



Resurseffektiva kyl- och värmepumpssystem

Effektivare dimensionering av bergvärmesystem

Implikationer från EFFSYS2 resultat

Projekt P04: Slutrapport

José Acuña

Juni 2014

Förord

Detta projekt finansieras av Energimyndigheten genom forskningsprogrammet EFFSYS+. Projektet har varit en fortsättning av forskningsaktiviteter som började under programmet EFFSYS2. Alla aktiviteter har utförts i nära kontakt med värmepumpstillverkande företag, installatörer, konsulter, brunnborrare, föreningar och fastighetsägare. Alla har bidragit på sitt sätt och samarbetet har förstärkts och byggts vidare under Effsys+. Antalet intressenter i projektet har vuxit med tiden och vi vill ge ett varmt tack till följande partners för all sponsring: ABB, A-energi AB, Alfalaval, Aska rör, AVANTI, Brage Broberg, BRUNATA, Cooly, COMSOL, ETM Kylteknik, GEOTEC, Geawelltech, Grundfos, Hydroresearch, IVT, Klas Andersson, LAFOR EnergiEntreprenader, LOWTE, Lundagrossisten, Manil Bygg och Förvaltning, Mateve OY, Merinova Oy, Muovitech, NIBE, NOWAB, Nordahl Fastigheter, OSU, Palne Mogensen AB, PEMTEC AB, SEEC AB, Stures Brunnborring, Team Wåhlin, THERMIA, Thorén VP, Tommy Nilsson, UPONOR, Viessmann, WILO, Värmex.

Sammanfattning

Projektet har syftat till att studera och förbättra prestanda på den kalla sidan av bergvärmesystem. Resultatet finns i en doktorsavhandling (med titel "Distributed Thermal Response Tests: New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes") där en ny metod för kartläggning av termiska egenskaper i och runt borrhål har tagits fram. Utöver denna finns det ett antal publikationer som har producerats och som inte ingick i avhandlingen. Projektet har utförts genom detaljerade mätningar i ett antal borrhålsvärmeväxlare och utveckling av innovativa analytiska och numeriska modeller.

Två effektivare bergvärmekollektorer av typ koaxial har testats och demonstrerats. Det lokala borrhålsmotståndet (R_b) i en design med isolerad centrumslang och små flödeskanaler i periferia blev 0,04 Km/W, ca 30% bättre än i U-rör. Den termiska kontakten mellan ned och uppåtgående kanaler, som anses vara negativ, kunde elimineras. Denna typ av kollektor var något svår att installera (något längre installationstid) men nya installationsmetoder är under utveckling.

Liknade R_b har mätts i U-rör med forcerad konvektion i grundvattnet utanför kollektorn, som en alternativ metod för befintliga anläggningar. Luftbubblor injiceras i grundvattnet under driften för att maximera effektuttaget vid behov.

I en koaxialkollektor bestående av en flexibel flödeskanal som trycks mot borrhålsväggen mättes R_b vara 0,015 Km/W, nästan 100% effektivare än dagens U-rör. Under 4 år har driften av denna demonstrerats med vatten som köldbärare tack vare det låga motståndet och kopplingen med ett varvtalsstyrt värmepumpssystem. Installationen av denna kollektor anses ha varit enkel men den flexibla slangen har tyvärr läckt. Detta har inte stoppat aktiviteterna i detta borrhål. Tack vare en hög grundvatten nivå kunde vi fortfarande drifta systemet genom att pumpa vattnet från denna nivå.

Några modeller har validerats med mätdata och driftfallen har expanderats för användning i djupare installationer. Modellerna har utvecklats för U-rörs kollektorer genom jämförelse med mätdata, inkl. egen konvektion i grundvattnet, med bra överensstämmelse. Modellerna kan användas för dimensionering av system med optimala köldbärarflödet i varje borrhål vid olika driftfall. Modellerna finns i programmeringsspråket Python, i MatLab och MathCad. Samtliga modeller beskriver både den kortsiktiga och långsiktiga responsen i enskilda borrhål vid olika köldbärarflöden. Även en modell som beskriver värmeupptagning och flödesströmning under självirkulation av koldioxid i en U-rörskollektor har utvecklats i programmet EES. Andra modeller som inkluderar flerborrhålsystem där markens respons studeras med realistiska randvillkor har tagits fram med finitelementmetoden, specifik med FEM-programmet COMSOL. Med dessa studerar vi system som inkluderar återladdning och en stor installation har följts upp och jämförts med modellerade värden.

Två olika återfyllningsmaterial har använts i ett borrhål, och det har bekräftats att under värmeförseln presterar grundvattenfyllda borrhål bättre än återfyllda jämfört med några av dagens kommersiella material.

Summary

The project studied and improved the performance on the source side of ground source heat pumps. The result is presented in a PhD thesis where an in-situ method for determining thermal properties in and around boreholes was presented. Besides this, a number of publications mostly concentrating on modeling have been done.

Two coaxial collectors showed better performance than U-pipes. The local borehole resistance (R_b) in a coaxial design with an insulated central and several small outer pipes was 0.04 Km/W. Thermal contact between down and up-going fluid was eliminated. Such a collector requires a different installation procedure and new installation methods are under development. Similar R_b was measured during forced convection in the groundwater outside U-pipes, through injection of air bubbles in the groundwater during system operation if needed.

R_b in a coaxial design having a flexible channel attached to the borehole wall was 0,015 Km/W, and its operation has been demonstrated during 4 years using water as a fluid and a variable speed heat pump system. The installation of such collector is considered to be simple in boreholes drilled in hard rock but the flexible pipe might leak.

Models have been developed for U-pipe and coaxial heat exchangers through comparison with the measured data with good agreement, including free convection in the groundwater. Similar data and models were done using a borehole grouted with 2 different materials. The models describe the short and long term behavior of single heat exchangers at any volumetric flow rate. All observations have been used as inputs for development of multiple borehole models with realistic boundary conditions used to study recharge strategies.

Innehåll

Bakgrund.....	4
Mål	5
Genomförande och resultat.....	6
Projektets vetenskapliga publikationer	24
Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer.....	26

Bakgrund

Avdelningen för tillämpad kyl och termodynamik på KTH Energiteknik har erfarenhet med undervisning och tester av värmepumpar, på laboratorium och genom fältmätningar. Avdelningen deltar i nationella och internationella forskningsprojekt rörande bergvärmepumpar där detta projekt är ett av dem. Projektet drivs av en ung forskningsgrupp med Prof. Björn Palm som projektledare, som en fortsättning av tidigare forskning utförd inom programmet Effsys2.

Idén med projektet är huvudsakligen att visa metoder för att minska temperaturdifferensen mellan köldbärare och berg i vertikala borrhål, både genom experiment och genom modeller. Detta med tanke på att dagens installationer görs med U-rörs kollektorer som anses vara en icke effektiv utförandeform då temperaturdifferensen mellan köldbärare och berget är stor.

Det finns ett behov av experimenter som demonstrerar att berget inte borde behandlas som en svart låda vid dimensionering av bergvärmearläggningar. Det samma gäller modelleringsarbetet då det finns ett antal antaganden och förenklingar bakom dagens dimensioneringsprogram. Antaganden har specifikt att göra med termisk påverkan mellan borrhål och de randvillkor som sätts. Installationer görs vanligen med relativt enkla responstester som bara ger en medelvärdig bild av berggrunden och dokumentationen från borrhöretag under borrhörningsprocesser är ofta utan detaljer.

I detta sammanhang sammanfattar denna rapport projektets resultat och presenterar en lista av alla publikationer som har utförts under de senaste 4 åren. Läsaren hänvisas vid behov till dessa publikationer för mer detaljerad information.

Mål

Projektets specifika mål är:

1. Studera konsekvenser av användning av standard termiska responstester i bergvärmekollektorer, och visa skillnader mellan resultat från dessa och den nya metoden. Mäta den ostörda temperaturprofilen och bergets värmeledningsförmåga längs borrhålsdjupet.
2. Återfylla ett borrhål med olika lager fyllningsmaterial och studera prestandan i varje sektion.
3. Undersöka användning av vatten och en kaliumkarbonatlösning som köldbärare.
4. Studera hur man kan säkerställa det optimala köldbärarflödet i borrhål vid olika djup och driftfall.
5. Utveckla och validera en modell för värmeupptagning och flödesströmning i en två-fas termosifon (själv-cirkulation) i ett borrhål med koldioxid.
6. Utvärdering av återladdning i bergvärmebrunnar och uppföljning av befintliga anläggningar.
7. Undersökning av egen konvektion, forcerad konvektion, och frysning av grundvatten.

Genomförande och resultat

Denna sektion presenterar en kort sammanfattning och några exempel på resultat som inte finns i den tidigare nämnda doktorsavhandlingen. Resultaten presenteras enligt ovanstående lista på specifika mål, som i stort är de samma som i ansökan för fyra år sedan.

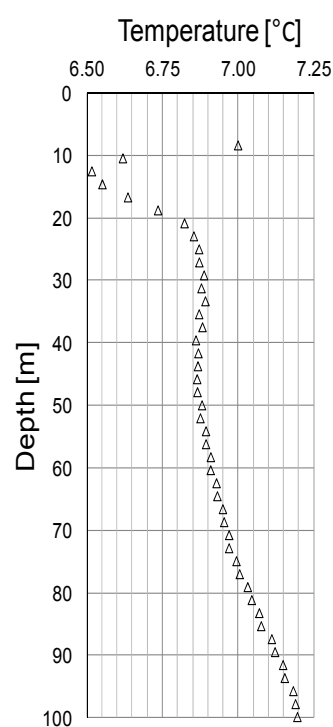
Användning av standard termiska responstester i bergvärmekollektorer och skillnader mellan resultat från dessa

Under ett vanligt termisk responstest brukar man mäta bergets medeltemperatur under ostörda förhållanden. Våra mätningar visar att temperaturprofilen i berget varierar lokalt beroende på var ett borrhål borrar i relation till stadens bebyggelsetyp och dess ålder. Figur 1 visar en mätning i ett nytt bostadsområde på Värmdö som har mätts upp under projektets gång.

