

| | |
|---|-----------------------|
| Energimyndighetens titel på projektet – svenska Hefaistos – Säsongslagring av värme | |
| Energimyndighetens titel på projektet – engelska Hefaistos – Seasonal storage of heat | |
| Universitet/högskola/företag Tekniska verken i Linköping AB | Avdelning/institution |
| Adress Box 1500, 581 15 Linköping | |
| Namn på projektledare Erik Olsson | |
| Namn på ev övriga projektdeltagare Henrik Lindståhl, Tekniska verken Anders Moritz, Tekniska verken Sören Alm, Tekniska verken Joakim Holm, Tekniska verken Mikael Frank, Tekniska verken Björn Palm, KTH José Acuña, KTH | |
| Nyckelord: 5-7 st värmelager, borrhål, fjärrvärme, avfallsförbränning, kollektorer, HT-BTES | |

Förord

Vid sidan om Re:Source har detta projekt helt finansierats av Tekniska verken i Linköping. Tekniska verken har anlitat extern expertis för projektets olika delar. För modelleringen av värmelagrets prestanda har KTH anlitats, och då särskilt Dr. José Acuña, med stöd av prefekten för institutionen för energiteknik, Björn Palm.

För övergripande processdesign och kostnadsbedömning av lagrets inkoppling i Linköpings fjärrvärmenät har Per Erdegren, JD-Gruppen anlitats. Arbetet med att finna produkter som kan fungera som borrhålsvärmväxlare i ett högttemperaturlager har utförts av Mikael Yabandeh, FVU (VärmeK).

Innehållsförteckning

| | |
|------------------------------|----|
| Sammanfattning | 2 |
| Summary | 3 |
| Inledning/Bakgrund | 4 |
| Genomförande | 6 |
| Resultat och diskussion..... | 9 |
| Diskussion..... | 15 |

Sammanfattning

Genom ett säsongslager skulle man kunna flytta en del av det värmeöverskott som råder sommartid till vintern, vilket skulle minska behovet av spetslastbränslen, som ofta är av fossilt ursprung. Förstudien har haft som syfte att utreda om ett borrhålslager, laddat med överskottsvärme från avfallsförbränning sommartid skulle fungera som ett säsongslager av värme ur ett tekniskt respektive ekonomiskt perspektiv.

Arbetet har varit inriktat mot tre delar:

- Processlösning, dvs framtagande av ett system för värmeöverföringen mellan värmelagret och fjärrvärmenätet
- Dimensionering och modellering av själva värmelagrets prestanda
- Marknadsundersökning av borrhålskollektorer för höga temperaturer

För processlösningen anlätades en känd processkonsultfirma som tog fram förslag på inkopplingspunkter i befintlig anläggning, skissade på tänkbara placeringar av ny processutrustning, och tog fram ett förslag till dimensionering och sträckning av rörförbindelser mellan lager och befintlig anläggning. Utifrån detta har en investeringskalkyl tagits fram.

Vidare upphandlades modellering av värmelagret. En grundkonstruktion av en värmelagermodell utfördes i ett verifierat modelleringsverktyg. I denna varierades sedan modelleringsparametrarna borrhålsantal, borrhålsdjup, seriekopplingar av borrhål, borrhålsavstånd och bergets värmeledningsförmåga på ett systematiskt sätt via faktorförsök för att avslöja parametrarnas egna och samverkande faktorer. Värmeledningsförmågan går i sig inte att påverka på en given plats, men undersöktes som underlag till val av lokalisering, ifall berget uppvisar olika värmeledningsförmåga mellan lagrets olika tänkbara lokaliseringar. Genom detta arbete kan nu lagret dimensioneras mot den punkt som ger störst lönsamhet sett till total omsatt energi, effektkapacitet och investeringskostnad. Nästa steg här är att genomföra termiska responstester i de ytor som kan vara aktuella för lagret, för att verifiera de antaganden som gjorts i modelleringsarbetet.

Marknaden för borrhålskollektorer för högtemperaturändamål undersöktes med hjälp av en branschorganisation som arbetar med innovationsupphandlingar. Det finns inga kommersiellt färdiga lösningar för de höga temperaturer som är aktuella här. En leverantör har dock hittats som har ett material som bedöms som intressant. Nästa steg är att genomföra laborietester på detta material.

Den ekonomiska analysen visar att investering i ett lager inte är lönsamt i Tekniska verkens nuvarande system, där spetslasten försörjs av befintligt kraftvärmeverk i centrala Linköping. Emellertid önskar kommunen, tillika bolagets ägare, att frigöra denna fastighet för andra ändamål. Detta innebär att bolaget i så fall måste investera i ny kapacitet för fjärrvärmeförsörjningen. I ett sådant scenario ligger detta projekts framgång, för studien visar att ett värmelager i en storleksordning som aldrig tidigare skådats kan vara en konkurrenskraftig

lösning i framtida fjärrvärmesystem, eventuellt i kombination med värmepumpar som ökar den planerbara värmeeffekten ur lagret.

Summary

The purpose of this feasibility study has been to investigate how a high temperature thermal borehole storage (HT-BTES), charged with excess heat from a waste to energy process, would work as a seasonal storage for the purpose of district heating from a technical and economical perspective.

The study has focused on three topics:

- A process solution – how a HT-BTES may be introduced in the existing district heating system.
- Determination of the appropriate size of a storage, and modelling of its thermal response.
- Market survey of available borehole thermal probes for high temperatures

For the process solution a known process consulting firm was hired that developed proposals for intervention points in the existing plant, sketched the likely locations of new process equipment, and made a proposal for the design and location of the pipe connections between the storage and the plant. Based on this, an investment calculation was made.

Furthermore, thermal modeling of the heat storage was procured. A basic construction of a heat storage model was carried out in a verified modeling tool. In this the number of boreholes, borehole depth, series connections of boreholes, borehole spacing and the thermal conductivity of the rock was varied. This was done in a systematic way through factorial design in order to reveal the effects of the individual parameters and of their interaction with each other. The thermal conductivity is not in itself possible to affect at a given location, it was examined to provide a basis for the choice of location in this regard, in case the rock will show different thermal conductivities between various possible locations of the storage. The next step will to perform thermal response tests in the areas available for a storage.

