

Simulering av värmepumpsystem

Martin Forsén

*Institutionen för Energiteknik,
Avdelningen för Tillämpad Termodynamik och Kylteknik
Kungliga Tekniska Högskolan
Stockholm*

Deltagande parter:

*Institutionen för Energiteknik, KTH
Statens Provnings och Forskningsinstitut
Svenska Värmepumpsföreningen
Thermia Värme AB
IVT Industrier
Nibe AB
Elforsk AB*

Projektledare: Per Lundqvist, KTH

Controller: Per Fahlén, Statens Provnings och Forskningsinstitut

Sammanfattning

Den svenska värmepumpsbranschen har under de senaste åren uppvisat en stark försäljningsutveckling. Värmepumpen utgör idag ett mycket konkurrenskraftigt uppvärmningsalternativ vid nybyggnation. Även vid ersättning av uttjänta olje- och elpannor kan tekniken medföra betydande energibesparing och minskad miljöbelastning. Då en värmepumpsinstallation i de allra flesta fall medför en betydligt högre initialkostnad krävs noggranna beräkningar av den energibesparing som installationen bidrar till. För detta ändamål använder sig tillverkarna av olika beräkningsprogram. De teoretiska beräkningsmodellerna skiljer sig mellan de olika programmen, varmed jämförelse av olika beräkningsresultat försvåras. Problemet har uppmärksammats av branschen och idag pågår ett gemensamt arbete med att ta fram en enhetlig beräkningsgrund att användas av alla tillverkare. Detta arbete bedrivs i form av ett forskningsprojekt i samarbete med Institutionen för Energiteknik, Avdelningen för Tillämpad Termodynamik och Kylteknik, KTH. Syftet med projektet är att ta fram beräkningsmodeller och programverktyg för bestämning av besparingspotentialen för en installation av värmepump. Programverktyget byggs upp av utbytbara moduler, där varje modul beskriver ett enskilt delsystem. Inom ramen för forskningsprojektet där även studier av befintliga beräkningsverktyg ingår har successivt modeller för simulering av klimat, värmesystem, byggnadskarakteristik, värmepump och värmekälla tagits fram. För att möjliggöra utvärdering av den slutliga produkten pågår även omfattande fältmätningar, i befintliga anläggningar, i högskolans och industrirepresentanternas regi. Denna rapport beskriver kortfattat de teoretiska modeller som tagits fram och de resultat som hittills erhållits från de pågående fältmätningarna.

Summary

The Swedish heat pump market has during the last few years experienced a significant sales growth. Heat pumps offer today a highly competitive alternative to the traditional heating systems in new constructions. Replacement of worn out oil- and electricity burners is another market segment where the heat pump can offer substantial energy savings and reduced environmental impact. The high investment cost associated with the heat pump can only be justified if the energy savings can be proven by accurate calculations. It exists a number of software for this purpose on the market today. The calculations are however, often based on different theoretical grounds which render difficulty in making comparisons between calculated results. The problem has drawn much attention by the actors on the market and led to a joint project with the aim to develop a common ground for calculation to be used by all manufacturers. This project is run in the form of a science project in co-operation with The Department of Energy technology, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Royal Institute of Technology. The aim of this project is to develop a simulation-model and a computerised tool in a scientific way in order to accomplish a generally accepted software for calculation of performance, heating- and electricity demand and energy savings for various installations. Different modules in the computer-program will describe different parts of the installation. Modules describing simulation of the outdoor climate, heating system, heat pump performance and heat source has gradually been put together. Extensive field measurements in existing installations are performed in order to facilitate evaluation of the final computer-program. This report give a short description of the theoretical models that has been developed. Results from the ongoing field measurements are shown.

Innehållsförteckning

Simulering av värmepumpsystem	1
Bakgrund och motiv för projektet	1
Dimensionering och besparingskalkyler för en bergvärmepump i Trollhättan	1
Beräkningsunderlag	1
Beräkningsresultat och val av värmepump	2
Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet	3
Syfte	3
Mål	3
Projektarbetets omfattning	3
Resultat	4
Kunskapsbildning modellering och validering	4
Modeller och datorprogram	5
Programfamiljer	6
Statiska beräkningsprogram	6
Kvasistatiska beräkningsprogram	7
Dynamiska beräkningsprogram	7
Positionering	8
Systemanalys och Moduluppbyggnad	8
Klimatmodell	9
Underliggande modeller för värmepumpens dimensionering	11
Värmedistribution-utveckling av vattenburna värmesystem	11
Värmebalans	12
Byggnadskarakteristik	14
Tappvarmvatten	15
Värmepump	16
Prestandamatriser	17
Vätska/Vatten värmepumpar	17
Luft/Vatten värmepumpar	17
Värmekälla	18
Energiuttag ur berg	18
Teoretisk modell	19
Bestämning av köldbärartemperatur	20
Demonstrationsprogram	22
Fältmätningar i Katrineholm	23
Bakgrund	24
Mätobjekt	24
Mätmetodik	26
Mätresultat från pågående mätning	26
IVT Industrier AB	29
Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP)	29
Thermia AB	29
Internationell samverkan	29
Måluppfyllelse	29
Industriell relevans	30
Projektets relevans för programmet	31
Officiella Publikationer	31
Referenser	31

Bilagor	32
Simulering av värmepumpsystem och klimatmodeller, Klimat 21-dagen 1998.	32
Simulering av värmepumpsystem, Klimat 21-dagen 1999.	32

Simulering av värmepumpsystem

Bakgrund och motiv för projektet

Den svenska värmepumpmarknaden har under de senaste 20 åren fluktuerat kraftigt. Kraftiga försäljningstoppar har inträffat under tidsperioder då värmepumpar subventionerats genom bidragssystem och stimulerats av högt bostadsbyggande under högkonjunkturer. Under senare år har värmepumpsteknik erhållit mycket god publicitet tack vare en lyckad och väl marknadsförd teknikupphandlingstävling. Under de 20 åren har det skett en kraftig teknikutveckling inom området som medfört högre tillförlitlighet och bättre energieffektivitet. Detta har lett till att värmepumpar idag utgör ett attraktivt alternativ till äldre konventionella uppvärmningsalternativ. På grund av den höga initialkostnaden för en värmepumpsinstallation använder tillverkarna beräkningsprogram för att påvisa värmepumpens ekonomiska fördelar ur ett längre tidsperspektiv. Det finns idag en handfull olika säljstödprogram som används inom branschen. Programmen har ingen gemensam beräkningsgrund vilket medför att dimensionering och resultat varierar mellan de olika tillverkarna. Jämförelser av offerter från olika tillverkare försvåras då dokumentation av beräkningsgång är bristfällig om ens tillgänglig. Aktörerna på den svenska marknaden har sedan ett flertal år uppmärksammat problemet och efterfrågat en gemensam beräkningsgrund för hela branschen. Villrådigas kunder som erhållit ett antal offerter från olika tillverkare söker i vissa fall kontakt med högskolan för att be om ett oberoende utlåtande. I en sådan granskning av offerter framgår branschens problem på ett väldigt tydligt sätt. I den följande texten återges intressanta delar av offerter en familj i Trollhättan erhållit från fyra olika värmepumpstillverkare.

Dimensionering och besparingskalkyler för en bergvärmepump i Trollhättan

En familj i Trollhättan har begärt in offerter på installation av värmepump ifrån fyra olika tillverkare. Tillverkarnas återförsäljare har i samråd med familjen utfört beräkningar med tillverkarnas egna beräkningsprogram. Av beräkningarna framgår att återförsäljaren gjort vissa egna antaganden av indata till programmen vilket gör att beräkningarna inte är helt jämförbara. Även i programmens beräkningsgrund föreligger en del antagen som skiljer sig mellan programmen och förklarar en del skillnader i beräkningsresultaten. I nedanstående tabeller återges delar av offerternas innehåll. I en av offerterna redovisades endast ett utdrag av beräkningsresultaten varmed tillverkare fyra ej finns återgiven i den ena tabellen.

Beräkningsunderlag

	Tillverkare 1	Tillverkare 2	Tillverkare 3
Oljeförbrukning [m ³]	4,2	4,2	4,2
Verkningsgrad oljepanna	85%	70%	80%
Netto energiförbrukning kWh/år	35700	29400	33600
Varmvattenförbrukning kWh/år	5000	4500	3500
Inomhustemperatur °C	22	20	20
DUT** °C	-20	-20	-20
Årsmedeltemperatur °C	6,6	6,6	7,1
Framledningstemperatur (DUT) °C	iu*	55	50
Inkommande brinetemperatur (DUT) °C	-3	-5	iu
lambda berg W/mK	3	3	3,47

* ingen uppgift, ** dimensionerande utetemperatur

Kommentarer: Av ovanstående tabell framgår vikten av att använda sig av samma verkningsgrad för oljepannan i de olika beräkningarna. Denna uppgift är oftast ett högst godtyckligt antagande med utgångspunkt från oljepannans ålder.

Beräkningsresultat och val av värmepump

	Tillverkare 1	Tillverkare 2	Tillverkare 3	Tillverkare 4
Nominell effekt VP [kW]	8,3	9	7	8,5
Beräknat effektbehov DUT	12,1	10,8	13,5	iu*
Relativ VP storlek**	69%	83%	52%	iu*
Energitäckning	94%	98%	93%	iu*
Årsvärmefaktor	2,93	2,63	3,1	iu*
Årlig besparing [kWh/År]	28 250	30 450	21 214	iu*
Aktivt borrhåldjup [m]	137	111	93	135
Offertpris [sek]	101 500	97 000	90 000	98 750

* ingen uppgift, ** Nominell effekt/Beräknat effektbehov vid DUT

Kommentarer: Det beräknade effektbehovet vid DUT skiljer 25% mellan högsta och lägsta värdet. Val av värmepumpstorlek är styrt av tillverkarnas produktutbud och vad återförsäljaren anser är lämpligt i förhållande till husets behov. En intressant iakttagelse är att den tillverkare som uppskattar det högsta effektbehovet väljer den minsta värmepumpen (tillverkare 3) och att den tillverkare som uppskattar det lägsta effektbehovet väljer den största värmepumpen (tillverkare 2). Den årliga energibesparingen skiljer 43% mellan det högsta och lägsta värdet, en del av detta kan förklaras med skillnaden i dimensionering och värmepumpens prestanda, men det framgår även att det måste finnas skillnader i beräkningarna. Det som kanske väcker mest uppseende i jämförelsen är dimensioneringen av borrhålet. Där det rekommenderade borrhåldjupet skiljer sig 47% mellan det längsta och kortaste hålet. Tillverkare 1 rekommenderar 137m emedan tillverkare 3 nöjer sig med 93m. Skillnaden på 44m aktivt borrhåldjup motsvarar ca 11 000 sek med dagens borrhälspriser och belastar direkt offerten, till skillnad från energibesparingen som endast är en uppskattning av förväntat utfall. I offerten från tillverkare 3 ingår dock ett aktivt borrhåldjup om 110m, vilket antyder att tillverkaren själv är tveksam till sin egen dimensionering.

Det ovan beskrivna fallet belyser marknadens problem idag och utgör den verkliga bakgrunden för branschen att ta fram en gemensam beräkningsgrund. I projektets officiella ansökningshandlingar har bakgrunden beskrivits enligt följande.

”En springande punkt för en vidsträckt introduktion av värmepumpar är att man på ett tillförlitligt sätt kan förutse hur en given värmepump kommer att fungera i en installation. Speciellt intressant är att kunna beräkna besparingsfaktor samt att jämföra driftskostnad mellan olika alternativ. Även jämförelser vad avser miljöaspekter vid olika lösningar tilldrar sig allt större intresse.

Idag råder svårigheter att få en rättvis jämförelse mellan olika värmepumpsalternativ eftersom många av de datorprogram som används är företagsspecifika. Likaså finns olikheter i det antal faktorer som man tar hänsyn till och som kan påverka systemets prestanda.

Ett led i att förbättra informationen till brukare är att ta fram datorhjälpmedel som kan bli allmänt accepterade och som kan hjälpa brukare och kunder att fatta förnuftiga

investeringsbeslut. Ett sådant verktyg är också mycket användbart i samband med utvecklingen av värmepumpar.”

Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet

Projektledare: Per Lundqvist, Energiteknik, KTH

Forskare: Martin Forsén, Energiteknik, KTH

Industrirepresentanter:

Per Fahlén, Statens Provnings och Forskningsinstitut

Mats Fehrm, Thermia Värme AB

Roger Andersson, Thermia Värme AB

Urban Kronström, IVT Industrier AB

Holger Svensson, NIBE AB

Bertil Strandh, Sydkraft Konsult

Anders Pulsson, Svenska Värmepumpsföreningen

Syfte

Syftet med projektet är att vetenskapligt ta fram beräkningsmodeller samt programhjälpmedel för ett, om möjligt allmänt accepterat program för beräkning av driftförhållanden, värme- och effekter samt energibesparing för olika installationer. Programmet skall vara uppbyggt i utbytbara moduler, som skall kunna kopplas samman till en helhet, som speglar hela systemet. Bland dessa moduler förutses förutom karakteristika för själva värmepumpenheten, även karakteristika för olika värmekällor, distributionssystem, husets isolationsgrad och tröghet, klimatdata, tillsatsvärme, etc. Viktigt är att programmet på ett relevant sätt även tar hänsyn till hur värmepumpdriften styrs vid verkliga installationer. Resultat från beräkningarna kan sedan även kopplas mot miljömässiga aspekter, såsom reducering av koldioxidutsläpp etc.