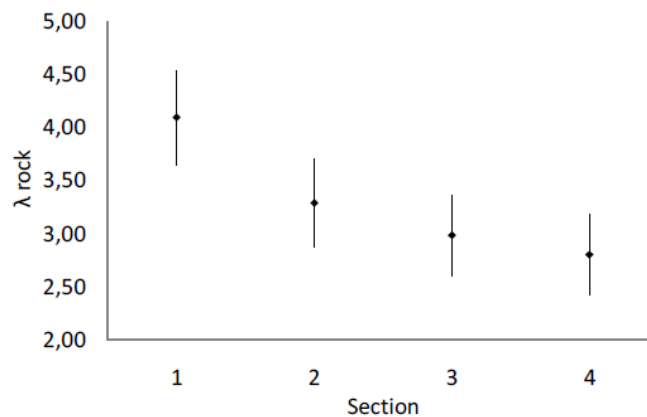
Att använda ett medelvärde kan leda till felaktiga antagande, om temperaturerna är högre än förväntat i de översta borrhålsmetrarna. Detta har vi bevisat med mätningar i borrhål som ligger i centrala och bebyggda stadsdelar. Eventuellt kyl driftfall kan kräva speciell hänsyn, särskilt om anläggningen använder grundare borrhål än djupet i testborrhålet. En medeltemperatur från ett vanligt termisk responstest kan i sådana fall vara något missvisande för dimensioneringsprocessen.

Ett vanligt termisk responstest ger också ett medelvärde av bergets värmeledningsförmåga i alla formationer som finns i berget inkl. eventuell påverka av grundvattenflöde. Resultatet säger inget om t.ex. närvaro av sprickor, lågledande zoner, mm. Är marken inte homogen kan information förbises som kan vara av nytta för en korrekt design.

Har berget högre ledande egenskaper närmare markytan kan en anläggning eventuellt dimensioneras med begränsat djupt för att utnyttja detta. Figur 2 visar en mätning på Värmdö där värmeledningstalet varierade med djupet. Mätningen är utförd i samma borrhål som visas i Figur 1 (observera relationen mellan temperaturprofilen och lambdavärden). Relationen mellan denna typ av information och observationer under borrhåll ger ett mer komplett underlag och kan vara av intresse vid dimensionering av anläggningar. Lambdavärdet från distribuerade tester där både temperatur och värmeledningstalet mätts längs djupet kan dessutom ge noggrannare resultat, då de termiska egenskaperna mätts under borrhålets termiska återhämtning.

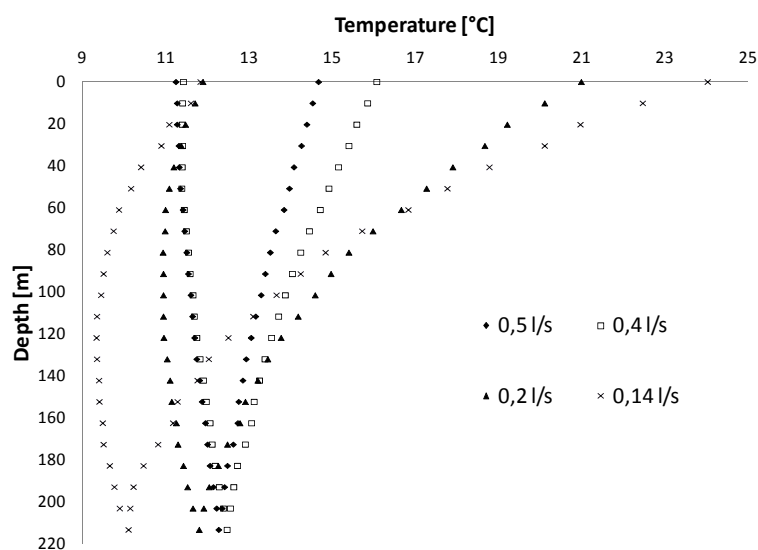


Figur 1. Temperaturprofil i Hålludden, Värmdö



Figur 2. Värmeledningsförmåga i [W/mK] längs 4st 20 meter sektioner i ett borrhål på Varmdö. Borrhålet är detsamma som profilen i Figur 1.

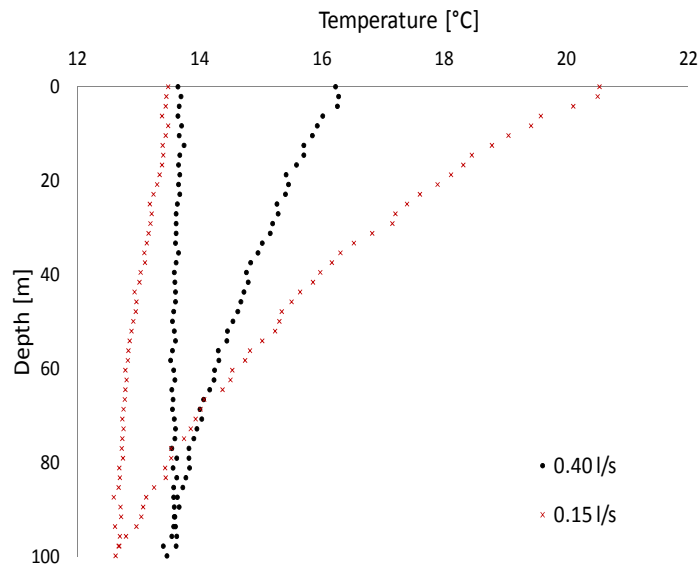
På grund av att ett vanligt responstest brukar utvärderas med ett medelvärde mellan in och utgående temperatur som mäts vid borrhålets övre del, kan eventuellt beräkningen av borrhålsmotståndet bli fel. Borrhålsmotståndet är också en viktig inputparameter som används vid dimensionering av anläggningar och antaganden kan leda till ett högre värde. Figur 3 och Figur 4 visar att ett medelvärde mellan in och utgående temperatur inte representerar det som händer i borrhålet i U-rör respektive koaxialkollektor med isolerad centrumslang.



Figur 3. Köldbärartertemperaturer längs en U-rörskollektor vid olika flöden för en given effekt. Värmetillförsel.

Randvillkor vid borrhållsväggen som används vid utvärdering av vanliga responstester samt i dimensioneringsprogram brukar anta att antingen värmeflödet är konstant eller att temperaturen vid borrhållsväggen är uniform. Det framgår från Figur 3 och Figur 4 att dessa antaganden kan vara felaktiga.

En diskussion om detta finns i flera av projektets publikationer.

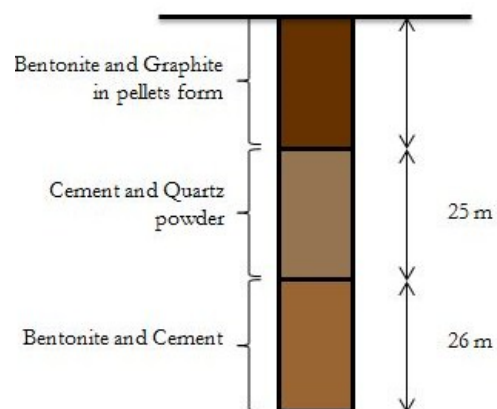


Figur 4. Köldbärartemperaturer längs en koaxial kollektor vid olika flöden för en given effekt. Värmetillförsel.

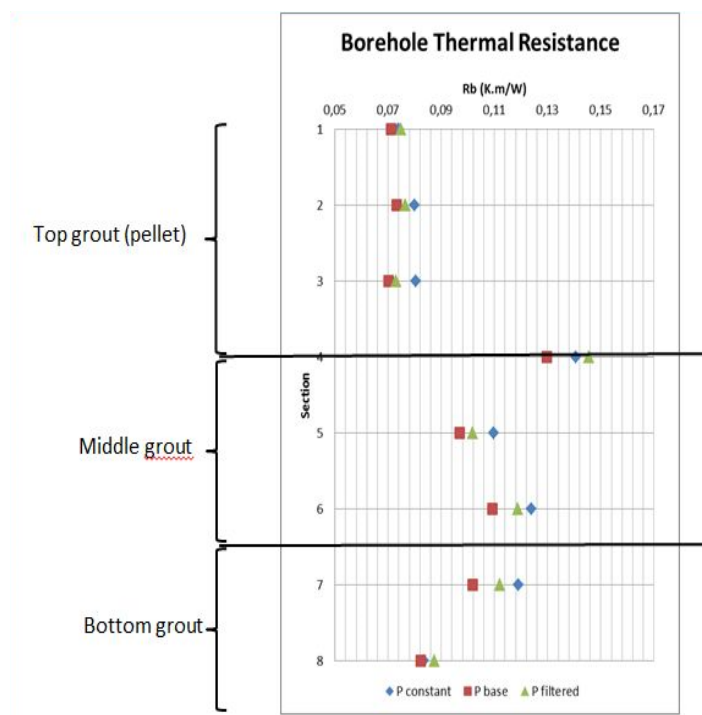
Återfyllning av borrhål och prestanda av olika fyllningsmaterial:

Ett 100 meter borrhål har återfyllts med olika material. Kollektorn är av typ U-rör och har slangar i dimension 40x3,0 mm för att motstå det högre utvändiga trycket vid återfyllningen. Kollektorn har distansklämmor mellan slangskänklarna med cc = 66 mm och ca en meters mellanrum. Detta för att kunna kontrollera avståndet och kunna jämföra med teoretiska modeller. Olika cement-kvarts-bentonitblandningar i pulverform har använts i de nedre sektionerna. Dessa har blandats med en bestämd mängd vatten och sedan pumpats ned i hålet. Längst upp har vi använt grafitfyllda pellets som löste upp sig i borrhålsvattnet. Injiceringen av det senare försvårades av distanshållarna på vilka särskilt pellets hade en tendens att fastna. Därför blev den tredje sektionen lik en grundvattenfylld sektion. En pelletspump hade eventuellt underlättat processen. Figur 5 illustrerar borrhålet.