The market for borehole collectors for high temperature purposes was investigated with the help of an industry association that works with procurement of innovations. One supplier was found that could provide a promising material. Next step is to perform laboratory tests on this material.

The economic analysis shows that an investment in a storage is not profitable within the current system of Tekniska verken, where the peak load heat demand is supplied by the existing heat and power plant in central Linköping.

However, the municipality, also the company's owner, has issued long term plans for the city development that assumes this plant to be moved elsewhere. In this case the company will have to invest in new capacity for its district heating supply. In such a scenario lies the success of this project, because this study shows

that a heat storage solution on a magnitude way beyond what has ever been built before could be a competitive solution for future district heating systems, possibly in combination with heat pumps that would increase the heat power available on demand from the storage.

Inledning/Bakgrund

Fjärrvärme är det vanligaste uppvärmningsalternativet i Sverige och står för ca hälften av den totala energianvändningen för uppvärmning och varmvatten i byggnader. Den tillförda energin till fjärrvärmeverken kommer framförallt från avfall och förnyelsebara bränslen såsom biobränslen, men även från en del fossila bränslen. Fossila bränslen, som till exempel olja, används huvudsakligen till spetsproduktion, det vill säga vid effekttoppar under kalla vinterdagar. Fortsatt utbyggnad av fjärrvärme baserad på energiåtervinning av avfall spelar en viktig roll för minskade utsläpp av växthusgaser. För att ytterligare minska de fossila utsläppen behövs insatser för att minska behovet av fossila bränslen och öka energi- och resurseffektivitet inom energiåtervinningen från avfall. Förbränning har en avgiftsfunktion i samhället vilket är en viktig del i arbetet mot ett samhälle baserat på hållbara cirkulära materialflöden.

Tekniska verken förser sina kunder med värme från våra avfallsförbränningsanläggningar under stora delar av året.

Idag kan vi tyvärr inte täcka det stora effektbehovet som finns vintertid med enbart avfall. Vi kompletterar då värmebehovet med tre pannor vars respektive främsta bränsle är returträ, olja och kol. Tekniska verkens vision är att bygga världens mest resurseffektiva region och enligt den strategin ska givetvis olja och kol fasas ut. Ett av problemen är den över året relativt konstanta tillgång på avfall och som inte bör deponeras under längre perioder, samtidigt som behovet av värmeenergi varierar stort över året. Att inte kunna lagra avfallet gör behovet av att lagra värmeenergi större hos avfallspannor än andra förbränningsanläggningar där bränslet, exempelvis de fossila som kol, olja eller de biobaserade som flis och pellets, är betydligt lämpligare att lagra eller hantera logistiskt. Genom att lagra värme från våra avfallsförbränningsanläggningar sommartid och täcka hela eller delar av det spetsvärmebehov som finns på vintern kan man åstadkomma en direkt ökad användning av energi från avfall. Ett sådant system skulle även leda till att avfallspannor blir konkurrenskraftigare gentemot andra typer av termiska energianläggningar.

För att närma sig ett resurseffektivt samhälle ur ett globalt perspektiv finns ett behov av ett skifte från dagens dumpning och deponering av avfall till återanvändning och återvinning av material och energi. Det finns ur klimatsynpunkt en tydlig rangordning mellan bra och sämre alternativ. Det är tydligt att Sveriges energiåtervinning eliminerar deponering i Europa och att marginal-avfallsbränslet till svensk energiåtervinning är importerat brännbart avfall. Tack vare att deponering elimineras kan betydande klimatpåverkan från deponierna undvikas. På grund av deponeringens metanemissioner så ger deponeringen ett relativt stort bidrag till klimatpåverkan. Ur klimatsynpunkt motsvarar 1 kg metangas ungefär 25 kg fossilt CO₂. Även från en modern och

effektiv deponi med insamling av metangas uppstår betydande metan-utsläpp om man summerar utsläppen under hela den kemiskt aktiva perioden. Metanproduktion uppkommer för allt biogent avfall som bryts ner anaerobt, dvs både för matavfall, papper, trä, mm. Inerta material som sten och metall och plastavfall bryts inte ner. Vid förekommande deponibränder deltar dock plasten och bidrar till spridning av svårt toxiska organiska föroreningar.

Det finns andra alternativ för avfall som exempelvis materialåtervinning och avfallsförebyggande, men eftersom deponeringen är den dominerande behandlingsmetoden internationellt finns det ingen konkurrenssituation mellan de olika alternativen. Istället kompletterar dessa metoder varandra i arbetet för att ersätta avfallsdeponeringen med bättre alternativ. Den generella avfallshierarkin fungerar som vägledning för att rangordna möjliga avfallshanteringsalternativen utifrån ett klimat- och resursperspektiv. En viktig orsak till att vi i Sverige har byggt upp fjärrvärmesystemen har varit, och är fortfarande, behovet av att minska på uppvärmningens totala miljöpåverkan i samhället. Energianvändningen i Sverige fördelas över året där värmeeffekten är som störst under vintermånaderna och som minst under sommartiden. Det dimensionerande effektbehovet blir mycket högt i förhållande till det faktiska behovet stora delar av året. På sommaren används endast en bråkdel av kapaciteten. Om dessa variationer kan jämnas ut skulle det leda till både ekonomiska och miljömässiga fördelar.

Utveckling av teknik och åtgärder som förbättrar ekonomin kring de cykliska effekttoppar som är kopplade till systemet behövs. Problemet med att anläggningarna genererar ett värmeöverskott sommartid, medan behovet av värme är som störst vintertid, skulle kunna lösas med säsongslagring av värme. En utjämning av lasten på pannorna kan också ge minskade emissioner genom jämnare förbränningsbetingelser. På så sätt kan utsläppen av bland annat kväve- och svaveloxider reduceras. Ett värmelager skulle därutöver ge en direkt minskad användning av fossila bränslen, till förmån för ökad avsättning för avfallsvärme, utan ökning av förbränningskapaciteten för avfall.

