th REHVA World congress Clima 2010 Sustainable Energy Use in Buildings, Antalya, Turkey, 2010-05-09--12. (Rehva.)
3. Javed, S., 2010. Short term response modelling. (Project group meeting, 2010-03-09), Gothenburg.
4. Javed, S., 2010. Thermal Response Testing. (Project group meeting, 2010-03-09), Gothenburg.
5. Javed, S, Fahlén, P, 2010. Development and planned operation of a ground source heat pump test facility. IEA Heat pump centre Newsletter, vol. 28, nr. 1, 2010-04, (IEA.).
6. Javed, S, Fahlén, P, Claesson, J, 2009. Optimering av marklageranslutna värmepumpssystem för klimatisering av byggnader. Effsys2 dagen 2009, KTH, Stockholm, 2009-12-14.
7. Barth, J, Fahlén, P, 2009. Chalmersprofessor: Geoenergins hinder är av politisk karaktär. Svensk Geoenergi, nr. 2, 2009, sid. 24. (Geotec.).
8. Gehlin, S, Fahlén, P, 2009. Glädje över Chalmers nya laboratorium. Energi och Miljö, vol. 80, nr. 11, 2009-11, sid. 9. Stockholm.
9. Hjorth, A, Fahlén, P, 2009. Chalmers återinviger tekniklab. ScanRef, vol. 38, nr. 6, 2009-12, sid. 16.



10. Fahlén, P, 2009. Återinvigning av installationstekniks försökshall - Förstärkt resurs för forskning och undervisning. Invigning av Chalmers Installations-tekniklaboratorium, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2009-10-13.
11. Fahlén, P, 2009. Test facility for optimization of ground storage heat pump systems. Masters' course in geophysics, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2009-10-07.
12. Javed, S., 2009. Project Update. (Effsys board meeting, 2009-09-29), Gothenburg.
13. Javed, S., 2009. Thermal response test. (Project group meeting, 2009-09-09), Gothenburg.
14. Javed, S., 2009. Project Update. (Project group meeting, 2009-09-09), Gothenburg.
15. Fahlén, P, 2009. Sandhultsskolan - Planerat fältmättningsprojekt. Projektmöte P7 Marklager, Chalmers, Göteborg.
16. Javed, S., 2009. Trnsys modelling of our lab system. (PhD course at Darlana university, 2009-09-04), Darlana.
17. Javed, S., Fahlén, P. and Holmberg, H., 2009. Modelling for optimization of brine temperature in ground source heat pump systems. Proceedings of 8th international conference on sustainable energy technologies; SET2009, Aachen, Germany. August 31- September 3.
18. Javed, S., Fahlén, P. and Claesson, J., 2009. Vertical ground heat exchangers: A review of heat flow models. Proceedings of 11th international conference on thermal energy storage; Effstock 2009, Stockholm, Sweden. June 14-17.
19. Claesson, J., 2009. New analytical models for ground heat exchanger modelling. (Project group meeting, 2009-03-18), Gothenburg.
20. Javed, S., 2009. Project Update. (Project group meeting, 2009-03-18), Gothenburg.
21. Javed, S., 2009. Overview of year 2008. (Project group meeting, 2009-03-18), Gothenburg.
22. Fahlén, P, 2009. Sistemas de bombas de calor: Aspectos sobre la eficiencia - Adaptación de la carga y pérdidas parasitarias. Frio Calor Aire Acondicionado, nr. 411, 2009-02, sid. 44-57. Madrid, Spain.
23. Fahlén, P, 2008. Efficiency aspects of heat pump systems. (Project group meeting, 2008-12-16), Gothenburg.
24. Eriksson, J, 2008. The GSHP system design software of Thermia. (Project group meeting, 2008-12-16), Gothenburg.