Mål

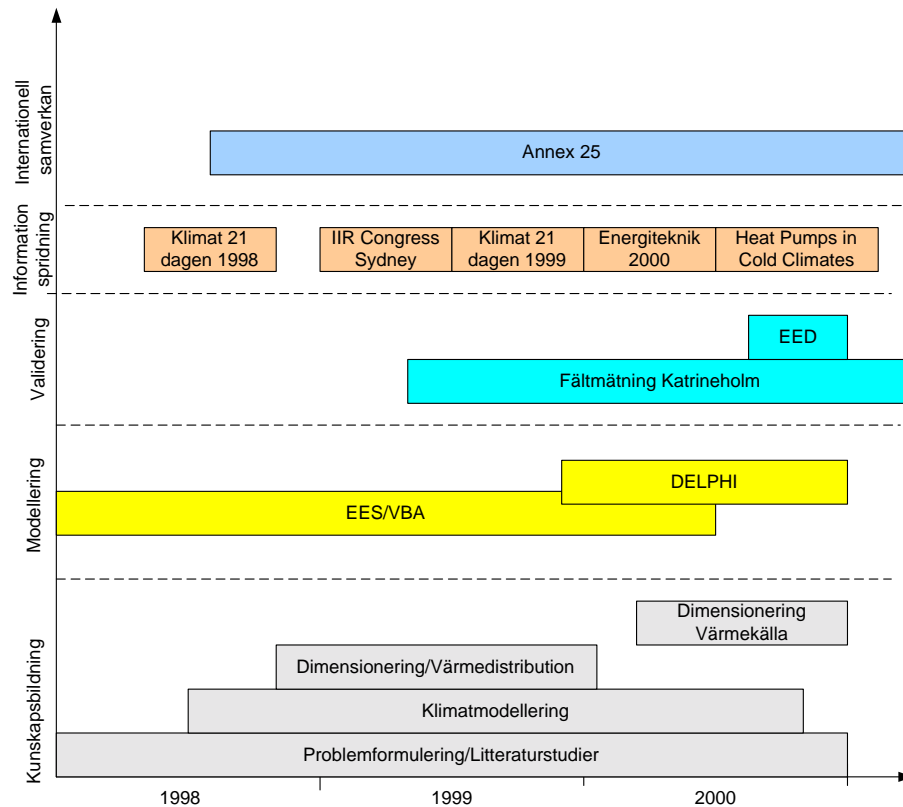
Målet är att utveckla ett program för beräkning av prestanda för värmepumpar i drift i olika klimat och för olika behovsprofiler. Programmet skall också medge jämförelser med andra uppvärmningsalternativ, även vad avser miljöaspekter. Programmet skall kunna användas i försäljningsledet så att neutral och så korrekt information som möjligt ges till potentiella kunder. Det skall även kunna användas av tillverkare som stöd vid utveckling av värmepumpsystem.

Projektarbetets omfattning

Projektet omfattar systemstudier genom analys och beräkningar varvid resultat från egna mätningar utnyttjas såväl som på annat sätt tillgängliga data från andra delprojekt och tidigare arbeten som finns redovisade i den öppna litteraturen. Arbetet omfattar även en grundlig genomgång av de program som finns tillgängliga idag och vilka faktorer som leder till att ett hjälpmedel skall bli allmänt accepterat bland branschens aktörer. Olika delar av systemet skall kunna beskrivas med utbytbara moduler, baserade på relevanta in- och utdata. Modulerna skall kunna kopplas samman till en helhet, som speglar hela systemet.

Resultat

För att beskriva projektets arbetsgång och resultat har arbetet indelats i olika aktivitetsområden, kunskapsbildning, modellering, validering, informationsspridning och internationell samverkan. I nedanstående bild visas de olika aktiviteterna i projektet och dess tidsomfattning.



Figur 1 Projektaktiviteter

Kunskapsbildning modellering och validering

En värmepumpsanläggning är till skillnad från många andra konventionella uppvärmningsanläggningar starkt beroende av de omgivande komponenter och det klimat den arbetar i. Man skulle kunna säga att värmepumpen är hjärtat i ett uppvärmningssystem med många delsystem som i sig påverkar värmepumpens karakteristik starkt. Som en följd av detta måste ett beräkningsprogram för värmepumpar ge en god och robust matematisk beskrivning av ett flertal komponenter utöver själva värmepumpenheten. I beskrivningen av dessa komponenter har modeller som tidigare använts för liknande modellering utvärderats och bedömts utifrån den fysikaliska beskrivningen och dess lämplighet i denna tillämpning. I ett flertal fall har nya modeller utvecklats. Utvecklandet av dessa modeller är ett sätt där projektet tillfört ny kunskap till forskningsområdet. Ett sådant område som identifierats är delmodeller för beskrivning av utomhusklimat.

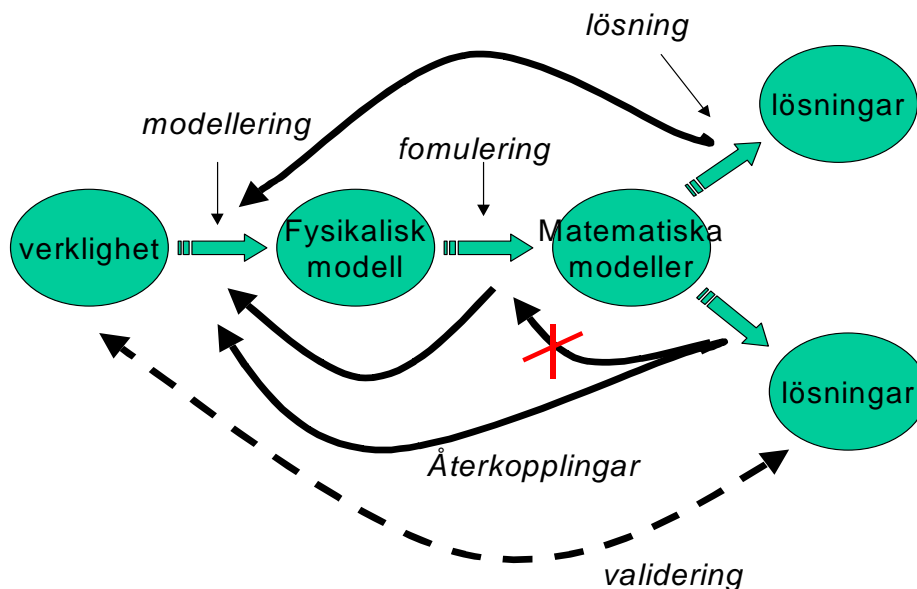
De flesta beräkningsprogram för värmepumpsystem som finns idag använder sig av tabeller för utetemperaturens varaktighet under ett normalår. Denna metod utgör en brist i och med att det blir svårt att ta hänsyn till säsons- och dygnsvariationer för exempelvis eltariffer och brinetemperaturer. Det finns även mer sofistikerade program utrustade med klimatfiler som beskriver utomhustemperaturens variation timme för timme under ett helt år. Underlaget för dessa temperaturfiler bygger på verkliga mätdata från väderstationer. Av kostnadsskäl begränsas antalet orter som finns tillgängliga i beräkningsprogram med denna typ av

klimatmodell. Under projektets första etapp har därför en ny klimatmodell utvecklats. Denna modell genererar denna typ av klimatfil utifrån ett begränsat antal parametrar. Arbetet med klimatmodellen redovisades i samband med Klimat 21-dagen 1998 [1] och har sedan efter utvärdering reviderats.

Ett annat område där projektet bidragit till en ökad kunskapsspridning inom teknikområdet är beskrivning av hur radiatorsystemets och inkommande brinetemperatur påverkar värmepumpens dimensionering. Denna kunskapsspridning har skett genom konferensbidrag till IIRs konferens i Sydney 1999 [2] och genom presentationer vid Industriseminarium-99, Energiteknik, KTH, Klimat 21-dagen 1999 [3] och vid Göteborgsmässan, Energiteknik 2000. Under hösten år 2000 har en ny modifierad metod för dimensionering av energibrunnar tagits fram och är i skrivande stund under utvärdering.

Modeller och datorprogram

I våra arbeten används ibland ordet datorprogram och ibland modell. Detta gör vi för att tydliggöra vår arbetsmetodik. Rent allmänt kan man säga att en modell är någon slags beskrivning av t.ex. en värmeväxlare eller någon annat delsystem. Den fysikaliska modellen innehåller de förenklingar som erfordras för att sedan kunna överföra denna till en matematisk modell dvs en samling ekvationer som kan lösas analytiskt eller numeriskt. Vi kallar detta arbete modellering och det är här avvägningen mellan noggrannhet och enkelhet måste göras.



Figur 2. Modellering och simuleringsprocessen

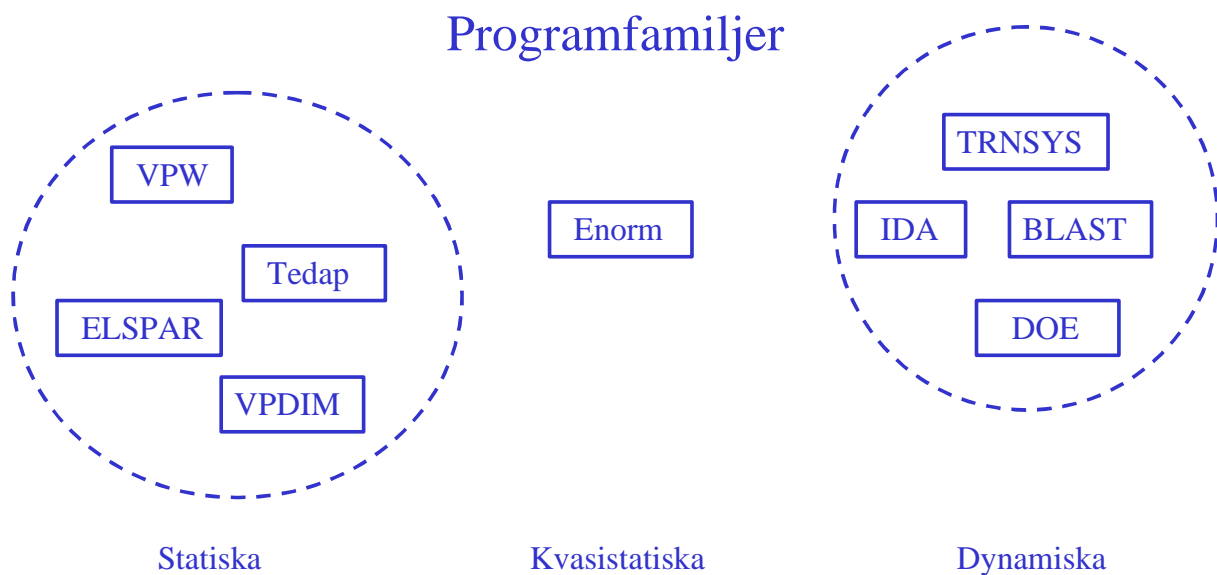
Ibland duger mycket enkla delmodeller därför att de ingår i en större helhet. Figur 2 illustrerar denna process. Det som visas som heldragna pilar är återkopplingar då man måste gå tillbaka och omarbeta sin grundläggande modell. Ett exempel är om det t.ex. inte går att lösa ekvationssystemet därför att man har för många variabler. En förenkling måste göras i

modellen. En återkoppling där man manipulerar lösningen genom att förändra den matematiska formuleringen kan vara riskfylld.

När väl de matematiska modellerna är klara kan de omsättas i programmeringskod till ett simuleringsprogram. Vi löser med andra ord ekvationssystemet. Det är först nu validering (streckad linje i fig 2) av modellen kan ske.

Programfamiljer

Det förekommer redan idag en uppsjö av olika datorprogram för energiberäkningar. Förutom de program som används av de svenska värmepumpstillverkarna, finns det en rad program som används av hustillverkare, energibolag, konsulter och konstruktörer. I och med att programmen har olika syften och olika användargrupper skiljer de sig markant med avseende på indata, tidsupplösning, beräkningskapacitet och inte minst användargränssnitt. Vid en närmare granskning av de olika programmen utkristalliserar sig tre huvudgrupper av beräkningsprogram. Den huvudsakliga skillnaden mellan dessa "programfamiljer" är den beräkningsstruktur som används. De olika beräkningsstrukturer som används är statisk-, kvasistatisk- och dynamisk beräkning. I den följande texten ges en generell beskrivning av de olika beräkningsstrukturerna.



Statiska beräkningsprogram

Till denna kategori hör samtliga säljstødsprogram som används inom den svenska värmepumpsbranschen. Huvudprincipen för energiberäkningar i dessa program är att först beräkna energiförbrukning vid alla förekommande utetemperaturer. Denna energiförbrukning multipliceras sedan med den årsvisa varaktigheten för varje utetemperatur. Genom att addera denna produkt för alla förekommande utetemperaturer erhålls ett värde för den årliga energiförbrukningen. Vid alla beräkningar förutsätts att stationärt tillstånd råder. Fördelarna med denna metod är bland annat att beräkningarna blir mycket snabba och att de ställer

relativt små krav på beskrivningen av utomhusklimatet. Nackdelarna är att beräkningarna inte tar hänsyn till säsongsvariationer för exempelvis eltaxor och värmekällans karakteristik. Beräkningarna kan kompenseras för detta genom det rimliga antagandet att de lägsta temperaturerna uppkommer under vinterperioden. På samma sätt kan compensation ske för dag respektive nattaxa genom ett antagande att nattaxa råder under 1/3 av den totala tiden. Genom att använda tips och tricks på detta vis kan man åstadkomma en statistisk modell som ger en relativt god överensstämmelse med verkligheten. Man bör dock vara medveten om att varje åtgärd som vidtas för att öka beräkningsnoggrannheten ökar komplexiteten i beräkningarna och därmed förloras en del av beräkningsmetodens största fördel. Istället för den utvecklade statistiska modellen kan det då vara aktuellt att använda en kvasistatistisk kronologisk modell som i många fall erbjuder en högre beräkningsnoggrannhet.