Tekniska verken har en lång erfarenhet av energiåtervinning ur avfall via förbränning i kraftvärmeverk. Tekniska verken har de senaste åren investerat stort i en ny avfallspanna för att minska förbränningen av fossila bränslen och på sikt fasa ut dessa helt. Med den nya avfallseldade Lejonpannan på 80 MW får Gärsstadverket en kapacitet som energimässigt räcker för nästan hela Linköpingsnätets värmebehov. På grund av den ojämna fördelningen över året räcker inte effekten från Gärsstadverket på vintern. Samtidigt som det råder ett underskott vintertid så har Tekniska verken sommartid ett stort värmeöverskott som uppgår till 260 GWh. Tekniska verken vill nyttiggöra överskottet för fjärrvärmeändamål vintertid via ett värmelager som flyttar värmeeffekt från sommar till vinter.

Därför har Tekniska verken sedan början av 2014 drivit en utredning kring hur ett borrhålsvärmelager skulle kunna användas för detta ändamål. Arbetet inleddes med ett examensarbete (Emilia Björe-Dahl och Mikaela Sjöqvist, Ökad

resurseffektivitet i kraftvärmesystem genom säsongslagring av värme (LIU-IEI-TEK-A--14/01887-SE), detta drevs sedan vidare av Mikaela Sjöqvist som anställd inom Tekniska verken (Fas 1). I nu föreliggande fas (Fas 2) togs arbetet över av Henrik Lindståhl. Förutom stödet från Re:Source har arbetet helt finansierats av Tekniska verken.

Ett borrhålslager bygger på samma princip som bergvärme. Skillnaden här är att i ett värmelager laddas berget först med högtempererad värme, och att fler borrhål med höga temperaturerna ökar effekten ur en given bergmassa. Ett borrhålslager skapas genom att flera tätt liggande borrhål kopplas samman så att en bergvolym kan kylas eller värmas. I de flesta fall är lagervolymen större än 100 000 m³ med ett trettiotal borrhål. Det finns dock flera svenska exempel på betydligt större lager med mer än 100 borrhål. Antalet hål är beroende på hur stort energibehovet är för fastigheten eller anläggningen som ska värmas och kylas. För att kunna utnyttja bergets geoenergi borrar normalt 60-200 meter djupa hål, med ett avstånd på 4-10 meter mellan dem. Hur djupt det behöver borrar beror på vilka geologiska förutsättningar som finns och energibehovet. När borrhålen är klara sänks slangar ner och fylls med vätska. När vätskan cirkulerar i slangarna tar den upp den värme eller kyla som finns i berget. På vintern när värmebehovet ökar hämtas värmen ur den uppvärmda bergmassan. En fördel med borrhålslager är att det har få rörliga delar och behöver därför lite underhåll och har generellt en mycket lång livslängd. De vanligaste typerna av säsongslager är bergrum, groplager, slangar i lera, borrhål i berg och akviferlager. En jämförelse av referensobjekt visar på att borrhål i berggrunden kan vara en intressant lösning för Tekniska verken. Det skulle dock behöva vara av en helt annan magnitud än de lager som byggts hittills i Europa. Den lösning som föreliggande projekt inriktats på är unik i fråga om sin inriktning mot integrering i ett befintligt fjärrvärmesystem, vilket kräver höga temperatur, stor lagrad energimängd och en fysiska storlek som saknar motstycke.

De beräkningar som utförts inom projektet visar att ett fjärrvärmesystem med borrhålslager vid Gärstadverket skulle kunna minska fjärrvärmesystemets spetslastbehov med upp till 50 MW och sammanlagt ersätta 45 – 120 GWh vintertid med avfallsvärme inlagrad från föregående sommar. Spannet beror av om lagret kompletteras med värmepumpar eller ej.

Genomförande

Studien har primärt riktats mot ett direktväxlat system, där värmen utväxlas med lagret utan värmepumpar. Projektet har haft följande mål:

- att beräkna utgående flöde ur lagret till storlek och temperatur vid laddning respektive urladdning för en given lastsekvens, specificerad som ett års dygnsmedelvärden för laddad respektive urladdad energi.
- att ta fram en kostnadsbedömning för det system som krävs för att sammanbinda lagret med fjärrvärmenätet
- att hitta material för borrhålvärmeväxlarna som kan hantera de extrema temperaturer som applikationen kräver

Modellering av borrhålslager

Denna del av projektet har syftat till att finna den struktur beträffande håldiameter, antal hål, borrhjup och inbördes kopplingar mellan hålen som ger störst överföring av energi från sommar till vinter. En målsättning har varit att finna en struktur som levererar en utgående fjärrvärmetemperatur (T_{ut}) från värmelagret på >67 °C så lång tid som möjligt under urladdningen.

En upphandling av beräkningsarbetet utfördes i enlighet med lagen om offentlig upphandling. Uppdraget vanns av KTHs grupp för geotermi, institutionen för Energiteknik inom Maskinsektionen, och har utförts av José Acuña.

KTH har anpassat en modell i beräkningsprogrammet TRNSYS efter den aktuella applikationen. Programmet innehåller en stor mängd standardkomponenter ("Types") som kan användas för att bygga modeller. För att modellera de vertikala borrhålsvärmeväxlarna och deras interaktion med omgivande berg har man använt Type 557b.

Beräkningsåren anpassades efter en ettårig huvudladdningscykel. Indata och resultat har redovisats som dygnsmedelvärden på temperatur på utgående vatten ur värmelagerkretsen för de tio första driftåren. Lagrets prestanda redovisades för Type 557b som simulerar u-rörskollektorer, bl.a. för att klarlägga betydelsen av den termiska kortslutningen mellan ingående och utgående flöde inuti hålen. KTH har redovisat antagna värden i beräkningar, som t.ex. värden på borrhålsmotståndet, bergets värmekapacitet, markisoleringens tjocklek etc. utifrån uppmätta data eller normalt förekommande värden.