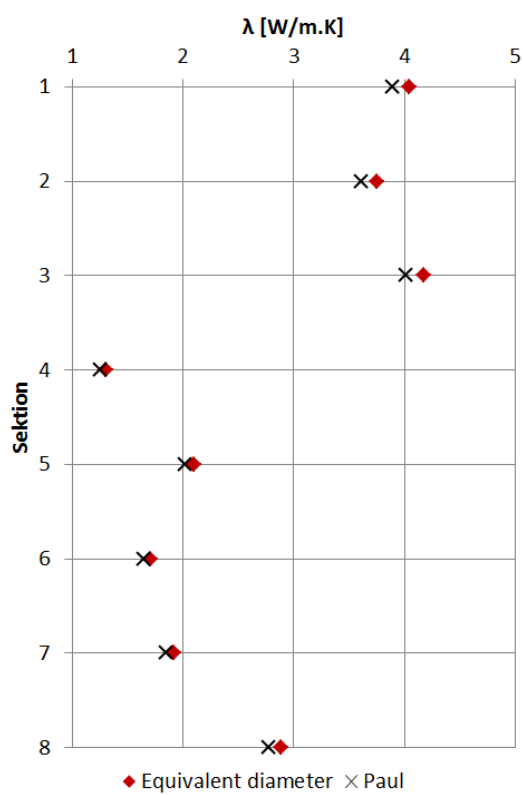
Ett distribuerat responstest har utförts med 8st 10 meter sektioner. Resultatet visar någorlunda bra överensstämmelse med tillverkardata vad gäller pulverlösningarna, med en värmeledningsförmåga av cirka 2 W/mK ($R_b = \text{ca } 0.11 \text{ Km/W}$). I sektionen med pellets blev $R_b = 0.07 \text{ Km/W}$ (liknar resultatet i ett grundvattenfyllt borrhål). Figur 6 visar resultat för lokala motstånd och Figur 7 visar värden på uppmätt värmeledningsförmåga i samtliga återfyllningsmaterial. Dessa har beräknats med modeller med R_b som utgångspunkt.



Figur 5. Illustration av det återfyllda borrhålet.



Figur 6. Lokala borrhålsmotstånd med olika återfyllningsmaterial.



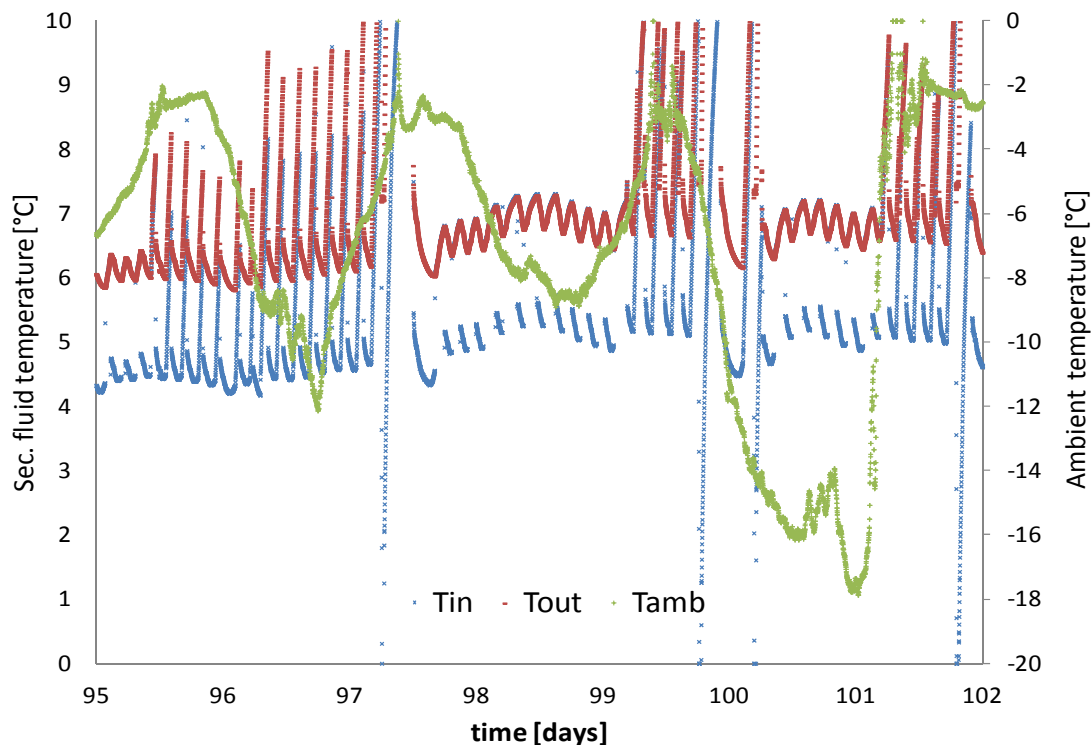
Figur 7. Återfyllningsmaterialalets värmeledningsförmåga enligt två olika modeller.

Vatten och kaliumkarbonatlösning som köldbärare:

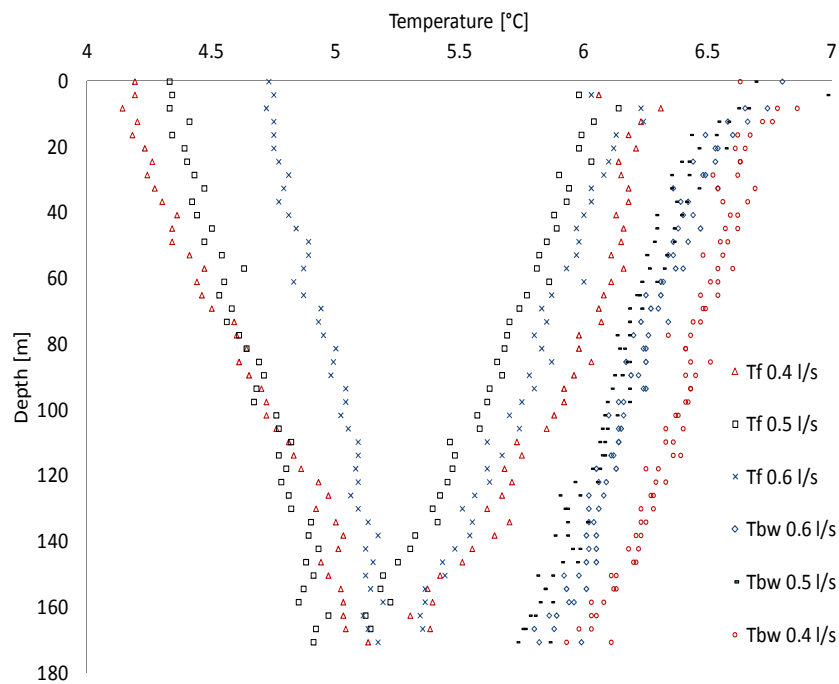
I en installation på Lidingö har vi använt vatten som köldbärare. Detta har varit möjligt tack vare det låga borrhålsmotståndet som karaktiserar kollektorn ($R_b \approx 0,015 \text{ Km/W}$). Kollektorformen upptäcktes under den senare delen av EFFSYS2 och består av en flexibel flödeskanal som trycks mot borrhålsväggen och en centrumslang som kan vara isolerad. En ny installation gjordes i slutet av 2010.

Detta låga värde innebär att utkommande temperatur från borrhålet blir ca 3 K högre än i vanliga U-rör. Koaxialkollektorn i kombination med ett varvtalstyrt värmepumpsystem har varit i drift under fyra vintersäsonger. Figur 8 visar ingående och utgående temperaturer för denna kollektor under en av de kallaste veckorna under år 3. Vattnets temperatur var alltid över 4°C . Figur 9 visar hur temperaturen varierar längs djupet i relation till borrhålsväggens temperatur vid tre olika flöden, som kan ställas in vid behov.

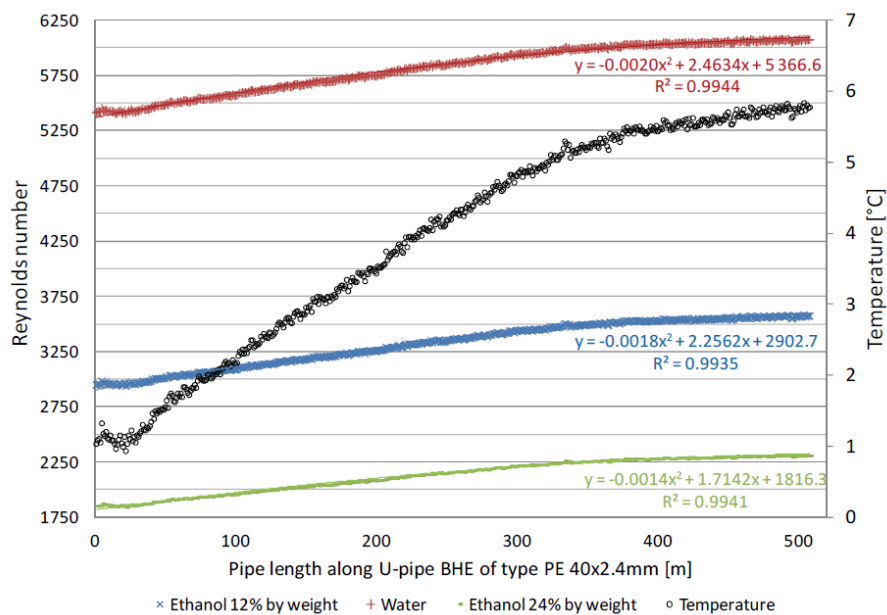
Att använda vatten som köldbärare, istället för köldbärare med frysskydd, eliminerar eventuella miljöproblem vid läckage. Installationskostnaden kan också minskas och pumpeffekten reduceras tack vare vattnets låga viskositet. Tryckfallet blir betydligt lägre. Det låga tryckfallet i denna kollektor är också en konsekvens av den låga hastigheten som vätskan har längs den ringformiga flödeskanalen. Figur 10 visar hur Reynoldstalet kan variera längs ett U-rör med olika köldbärarvätskor. Figur 11 visar tryckfallet för de olika delarna av koaxialkollektorn vid olika flöden. Observera skillnaden mot centrumsröret (som har samma inre diameter som de vanliga U-rörs kollektorer).



Figur 8. Köldbärare (vatten) och utelufttemperatur under en kall vecka.