25. Javed, S, 2008. Heat pump modelling. (Project group meeting, 2008-12-16), Gothenburg.
26. Javed, S, 2008. Project Update. (Project group meeting, 2008-12-16), Gothenburg.
27. Javed, S., 2008. Optimization of ground source heat pump systems. (Effsys day, 2008-11-11), Eskilstuna.
28. Fahlén, P., 2008. Planning of laboratory research facilities. (Project group meeting, 2008-10-01), Gothenburg.
29. Javed, S., 2008. Modelling of ground heat exchangers. (Project group meeting, 2008-10-01), Gothenburg.
30. Hellström, G., 2008. Duct Storage Temperature (DST) model. (Project group meeting, 2008-10-01), Gothenburg.
31. Fahlén, P, 2008. Efficiency aspects of heat pump systems - Load matching and parasitic losses. IEA Heat pump centre Newsletter, vol. 26, nr. 3, 2008-08, (IEA.).
32. Javed, S., 2008. Optimization of ground source heat pump systems. (PhD course at IUAV university, 2008-07-11), Venice, Italy.
33. Javed, S., 2008. Optimization of ground source heat pump systems. (PhD course at DTU, 2008-05-28), Lyngby, Denmark.
34. Fahlén, P, 2008. Efficiency aspects of heat pump systems - Load matching and parasitic losses (keynote speech). 9th IEA Heat Pump Conference, Zürich, Switzerland. May 20- 22.
35. Fahlén, P., 2008. Värmepump, Frikyla och Borrhållslager. (Project group meeting, 2008-04-10), Gothenburg.
36. Javed, S., 2008. Lab Plans, Feedback from Companies & Investigation Points. (Project group meeting, 2008-04-10), Gothenburg.
37. Javed, S., 2008. Overview of year 2007. (Project group meeting, 2008-04-10), Gothenburg.
38. Javed, S., 2007. Field study of GSHP system at Karlstad University. (Project group meeting, 2007-12-03), Karlstad.
39. Javed, S., 2007. Optimization of ground source heat pump systems. (Effsys day, 2007-11-08), Eskilstuna.
40. Javed, S., 2007. GSHP systems – Simulation programs. (Project group meeting, 2007-10-10), Gothenburg.

41. Javed, S., 2007. GSHP systems – Literature review. (Project group meeting, 2007-10-10), Gothenburg.
42. Javed, S., 2007. Project work plans. (Project group meeting, 2007-10-10), Gothenburg.
43. Fahlén, P., 2007. Optimization of GSHP systems for space conditioning of buildings. (Project group meeting, 2007-05-16), Gothenburg.



## 5 Diskussion och slutsatser

Utformning av markvärmesystem är en intrikat process. Man måste ta hänsyn till lastprofilen från byggnaden, värmepumpens driftegenskaper och temperaturresponsen från hela borrhålssystemet. Av speciellt intresse är borrhålssystemet. En optimering av detta system förbättrar den totala effektiviteten för värmepumpssystemet och bidrar därmed till förbättringar avseende både ekonomi och miljö. Som resultat av detta projekt har det kommit fram flera nya modeller som kan användas i optimeringsprocessen. Dessa diskuteras i detalj i Saqib Javeds licentiatuppsats **Design of ground source heat pump systems - Thermal modelling and evaluation of boreholes**.

### 5.1 Diskussion

Bergvärme med individuella borrhål för småhus har länge varit ett av de vanligaste uppvärmningssystemen i Sverige. Dimensionering av dessa är en väl beprövad procedur och det finns både analytiska och numeriska modeller som är tillräckligt bra för denna typ av tillämpningar. Individuella borrhål har också använts av televerket i många år för kylning av automatväxlar. I båda dessa fall får värmeflödet i en riktning, antingen i form av uttag eller inlagring.

Det som hänt under de senaste decennierna är ett snabbt ökande intresse för att kombinera både värme och kyla i samma system. Framförallt olika typer av lokalbyggnader som kontor, skolor, sjukhus etc. har stora kylbehov dagtid men värmebehov nattetid. Då kommer värmeflödet att ständigt växla riktning och den aktiva delen av borrhålssystemet blir i huvudsak vattnet i borrhålet och den närmast angränsande marken. För att kunna räkna på detta har hittills bara funnits komplicerade numeriska modeller. Dessa är svåra att integrera i energiberäkningsprogram p.g.a. av omfattande programmeringsarbete och lång beräkningstid.

För att klara optimering av system med växlande kyl- och värmebehov har en huvudpoäng med detta projekt varit att ta fram en analytisk modell eller en enklare och beräkningseffektivare numerisk modell. Vi har lyckats med båda delarna och kunnat verifiera funktionen både gentemot varandra, mot andra beräkningsmodeller samt mot egna och andras experimentella resultat.