För att få en uppfattning om de olika parametrarnas betydelse för lagrets prestanda lät vi KTH räkna igenom en försöksplan där antalet borrhål, borrhålsavstånd, borrhjup, seriekoppling och bergets värmeledningsförmåga på ett systematiskt sätt varierades mellan två olika nivåer, en låg och en hög. För varje kombination beräknades laddad respektive urladdad energi på årsbasis. På så vis har respektive parameter, och samverkan mellan olika parametrar kunnat bestämmas.

Borrhålskollektorn

En projektdel har varit att finna borrhålskollektorer som maximerar laddningstemperaturen, med hänsyn till borrhålsvärmeväxlarnas temperaturbegränsning. Den prioriterade processlösningen, direktväxling utan värmepumpar, förutsätter material som tål temperaturer som är extremt höga relativt de man arbetar med inom geovärmekniken idag. Även en lösning med värmepumpar gynnas av hög lagertemperatur.

Utifrån processdesignen har kraven på maximalt ingående tryck till värmelagret fastställts, vilket också är en dimensioneringsparameter för kollektorn.

Fjärrvärmebolagens gemensamma bolag VÄRMEK har ett dotterbolag för innovationsupphandling, FVU AB. Deras Mikael Yabandeh har anlåtats för att söka efter kollektorlösningar som skulle fungera för vår applikation.

Implementering och kommersialisering

I projektet har de marknadsrelaterade förutsättningarna undersökts för att möjliggöra en framgångsrik vidareutveckling och nyttiggörande av värmelagret. Två olika typer av aktiviteter har genomförts, den ena delen bestående av affärsplanering för att bedöma ekonomiska potentialen av ett värmelager samt den andra delen är aktiv affärsutveckling där potentiella samarbetspartners har kontaktats för att praktiskt verifiera affärsmodellen och utveckla hela värdekedjan.

Affärsplanering - Har skett internt på Tekniska verken och påvisar under vilka förutsättningar som det är kommersiellt lönsamt med storskalig säsonglagring av värme via borrhål. Bedömningen har gjorts utifrån investerings- och rörelsekostnad samt ur de data som lagermodellen predikterar samt kopplat till olika scenarier för effektbehov och energiprisets utveckling.

Affärsutveckling – Genom kontakt och möten med ett stort antal aktörer i branschen för att belägga värdekedjan och vår roll i den. Tekniska verken är en aktör som vill positionera sig som en aktiv beställare av ett system och utifrån våra behov delta aktivt i teknikutvecklingen. Tekniska verken har via kontakt med ett flertal andra potentiella användare av tekniken verifierat en stor efterfrågan. Dessa användare är främst andra energibolag med samma grundproblematik kring säsongsmönster av energibehovet samtidigt som man vill köra sina avfallspannor kontinuerligt. Dessa aktörer har ställt sig så intresserade av systemutvecklingen att de är villiga att delta i en samfinansiering för att på sikt kunna lösa sina säsongsvaryerande energileveranser. Tekniska verken har även haft kontakt med potentiella leverantörer av systemet. Eftersom ingen har byggt något liknande system tidigare har det varit svårt att hitta aktörer som på ett trovärdigt sätt kan redovisa en samlad systemkompetens. Det finns även aktörer som försöker erbjuda liknande system och försökt få oss att ändra kravbild på funktion och lönsamhet. En möjlig kandidat att gå vidare med vid en realisering har identifierats som vi bedömer mycket trovärdiga och med stor samlad kunskap och erfarenhet inom området.

PRESENTATIONER EU MM

För att lösa uppgiften har information och samarbetspartners sökts på flera sätt:

- Besök vid Sveriges största borrhålsvärmelager vid Xylem i Emmaboda
- Presentation av Hefaistos vid Euroheat & Powers Brokerage Event 2016-10-12 i Bryssel, som är ett forum som syftar till att skapa kontakt mellan olika intressenter med fjärrvärme som gemensam nämnare, där bl.a. värmelagring hade en session. Detta har gett kontakt dels med den holländska konsultfirman VITO, och med Oslos fjärrvärmeföretag Hafslund.

- Besök vid ST1:s djupjordvärmeprojekt i Finland 2016-10-28. ST1 ligger i den absoluta världstoppen när det gäller geologisk kompetens för energiändamål. Vi fick god kontakt med deras projektledare Tero Saarno, som har mycket god kännedom om geoenergi, och som visat intresse för att bidra även i vårt projekt.

Resultat och diskussion

I vår ansökan angav vi följande:

1. Det övergripande målet i detta projekt har varit att undersöka de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för storskalig säsongslagring av värme från avfallsförbränningsanläggning. Ett framgångsrikt förprojekt ska ligga till grund för genomföra ett större projekt som syftar till att utveckla lösningen där denna del är analyserade och utvärderade.

Utfall

Projektet har resulterat i en bra bild av förutsättningarna för ett borrhålslager i Linköpings fjärrvärmesystem. Projektet har ökat kunskapen om teknikens möjligheter och begränsningar markant. Sammanfattningsvis kan sägas att ett borrhålslager inte är lönsamt på egna meriter med de förutsättningar som råder i Linköpings fjärrvärmesystem. Emellertid, och detta är också en utlösande faktor bakom projektet, är Tekniska verkens kraftvärmeverk i centrala Linköping ifrågasatt av kommunen, som tillika är bolagets ägare. I ett scenario där denna anläggning måste läggas ner och ersättas visar projektet att ett värmelager är konkurrenskraftigt i relation till kostnaden för den nya förbränningskapacitet som annars måste byggas.