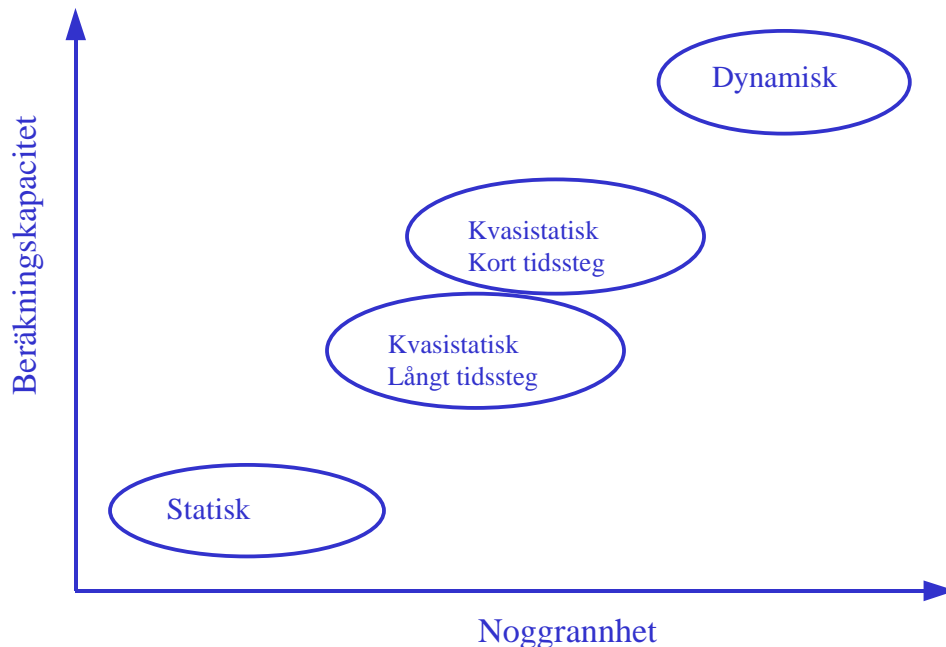
Kvasistatistiska beräkningsprogram

I de kvasistatistiska beräkningsprogrammen utförs beräkningarna i kronologisk ordning. Året delas in i godtyckligt långa tidssteg, varefter beräkningar utförs för varje tidssteg. Valet av tidssteg styrs av beräkningskapacitet, tillgänglig klimatbeskrivning och tillämpning. Enorm [4] är det kvasistatistiska program som har störst utbredning i Sverige. I detta program används ett tidssteg om ett dygn. Andra vanligt förekommande tidssteg är timmar och veckor. Det förekommer även i starkt förenklade modeller att man använder tidssteg om en månad. I dessa förenklade modeller definieras ett typdygn som representerar hela tidssteget. Vid varje beräkning förutsätts att stationära förhållanden råder. Den största fördelen med de kvasistatistiska programmen är att beräkningarna på ett enkelt sätt kan ta hänsyn till de säsongsmässiga variationerna. Den kronologiska indelningen av beräkningarna öppnar även för möjligheten att i efterhand jämföra beräkningsprogrammets resultat med utförda fältmätningar. Utgående från utförda mätningar kan indata till beräkningsprogrammet kalibreras och klimatmodellen ersättas med verkligt uppmätt temperatur. På detta sätt öppnas möjligheten att använda dessa beräkningsprogram för granskning av reklamationsärenden. Genom att utföra fältmätningar under en begränsad tidsperiod kan avvikelser från förväntat utfall identifieras och i många fall förklaras. Nyckeln till en övergång från statisk beräkningsgrund till en kvasistatistisk ligger i beskrivningen av klimatet. Klimatmodellen måste ge en kronologisk beskrivning av klimatet med samma tidssteg som beräkningsmodellen. Istället för att använda en modell som genererar klimatdata kan temperaturfiler för ett helt år köpas från ett meteorologiskt institut. Detta ger naturligtvis det bästa resultatet, men är oftast väldigt kostsamt och används endast i undantagsfall. I de fall man önskar ett mycket kort tidssteg i sina beräkningar kan man inte längre förutsätta att stationära förhållanden råder under varje tidssteg. I dessa fall måste en dynamisk beräkningsgrund användas.

Dynamiska beräkningsprogram

Då tidskonstanten för någon eller några av de ingående komponenterna överstiger det tidssteg man vill använda i beräkningarna kan kvasistatistiska beräkningar inte längre användas. I dessa fall krävs en övergång till dynamisk beräkningsgrund. För att kunna beskriva de ingående komponenternas interaktion dynamiskt krävs en utförlig beskrivning av de olika komponenternas egenskaper. Av denna anledning kräver dessa program omfattande indatamaterial, vilket gör att större krav ställs på användaren av programmet. De höga kraven på användaren begränsar användandet till en mindre grupp. Fördelen är att relativt komplexa systemstudier kan utföras med god tidsupplösning. Exempelvis kan man i det svenska programmet "IDA-Klimat och Energi" studera hur det termiska klimatet i ett rum förändras om ett fönster eller dörr till ett angränsade rum öppnas. De tilltänkta användarna och syftet

med beräkningarna avgör i slutändan vilken typ av beräkningsgrund som skall väljas. I de fall man önskar beskriva infrysningen av livsmedel i en hushållsfrys måste en dynamisk modell användas, emedan en enklare beräkningsgrund oftast kan användas då man inte har lika stora krav på att beskriva korta tidsförlopp. De olika metodernas krav på beräkningskapacitet och resultatupplösning beskrivs generellt av nedanstående bild.



Figur 3 *Modellegenskaper*

Positionering

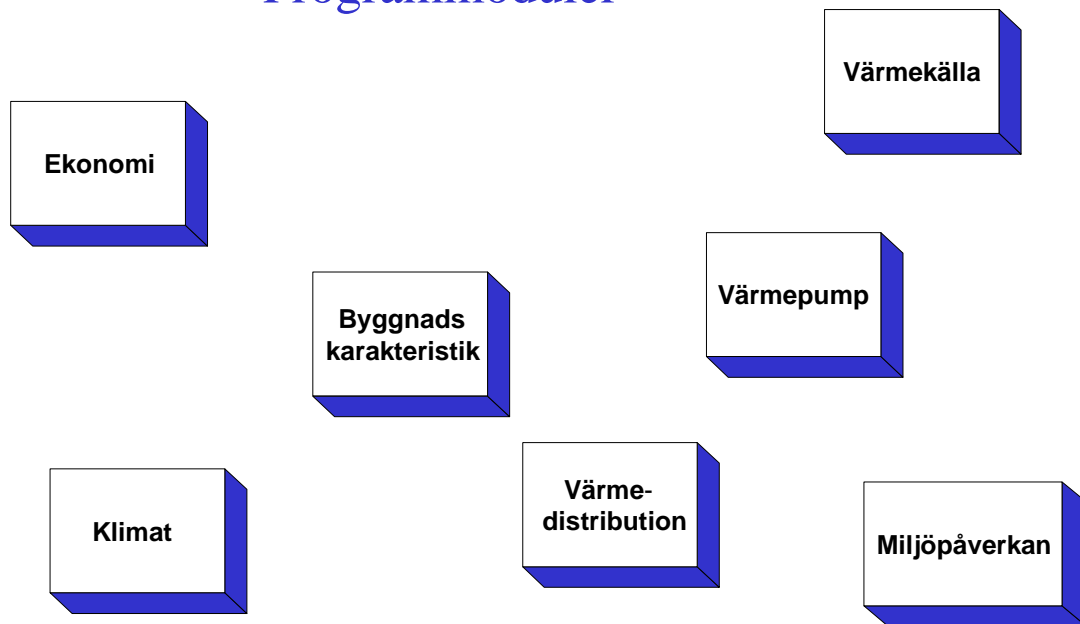
Vid utveckling av nya programvaror definieras syftet för beräkningsprogrammet i initialskedet. Syftet och de identifierade användarnas kunskap sätter gränser för den beräkningsstruktur som kommer att användas i programmet. Det datorprogram som är under utveckling inom ramen för detta projekt är tänkt att användas i kontakten mellan en värmepumpsförsäljare och en potentiell kund. Kraven på beräkningarna är att de på relevant sätt skall spegla den verkliga installationens funktion och arbetsförhållanden. Ur resultatutskriften skall den totala energibesparingen från en värmepumpsinstallation kunna utläsas. Programmet skall till sin uppbyggnad vara utformat så att vidareutveckling och validering av programvaran underlättas. Utifrån dessa förutsättningar har vi konstaterat att en kvasistatisk beräkningsmodell med ett tidssteg motsvarande 1 timme är det som är mest lämpligt för denna tillämpning. En statisk beräkningsmodell anses inte på relevant sätt kan efterleva kravet på återspeglning av installationens verkliga arbetsförhållanden och en dynamisk modell bedöms vara alltför krävande för de tilltänkta användarna av denna programvara.

Systemanalys och Moduluppbyggnad

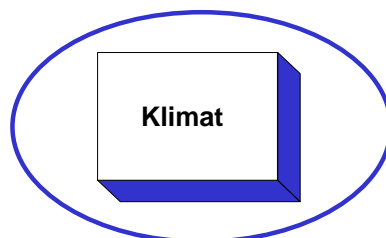
En värmepumpsanläggning i en mindre fastighet består av ett flertal delsystem med många ingående komponenter. Egenskaperna för varje delsystem beror av karakteristiken för de ingående komponenterna i systemet. Komponenternas karakteristik bestäms i sin tur av ett antal styrande parametrar. Dessa parametrar är i vissa fall beroende av andra komponenters

egenskaper. Om, som i fallet med en värmepumpsanläggning, det totala antalet ingående komponenter är stort genereras ett oerhört komplext system. Att beskriva hela anläggningens beteende underlättas väsentligt genom att först studera varje delsystem med dess ingående komponenter. På så sätt kan olika metoder att beskriva varje delsystem lätt studeras. Genom att successivt skapa enskilda "moduler" bestående av modeller för varje enskilt delsystem kan sedan en komplett modell för hela anläggningen skapas. På ett tidigt stadium i projektet identifierades nedanstående moduler för det tilltänkta datorprogrammet.

Programmoduler



Resultat från arbetet med att ta fram modeller för de enskilda delsystemen har löpande redovisats under projektets gång vid nationella och internationella konferenser. De deltagande industrirepresentanterna har tagit del av resultatet och givits stora möjligheter att utifrån egna erfarenheter påverka modellernas utformning. Då den kvasistatiska beräkningsgrunden förutsätter en kronologisk beskrivning av klimatet inriktades projektarbetet initialt på att ta fram en modell för att generera klimatdata enligt detta format.



Klimatmodell

Klimatmodellen har utvecklats med utgångspunkt från Anderlinds modell "Approximation of monthly mean temperatures by using fourier series" [5]. Denna metod som även ligger till grund för klimatmodellen i beräkningsprogrammet Enorm genererar dygnsmedeltemperaturen för årets alla dagar utifrån ett begränsat antal indata. Den temperaturprofil som genereras motsvarar ett normalår. Eftersom ett normalår utgör ett normaliserat år saknas alla former av

köldknäppar och värmeböljor som uppträder under ett verkligt år. Ett normalår utgör av denna anledning inte ett representativt underlag för ett energiberäkningsprogram. Klimatmodellen har därför korrigerats på så sätt att en artificiell köldperiod om två veckor med början sista veckan i januari genereras. På motsvarande sätt genereras även en varm period i mitten av juli. Dygnsmedeltemperaturen bestäms enligt följande formel.

$$T_d = T_y + T_a \times 1,048 \times \sin((t - 113,5) \times 2\pi / 365) + T_a \times 0,084 \times \sin((t - 129,5) \times 4\pi / 365)$$

$$T_a = (T_y - (T_{jan} + T_{feb}) / 2)$$

$$t = \text{dagnummer (ex 31: a januari } t = 31)$$

$$T_y = \text{ortens årsmedeltemperatur}$$

$$T_{jan} = \text{dygnsmedeltemperatur januari}$$

$$T_{feb} = \text{dygnsmedeltemperatur februari}$$

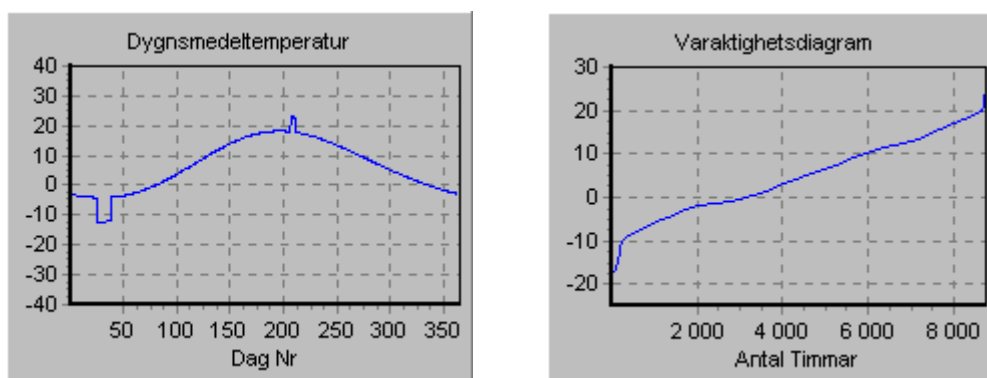
Temperaturvariationen under 1 dygn kan i många fall vara betydande. Detta gör att energiberäkningar utifrån dygnsmedelvärden kan bli missvisande, då alla extrempunkter för värmepumpens arbetsförhållanden ej kommer att återspeglas vid beräkningen. I denna klimatmodell genereras utetemperaturen för dygnets alla timmar. Utifrån dygnsmedeltemperaturen genereras dygnsvariationen med hjälp av utetemperaturens dygnsamplitud för den aktuella årstiden. Temperaturvariationen under dygnet bestäms enligt följande.