### 5.2 Kommersialiseringsmöjligheter

Behovet för effektiva lösningar för byggnader med både kyl- och värmebehov är stora. Förutsättningarna beskrivs översiktligt i bakgrundsavsnittet i denna rapport. Den allmänna utvecklingen i Sverige och potentialen för effektivisering finns redovisade i en stor utredning från Chalmers EnergiCentrum, vilken utgör underlag till Boverkets arbete med energikapitlet i BBR och de kommande energideklarationerna (Dalenbäck, J.-O., Göransson, A., Jagemar, L., Nilsson, A., Olsson, D., Pettersson, B., 2005. Åtgärder för ökad energieffektivisering i bebyggelse).

Tekniken med värme och kyla ur mark har visat att den fungerar utmärkt för vissa typer av lokalbyggnader, både tekniskt och ekonomiskt. De tekniska riskerna är små men det finns en betydande potential för att ytterligare effektivisera dessa lösningar. Det finns även goda möjligheter att bredda intresset till andra typer av byggnader, t.ex. lagring från vinter till sommar för både komfortkyla och kylning

av diskar i livsmedelsbutiker. För att få ut mesta möjliga av potentialen behövs bättre beräkningsverktyg för att kunna optimera den teknisk/ekonomiska utformningen och vi har kommit en god bit på vägen att skapa dessa verktyg. Det finns en vetenskaplig risk i att satsa på en ny typ av modelleringsverktyg men vid ett lyckat resultat finns stora effektivitetsvinster för både forskare och projektörer. Som alternativ finns alltid möjligheten till mera traditionell modellering i separata, existerande program (tidsödande och besvärligt).

### 5.3 Slutsatser

Det finns en tydlig trend av minskande värmebehov inom lokalsektorn (jämför fig. 1.1). Många byggnader har numera ett kylbehov dagtid som nattetid kan vändas till ett värmebehov, åtminstone vintertid. En effektiv lösning för dessa byggnader är att utnyttja marken som värmesänka, värmekälla och utjämningslager och med hjälp av värmepump höja eller sänka temperaturen till erforderlig nivå. Jämfört med fjärrvärme och fjärrkyla kan den köpta energin (el) ofta sänkas med en faktor 7-8 i förhållande till köpt värme och kyla. I denna typ av system bestäms markkollektorns dimensionering och geometri av om marken ska fungera som källa, sänka eller lager. Optimering av totalfunktionen kräver samordning mellan mark, värmepump och byggnad och för detta har lämpliga beräkningsverktyg saknats. Vi har i detta doktorandprojekt haft som huvudmål att ta fram underlag som gör det möjligt att utveckla program för kompletta systemsimuleringar. I huvudsak har vi lyckats med projektets målsättning och hittills har arbetet resulterat i:

- En ny laboratorieanläggning för markvärmesystem som omfattar ett 9-håls lager, 3 värmepumpar, 5 ackumulatortankar, specialkonstruerade laster i form av luftbehandlingsaggregat och golvsystem för värme och kyla.
- En detaljerad litteraturstudie beträffande dagsläget för analytiska modeller för värmeöverföring i borrhålssystem.
- En slutsats att analytiska modeller för korttidssvar i borrhål har saknats och att detta gäller även för långtidssvar för flerhålsystem.
- Nya, validerade metoder för att modellera långtidssvar från flerhålsystem baserade på existerande analytiska lösningar.
- En ny, validerad analytisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem. Denna metod använder Laplacetransformer för att ge en exakt lösning till det radiella värmetransportproblemet i borrhål.
- En ny, validerad numerisk lösning för att modellera korttidssvaret från ett borrhålssystem med hjälp av en koordinattransformations teknik.
- En analys av osäkerheten för beräkningsindata i samband med analys av vårt borrhålssystem. Data från termiska responstester har gett värden för den ostörda marktemperaturen, värmekonduktiviteten och borrhålets termiska motstånd för samtliga nio borrhål.

Huvudslutsatsen från arbetet är att vi nu har fungerande analytiska och numeriska modeller. Dessa kan lätt integreras i energiberäkningsprogram för byggnader för att optimera totalfunktionen för ett marklagersystem. En annan slutsats är att alltför kort provtid är den viktigaste osäkerheten för beräkning av markens värmekonduktivitet vid responstester men också att variationer i de beräknade parametrarna inte har någon avgörande inverkan på dimensioneringen av ett borrhålssystem.

## 6 Referenser

De referenser som aktivt använts i arbetet finns redovisade i följande licentiatuppsats: Javed, S, 2010. **Design of ground source heat pump systems - Thermal modelling and evaluation of boreholes.** Building Services Engineering, Thesis for Lic.Eng., D2010:02, 116 sidor. (Chalmers University of Technology.) Göteborg. Nedan redovisas referenser som använts i samband med planeringen av projektet (i många fall naturligtvis även under projektets genomförande). Egna publikationer under projektiden redovisas under avsnitt "Resultat".