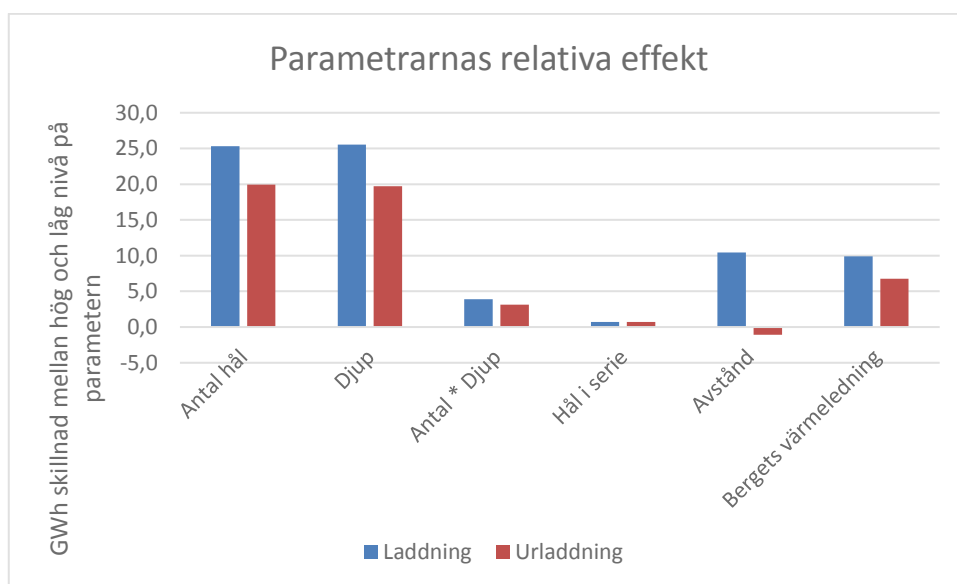
2. Målet är att dimensionera ett system som optimerar lagerstrukturen med avseende på antal hål, borrhålsavstånd, borrhålsdjup, borrhålsdiameter, borrhålskoppling (parallell, två- tre eller multiseriell) samt vinklar (divergerande för minimering av markanvändning eller parallella borrhål). Möjliga temperatur/flödesprogram samt lednings- och konvektionsförluster i lagret. Öppet/slutet kollektorsystem samt kollektortyp och material.

Utfall

Lagret har modellerats för 16 olika utförande där ett antal parametrar har varierats systematiskt mellan en hög respektive en låg nivå, vilket har klarlagt effekten av lagrets olika parametrar på ett mycket bra sätt.

| Försök | Indata | | | | | Respons | |
|--------|-----------|------|-------------|---------|--------------|------------|--------------|
| | Antal hål | Djup | Hål i serie | Avstånd | Värmeledning | GWh laddat | GWh urladdat |
| F1 | 1000 | 200 | 1 | 4 | 4,5 | 48,9 | -37,5 |
| F2 | 1000 | 200 | 1 | 6 | 2,9 | 49,2 | -32,4 |
| F3 | 1000 | 200 | 3 | 4 | 2,9 | 43,0 | -34,0 |
| F4 | 1000 | 200 | 3 | 6 | 4,5 | 57,5 | -38,1 |
| F5 | 1000 | 300 | 1 | 4 | 2,9 | 61,8 | -49,6 |
| F6 | 1000 | 300 | 1 | 6 | 4,5 | 81,6 | -55,3 |
| F7 | 1000 | 300 | 3 | 4 | 4,5 | 70,9 | -55,4 |
| F8 | 1000 | 300 | 3 | 6 | 2,9 | 71,1 | -48,0 |
| F9 | 1500 | 200 | 1 | 4 | 2,9 | 61,5 | -49,9 |
| F10 | 1500 | 200 | 1 | 6 | 4,5 | 81,4 | -55,5 |
| F11 | 1500 | 200 | 3 | 4 | 4,5 | 70,4 | -55,8 |
| F12 | 1500 | 200 | 3 | 6 | 2,9 | 71,0 | -48,0 |
| F13 | 1500 | 300 | 1 | 4 | 4,5 | 98,4 | -79,1 |
| F14 | 1500 | 300 | 1 | 6 | 2,9 | 99,4 | -67,9 |
| F15 | 1500 | 300 | 3 | 4 | 2,9 | 88,6 | -73,1 |
| F16 | 1500 | 300 | 3 | 6 | 4,5 | 115,7 | -80,5 |
| F17 | 1250 | 250 | 2 | 5 | 3,7 | 75,2 | -56,9 |

Tabell 1. Systematisk variation av lagerparametrar, med utfall enligt KTHs modellering



Figur 1. Effekten av variation i parametrar enligt Tabell 1

Modelleringen visade på två oväntade resultat: dels att seriekoppling av hålen knappt har någon effekt alls, dels att ökande borrhålsavstånd är positivt för laddad energi, men negativt för urladdad energi. Detta kan tolkas som att förlusten ökar med borrhålsavståndet. Emellertid gick det inte att bygga modellen så att den klarade att vända flödet mellan laddning

och urladdning. Därför gick det inte att beräkna den positiva effekt som sannolikt kan uppnås genom seriekoppling av hålen.

3. Projektet ska visa under vilka förutsättningar som det är kommersiellt lönsamt med storskalig säsonglagring av värme via borrhål. Bedömningen görs utifrån investerings- och rörelsekostnad samt under vilka systemförluster och energipriser ett borrhålslager kan vara lönsamt. Om förutsättningarna för implementering av ett värmelager bedöms goda, ska en plan tas fram inom projektet som beskriver fortsatt utveckling och implementering både tekniskt och kommersiellt samt identifiera relevanta aktörer och samarbetspartners.

Utfall

Ekonomiska kalkyler för olika processvarianter för värmelager i vårt fjärrvärmesystem har utarbetats. I kalkylerna har hänsyn tagits till en rad faktorer som påverkar eller påverkas av en lagerinvestering, som:

- lagrets energiprestanda
- anläggning av själva borrhålslagret, vilket omfattar borrhålsarbete, kollektorer med montage och kringutrustning
- ledningsdragning till Gärtstadverket, inklusive inkoppling på befintligt system
- elprisprognos för kommande decennium
- förändrad effektbalans inom Linköpings kraftnät
- drift- och underhållskostnader
- prisprognoser för alternativa bränslen
- kostnadsskattningar för alternativa pannor
- mm.