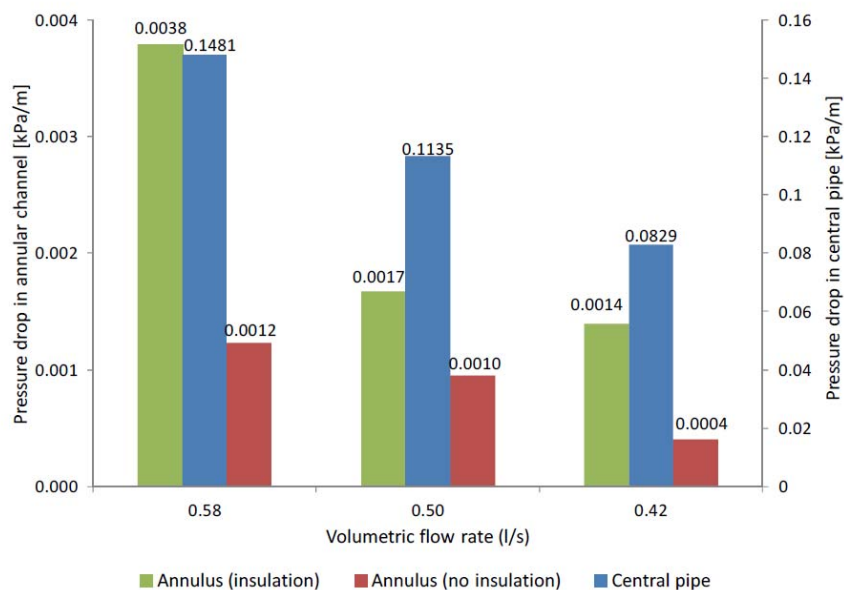


Figur 9. Temperaturprofiler längs djupet för vatten och vid borrhållsväggen. Olika flöden.



Figur 10. Reynoldstal för olika köldbärare längs ett U-rör för given temperaturprofil.

Genom att praktiskt eliminera borrhålsmotståndet och minimera pumpeffekten kan en ökning i värmefaktorn av 6 - 9% förväntas i installationer som tillämpar denna typ av värmeväxlare.



Figur 11. Tryckfall vid olika flöde för rör-i-rör koaxialkolektor.

Vad gäller kaliumkarbonat blev blandningsprocessen något komplicerad. Kaliumkarbonatlösningen (K_2CO_3) har, vid samma fryspunkt, betydligt lägre viskositet än den vanliga etanolösningen. Viskositeten visas tillsammans med andra egenskaper i Tabell 1 vid tre olika fryspunkter (se egenskap *my* och/eller *ny*). Observera också att lösningen har högre densitet och värmeledningstal än etanol, fast lägre värmekapacitet.

Tabell 1. Termofysiska egenskaper för etanol och kaliumkarbonatlösning.

	t _F °C	t °C	Conc. % by wt	ρ ₀ kg/m ³	c _p J/(kg·K)	k W/(m·K)	my mPa·s	ny mm ² /s	Pr -	(ρ ₀ ·c _p) kJ/(m ³ ·K)
Ethanol	-5	5	11	984	4373	0,50	2,76	2,81	24,0	4300
K ₂ CO ₃	-5	5	13	1127	3536	0,56	1,99	1,77	12,6	3983
Ethanol	-10	5	19	975	4376	0,46	3,88	3,98	36,9	4268
K ₂ CO ₃	-10	5	22	1214	3222	0,55	2,57	2,12	15,0	3911
Ethanol	-15	5	24	970	4297	0,43	4,65	4,80	46,6	4167
K ₂ CO ₃	-15	5	27	1273	3034	0,55	3,21	2,52	17,8	3863

Vid påfyllningen var ingående lösning så koncentrerad att kristallisation inträffade i slangen och eventuell lång propp bildades. Proppen kunde röra sig 70 m upp och ned, och förmodligen stannade den vid botten samt vid borrhålets mynning, vilket orsakade fluktuationerna i flöde och tryckfall. Medelvärde för uppmätta flöden och tryckfall visas i Tabell 2, där även det teoretiska värdet för givet flödet visas.

Lösningen hade gjorts koncentrerad (värmning) för att kunna driva ut vattnet ur slangen utan kaliumkarbonatförlust. Försök att lösa upp proppen genom att koppla TRT-aggregatet (på en parallell U-rörskollektor som finns i samma borrhål) och värma hålet misslyckades. En hypotes är att det skulle kunna vara ett vätskelås som hindrar cirkulationen. Koncentrerade kaliumkarbonat-lösningar har hög densitet (1200 – 1500 kg/m³) och kan lägga sig som en tung vätska i botten på U-slangen. En halt av 21 % (vikt) har eftersträvt för att uppnå en fryspunkt av -10 °C och en densitet av ca 1200 kg/m³. Tyvärr blev tryckfallet i kaliumkarbonatexperimentet betydligt högre än förväntad p.g.a. proppen och den tjocka blandningen.

Tabell 2. Medelvärde av uppmätt tryckfall. Prov med kaliumkarbonat. Jämförelse med teoretiska värden.

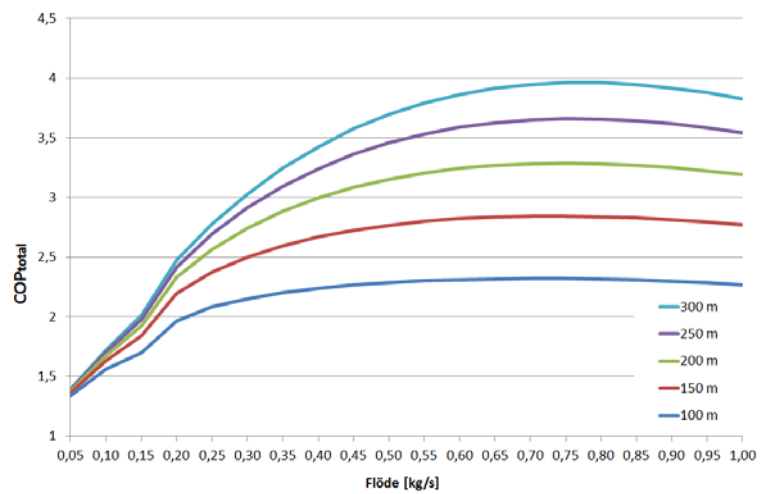
Flöde [l/s]	0,37	0,29	0,21
Reynolds	7555	5907	4390
Tryckfall teori [kPa]	48	32	19
Tryckfall uppmätt [kPa]	131	89	54

Säkerställning av det optimala köldbärarflödet i borrhål:

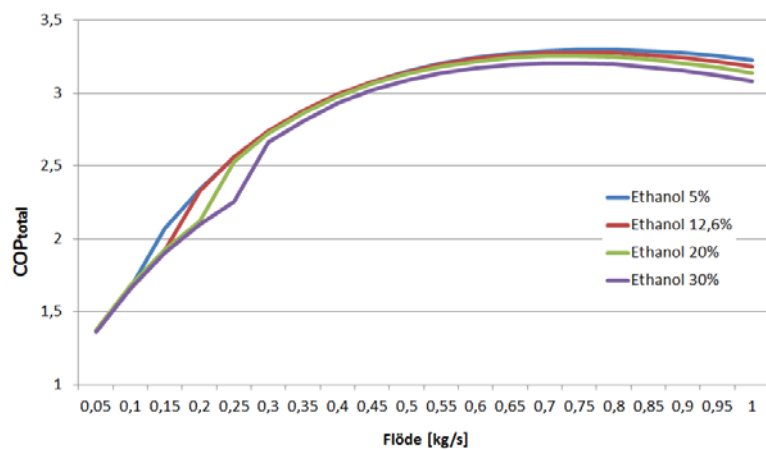
Det optimala köldbärarflödet i en kollektor är den som ger bästa prestanda ur ett termiskt och hydrauliskt perspektiv och därmed ger högsta COP i ett system. Detta flöde kan komma att variera för olika systemkonfigurationer (slangdimensioner, material, djup, köldbärare, återfyllning/grundvattenfylld, mm). En modell för U-rörskollektor i enfamiljvilla har byggts upp för att studera detta. Exakta värden på samtliga parametrar och formler som använts i modellen lämnas utanför denna rapport. Vid studie av en enskild variabel hålls resterande variabler konstanta.

Figur 12 till Figur 17 visar COP vs. Flöde som funktion av olika variabler. Vid varje kombination finns de ett optimalt flöde (Figur 17 för koaxialkollektor). COP räknas inklusive elförbrukning i cirkulationspump enligt $COP_{total} = (Q_{borrhål} + E_{kompressor}) / (E_{cirk.pump} + E_{kompressor})$, där Q och E står för effekt i de övriga systemkomponenterna som indikeras i sub-indexerna. Formeln gäller även Figur 29.

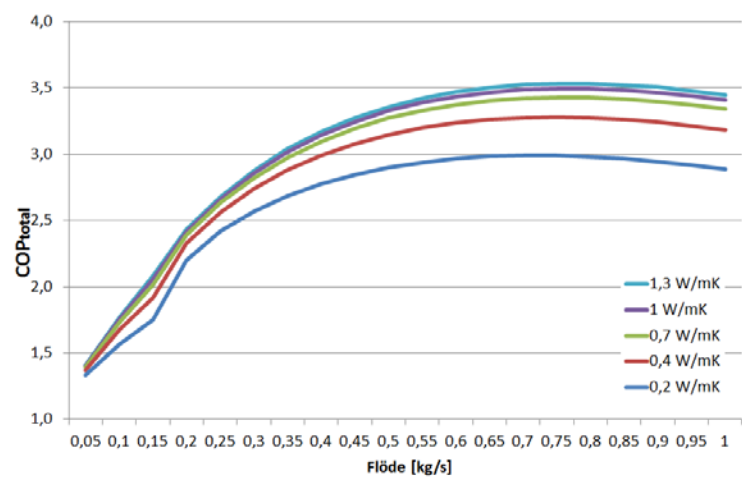
Det högsta COP uppnås vid system med djupare borrhål, låga etanolhalter, högt lambdavärde i plaströr, högt lambdavärde återfyllningsmaterial, forcerad konvektion i grundvattnet, högt lambdavärde i jord/berg, långt avstånd mellan och grövre dimension i kollektorslangar. För de fallen som testades ligger det optimala köldbärarflödet i området mellan 0,6 och 0,9 kg/s. Andra kombinationer eller indata till modellen kan komma att ge andra tendenser.