1. Claesson, J., et al, 1985. Markvärme - En handbok om termiska analyser - del I: Allmän del. (Statens råd för byggnadsforskning.) BFR-rapport T16:1985. Stockholm, Sweden.
2. Claesson, J., et al, 1985. Markvärme - En handbok om termiska analyser - del II: Värmelager. (Statens råd för byggnadsforskning.) BFR-rapport T17:1985. Stockholm, Sweden.
3. Claesson, J., et al, 1985. Markvärme - En handbok om termiska analyser - del III: Naturvärmekällor. (Statens råd för byggnadsforskning.) BFR-rapport T18:1985. Stockholm, Sweden.
4. Dalenbäck, J.-O., Göransson, A., Jagemar, L., Nilsson, A., Olsson, D., Pettersson, B., 2005. Åtgärder för ökad energieffektivisering i bebyggelse. (Chalmers EnergiCentrum.) CEC 2005:1, 108 plus appendices sidor. Göteborg, Sweden.
5. Fahlén, P., 1998. Realtidssimulering - Ett nytt hjälpmedel för att kombinera modell och verklighet. (Docentföreläsning på CTH.) 1 September. Göteborg.
6. Fahlén, P., 2000. Ground-source heat pumps - Recharging of bore-holes by exhaust-air coils. (Cold Climate HVAC 2000, SHASE/ASHRAE/SCANVAC.) 1-3 November, vol. 1, sid. 257-262. Sapporo, Japan.
7. Fahlén, P, 2005. Teknik och goda exempel finns - Varför bygger vi inte mera energisnålt. SVR Samhällsbyggnadsdagar 2005, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2005-09-28--29. (SVR.)
8. Fahlén, P., 2006. Department of Energy and Environment - Research in Building Services Engineering. (Building Services Engineering.) R2006:03. Göteborg.
9. Fahlén, P., Voll, H., Naumov, J., 2006. Efficiency of pump operation in hydronic heating and cooling systems. (Rehva.) Journal of Civil Engineering and Management, 2006-01, no. 1, vol. 12, sid. 57-62.

10. Karlsson, F., 2003. Integrated control of heat pumps. (Chalmers University of Technology, Building Services Engineering.), Chalmers report D2003:03, 82 sidor. Göteborg.
11. Karlsson, F., Fahlén, P., 2005. Kapacitetsreglering av bergvärmepump. (4:e eff-Sys-dagen, Statens Energimyndighet.) 2005-01-13. Stockholm, Sweden.
12. Lindholm, T., 2003. Frikyla - en outnyttjad resurs? Kyla, no. 2.
13. Lindholm, T., 2004. Frikyla. (Statens Energimyndighet.) eff-Sys H20. Gothenburg, Sweden.
14. Lindholm, T., 2004. Frikyla -analys av teknik och systemlösningar. (Institutionen för byggnadsteknologi, Installationsteknik, Chalmers tekniska högskola.). Göteborg.
15. Lindholm, T., Fahlén, P., 2003. Free cooling - How to reach an optimum efficiency. (21st International Congress of Refrigeration, International Institute of Refrigeration.) 2003-08-17--22. Washington, USA.
16. Maripuu, M.-L., 2006. Adapting Variable Air Volume (VAV) systems for office buildings without active control dampers - Function and demands for air distribution components. (Chalmers University of Technology, Building Services Engineering.), D2006:02, 131 sidor. Göteborg.
17. Naumov, J., 2005. Optimization of ground-coupled systems for heating and cooling of buildings. (Chalmers University of Technology, Building Services Engineering.), D2005:04, 82 sidor. Göteborg.
18. Ruud, S., Fahlén, P., 1999. Description of and experience with the SPsim/ber building simulation programme. (6th International IBPSA Conference.) 13-15 September. Kyoto, Japan.
19. Wentzel, E.-L., 2005. Thermal modelling of walls, foundations and whole buildings using Dynamic Thermal Networks. (Chalmers University of Technology, Building Physics.), 2368, 219 sidor. Gothenburg.
20. Zhou, Y., Fahlén, P., Lindholm, T., 2006. Recharging the borehole by means of exhaust-air (Elsevier Science Ltd, IIR.) International Journal of Refrigeration (submitted).