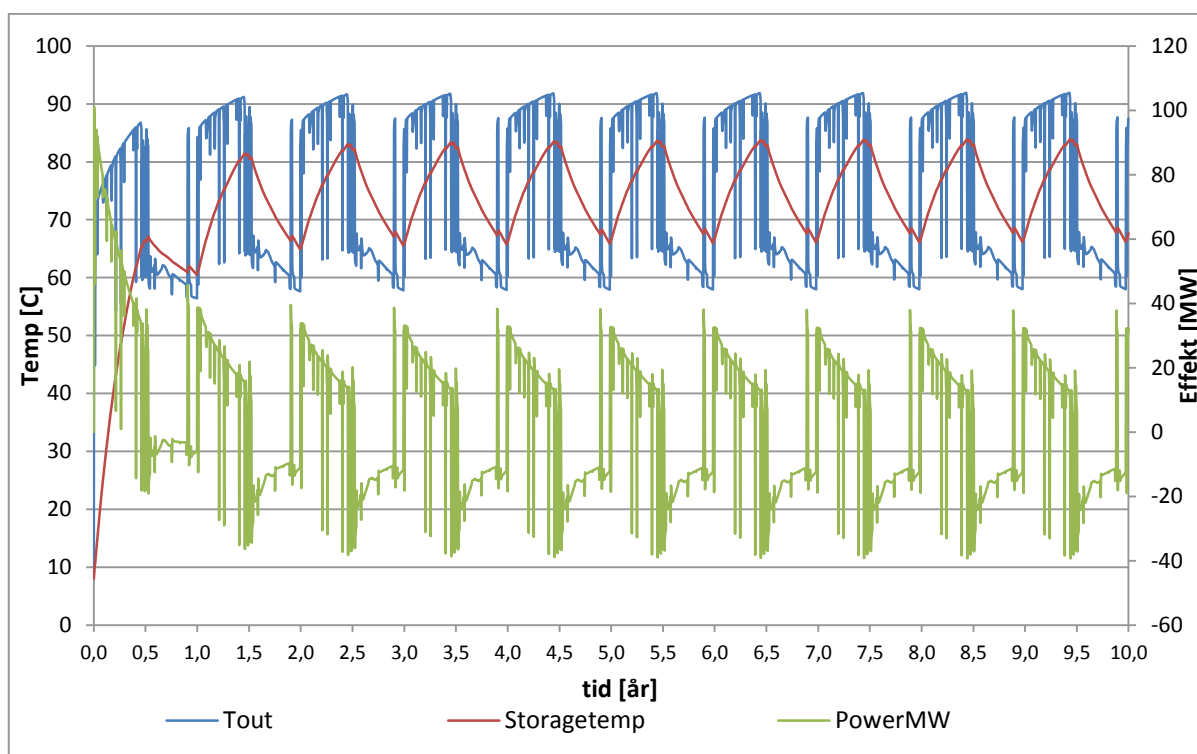
Med dessa kalkyler som grund finns nu ett gott underlag för beslut om nästa åtgärd.

Vidare har arbetet visat på en rad uppenbara men svårvärderade fördelar med ett värmelager. Här kan nämnas:

- det öppnar för att i högre grad planera panndriften mot elbehovet istället för mot det momentana fjärrvärmebehovet, något som kan bli än mer värdefullt när volatiliteten i elbörsen ökar
- ett värmelager kan byggas så att det inte har någon minlast, utan kan leverera effekt helt flexibelt mellan 0-100% av kapacitet, till skillnad från en panna som har en viss minlast som inte kan underskridas.
- ett värmelager kan minska antalet start och stopp i pannorna genom att i samverkan med befintlig ackumulator hantera kortare effekttoppar som annars krävt en kortvarig eller tidigare pannstart, och medger tidigare släckning av spetslastpannor i lägen som idag skulle vara osäkra. Undvikna start/stopp av pannorna sparar underhållskostnader.
- det kan minska värmeförlusten vi har idag till följd av bortkyld värme då värmebehovet faller i ett intervall som ligger under marginalpannans minlastgräns.

4. Målet med projektet var att beräkna utgående flöde ur lagret till storlek och temperatur vid laddning respektive urladdning för en given lastsekvens, specificerad som ett års dygnsmedelvärden för laddad/urladdad energi. Beräkningar för de specificerade lastsekvenserna ska utföras både för uppladdningsfasen samt för jämviktsfasen (2 år). Beräkningarna ska inkludera en osäkerhetsbedömning på redovisad temperatur. Osäkerhetsbedömningen ska inte omfatta avvikelser till följd av grundvattengenomströmning, gasutveckling eller strömningsproblem som kan uppstå. Flödet antas vara jämnt fördelat mellan parallellkopplade hål. Systemet antas tätt, utan läckage i någon riktning.

Utfall



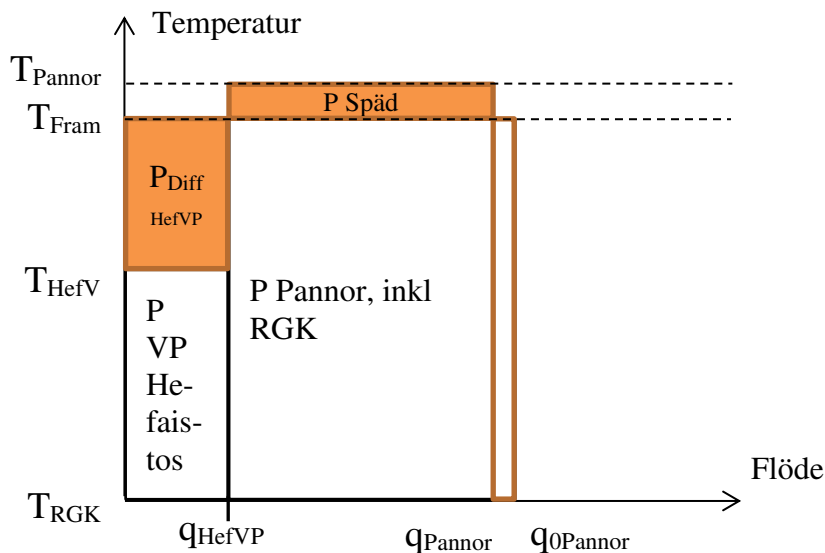
Ovan visas utfallet för beräkning av ett direktväxlat lager, 1500 borrhål, borrhjup 300 m, borrhålsavstånd 4 m, 3 hål i serie, värmeledningstal i berg 2,9 W/m, K. Blå och röd kurva avläses till vänster, grön effektkurva till höger (nedersta kurvan). Positiva effekter anger laddning av lagret och vice versa. Den röda (jämn) kurvan anger medeltemperaturen i lagret medan den blå (fransiga) visar utgående temperatur.