$$T_h = T_d + T_{a\text{ årstid}} \times \sin(((t - 24 \times \sin(t \text{ div } 24 + 1) + 24) - 7) \times 2\pi / 24)$$

$$t = \text{timnummer (} 0 < t \leq 8760)$$

$$T_{a\text{ årstid}} = \text{dygnsamplitud för årstiden}$$

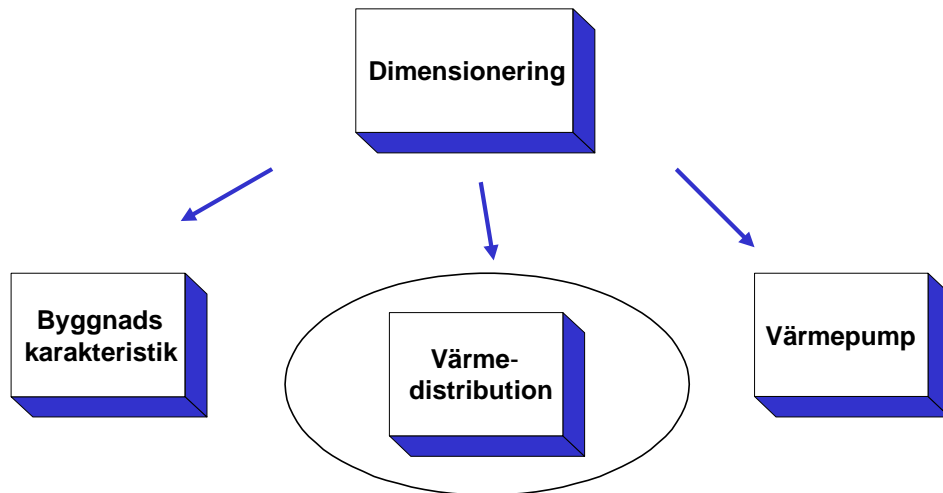
Då klimatmodellen utgör en central del av beräkningsprogrammet har ett fristående demonstrationsprogram tagits fram för att demonstrera det modellerade klimatet. Jämförelse med antal graddagar och varaktighetskurvor enligt SMHI har utförts för ett mindre antal orter. Nedan visas exempel på erhållna utetemperaturer i Stockholm.



Figur 4a,b Genererat klimat för Stockholm

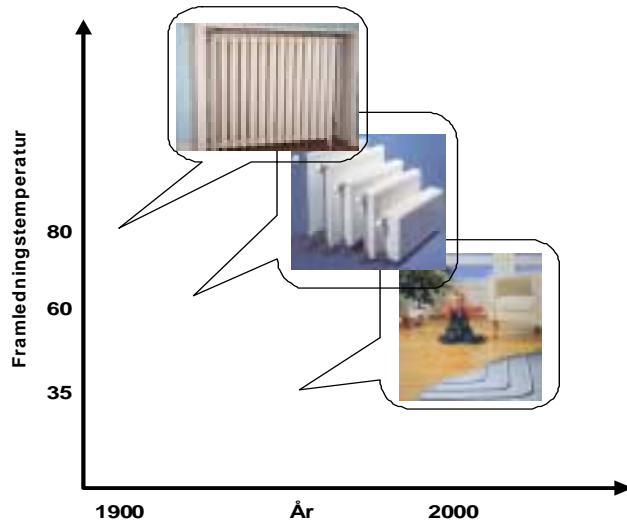
Underliggande modeller för värmepumpens dimensionering

Arbetet med att ta fram en modell som beskriver utfallet av en värmepumpsinstallation i en byggnad med olika temperaturnivåer på värmedistributionssystemet sammanfattades i ett arbete om värmepumpens dimensionering. Detta arbete presenterades vid Klimat-21 dagen 1999 [3]. I följande avsnitt återges underliggande modeller för detta arbete kortfattat.



Värmedistribution-utveckling av vattenburna värmesystem

I början av förra seklet var olika typer av eldstäder den huvudsakliga värmekällan. En betydande förändring inträffade när de lokala eldstäderna ersattes av centralt placerade pannor. Till en början eldades dessa pannor med fasta bränslen. När sedan billiga raffinerade oljebränslen blev vanliga kom oljepannor att dominera. I och med oljekriserna på 70-talet blev eluppvärmning i form av elpannor och direktverkande elradiatorer allt vanligare. Men trots att elradiatorer är mycket vanliga i hus byggda under de senaste årtiondena är fortfarande den övervägande delen värmedistributionssystem i Sverige vattenburna radiatorsystem. För att möjliggöra själv-cirkulation var de tidiga radiatorsystemen dimensionerade för en hög framledningstemperatur. Framledningstemperaturer kring 80-90°C vid dimensionerande utetemperatur är inte ovanligt för dessa system. När cirkulationspumpar introducerades och radiatorerna blev effektivare fanns det inte längre något egentligt behov av de höga temperaturnivåerna. Gradvis har temperaturerna reducerats och numer anges till och med maximal framledningstemperatur för nya vattenburna värmesystem i byggreglerna (BBR94, 95) [6].

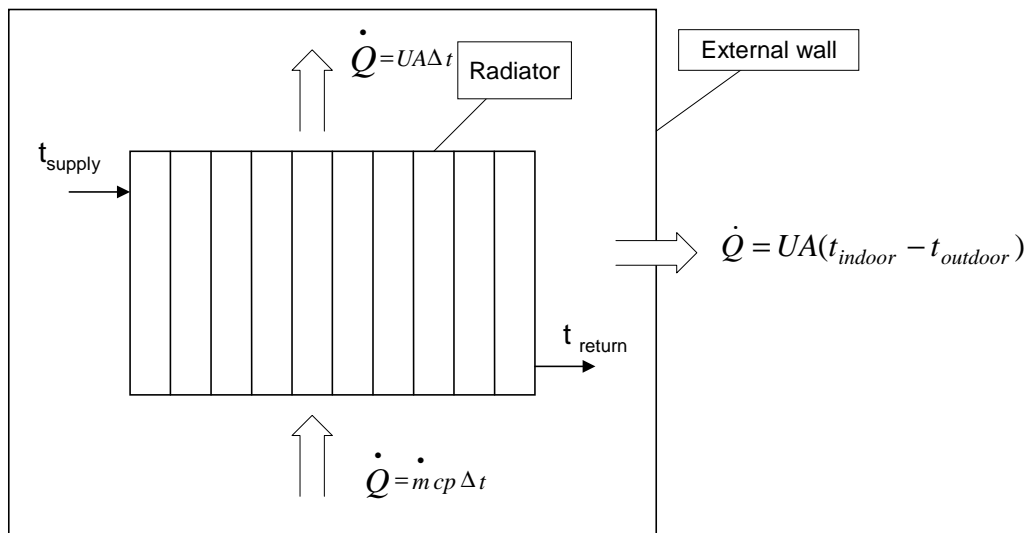


Figur 5 *Temperatortrend*

För att kunna beräkna en värmepumps prestanda i en anläggning krävs kännedom om radiatorsystemets fram- och returledningstemperaturer vid varierande utetemperatur. Utifrån en värmebalans har följande modell tagits fram för att beskriva reglerkurvan för ett godtyckligt radiatorsystem.

Värmebalans

Vid stationära förhållanden måste den tillförda värmeenergin till radiatorsystemet vara lika med värmeavgivningen från radiatorerna och värmeförlusterna genom klimatskärmen. Sambanden för värmetransporten återges i nedanstående bild.



Figur 6 *Värmebalans för värmesystem*

Den till radiatorsystemet tillförda värmen motsvarar:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta t$$

Om massflödet är konstant och den specifika värmekapaciteten kan anses konstant i det betraktade temperaturområdet kan mcp ersättas med en konstant c_1 .

Värmeförlusten genom klimatskärmen ges av:

$$\dot{Q} = UA(t_{indoor} - t_{outdoor})$$

I likhet med radiatorsystemet förutsätter vi här att produkten UA är konstant och ersätter detta med en konstant c_2 .

Det totala värmegenomgångstalet för radiatorerna kan inte betraktas som konstant eftersom det beror av den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan radiatorerna och rumsluften. Sambandet för värmegenomgångstalet för radiatorerna uttrycks enligt [7,8]:

$$U = U_{DUT} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_{DUT}} \right)^n$$
$$\Delta t = \frac{t_{supply} - t_{return}}{\ln \left(\frac{t_{supply} - t_{indoor}}{t_{return} - t_{indoor}} \right)}$$

Index DUT motsvarar värden vid dimensionerande utetemperatur. Som en följd av ovanstående resonemang kan värmeavgivningen från en radiator tecknas med följande samband.

$$\dot{Q} = U_{DUT} A \left(\frac{1}{\Delta t_{ODT}} \right)^n \cdot (\Delta t)^{1+n}$$
$$\dot{Q} = c_3 (\Delta t)^{1+n}$$

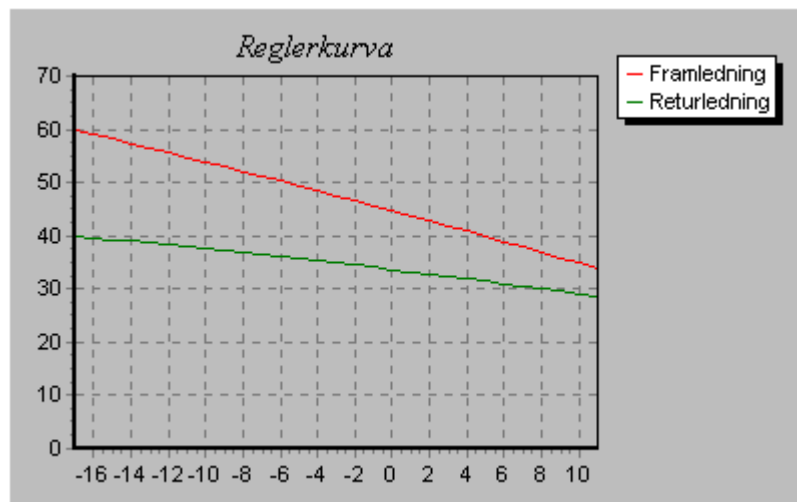
För de tre beskrivna delsystemen erhålls följande ekvationssystem:

$$(1) \quad \dot{Q} = c_1 (t_{supply} - t_{return})$$
$$(2) \quad \dot{Q} = c_2 (t_{indoor} - t_{outdoor})$$
$$(3) \quad \dot{Q} = c_3 (\Delta t)^{1+n}$$

Omskrivning av (1), (2) och (3) resulterar i:

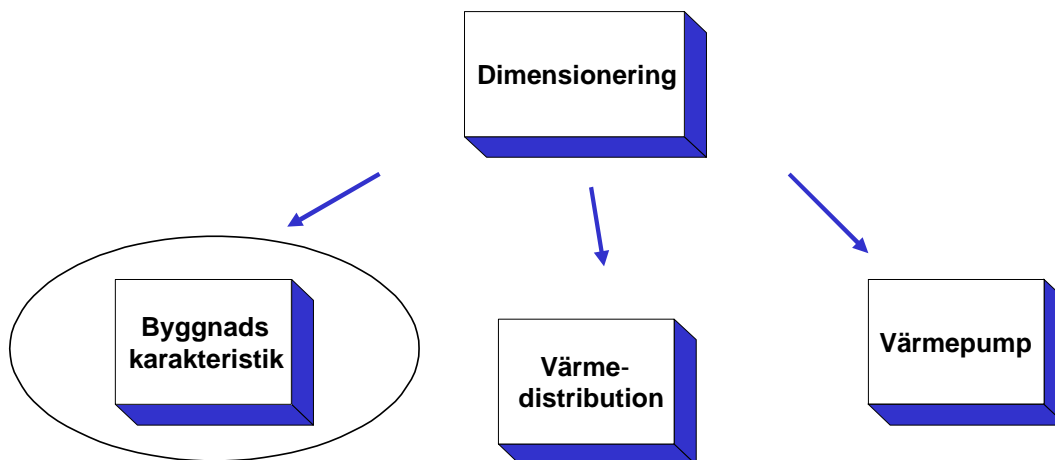
$$(4) \quad (\Delta t)^{1+n} = K_1 (t_{supply} - t_{return})$$
$$(5) \quad t_{indoor} - t_{outdoor} = K_2 (t_{supply} - t_{return})$$

För ett givet radiatorsystem kan konstanterna K_1 och K_2 bestämmas och därefter kan reglerkurvan beräknas. Reglerkurvans utseende för ett "60/40-system" visas nedan.



Figur 7 Reglerkurva "60/40" system

I ovanstående fall är den dimensionerande utetemperaturen -17°C . Inomhustemperaturen är 20°C och radiatorexponenten (n) är 0,3.