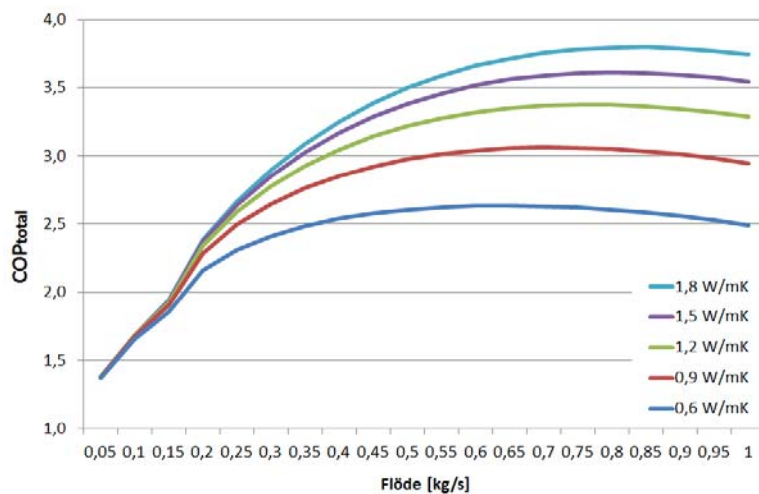
Figur 12. System COP vs flöde för ett återfyllt borrhål (olika djup).



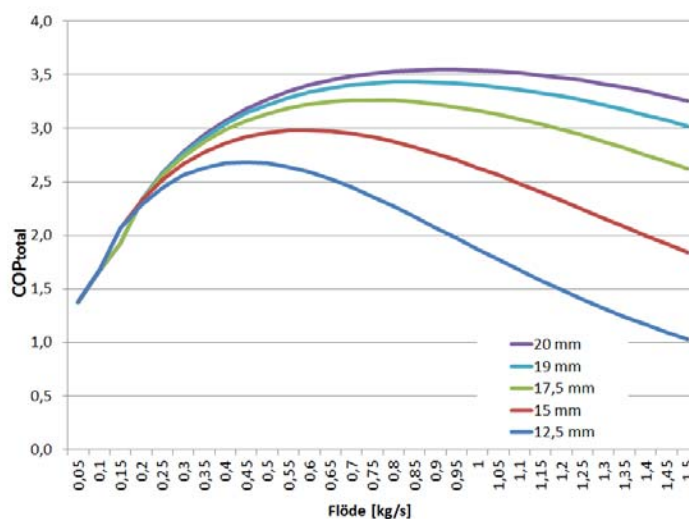
Figur 13. System COP vs. flöde vid olika etanolhalter.



Figur 14. System COP vs flöde med olika värmeledningsförmåga i plaströr.

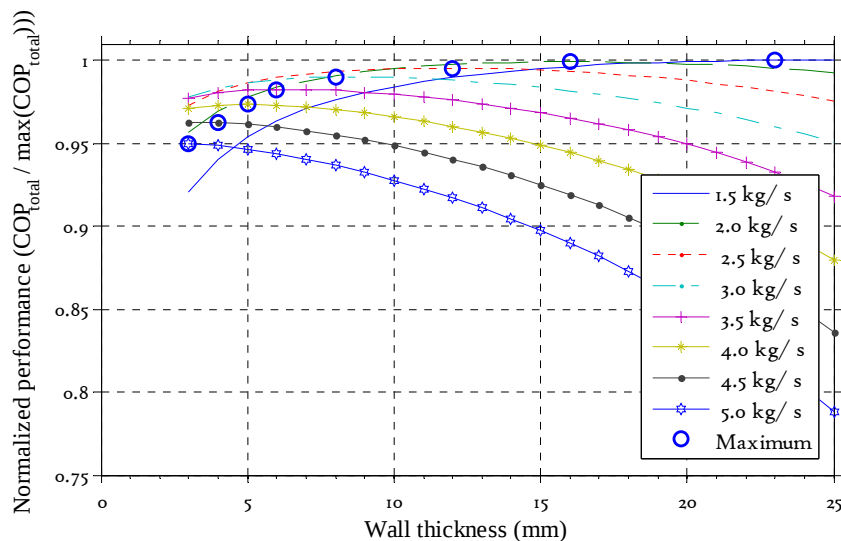


Figur 15. System COP vs. Flöde för olika värmeledningstal i återfyllningsmaterial



Figur 16. System COP vs. Flöde för olika inremått i U-rörs kollektor

For koaxialkollektorer har studiet om det optimala flödet gjorts i relation till måttet på centrumslangen och borrhålsdjupet. Modellen utvecklades som ett samarbetsinitiativ tillsammans med en grupp i NTNU. Figur 17 visar prestanda för olika djup och flöde vid specifika dimensioner i centrumslangen. Det går att uppnå liknade system COP med olika kombinationer. Höga köldbärarflödet ger bra verkningsgrad med tunnare centrumslang och låga flöden kräver grövre slangdimension. Max-COP_{total} är lika med den högsta verkningsgraden för varje enskilt fall.



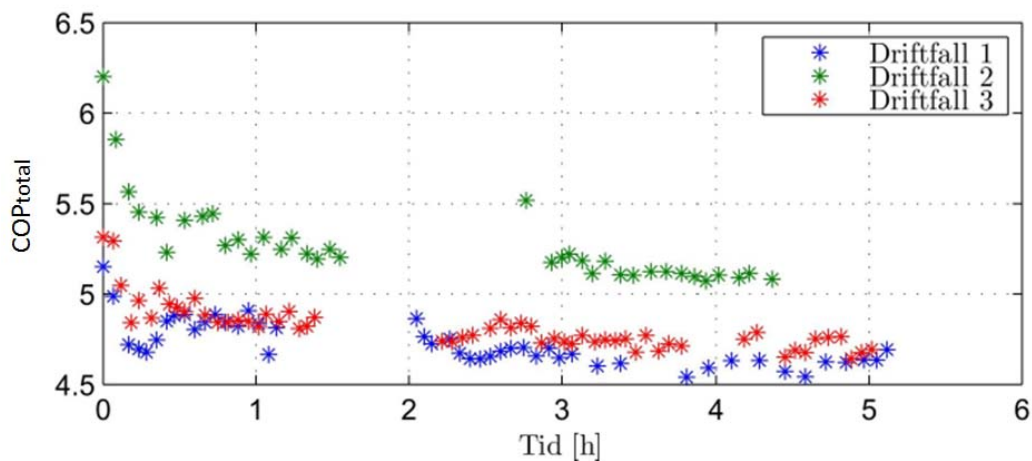
Figur 17. Diagram för prestanda (systems verkningsgrad) av koaxialvärmeväxlare i djupa borrhål vid olika flöden, olika borrhålsdjup, och olika dimensioner på centrumslangen.

Frågan om det optimala köldbärarflödet studeras också experimentellt ur systemets perspektiv. En anläggning i Vallentuna har instrumenterats med 2st borrhål à 140 m. Anläggningen har separat borrhålskrets, en pump och reglerbar bypass för att minska köldbärarflödet i värmepumpen. Den är byggd utmed tryckmätning på båda sidor om cirkulationspumpen för att kunna bestämma strypförlusten. Effektöverskottet på varma sidan kyls vid behov bort med stadsvatten och en termostatstyrd reglerventil håller framledningstemperaturen konstant. Ett flertal mätpunkter loggas kontinuerligt. Som ett tillägg har husets radiatorer försetts med elementfläktar för att utvärdera effektiviteten hos detta koncept kombinerat med bergvärme. De första resultaten visas i Tabell 3 och Figur 18.

Förutom denna anläggning studeras samma fråga i ytterligare en villainstallation i Vallentuna. Den senare är nästan färdig och instrumenteringen planeras som en del av ett eventuellt fortsättningsprojekt. I vår ursprungliga plan fanns bara ett borrhål, där experimentet om återfyllningsmaterial utfördes. Vi såg dock en potential i båda installationer för att studera frågan om optimalflödet. Goda samarbetsmöjligheter med två nya fastighetsägare som ville sponsra projektet erhöles.

Tabell 3. Tre olika driftfall som testats i en anläggning med separat borrhålskrets, Vallentuna.

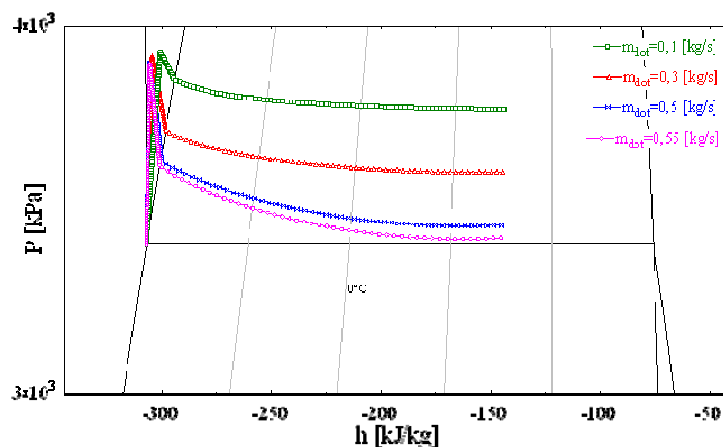
	$\dot{V}_{\text{förångare}} [\text{l/s}]$	$\dot{V}_{\text{BH1}} [\text{l/s}]$	$\dot{V}_{\text{BH2}} [\text{l/s}]$	Re_{BH1}	Re_{BH2}
Driftfall 1	0,700	0,645	0,598	4791	4441
Driftfall 2 – by-pass stängd	0,694	0,386	0,357	2685	2652
Driftfall 3 – by-pass stängd	1,003	0,556	0,515	4134	3825



Figur 18. System COP för tre olika driftfall i en anläggning med separat borrhålskrets.

U-rörs termosifon med koldioxid i ett borrhål:

En modell har utvecklats för att beskriva värmeupptagning och flödesströmning längs ett 70 meter djup U-rörs termosifon. Geometrin är den samma som i en av de experimentella anläggningar som installerades i Norrtälje. Mätningar längs djupet visade att värmeövergångstalet var som högst i sektionen mellan 30 - 10 meter djup, vilket tolkades som förångningen av CO₂ skett i denna sektion. Relativt konstanta temperaturer konstaterade att detta var en möjlighet.