Kurvan visar att lagret är i balans från och med tredje säsongen. Som mest levererar lagret 35 MW vid urladdningssäsongens början, som snabbt faller ned till 20 MW, för att därifrån gradvis falla till 10 MW vid urladdningssäsongens slut.

Beräkningar

Vid arbetet med att modellera värmelagret användes mjukvaruverktyget TRNSYS, som när modellen är definierad, enbart kräver några minuter för att genomföra modellering på timbasis över en 10-årsperiod. Som indata kräver programmet ingående flöde och temperatur till lagret vid laddning respektive urladdning. Programmet levererar temperatur på utgående flöde, samt ett värde på medeltemperaturen i lagret, men gör ingen form av optimering eller designförslag. Modelleringsarbetet har utförts av Dr. José Acuña. Det har baserats på prognosticerade effekter, flöden och temperaturer i Linköpings fjärrvärmenät.

Vidare har TvAB utfört beräkningar i egen regi för att bedöma effekten av olika systemlösningar. En viktig faktor är framledningstemperaturen, som avgör vilken effekt som fjärrvärmenätet kan leverera vid fullt flöde. Nedan följer en beräkning av en blandningsberäkning utifrån begränsningar i temperaturer och flöden för ett värmepumpsfall.



Flödes-, temperatur- och effektfördelning pannor respektive Hefaistos

Om absorptionsvärmepumpar används för att dra upp värme ur lagret förbrukas ångeffekt från pannorna till drivånga. Absorptionsvärmepumpar baserade på LiBr/H₂O levererar maximalt 90 °C, vilket medför en undertemperatur på utgående flöde som måste kompenseras med övertemperatur från de parallellkopplade pannorna. Beräkningen nedan avser att bestämma den maximala effekt från ett parallellkopplat värmepumpssystem som tillsammans med tillgänglig effekt från ångkondensatorerna klarar av att leverera beställd framledningstemperatur, utifrån fjärrvärmesystemtemperaturer och temperaturbegränsningar hos värmepumparna och ångkondensatorerna.

$P_{DiffHefVP}$ = Effektunderskott i flöde från värmepumparna

q_{HefVP} = Fjärrvärmefflöde över värmepumparna

T_{Fram} = Fjärrvärmens beställda framledningstemperatur
 T_{HefVP} = Utgående fjärrvärmtemperatur från värmepumpar
 T_{Pannor} = Fjärrvärmtemperatur från ångkondensorer, högre än framledningstemperaturen för att kompensera för undertemperaturen från värmepumparna.
 q_{Pannor} = Fjärrvärmefflöde genom turbinkondensatorerna
 P_{Pannor} = Fjärrvärmeeffekt från turbinkondensatorerna
 $P_{Späd}$ = Effekten som motsvaras av pannornas övertemperatur relativt T_{Fram} , multiplicerat med q_{Pannor}
 T_{RGK} = Fjärrvärmtemperatur efter rökgaskondensering, ingående temperatur till lagerväxlaren
 P_{KV50} = Drivångeffekt från KV50 till värmepumpar
 P_{Hef} = Effekt hämtat från värmelagret

Följande uttryck har härlett för beräkning av den maximala effekt från Hefaistos som de pannor som parallellkopplas i systemet förmår att kompensera undertemperaturen från:

$$P_{Hef} = \frac{(T_{Pannor} - T_{Fram}) * (T_{HefVP} - T_{RGK})}{(T_{Fram} - T_{HefVP}) * (T_{Pannor} - T_{RGK})} * P_{Pannor} - P_{KV50}$$

Detta är av stor betydelse för värderingen av denna typ av processlösning i vårt energisystem.

Beräkningen visar att jämvikt nås för en effekt av 50 MW från Hefaistos. Detta gäller när lagret är kopplat mot fjärrvärmem med absorptionsvärmepumpar som använder ångan från en av Gästadsverkets anläggningsdelar, KV50. Emellertid faller nyttan av lagrets bidrag när lasten i nätet ökar ytterligare, vilket gör att en lösning med absorptionsvärmepumpar inte är att betrakta som tillgänglig effekt under de allra kallaste perioderna.

Borrhålskollektorn

Vi har haft diskussioner med Laplast (Thomas Andersson) som meddelat att de har en lösning som i teorin borde fungera. För att testa detta har de involverat en professor vid KTH som är expert på plastmaterial. Han kan genomföra en analys av den metod som Laplast vill använda. Nästa steg är att KTH genomför undersökningen på om metoden är gångbar. Det går att tillverka koaxialrör, det skulle kosta cirka 50% mer än ursprungspriset, vilket sannolikt inte kompenseras av den ökade effektiviteten. Undersökningar utförda inom andra arbeten har visat att skillnaden i termisk effektivitet mellan u-rör och koaxialrör är obetydlig.

Lagerstruktur

Lagret som har modellerats består av parallella vertikala borrhål som är utplacerade inom en åttkantig yta. Vid modellering av seriekoppling har lagerytan delats in i koncentriska ringar där de seriekopplade hålen ligger i var sin ring.