Byggnadskarakteristik

Byggnadens värmebehov antas vara linjärt beroende av temperaturdifferensen mellan ute- och inomhustemperatur. Erforderlig innetemperatur antas vara konstant under hela uppvärmningssäsongen. Intern värmelast antas motsvara en temperaturökning av 3K. Värmebehovet antas vidare att upphöra då utetemperaturen överstiger $+11^{\circ}\text{C}$ [9]. Detta bygger på ett antagande om att värmetillskottet från solinstrålning då är tillräckligt stort för att tillsammans med internlasten garantera erforderlig inomhustemperatur.

$$\dot{Q}_{Hus} = k(t_{inne} - t_{ute}) - \dot{Q}_{Int}$$

Värmesystemet i byggnaden dimensioneras på så sätt att normal inomhustemperatur upprätthålls under normala förhållanden. Under extrema köldperioder kan däremot en viss temperatursänkning accepteras. I Sverige beräknas den dimensionerande utetemperaturen utifrån ett antagande att 3 graders temperatursänkning kan accepteras under extrema förhållanden. Sambandet för en byggnads dimensionerande utetemperatur (DUT) [10] ges av:

$$DUT = EUT_{20} + \frac{\Delta\Theta}{1 - e^{(-t/\tau_b)}}$$

EUT_{20} = extrem utetemperatur som maximalt underskrids en gång på 20 år

$\Delta\Theta$ = accepterad temperatursänkning [K]

t = varaktighet för extrem utetemperatur [timmar]

τ_b = byggnadens tidskonstant

$$\tau_b = \frac{\sum M_i c_i}{\dot{V} \rho c_{p_l} + \sum U_i A_i}$$

M_i = massa för specifik byggnadsdel eller möbel [kg]

c_i = specifik värmekapacitet [kJ/kg K]

\dot{V} = ventilationsluftflödet [m³/s]

ρ = densitet luft [kg/m³]

c_{p_l} = värmekapacitet luft [kJ/kg K]

U_i = värmegenomgångstal väggyta [W/m² K]

A_i = area väggyta [m²]

Eftersom beräkning av tidskonstanten kräver omfattande definition av byggnaden förenklas förfarandet genom användande av schablonvärden för lätt-, medel- respektive tung byggnad. Följande tidskonstanter används.

	Lätt	Medel	Tung
Tidskonstant [timmar]	24	95	140

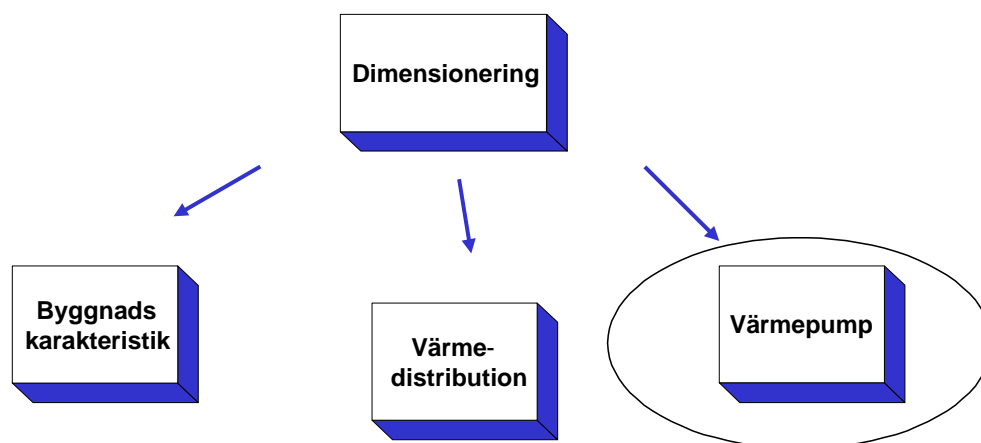
Tappvarmvatten

Årligt energibehov för beredning av tappvarmvatten beräknas för närvarande enligt en schablonmetod. Enligt denna metod beräknas energibehovet enligt:

$$Q_{vv} = 3000 + (\text{Antal personer} - 1) \times 500$$

$$Q_{vv} = \text{Årligt energibehov varmvatten [kWh]}$$

Vid beredning av varmvatten antas värmepumpen höja temperaturen i varmvattenberedaren från 48-55°C.



Värmepump

Modellering av värmepumpens prestanda kan göras på många olika sätt. Syftet för modellen är det som avgör hur modellbeskrivningen utformas. Vid framtagandet av energiplaner för större bostadsområden görs ofta bedömningar av energiförbrukning för olika uppvärmningsalternativ. I ett sådant förfarande används ofta grova modeller där energibesparingen för en värmepump försörjande ett större område, beräknas utifrån en uppskattad årsvärmefaktor. I en mindre anläggning motsvarande den i ett enskilt småhus önskar man ofta beräkna värmepumpens energibesparing utifrån de verkliga förhållanden som råder i den enskilda anläggningen. För att förenkla beskrivningen av de olika angreppssätten för värmepumpens modellering begränsar vi resonemanget här till en värmepump vars värmekälla är ansluten till en köldbärarkrets. Värmesänkan utgörs av ett radiatorsystem. I dessa tillämpningar förekommer olika varianter av modellering. I enkla modeller anges medeltemperatur för värmesystemets framledningstemperatur och medeltemperatur för den till värmepumpen inkommande köldbäraren. Värmepumpens prestanda beräknas sedan utifrån uppmätta prestanda vid dessa temperaturer och utgör grunden för beräkning av den årliga energibesparingen. I något förfinade modeller beräknas värmesystemets reglerkurva varefter värmepumpens prestanda kan bestämmas utifrån uppmätta prestanda och den verkliga temperaturvariationen i värmesystemet. På motsvarande sätt kan hänsyn tas till temperaturvariationer för värmekällan. De beskrivna metoderna för modellering fungerar bra i många tillämpningar, men erbjuder föga hjälp för en konstruktör av värmepumpar. En modell som skall kunna användas som hjälpmedel vid nykonstruktion kräver att enskilda maskinkomponenter och köldmedium skall kunna väljas fritt. Refrex [11] är ett svensktutvecklat program där användaren kan laborera med olika verkliga komponenter. I programmet ingår en databas med prestanda för olika tillverkares komponenter. Denna metod för modellering ger större frihet för användaren, men ställer också större krav på användarens kunskap. En utvecklare av plattvärmeväxlare eller kompressorer kräver andra varianter av modellverktyg. Valet av metod för modellering av en värmepumps prestanda är helt beroende av användaren och användarens syfte med modellen. I detta projekt skall datormodellen användas för att uppskatta årlig energiförbrukning för befintliga och testade värmepumpar. Programmet skall kunna användas av värmepumpsförsäljare i kontakt med kund. Mot bakgrund av detta syfte används en modell där värmepumpen betraktas som en svart låda, där prestanda bestäms av inkommande köldbärartemperatur och levererad framledningstemperatur till värmesystemet. Uppgifter om värmepumpens prestanda erhålls

utifrån fördefinierade testmatriser. I den nedanstående texten återges formatet för dessa matriser.

Prestandamatriser

Med utgångspunkt från, EN 255 och SS 2095, har följande matriser tagits fram för att ange prestanda. De testpunkter som skall mätas framgår av tabellerna nedan. Linjär interpolation används för att erhålla värden mellan olika mätvärden.

Vätska/Vatten värmepumpar

	VB	35	50
KB	-5	–	–
	0	–	–
	+5	–	–

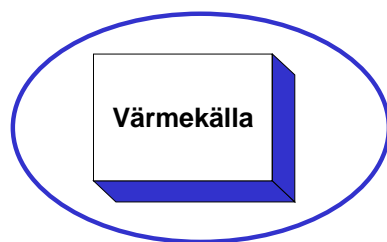
Utöver dessa punkter anges den högsta framledningstemperaturen värmepumpen kan leverera. Prestanda vid denna punkt beräknas genom att extrapolera utifrån de övriga punkterna. På samma sätt anges den lägsta inkommande köldbärartemperaturen som värmepumpen kan arbeta med. Detta värde utgör en form av larm. Om denna temperatur underskrids någon gång under året finns risk för att värmepumpen stannar på grund av för lågt förångningstryck. Prestandamatriser finns både för avgiven värmeeffekt och tillförd eleffekt. I den tillförda eleffekten ingår endast kompressoreffekten. Effektförbrukning för cirkulationspumpar anges i två kompletterande indatarutor. För köldbärarpumpen anges effektförbrukning vid nominell driftpunkt för den storlek på pump som normalt används till motsvarande värmepump. Effekt för värmebärarpump anges enligt EN 255. I programmet skall även fast kondensering kunna anges och hanteras.

Luft/Vatten värmepumpar

	VB	35	50
Utetemp	-7(-8)	–	–
	+2(1,5)	–	–
	+7(6)	–	–

Utöver dessa mätpunkter anges den lägsta utetemperatur som värmepumpen arbetar med. Extrapolation för utetemperaturer överstigande +7(6) erhålls genom att använda lutningen mellan testpunkterna –7(-8) och +2(1,5). Lufttemperaturerna avser torr temperatur (°C). Lufttemperatur inom parentes avser våt temperatur. Effektförbrukning för värmebärarpumpen anges på samma sätt som för vätska/vatten värmepumparna.

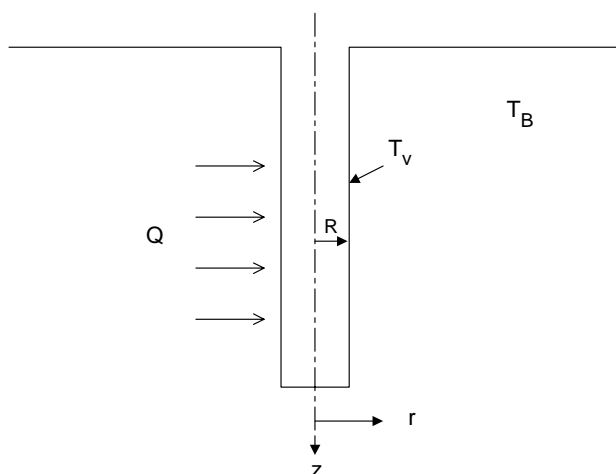
Värmekälla



Bergvärmepumpar är idag den vanligaste typen av värmepump som installeras på den svenska marknaden. Berggrunden erbjuder en värmekälla med stabil och relativt hög temperaturnivå. Nackdelen är att kostnaden för borrhning är hög. Kostnaden för att iordningställa ett borrhål utgör ofta 20-30% av totalkostnaden för en installation av en villavärmepump. Av denna anledning är det därför mycket viktigt att dimensionering av borrhålslängd utförs på rätt sätt. I detta avsnitt återges den modell som utvecklats inom ramen för detta projekt och som nu är under utvärdering.

Energiuttag ur berg

Borrhålet som utgör den dyraste värmeväxlaren i hela anläggningen dimensioneras för att upprätthålla en lämplig temperaturnivå på den cirkulerade köldbäraren. Den verkliga dimensioneringen är en avvägning mellan geografiska och ekonomiska förutsättningar. Temperaturen på köldbäraren kan bestämmas utifrån bl.a. kyleffekt, borrhålsgeometri och termodynamiska egenskaper för berggrunden. I den följande diskussionen anges de förutsättningar och antaganden som föreligger den teoretiska modell som anpassats för vår beräkningsmodell. Nedanstående figur återger schematiskt geometrin för ett borrhål.



Figur 8 Borrhålsgeometri

Beskrivningen av värmetransporten från det omgivande berget till köldbäraren delas in i två steg där det första steget beskriver temperaturskillnaden mellan den ostörda marktemperaturen (T_B) och temperaturen på borrhålsväggen (T_v). Med ostörd marktemperatur menas markens temperatur opåverkat av energiuttag eller energitillförsel. Det andra steget

som beskriver värmetransporten från borrhålsväggen och in till köldbäraren beskrivs under rubriken "Bestämning av köldbärartemperatur".

I vår betraktelse av borrhålet sker värmeupptagningen ifrån den omgivande berggrunden. Långt ifrån borrhålet antas den ostörda marktemperaturen (T_B) råda. En första uppskattning av värdet för denna temperatur är ortens årsmedeltemperatur. Detta värde medför dock en underskattning av temperaturen för orter vars mark under längre perioder är snötäckt. Snötäcket fungerar som en isolering för marken, vilket medför att den ostörda marktemperaturen kommer att vara något högre än ortens årsmedeltemperatur. I VVS handboken [12] rekommenderas därför en korrektion med 1,5 °C per 100-dagars sammanhängande snötäcke.

I berggrunden förekommer även en naturlig temperaturgradient i vertikal utsträckning. Denna naturliga temperaturgradient motsvarar för ett genomsnitt av svensk berggrund ca 1,6 K/100m. För att underlätta beräkningarna används dock en konstant temperatur för den ostörda marktemperaturen. Den temperatur som lämpligen används är den temperatur som med hänsyn till temperaturgradienten antas råda vid halva borrhålsdjupet. Temperaturprofilen i berget kring borrhålet kommer även att påverkas av grundvattenströmning. I de allra flesta fall erhålls en positiv effekt av att grundvatten strömmar genom sprickor i och kring borrhålet. Ett sprickrikt berg med hög genomströmning av grundvatten kan i vissa fall medföra att borrhålets temperaturprofil återhämtar sig snabbt efter varje uppvärmningssäsong, emedan en sprickfri berggrund återhämtar sig långsammare. På förhand vet man väldigt sällan något om den förväntade grundvattengenomströmningen varför dimensioneringen utförs utifrån det konservativa antagandet att ingen grundvattenströmning förekommer.