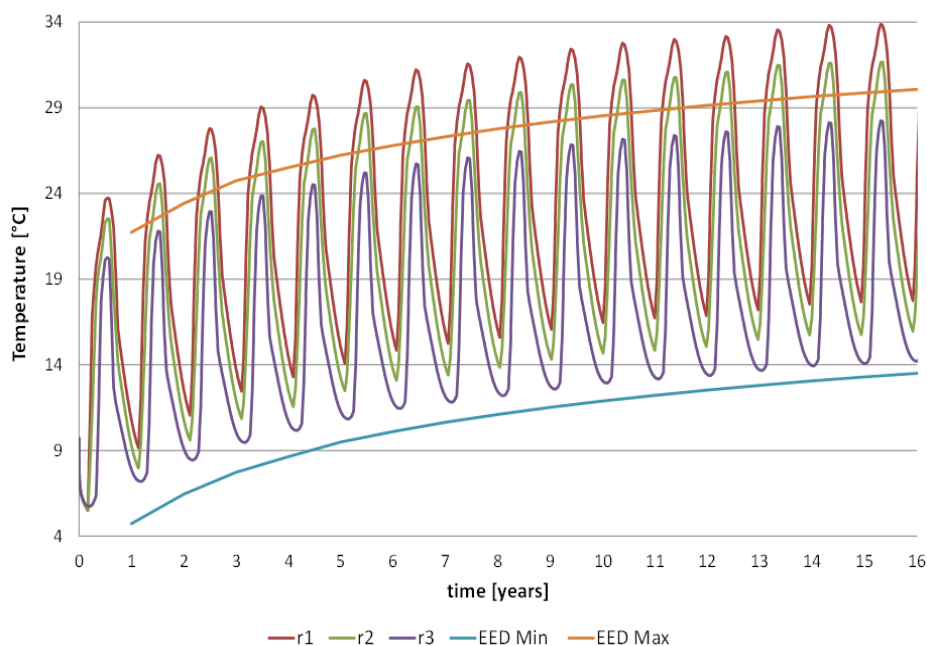


Figur 19. P-h diagram för flödesströmningen längs U-rörstermosifon. CO₂ i mättad form (längs till vänster) blir underkyld längs den isolerade centrumsslangen tills den når botten (högsta punkten i diagrammen). Trycket minskar på vägen uppåt och CO₂ går in i förångningsförhållande.

En modell utvecklades i EES för att beskriva strömningen av CO₂. Det konstaterades att, p.g.a. att den nedgående slangen är isolerad, CO₂ är underkyld när den kommer till botten och att den reser uppåt i vätskeform de första metrarna tills den kommer till den delen av kollektorn där förångningen började. Figur 19 illustrerar processen.

Återladdning i bergvärmebrunnar och uppföljning av befintliga flerborrhålssystem:

För att studera flerborrhålssystem har vi börjat med att lära oss teorin om g-funktioner, ett vanligt sätt att behandla problematiken. En g-funktion är ett dimensionslöst sätt att representera temperaturutveckling i ett borrhålsfält under ett fall med konstant last. Vid beräkning av g-funktioner används idag dels analytiska modeller (finitlinjekälla, FLS) där randvillkoret vid borrhålsväggen måste sättas som ett konstant värmefflöde per meter till borrhålet, lika längs hela borrhålet och lika för alla borrhål. Det finns också nyligen presenterade analytiska modeller som uppdaterar randvillkoren per borrhål både i tid och längs djupet. Detta för att ha en uniform temperatur längs borrhålet och lika temperatur i alla borrhål. Det senare är fallet i de numeriska modellerna som vi har utvecklat. Vi har dock möjlighet att tillämpa båda alternativen. Dessutom kan vi ändra randvillkoren till quasi-uniform temperatur längs borrhålet vilket bättre svarar mot verkliga förhållanden, där parallellkopplade borrhål känner påverkan av temperaturprofilen i köldbäraren vid olika flöden.



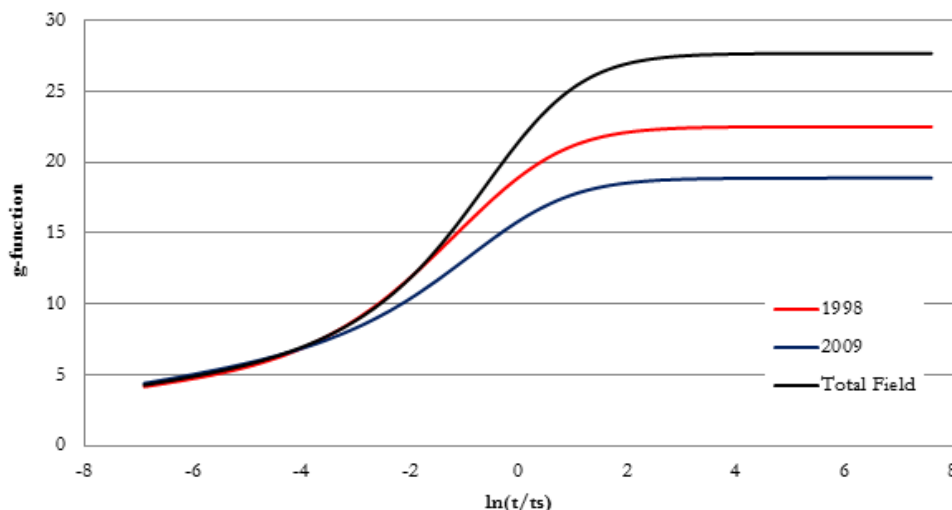
Figur 20. Exempel på temperaturresponsen vid olika sektioner av ett borrhålsfält (r_1 , r_2 , r_3) och jämförelse med lägsta (min) och högsta (max) temperaturer beräknade med kommersiellt program (EED).

Figur 20 visar ett fall där en specifik återladdningsstrategi användes för att studera hur man kan kontrollera/utnyttja de olika temperaturerna som finns i olika delar av borrhålslagret under tiden. I detta fall visas en obalanserad värmelast och r_1 , r_2 , och r_3 står för tre olika ringformiga rader med borrhål (d.v.s. det handlar om ett cylindriskt borrhålsfält med tre olika ringar där r_1 är den inresta och r_3 den yttersta).

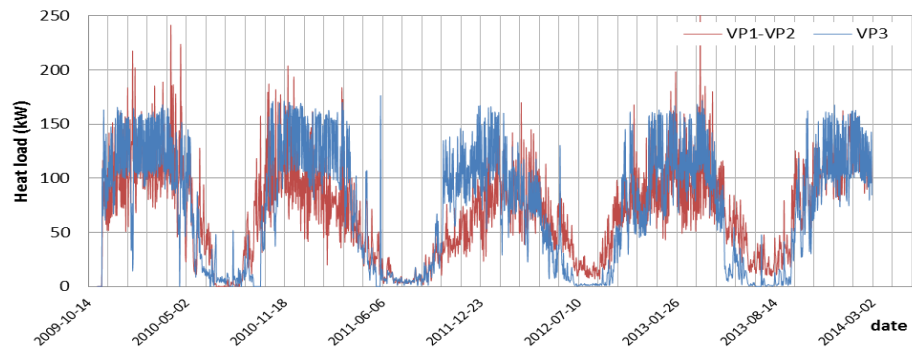
Modellerna är flexibla och tillåter att studera responsen i olika delar av borrhålsfältet, vilket kan vara av nytta om man vill styra användningen av lagret. Vi tror att denna typ av resonemang kommer att behövas i framtiden för kyl eller värmedominerade anläggningar.

Figur 21 visar g-funktionen för två olika borrhålsfält som borrades vid två olika datum i samma anläggning (en Brf i Saltsjöbaden). Borrhålsfälten är kopplade till olika värmepumpar vilket leder till att lasterna kan vara annorlunda. Dessutom är avståndet mellan fälten tillräckligt långt så att termisk påverkan först sker efter några års drift. Detta har krävt att borrhålsfälten behandlas separat. Figuren visar även vad g-funktionen blir efter att borrhålen börjar samverka. G-funktionerna vill man i bästa fall multiplicera gånger effektbehovet i en anläggning och superponera effekten av de varierande lasterna, för att kunna göra en prognos av hur anläggningen kommer att fungera under tiden. Resultatet av tids superponeringen blir en temperatur vid borrhålsväggen. Prognosen för anläggningen i Saltsjöbaden som vi följer upp visas i Figur 23 (i detta fall har vi lagt till effekten av borrhålsmotståndet). Temperaturen visar en tendens att minska med tiden, och återladdningsförslag har diskuterats med föreningen.

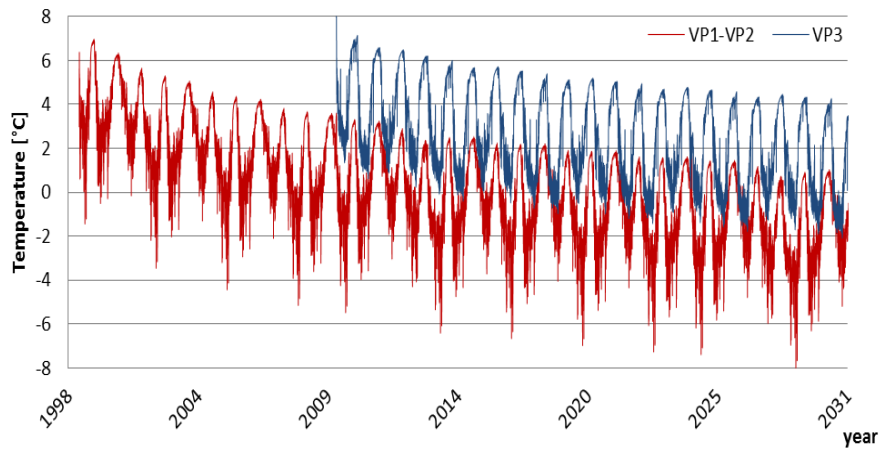
I projektet har vi börjat att hitta indikationer som tyder på att g-funktionerna som beräknas med dagens metoder kan avvika något från vad vi anser är en bättre representation av verkligheten. Resultatet är preliminärt. Exempel på denna skillnad visas i Figur 24.