Diskussion

Tekniska verken är ett affärsdrivande kommunalt bolag, som i sin och dotterbolagens verksamhet löpande utvecklar nya tekniska lösningar för samhällsinfrastruktur, el-, vatten- och värmedistribution samt inom området för energiutvinning och bränsle. Innovationer skapade av och för Tekniska verken inom dessa verksamhetsområden låter Tekniska verken regelbundet etablera immateriella ensamrättigheter till och kommersialisera på marknaden själva eller genom licensavtal med externa samarbetspartners inom och utom Sverige. Tekniska verken överväger att vidare kommersialisera systemet tillsammans med partners, och vara en föregångare i utvecklingen, byggandet och användningen av konceptet för värmelagring. Värmelagring i denna skala och vid aktuella temperaturer är ett nytt område och denna anläggning skulle bli den största i världen. Genom att vara en föregångare med de risker och konsekvenser det kan medföra, att utveckla och använda nya innovativa tekniska lösningar, söker Tekniska verken i gengäld få en potentiell framtida ekonomisk återbetalning.

Tekniska verken har genom projektet bekräftat den tidigare uppfattningen att det finns ett intressant nyhets- och kommersiellt värde i att erbjuda know-how till andra aktörer som verkar inom denna sektor system för säsongslagring av värme. Vi överväger idag att gå vidare med vidare projektutveckling. En uppförd referensanläggning skulle ha ett mycket stort värde för branschen i stort då ett flertal intressenter är intresserade av att aktivt följa samt delfinansiera utveckling.

En förutsättning för kommersiell framgång är att konceptet uppmärksammas och vinner marknads förtroende avseende effektivitet, funktionalitet och nytta. Vi har lärt oss att den kommersiella nyttan i ett system likt detta har oerhört många dimensioner utifrån både de lokala förutsättningarna samt hur det lokala energisystemet och dess säkerhet planeras framöver. Ett investeringsbeslut är inte enbart baserat på investeringskostnad och energipriset som anläggningen genererar, för Tekniska verken är investeringsbeslutet avhängigt de alternativ som finns till ökad energiåtervinning från avfall.

Utifrån våra beräkningar är systemet inte direkt konkurrenskraftigt med befintlig värmeproduktion, men tillsammans med de system och miljövinster som går att uppnå kan det vara en investering som är tillräckligt lönsam för att genomföra. Utifrån den stora mängd kontakter och det intresse som finns i branschen har vi bekräftat vår tidigare uppfattning att affären för konceptet kan vara skalbar såväl uppåt som nedåt. Projektpartnerens kan erbjudas olika roller i värdekedjan för en kommersialisering av konceptet med, för parterna, bibehållen kontroll över konceptet i eventuella framtida affärer.

Föreliggande utredning visar att det är fullt möjligt att lagra värdefull energi från sommar till vinter. Hänsyn behöver dock tas till lagrets, och även värmepumpars begränsning i leveranstemperatur när man designar systemet runt värmelagret. En bärkraftig lösning är att använda lagret till att förvärma ingående fjärrvärmevatten

till värmeverkets ångkondensorer, vars effekt då kan värma ett högre flöde till aktuell måltemperatur.

En reservation är den konvektiva värmeförlusten ur lagret, som beror av grundvattenrörelser. Denna typ av lager förutsätter att grundvattenrörelsen är utomordentligt låg, annars går värmen förlorad. Detta måste alltid undersökas specifikt på den aktuella platsen innan lagret anläggs.

Den optimala utformningen på lagret beror dock av det kringliggande system som lagret ingår i. Ett värmelager har ingen egen intjäning, hela nyttan utgörs av sekundära effekter i det system det verkar i. Vad som är en optimal utformning av lagret beror därför på vilka bränslen som finns tillgängliga i framtiden, prisrelationen mellan dessa bränslen och el, framtida skatter och styrmedel, framtida elpriser, utvecklingen hos Linköpings framtida stadsutveckling, kundernas benägenhet att välja fjärrvärme i framtiden, och, sist men inte minst, hur klimatet utvecklas i vår region. Bedömningen av allt detta har inte kunnat inrymmas i föreliggande projekt, men med de indata som projektet producerat har underlag skapats så att strategiskt korrekta beslut nu kan tas om Linköpings fjärrvärmesystem i linje med bolagets riskpolicy.

För att förverkliga ett värmelager kommer följande fortsatta utredningar och åtgärder att krävas:

- Provbörning med termiska responstester av berggrunden och kontroll av vattenföringen på tillänkta ytor för lagret.
- Testning av nya högtemperaturmaterial för kollektorslangarna. Utförs vid KTH.
- Söka samarbetspartners och eventuellt mer bidrag.
- Val av processvariant
- Inleda miljökonsekvensutredning i fråga om:
 - Värmeutbredning i mark som funktion av tid
 - Identifiering av påverkade vattenbrunnar
 - Identifiering av påverkade energibrunnar
 - Bedömning av konsekvenser av ändrad underjordisk mikrobiologi
 - Bedömning av risk för förorening av grundvatten föreligger pga förändrad löslighet av mineraler i det värmepåverkade området
 - Bedömning av påverkan på grundvattenrörelser
 - Bedömning av risk för rörelser och sättningar i marken till följd av värmeväxlingarna i bergvolymen
- Studie av ett värmelagers effekter på TvABs organisation
- Studie av de olika processvarianternas påverkan på leveranssäkerheten ur redundans- och beredskapsperspektiv.

Ur ett hållbarhetsperspektiv vore ett fjärrvärmeintegrerat värmelager ett stort framsteg. Det skulle fungera som en referensanläggning för andra energibolag som visar på hur man på ett bättre sätt kan nyttiggöra energi ur avfall sommartid, samtidigt som det erbjuder en möjlighet att jämna ut svängningarna i elnätet

genom att öka möjligheten att producera, respektive använda elkraft utifrån de variationer som de icke planerbara kraftkällorna i det svenska kraftsystemet ger upphov till.