Teoretisk modell

Om vi med ovan givna förutsättningar tänker oss borrhålet som en oändligt lång cylinder nedsänkt i en oändligt stor homogen omgivning med kända värmetekniska egenskaper, så finns det en analytisk lösning för temperaturskillnaden mellan ostört berg och temperaturen på borrhålsväggen vid konstant effektuttag. Lösningen tecknades första gången av Carslaw och Jaeger 1947 [13] och anpassades senare för denna tillämpning av Ingersoll et al 1954 [14]. Enligt denna lösning kan temperatursänkningen i berget tecknas enligt följande:

$$T_B - T_{v(t)} = \frac{\dot{Q}}{L\lambda\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 Fo(t)} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} \left[J_0\left(\frac{r}{R}\beta\right)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0\left(\frac{r}{R}\beta\right) \right] \frac{\partial\beta}{\beta^2}$$

T_B = ostörd marktemperatur

$T_{v(t)}$ = temperaturen vid borrhålsväggen vid tiden t

Q = kyllast

L = aktiv borrhålslängd

λ = bergets värmeledningstal

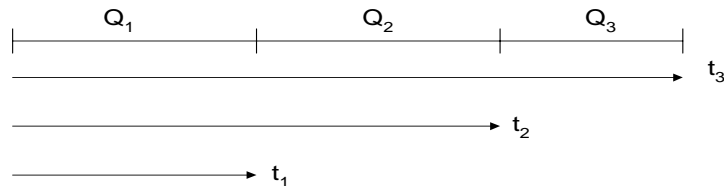
J_0, J_1 = Bessel funktionen av nollte och första graden

Y_0, Y_1 = Neumann funktionen av nollte och första graden

$Fo = 4\alpha t / d^2$

Den givna lösningen gäller för ett idealiserat fall med konstant kyllast under den betraktade tidsperioden. I en verklig anläggning varierar kyllasten över tiden vilket medför att lösningen

inte kan användas i nuvarande form. Lösningen kan däremot anpassas för att gälla variabel kylast genom superposition av olika kylaster som varar under olika tidsperioder. Schematiskt kan vi tänka oss tre superponerade laster enligt nedan:



Skrivsättet för lösningen på föregående sida förenklas något om vi uttrycker en del av högerledet som en funktion av Fourier-talet:

$$\frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 Fo(t)} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} \left[J_0\left(\frac{r}{R}\beta\right) Y_1(\beta) - J_1(\beta) Y_0\left(\frac{r}{R}\beta\right) \right] \frac{\partial \beta}{\beta^2} = f(Fo)$$

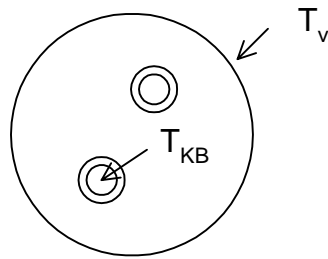
Med det förenklade skrivsättet erhålls följande uttryck för de superponerade lasterna:

$$T_B - T_{V(t_3)} = \frac{\dot{Q}_1}{L\lambda} [f(Fo_{t_3-0}) - f(Fo_{t_3-t_1})] + \frac{\dot{Q}_2}{L\lambda} [f(Fo_{t_3-t_1}) - f(Fo_{t_3-t_2})] + \frac{\dot{Q}_3}{L\lambda} f(Fo_{t_3-t_2})$$

Valet av tidssteg för de superponerade lasterna avgörs av lastens variationsmönster och krav på beräkningsnoggrannhet. Lämpligt tidssteg för en värmepump med långa drifttider under uppvärmningssäsongen är ett dygn. Vanligt är att dimensionering sker för drift under 15-20 år. Efter så lång tid är den årliga förändringen av driftförhållandena närmast försumbara. Superponering av dygnslaster för en period om 20 år medför att en väldigt stor mängd termer måste beräknas i ovanstående uttryck. En förenkling i detta avseende kan göras genom vetskapen att de laster som har störst inverkan på den totala temperatursänkningen är de laster som uppstått nyligen. Med utgångspunkt av denna vetskap kan antalet termer i ovanstående uttryck starkt reduceras, genom att låta den första termen utgöras av medelvärdet för ett stort antal laster som inträffade lång tid tillbaka. I denna modell används samtliga dygnslaster för det sista driftåret emedan kylastens årsmedelvärde används för tiden fram tills dess. Till följd av detta kommer antalet termer i högerledet för ovanstående ekvation att reduceras till 366 termer.

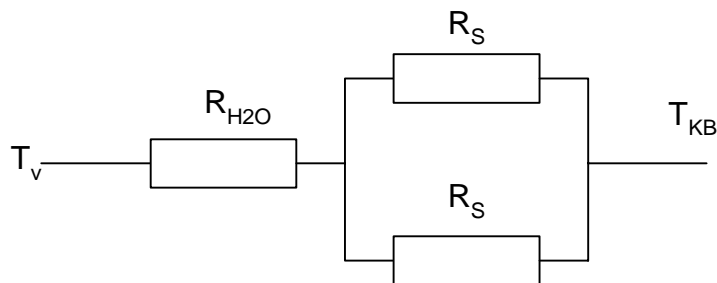
Bestämning av köldbärartemperatur

Ovanstående beskrivning leder fram till temperaturen vid borrhållsväggen. För bestämning av en värmepumps prestanda krävs emellertid kännedom om köldbärarens temperatur då den når förångarinloppet. I det följande resonemanget som leder fram till bestämningen av denna temperatur förutsätter vi att värmetransporten mellan borrhållsväggen och köldbäraren kan betraktas som stationär. Nedanstående figur återger ett schematiskt tvärsnitt av ett borrhål.



Figur 9 Tvärsnitt av borrhål

De utmärkta temperaturerna motsvarar medeltemperaturen för köldbäraren (T_{KB}), respektive temperaturen vid borrhålsväggen (T_v). Med en elektrisk analogi kan vi uttrycka temperaturdifferensen mellan borrhålsväggen och fluiden med hjälp av ett borrhålsmotstånd.



Figur 10 Borrhålsmotstånd-Elektisk Analogi

$$T_v - T_{KB} = \frac{\dot{q}}{R_b}$$

$$R_b = \frac{R_s}{2} + R_{H_2O}$$

R_s är värmemotståndet i slangerna bestående av värmemotståndet mellan fluiden och slangens innervägg samt ledningsmotståndet genom slangerna.

$$R_s = \frac{\ln(D_y / D_i)}{2\pi \lambda_{slang}} + \frac{1}{\pi D_i \alpha_i}$$

Värmeövergångstalet på slangens insida ges enligt:

För $Re \geq 2300$ gäller

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

För $Re < 2300$ gäller

$$Nu = 1,86 (Re Pr d_i / L)^{1/3}$$

Motståndet mellan borrhålsväggen och slangerna i hålet kallas R_{H_2O} beror till stor del på hur slangarna ligger i förhållande till varandra och borrhålsväggen. Värmeledningstalet för materialet mellan slang och borrhålsvägg påverkar naturligtvis också i hög grad storleken på

motståndet. I Sverige utgörs mellanrummet i de allra flesta fall av stående grundvatten, emedan miljölagstiftning i många andra länder kräver att borrhålen tätas mot omgivande berg och återfylls med ett fyllnadsmaterial. En del forskning har utförts i syfte att undersöka olika mineralblandningar för att optimera sammansättningen av denna återfyllning [15]. I denna forskning förekommer ofta formfaktorer för att beräkna borrhålsmotståndet med hänseende till slangarnas placering i hålet. Utifrån praktiska prov har verkligt motstånd uppmätts för olika borrhålskonfigurationer. I detta projekt används en modell för att bestämma formfaktorn (S_b) som tagits fram av Remund 1999 [16].

$$S_b = \beta_0 \left(\frac{D}{d} \right)^{\beta_1}$$

β_0 och β_1 är konstanter som ges av slangarnas orientering i hålet.

D = borrhålets diameter.

d = kollektorslangens diameter.

$$R_{H_2O} = \frac{1}{S_b \lambda_{H_2O}}$$

I den modell som nu är under utvärdering förutsättes att vattnet är fruset varmed $\lambda_{H_2O} = 2,2 \text{ W/mK}$.

När det totala borrhålsmotståndet är fastställt återstår endast att beräkna köldbärarens temperatur vid inloppet till förångaren. I denna betraktelse antas något förenklat att köldbäraren har lägst temperatur då den lämnar förångaren och högst temperatur vid förångarinloppet. Temperaturhöjningen i slangen antas ske linjärt. I ett verkligt fall förekommer värmeledning mellan de båda slangarna i hålet varmed köldbärarens högsta temperatur i verkligheten kommer att uppstå före förångarens inlopp.

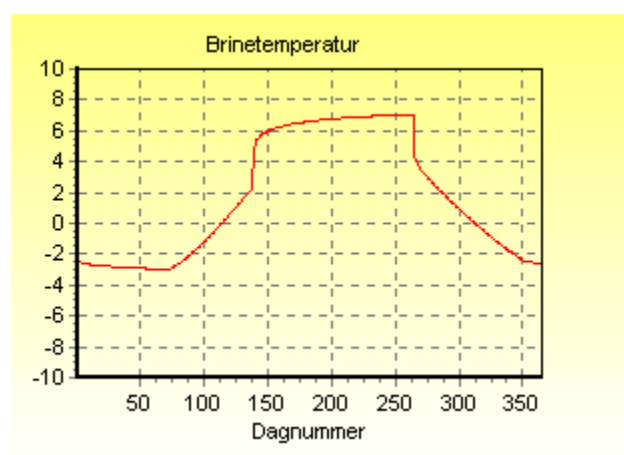
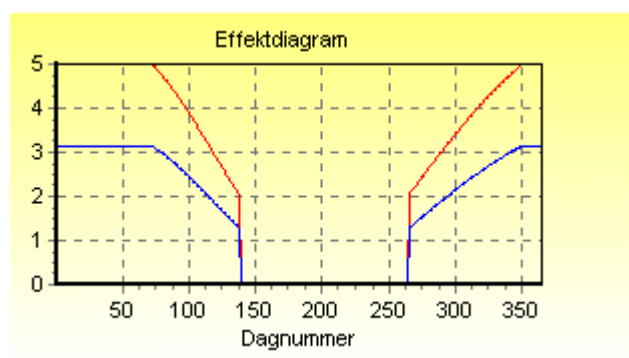
$$T_{kb_{in}} = T_{KB} + \frac{\dot{Q}}{2\dot{m}cp}$$

Demonstrationsprogram

De senaste årens starka försäljningsframgångar för bergvärmepumpar har accentuerat intresset för dimensionering av energibrunnar. Idag använder tillverkarna olika metoder för denna dimensionering, vilket medför en stor spridning för vad som anses vara korrekt dimensionering. Eftersom kostnaden för energibrunnen utgör en så pass stor del av totalkostnaden för en anläggning innebär detta att tillverkare som använder sig av mer optimistiska modeller för borrhålsdimensionering åtnjuter en konkurrensfördel gentemot övriga tillverkare. Den snedvridna konkurrensen som uppstår av denna anledning upplevs som ett problem för branschen. I syfte att ena branschen kring en gemensam metod för dimensionering av energibrunnar har ett fristående demonstrationsprogram utvecklats. Grunden för demonstrationsprogrammet utgörs av den teoretiska beskrivningen i föregående avsnitt. Programmet har utformats för att underlätta jämförelser med fältmätningar och andra dimensioneringsverktyg. I programmet genereras en kyllast utifrån angivet värmebehov (kWh) och uppskattad årsvärmefaktor för den tilltänkta värmepumpen. Denna kyllast tillsammans med uppgifter om berggrundens värmeledningstal, köldbärare och aktiv

borrhålslängd ligger till grund för den beräknade temperaturprofilen. För att exemplifiera resultatpresentationen visas nedan beräknade köldbärartemperaturer för ett beräkningsexempel med följande förutsättningar.

Årligt energibehov [kWh]	25000
Uppskattad årsvärmefaktor	2,7
Nominell effekt värmepump [kW]	5
Ort	Stockholm
Aktiv borrhålslängd [m]	100
Lamda berg [W/mK]	3,1
Borrhålsdiameter [m]	0,11
Dimension köldbärarslang [mm]	40/35
Köldbärare	Etylenglykol 30,5%
Brineflöde vid 0 °C [l/min]	17



Figur 11a,b Beräkningsexempel borrhålsdimensionering

Den övre kurvan i det vänstra diagrammet visar den av värmepumpen levererade värmeeffekten [kW]. Värmepumpen i beräkningsexemplet är dimensionerad för att täcka ungefär 60% av det dimensionerade effektbehovet. Den undre kurvan visar den genererade kyllasten utifrån den angivna årsvärmefaktorn. Det högra diagrammet återger beräknad temperatur för köldbäraren vid inloppet till förångaren. De beräknade temperaturerna avser det 21:a driftsåret.

Fältmätningar i Katrineholm

Under senhösten 1999 startade planering och projektering av ett omfattande mätprojekt i en bergvärmeanläggning i Katrineholm. Under våren 2000 har successivt mätutrustning utprovats och monterats. Mätningen kommer att innefatta hela uppvärmningssäsongen 2000/2001 och även innefatta sommaren 2001 för att möjliggöra utvärdering av komfortkyla från anläggningen. Huvudsyftet med projektet är att studera och visualisera energibesparing och arbetsförhållanden för en modern klimatanläggning i ett äldre småhus. Klimatanläggningen utgörs av en bergvärmepump som via ett vattenburet radiatorsystem förser huset med värme. I husets källarplan finns golvvärme installerat i badrum och tvättstuga. Golvvärmekretsen är ansluten till värmesystemets returledning. Värmepumpen

bereder även tappvarmvatten och skall sommartid användas för komfortkyla genom cirkulation av värmepumpens köldbärare genom fläktkonvektorer i husets två boningsplan. Mätningarna är koncentrerade på att ge en övergripande bild av husets komfortsystem. Av denna anledning innefattar mätningarna många av värmepumpens omgivande system såsom värmedistributionssystemet, brinekrets, utetemperatur och inneklimat. Ytterligare ett syfte med mätprojektet är att utröna möjligheten till utveckling av nya metoder för omfattande fältmätningar med enkel utrustning. Av denna anledning har viss elektronikutveckling skett för att möjliggöra mätning av eleffekt med hjälp av en energimängdsmätare. Resultatet från mätprojektet skall användas för att sprida kunskap om värmepumpsteknik till VVS-installatörer och för utvärdering av beräkningsprogrammet utvecklat i projektet. Mätprojektet har presenterats vid konferensen "Heat Pumps in Cold Climates" under augusti 2000 [17].