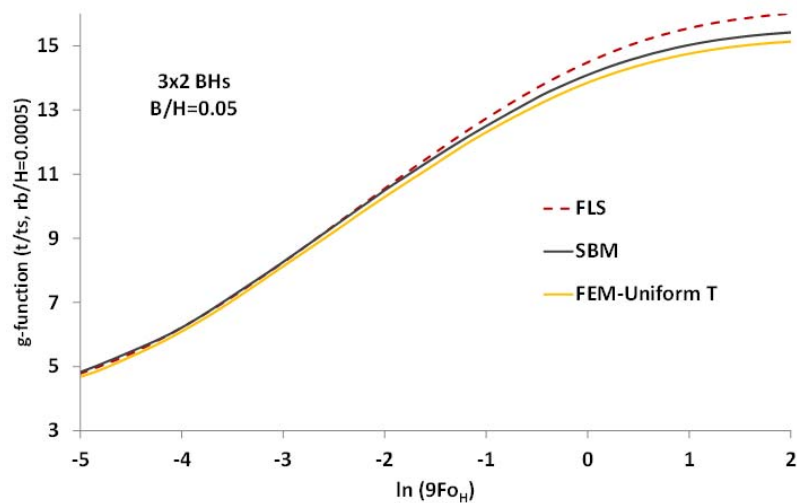
Figur 21. G-funktion för ett borrhålsfält där olika zoner behandlas separat.



Figur 22. Effektlaster från två olika borrhålsgrupper som är kopplade till borrhålsfälten som visas i Figur 21.



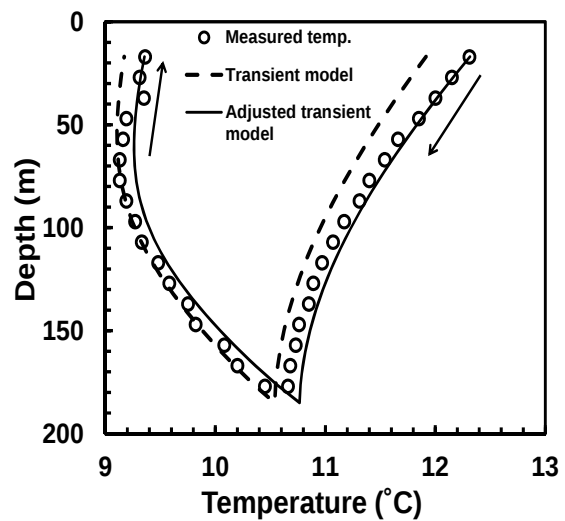
Figur 23. Temperaturprognos efter beräkningen av borrhålsfältets respons i en anläggning i Saltsjöbaden.



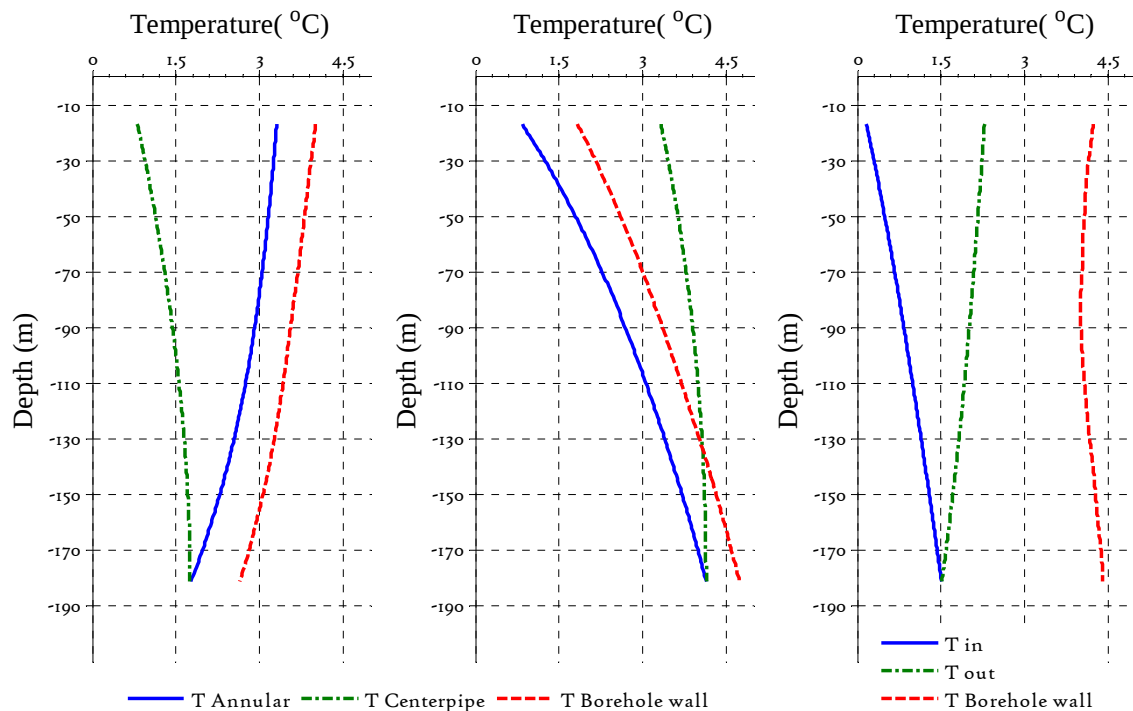
Figur 24. G-funktion för tre olika lösningar, inklusive vårt sätt att beräkna med detaljerade numeriska modeller.

Det som händer i borrhålet, och som inte tas hänsyn till i befintliga program, har att göra med temperaturprofilen längs borrhålsväggen vid beräkning av g-funktionen. Våra mätningar, och modellerna för enkla borrhålsystem som vi har jobbat med, ger exakt info om det som händer i borrhålet och vi använder detta för justering av våra numeriska modeller för flerborrhålssystem.

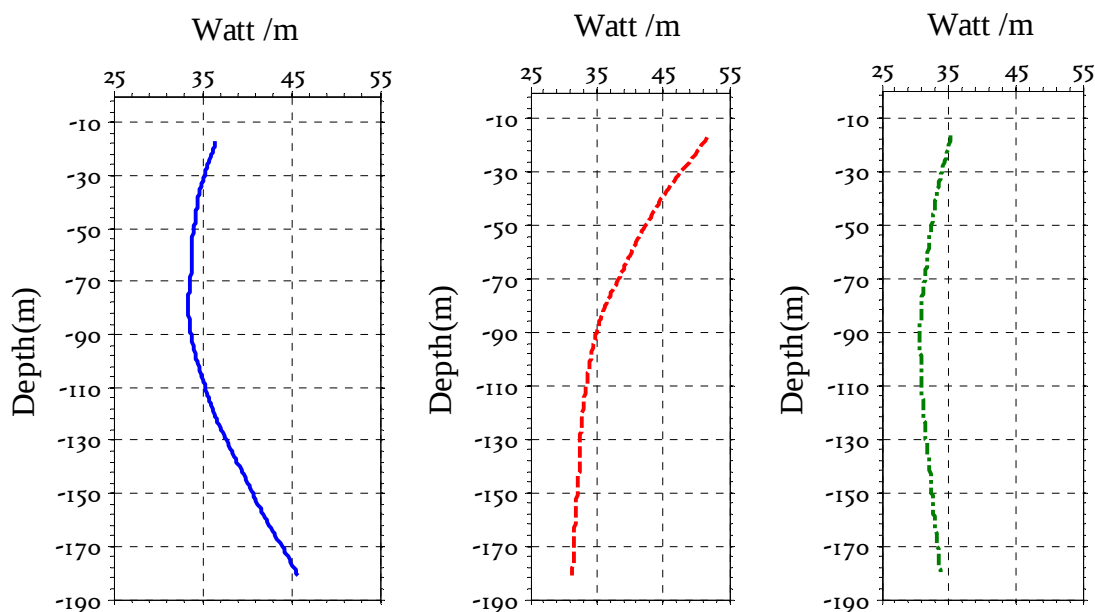
Figur 25, Figur 26 och Figur 27 visar validerad information som vi får från modellerna, och som senare används som indata i modellerna för flerborrhålssystem.



Figur 25. Uppmätt och beräknad temperaturprofil. Analytisk modell från OSU som validerades med vår data.



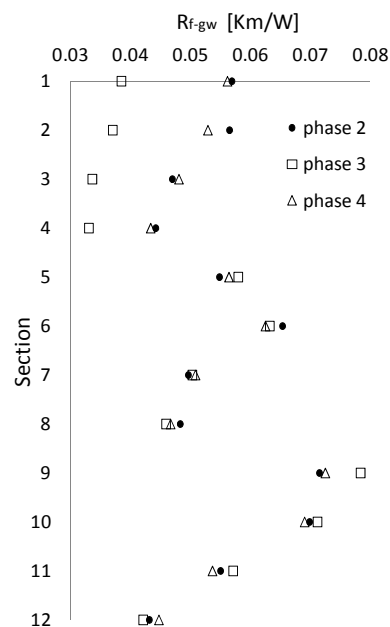
Figur 26. Temperaturprofiler från numerisk modell i koaxialvärmväxlare (till vänster för två olika flödesriktningar) och U-rör (längs till höger).



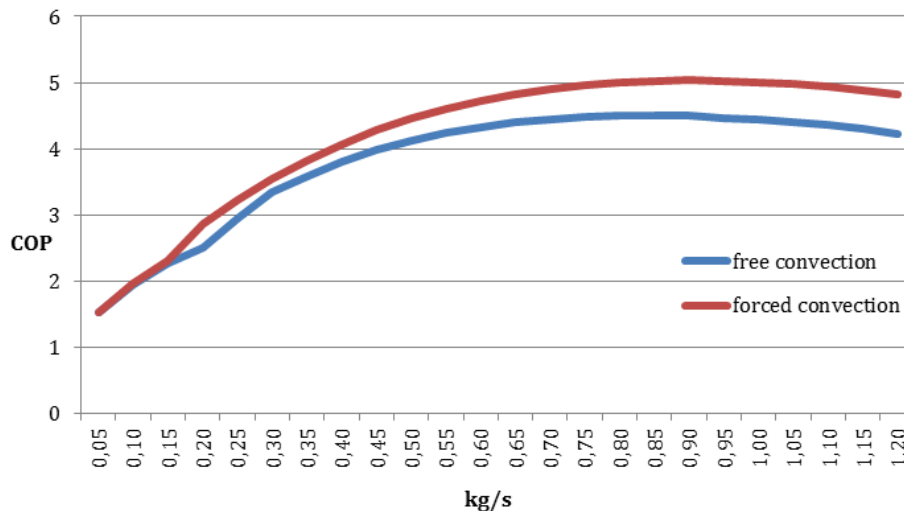
Figur 27. Effektfördelning längs djupet från numerisk modell i koaxialvärmewäxlare (till vänster och i mitten för två olika flödesriktningar) och U-rör (längs till höger)

Undersökning av konvektion och frysning av grundvatten utanför kollektorslangar:

Det är känt att naturlig konvektion förbättrar värmeöverföringen i vattenfyllda borrhål mellan kollektorslangar och borrhålsvägen. Under många av de responstesterna med värmetillförsel som vi har utfört har vi bekräftat detta med mätdata inne i borrhålet, längs hela djupet. I några av våra publikationer behandlas detta mer i detalj och våra modeller har byggts för att ta hänsyn till egen och forcerad konvektion i grundvattnet. Ett experiment utfördes för att kvantifiera skillnaden mellan dessa när forcerad konvektion sker genom att röra grundvattnet med hjälp av luftbubblor. Under fas 2 och 4 i Figur 28 fungerar borrhålet som vanlig (naturlig konvektion) och grundvattenrörelse forceras under fas 3. Luften injicerades i sektion 1 till 4.