Bakgrund

Under den senaste femårsperioden har den svenska värmepumpmarknaden uppvisat en mycket stark tillväxt. År 1999 installerades 20 296 st värmepumpar enligt SVEPs (Svenska Värmepumpföreningen) försäljningsstatistik. Endast vid två tidigare tillfällen har liknande försäljningssiffror kunnat uppvisas. Första gången var under första hälften av 80-talet då försäljningen stimulerades av generösa bidrag för installation av värmepumpar i kombination med höjda energipriser. Under denna tid hemsöktes branschen av lycksökare som utlovade stora besparingar för villaägare. Löftena infriades sällan, mycket beroende på att det vid denna tid installerades många aggregat som inte var lämpade för svenska förhållanden. Många installationer blev också misslyckade p.g.a. att installatörerna inte hade tillräcklig kunskap om tekniken. Den andra försäljningstoppen inträffade under 1991 då vi stod på toppen av den högkonjunktur som rått sedan slutet av 80-talet. Vid denna tid bidrog den höga nyproduktionen av småhus till de höga försäljningssiffrorna. Den innevarande tillväxten förklaras till stor del av den teknikupphandlingstävling som NUTEK initierade under 1993.

Värmepumpar har nu betraktats som en konventionell uppvärmningsform i mer än 20 år. De flesta har hört talas om tekniken i ett eller annat sammanhang. De många misslyckade installationer som gjordes under 80-talet gjorde att branschen drabbades av ett mycket dåligt rykte och än idag kämpar man för att bygga upp ett förtroende hos fastighetsägarna. Förtroendet har under senare år stärkts genom högre energieffektivitet och högre tillförlitlighet. En starkt bidragande orsak till den ökade tillförlitligheten beror på ökad utbildning av installatörer. Utbildningar sker dels hos enskilda tillverkare och centralt hos SVEP. Även VVS-Installatörerna, branschorganisationen för installatörerna, har tagit initiativ för att främja utbildning och öka informationen kring tekniken. Detta mätprojekt ingår som en del i ett demonstrationsprojekt som initierats av VVS-Installatörerna. Demonstrationsprojektet syftar till att öka kunskapen och spridningen av information kring värmepumpsteknik hos organisationens medlemmar. Ett långsiktigt mål är att installation av värmepumpar skall utgöra en lönande och naturlig breddning av verksamheten hos traditionella VVS-installatörer. Projektet är samfinansierat av SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) och SVEP.

Mätobjekt

Det aktuella mätobjektet är ett friliggande småhus i Katrineholm. Huset utgörs av två plan, om vardera ca 70 kvm och ca 50 kvm inredd och uppvärmd källare. Huset är byggt 1938 i funktionalistisk stil. Huset har sedan uppförandet genomgått flera renoveringar varvid det bl.a. tilläggsisolerats. Fönstren utgörs av tvåglasfönster. Vid uppförandet utrustades huset med ett vattenburet radiatorsystem, vars vatten värmdes med en kombipanna avsedd för kol- och oljeeldning. Pannan byttes sedermera ut mot en elpanna. Radiatorerna är av äldre typ med

relativt stor vattenvolym. Dimensionerande temperaturnivåer för radiatorsystemet har inte kunnat fastställas, men tack vare husets tilläggsisolering och de relativt stora radiatorytorna bedöms det dock vara lämpligt att kombinera med en värmepump.



Figur 12a Radiator



Figur 12b Tvåplanshus Katrineholm

I samband med installationen av värmepumpen har husets källarplan renoverats. Vid renoveringen har golvvärme installerats i källarens badrum och tvättstuga. Golvvärmekretsen är ansluten till värmesystemets returledning. I huset bor för närvarande en vuxen person tillsammans med två barn. För demonstrationsprojektets räkning har huset under hösten 1999 utrustats med en bergvärmepump. Dimensioneringsunderlag och prestanda för anläggningen återfinns i nedanstående tabell.

Värmepump	Thermia VillaClassic 55
Kompressor	Copeland Scroll
Köldmedium	1,4 kg R404a
Avgiven Värmeeffekt	5,4-5,0 kW
Värmefaktor	4,2-2,8
Elpatron	6 kW
Volym VV-beredare	150 liter
Max effektbehov	8,7 kW
Värmebehov	25000 kWh
Varmvattenförbrukning	5000 kWh
Inomhustemperatur	20 C
Årsmedeltemperatur	6,2 C
DUT	-20°C
Avgiven värmeenergi VP	22 880 kWh
Energitäckning	91,5%
Balanstemperatur	-3,3°C
Total årsvärmefaktor	2,78
Årlig Energibesparing	16 010 kWh



Figur 13 Thermia VillaClassic 55

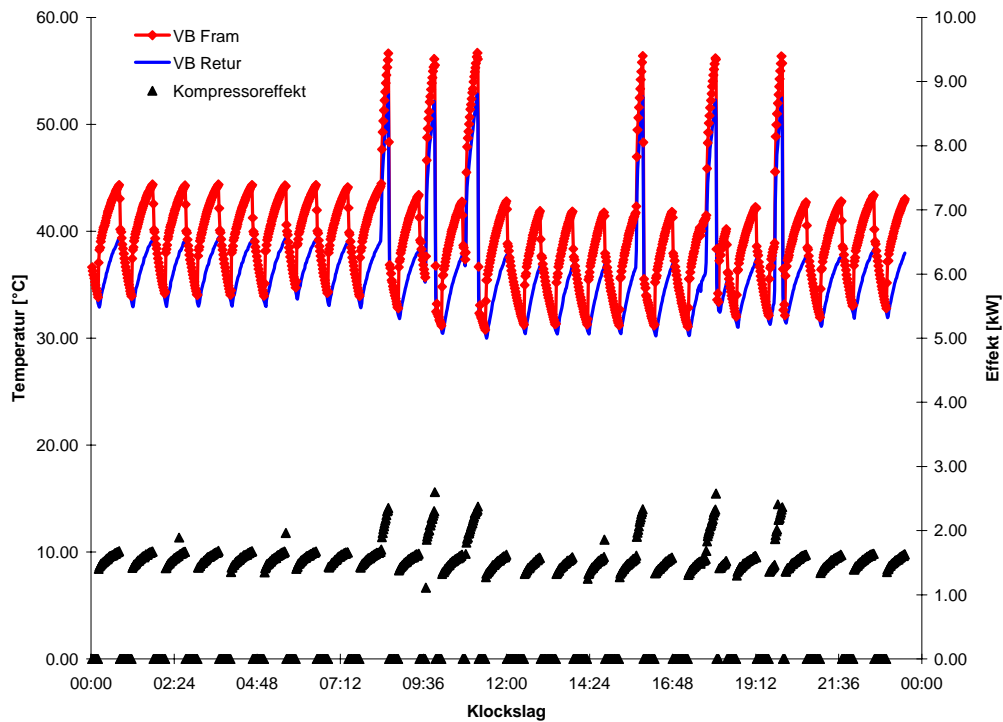
Tabell 1 Beräkningsförutsättningar

Mätmetodik

Den övergripande målsättningen med mätningarna är att ge en så fullständig bild som möjligt av systemets temperaturvariationer och energieffektivitet. Den långa mätperioden gör det möjligt att observera såväl dygnsvariationer som säsongsvariationer. Genom mätning av anläggningens eleffektförbrukning tillsammans med relevanta temperaturer för värmebärare och köldbärare ges en god bild av systemets dynamik. Under studier av dygnsförlopp kan varje enskild uppstart av kompressorn observeras. En förutsättning för detta är att avläsningen av mätvärden sker mycket ofta. I den aktuella tillämpningen registreras 17 mätparametrar 6 gånger per minut. Detta genererar 146 880 mätvärden per dygn. Hanteringen av så stora datamängder ställer höga krav på automatisering av databehandling. I detta projekt används mätprogrammet HP-VEE tillsammans med Microsoft Excel för att automatiskt bearbeta, spara och skapa rapporter utifrån registrerade mätvärden. För att reducera antalet data utan att förlora information bildas medelvärden för varje minut. Informationen skickas sedan vidare till Microsoft Excel. Varje dygn sparar HP-VEE automatiskt excelfilen med de lagrade mätvärdena. En ny excelfil skapas sedan av HP-VEE och mätvärden skickas under påfallande dygn till denna fil. Excelfilerna namnges efter dygnets datum.

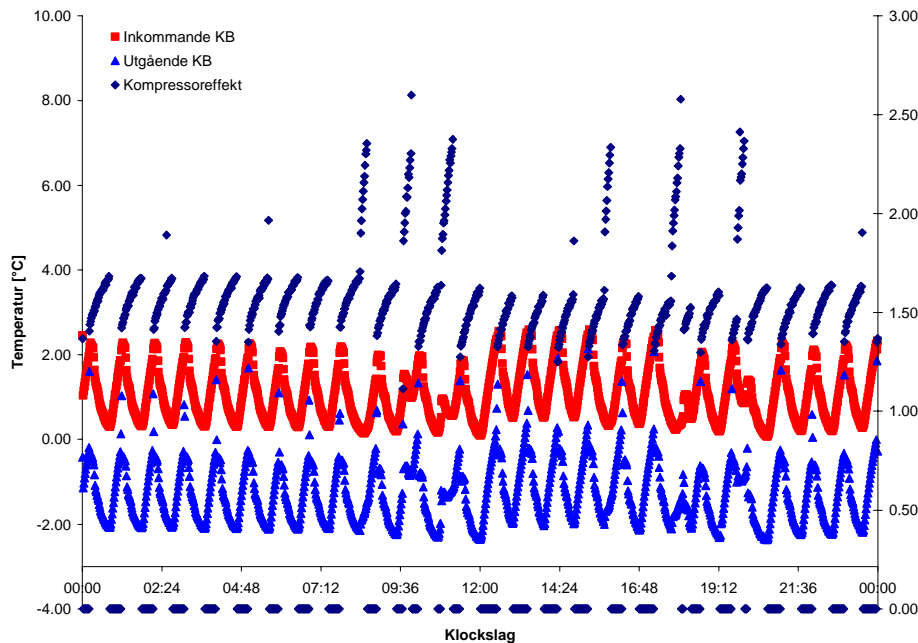
Mätresultat från pågående mätning

Hösten 2000 har varit extremt mild och nederbördsrik. Värmerekord för september, oktober och november har slagits på många håll i landet. Detta har fått till följd att den innevarande uppvärmningssäsongen fick en sen start. Det är ännu alltför tidigt att dra några slutsatser av mätningarna, men i syfte att visa mätningarnas upplösning och lite av systemets temperaturnivåer visas nedan ett urval av mätresultat från de pågående mätningarna.



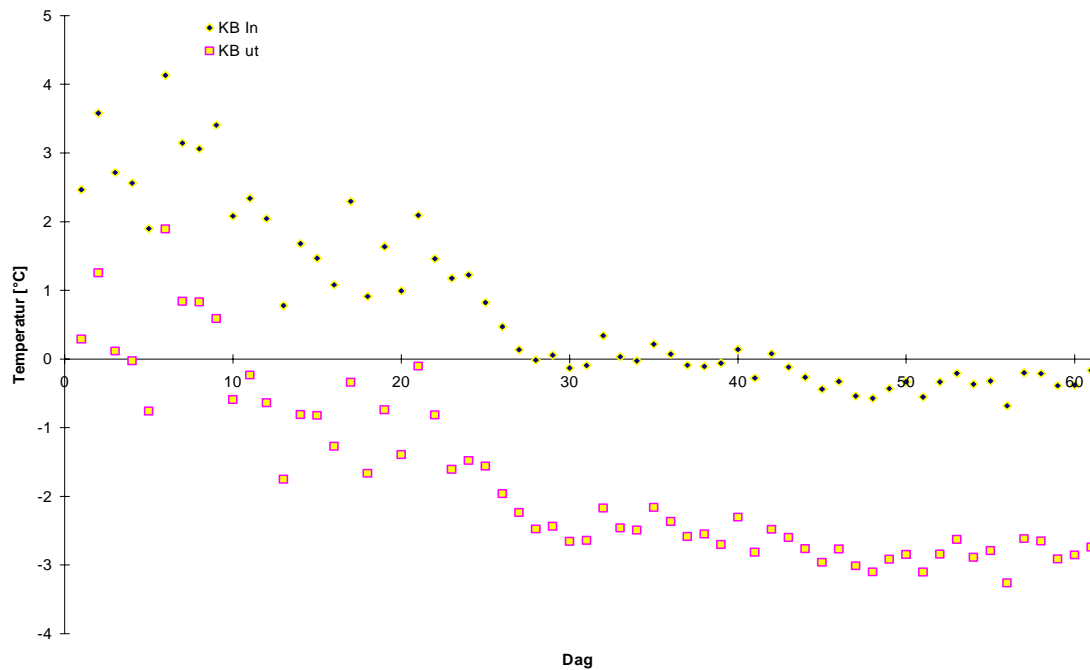
Figur 14 Mätresultat 2000-11-05

Av ovanstående figur framgår att värmepumpen startat 25 gånger detta dygn. Vid sex tillfällen har värmepumpen berett varmvatten. Det är vid dessa tillfällen som framledningstemperaturen ökar markant. Varmvattenberedningen medför högre kondenseringstemperatur och ökad kompressoreffekt, vilket tydligt framgår av figuren. Vid mätningen av kompressoreffekten förekommer i några enstaka fall någon form av störning. Detta medför att ett litet antal skräpvärden registreras. Dessa värden är dock relativt lätta att identifiera i figuren ovan.



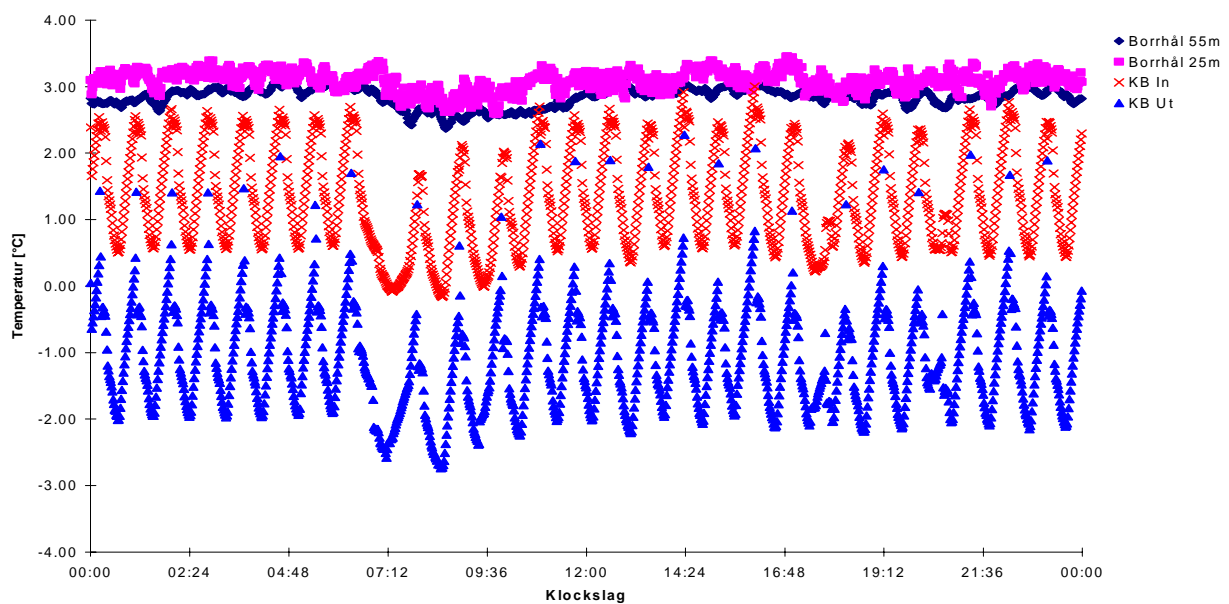
Figur 15 Mätresultat 2000-11-05

I figuren ovan återges registrerade köldbärartemperaturer och kompressoreffekt den 5e november 2000. Anläggningen i Katrineholm har ännu inte belastats speciellt hårt, men en viss sänkning av brinetemperatur har kunnat observeras. I nedanstående figur visas den lägsta registrerade köldbärartemperaturen för varje dag i oktober och november. Dag 1 motsvarar första oktober och dag 61 den 30e november.



Figur 16 Lägsta köldbärartemperatur oktober-november

Mätutrustningen har kompletterats med temperaturgivare som är nedsänkta i borrhålet. Dessa givare registrerar vattentemperaturen på vattnet mellan slangarna. Mätgivare finns på 25 respektive 55 meter under markytan. I nedanstående figur visas köldbärartemperatur och vattentemperatur den 30e november 2000.



Figur 17 Temperatur köldbärare, borrhål

Utöver detta mätprojekt har de deltagande företagen utfört fältmätningar i egen regi. Dessa fältmätningar har utgjort en stor del av projektets företagsinsatser. Fältmätningarna är koncentrerade till att undersöka aktuella köldbärartemperaturer i existerande bergvärmeanläggningar. Resultat från fältmätningarna kommer att redovisas enligt föreskriven mall för att möjliggöra en enhetlig sammanställning. Ett förväntat resultat från denna sammanställning är att inverkan av över- respektive underdimensionering av en anläggning kan analyseras. Resultaten kommer även att användas för validering av projektets modell för energiuttag ur berg. Följande mätningar har utförts av de deltagande företagen.

IVT Industrier AB

Mätningar av utetemperatur, framlednings- resp. returledningstemperaturer för värmesystem och brinetemperaturer (in/ut) har utförts på 6-7 bergvärmeanläggningar och en yttjordvärmeanläggning.

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP)

SP har utfört mätningar på minst två bergvärmeanläggningar. Mätparametrar är:
Temperatur för inkommande köldbärare
Flöde och temperaturer på värmesystemet
Total elförbrukning för anläggningarna
Ute- resp. inomhustemperatur

Thermia AB

Thermia har utfört fältmätningar på tre anläggningar. Två anläggningar i Arvika och tillsammans med KTH sker mätningar på anläggningen i Katrineholm. På anläggningarna i Arvika har följande parametrar mäts:
Ute- resp. inomhustemperatur
Varmvattentemperatur
Framlednings- resp. returledningstemperatur för radiatorsystemet
Drifttider för kompressor, varmvatten och tillsatsvärme

Internationell samverkan

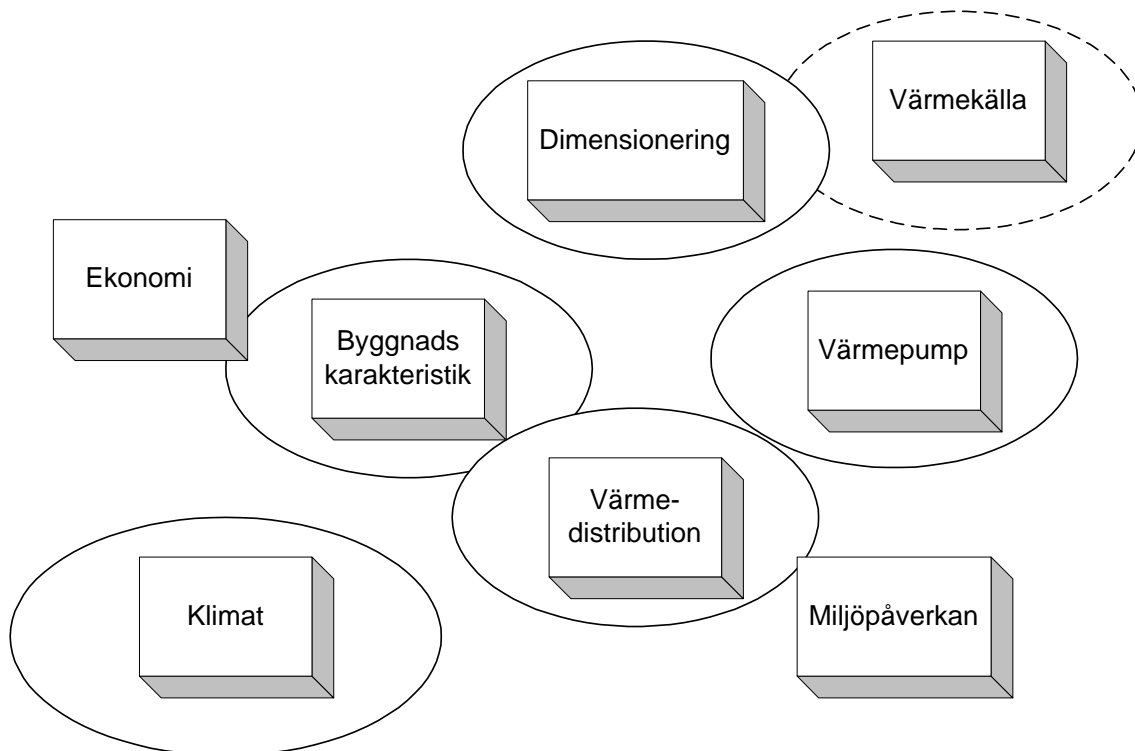
Ett viktigt mål med forskningsarbete är att bevaka och medverka i forskningen på internationell nivå. I detta projekt sker detta genom att projektdeltagarna även medverkar i IEA Annex 25 "Year round residential space conditioning systems using heat pumps". Detta annex startades under 1998 och sträcker sig till år 2002. Det övergripande målet med Annex 25 är att definiera och demonstrera nya systemlösningar för kontroll av inomhusklimat med hjälp av värmepumpsteknik. I Annex 25 medverkar Frankrike (EDF), Nederländerna (NOVEM), USA (Oakridge National Laboratory) och Sverige (KTH).

Måluppfyllelse

Inom ramen för projektets första etapp identifierades de krav som föreligger en gemensam beräkningsgrund för värmepumpsapplikationer. I detta arbete identifierades även de *tilltänkta användare* av det beräkningsprogram som utgör ett av projektets mål. Detta är ett nog så viktigt delresultat då många simuleringsprogram utvecklats p.g.a. utvecklarens eget intresse

att studera vissa parametrar. Att redan från början se slutanvändaren och dess begränsningar i kunskap och tid har varit en stor utmaning i projektet.

Under första etappen fastställdes även vilka komponenter som måste ingå i beräkningsmodellen för att rättvist kunna beräkna besparingspotentialen för ett värmepumpsystem. Programutvecklingen har skett successivt i och med att kunskapen byggts upp kring de olika delsystemen (moduler). De moduler som identifierades under inledningen av projektet visas i nedanstående figur.



De inringade modulerna har behandlats i projektet. Modulen värmekälla har streckats då det i skrivande återstår att utveckla en modell för ytjordvärme. Det återstår även att beskriva hur miljöbelastningen ändras då man övergår från en konventionell uppvärmning till en värmepumpsanläggning och vad en sådan anläggning får för privatekonomiska konsekvenser. Den slutliga programvaran som utgör ett viktigt delresultat av forskningsprojektet kan inte utvärderas i sin helhet förrän alla delmodeller fogats ihop till ett sammanhängande system.

Industriell relevans

Ett av projektets huvudmål har varit att ta fram ett för värmepumpsbranschen gemensamt beräkningsprogram. Den industriella relevansen för detta mål beskrivs i inledningen av denna rapport och utgör bakgrunden för projektets tillblivelse. I dagsläget återstår visst arbete innan ett fullständigt program står klart. Det är projektets målsättning att få detta klart inom projekttiden.

Inom projektet har det utförts ett antal fältmättningsprojekt, för att öka och sprida kunskap om driftförhållanden i befintliga anläggningar. Denna kunskapsspridning skall ske genom en enhetlig sammanställning av alla mätprojekt. I skrivande stund har de deltagande företagen ej inrapporterat resultat från dessa fältmätningar. Då projektet prioriterar att färdigställa

beräkningsprogrammet bedöms inte denna sammanställning vara klar inom den anslagna projekttiden.

Projektets relevans för programmet

I de genomförda projektmötena och vid företagsbesök har kunskapsutbyte mellan högskola och de deltagande företagen skett. Övrigt svenskt näringsliv har vid medverkan i programmets officiella informationsdagar och genom personlig kontakt tagit del av nya kunskaper som genererats i projektet. Genom projektets deltagande vid internationella konferenser och medverkan i Annex 25 har internationell kunskap förts hem. Vid projekttidens slut kommer branschen att ha tillgång till ett beräkningsverktyg, som de senare efter egna önskemål kan utveckla till ett färdigt säljstödprogram att distribuera till de egna återförsäljarna. Projektet kommer att leda till en licentiatexamen under år 2001.

Officiella Publikationer

1. 98-12-03: Klimat 21-dag
2. 99-07-15: Nyhetsbrev #1
3. 00-08: IIR-99 Sydney
4. 99-09: Newsletter #2
5. 99-11-25: Klimat 21-dag
6. 00-04-27: Mätprojekt "Totalkomfort i Småhus"
7. 00-08: Heat Pumps In Cold Climates

Referenser

1. Forsén, M., Simulering av värmepumpsystem och klimatmodeller, Klimat 21-dagen 1998, Stockholm 3 december 1998.
2. Forsén, M., Granryd, E., Design Criteria for Small Heat Pumps, 20th International Congress of Refrigeration, IIR-99, Sydney 19-24 september 1999.
3. Forsén, M., Simulering av värmepumpsystem, Klimat 21-dagen 1999, Göteborg 25 november 1999.
4. Enorm 1000, Energiberäkningsprogram anpassat efter Boverkets Byggregler, BBR. AB Svensk Byggtjänst 1996.
5. Anderlind, 1984. Approximation of monthly mean temperatures by using fourier series, Report BKL 1984:1, Lunds Tekniska Högskola.
6. Boverkets Byggregler, BBR94, §9:233.
7. Peterson, F., Reglerkurvan, Debatt #1, A4-Serien #100, Institutionen för Energiteknik, Avdelningen för Uppvärmning och Ventilationsteknik, KTH.
8. Nilsson, P-E., 1988. Anslutning av värmepumpar till befintliga värmesystem, värmetekniska och ekonomiska begränsningar, Document D6, Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för Installationsteknik.
9. Peterson, F., 1984. Värmebehovsberäkningar, Institutionen för Energiteknik, Avdelningen för Uppvärmning och Ventilationsteknik, KTH.
10. Berg-Hallberg, E., 1983. Design Outdoor Temperature For Modern Buildings In Sweden, Tekniska Meddelanden #267. Institutionen för Energiteknik, Avdelningen för Uppvärmning och Ventilationsteknik, KTH.
11. Refrex 3, 2000. Kylentreprenörens Förening, Box 175 37, 118 91 Stockholm.
12. VVS-Handboken, 1963. Förlags AB VVS, Stockholm.

13. Carslaw, H. S., Jaeger, J. C. 1947. Conduction of Heat In Solids. Oxford, U.K.
14. Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., Ingersoll, A. C., Heat Conduction With Engineering, Geological and Other Applications, Revised Edition, McGraw-Hill.
15. Kavanaugh, S., Allan, M., 1999. Thermal Conductivity of Cementitious Grouts and Impact On Heat Exchanger Length Design for Ground Source Heat Pumps, HVAC&R Research Vol. 5, no. 2.
16. Remund, C.P. 1999. Borehole Thermal Resistance, Laboratory and Field Studies, ASHRAE Transactions 105 Part 1, p. 439-445.
17. Forsén, M., Lundqvist, P., 2000. Field Measurements On A Single Family House In Sweden Supplied With A Ground Source Heat Pump For Heating And Passive Cooling, 4th International Conference, Heat Pumps In Cold Climates, Caneta Research, August 17-18, Ottawa, Canada.

Bilagor

[Simulering av värmepumpsystem och klimatmodeller, Klimat 21-dagen 1998.](#)

[Simulering av värmepumpsystem, Klimat 21-dagen 1999.](#)