Figur 28. Termiskt motstånd mellan grundvatten och köldbärare under förhållanden med egen och forcerad konvektion utanför U-rör i Hammarby.



Figur 29. COP vs. flöde i grundvattenfylldt borrhål med egen och forcerad konvektion i grundvattnet utanför U-röret.

Motståndet i de övre sektionerna minskar med ca 20%. Påverkan av denna förbättring i systemets COP används i vår modell med ett borrhål där bubblor finns längs hela djupet. Resultatet presenteras i Figur 29.

Sammanfattningsvis har denna sektion gett en kort inblick av vad projektet har handlat om. Projektet har som tidigare nämnts resulterat i en doktorsavhandling, där metoder som ger bättre dimensioneringsunderlag och drift vid anläggningar med borrhål demonstrerats.

För att kunna uppnå våra mål har vi fått utveckla mätmetoder och mätutrustning som inte fanns tillgängliga före projektets start. Ett exempel på detta är vår nya responstests utrustning, som inkluderar ett avancerat styrsystem. Loggningen och datautvärdering har automatiserats och anses ha en mycket praktiskt tillämpning. Ofta behandlas berget som en svart låda och vi tror att kvalitén på de anläggningar som byggs idag kan ökas markant. Våra tester ger bättre underlag och information om det som händer i berget.

Våra resultat demonstrerar att man faktiskt kan göra en besparing av cirka 0,4 TWh el/år i Sverige genom användning av tekniken som rekommenderats i projektet. Beroende på vilket elpris och energimix som man väljer kan denna besparing göra ett relevant bidrag till användarnas årliga kostnader för energi och bidra till reduktion av koldioxidutsläpp.

Konsulter och ingenjörer (och inte minst andra forskare) har också nytta av våra resultat. Våra mätningar har använts för utveckling och validering av modeller för enkla och flerborrhålsystem som beskriver värmetransportprocessen i borrhål och mark på ett bättre sätt än det brukar göras. Projektet anses också ha en positiv påverkan i branschen och samhället då vi har hjälpt till och utbildat ett antal studenter (föreläsningar, studiebesök, mm). Totalt har 19st examensarbete på civilingenjörsnivå gjorts inom EFFSYS+ projektet.

Under EFFSYS+ har vi också skrivit 8st artiklar i vetenskapliga tidskrifter (5st redan publicerade och 3st under review), och 17st artiklar vid internationella konferenser (13st publicerade och 4st under review). Vi har också varit aktivt deltagande vid ett antal nationella och internationella seminarier och workshops, samt skrivit artiklar i populära tidningar. En lista på dessa finns i de nästa två sektionerna.

Vi har också förstärkt vårt samarbete med bra forskare från andra universitet världen runt som NTNU i Norge, UPV i Spanien, UNIGE i Italien, École Polytechnique de Montréal i Kanada, OSU i USA bland andra.

Projektets vetenskapliga publikationer

1. Holmberg H, Acuña J, Erling N, Otto K. Thermal Evaluation of Deep Borehole Heat Exchangers. Submitted to Renewable Energy.
2. Derouet M, Monzó P, Acuña J. 2015. Monitoring and forecasting the thermal response of an existing borehole field. Submitted to the World Geothermal Congress.
3. Holmberg H, Acuña J, Erling N, Otto K. 2015. Deep Borehole Heat Exchangers, Application to Ground Source Heat Pump Systems. Submitted to the World Geothermal Congress.
4. Rolando D, Acuña J, Fossa M. 2015. A Web Application for Geothermal Borefield Design. Submitted to the World Geothermal Congress.
5. Holmberg H, Acuña J, Erling N, Otto K. Numerical model for non-grouted borehole heat exchangers. Submitted to Geothermics.
6. Monzó P, Calvo F, Mogensen P, Acuña J, Montagud C. 2014. Experimental Validation of a Numerical Model for the Thermal Response of a Borehole Field. ASHRAE Annual conference. Seattle.
7. Beier R, Acuña J, Mogensen P, Palm B. 2014. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger. Geothermics 51, 470-482.
8. Penttillä J, Acuña J, Monzó P. 2014. Temperature stratification of circular borehole thermal energy storages The 11th International Energy Agency Heat Pump Conference. Montreal.

9. Monzó P, Mogensen P, Acuña J. 2014. A novel numerical model for the thermal response of borehole heat exchanger fields. The 11th International Energy Agency Heat Pump Conference. Montreal.
10. Beier R, Acuña J, Mogensen P, Palm B. 2013. Borehole resistance and temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers. *Applied Energy* 102, 665-675.
11. Acuña J, Palm B. 2013. Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers. *Applied Energy* 109, 312-320.
12. Monzó P, Acuña J, Mogensen P, Palm B. 2013. A study of the thermal response of a borehole field in winter and summer. International conference on applied energy. ICAE2013-524. Pretoria.
13. Acuña J. 2013. Distributed Thermal Response Tests: New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. Doctoral thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
14. Monzó P, Acuña J, Fossa M, Palm B. 2013. Numerical generation of the temperature response factors for a borehole heat exchanger field. European Geothermal Congress, Pisa.
15. Beier R, Acuña J, Mogensen P, Palm B. 2012. Vertical temperature profiles and borehole resistance in a U-tube borehole heat exchanger. *Geothermics* 44, 23-32.
16. Acuña J, Fossa M, Monzó P, Palm B. 2012. Numerically Generated g-functions for Ground Coupled Heat Pump Applications. COMSOL Multiphysics Conference, Milano.
17. Johansson E, Acuña J, Palm B. 2012. Use of Comsol as a Tool in the Design of an Inclined Multiple Borehole Heat Exchanger. COMSOL Multiphysics Conference, Milano.
18. Acuña J, Palm B. 2012. Distributed Thermal Response Tests on Pipe-in-pipe Borehole Heat Exchanger. Innostock - The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida.
19. Monzó P, Acuña J, Palm B. 2012. Analysis of the influence of the heat power rate variations in different phases of a DTRT. Innostock - The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida.
20. Acuña J, Mogensen P, Palm B. 2011. Distributed Thermal Response Tests on a Multi-pipe Coaxial Borehole Heat Exchanger. *HVAC&R* 17:6, 1012-1029.

21. Acuña J. Palm B. 2011. Distributed Temperature Measurements on a Multi-pipe Coaxial BHE The 10th IEA Heat Pump Conference, Tokyo.

22. Acuña J. Palm B. 2011. First Experiences with Coaxial BHEs. IIR Conference on Sources/Sinks alternative to the outside Air for HPs and AC techniques, Padua.

Förutom dessa finns det 19st Master theses (examensarbete på civilingenjörsnivå).

Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer

1. Acuña J. 2014. Caso del mercado Sueco. Claves de éxito de la geotermia de baja entalpía en Suecia. 2:a Congreso ACLUXEGA. Spanien, 12-13 juni.
2. Acuña J. 2013. Forskningresultat från KTH. INFORMAs Geoenergikonferens. April 4-5.
3. Acuña J. 2013. KTHs forskningresultat från borrhål. SWECO tekniklunch. April 3.
4. Ericsson M, Acuña J, Nilsson T. 2013. Separat borrhålskrets för köldbärcirkulationen. KYLA + värmepumpar nr 5.
5. Acuña J. 2013. Mätningar i berg ger bättre förståelse för geoenergin. Energi&Miljö nr 8.
6. Acuña J. 2012. Detaljerade mätningar längs djupet i flera bergvärmeborrhål i Stockholm. Presentation om projektet vid EMTF lunchseminariet. 3 september.
7. Acuña J. 2012. Vatten som köldbärare i svenska bergvärmepumpar! Är det möjligt? KYLA+Värmepumpar nr 6.
8. Acuña J. 2012. Distributed Thermal Response Test: Ett bättre underlag till dimensionering av stora bergvärmesystem. Deltagande vid två sessioner under Nordbygg. Seminarium Kyl och Värmepumps företagen.
9. Acuña J. 2012. Bergvärmepumpsanläggningar - skillnader mellan design och verkligheten. Presentation under SVEPs eftermiddagsseminarium. 11 Maj.
10. Acuña J. 2012. Effektivitet hos bergvärmekollektorer. Kyltekniska Föreningen Stockholm. Vårens medlemsmöte. 23 april.

11. Acuña J. 2011. Framtidens värmesystem med borrhålsvärmepump. Energi&Miljö nr 2 februari.
12. Acuña J. 2011. Forskningsresultat från borrhålsvärmepump. Seminarium om bergvärme och värmepumpar. EU projektet GEOPOWER. 20 September.
13. Acuña J. 2011. Bergvärmepumpar. Föreläsning under "Nordforsk Summer Course on Hydrothermal systems and energy". 22-29 Augusti. Island.
14. Acuña J. 2011. Research results from Sweden. GeoEnergiTag. 13 maj. Tyskland.
15. Acuña J. 2010. Effektivare Utnyttjande av Energibrunnar för Värmepumpar Undersöks på KTH. KYLA Värmepumpar No 6.