

Prestandaförändringen hos en bergvärmeanläggning efter fem års drifttid

En fallstudie på Brf Duvan i Uppsala

Joakim Riml

REFERAT

Prestandaförändringen hos en bergvärmeanläggning efter fem års drifttid

Joakim Riml

Syftet med detta examensarbete var att göra en fallstudie på ett befintligt bergvärmesystem som har varit i drift i 5 år, och studera om dess prestanda har förändrats under den tid som systemet använts. Som bakgrund genomfördes även en litteraturstudie över de processer som äger rum då geotermisk energi kan utvinnas samt hur denna energi konverteras till konventionell energi för uppvärmning av lokaler.

Bostadsrättsföreningen Duvan på Petterslundsgatan i Uppsala installerade under år 1999-2000 ett bergvärmesystem som skulle leda till ett mindre användande av fjärrvärme och således bidra till att utgifterna för inköp av energi skulle minska. Systemet består av 19 energibrunnar och 4 värmepumpar, och är en av de första anläggningarna av denna storlek i Uppsala regionen. Detta gör att Bostadsrättsföreningen Duvan ses som ett referensobjekt för anläggningar av denna storlek. Anledningen till att studien gjordes vid denna tidpunkt var att det tar ungefär 5 år innan värmebalansen i berggrunden stabiliseras när ett bergvärmesystem installeras, och temperaturen i berggrunden kommer under denna period minska vilket leder till prestandaförändringar hos värmepumpen. Denna femårsperiod har nu gått och en relevant undersökning av systemet har kunnat göras.

I denna rapport beskrivs bakomliggande parametrar så som geologi, grundvattennivåer och temperaturförändringar som behövs för att få en överblick över situationen och kunna ge en inblick i vad som påverkar utvinningen av energi i berggrunden. Data från kompressorernas drifttider och förbrukning av energi före och efter installationen av bergvärmesystemet jämförs och slutligen görs en ekonomisk kalkyl för bostadsrättsföreningens energiförbrukning. Alla de punkter som rapporten undersöker visar att systemet fungerar väl och att det bidragit till en ekonomisk vinst med avseende på energianvändandet.

Nyckelord: *bergvärme, energi, värmepump, geohydrologi, GIS, grundvatten, geologi*

ABSTRACT

Performance change of a geothermal heat pump system after five years of operation

Joakim Riml

The aim of this report was to do a case study at a geothermal heating system which has been in operation for about 5 years, and study if its performance has changed during this period of time. A literature study about the processes involved was also done in purpose of background knowledge.

The tenant-owner's association Duvan at Petterslundsgatan in Uppsala installed year 1999-2000 a geothermal heating system. The purpose of this installation was that they hoped it would lead to a smaller usage of district heating which would lead to a reduction of the heating expenses for their buildings. The geothermal heating system consists of 19 energy wells and 4 geothermal heat pumps, and it is one of the first systems of that size in the region of Uppsala. Due to that, the system at Duvan is referred to as a reference project for geothermal heating system of this size. The reason that the study was made after 5 years is that it takes about 5 years before the heat equilibrium in the bedrock has been stabilized after a geothermal heat system has been installed. The temperature in the bedrock will decrease during this 5 year period and the performance of the system will change

In this report factors such as geology, groundwater levels and temperature changes are examined to get a summery of the processes that extract heat from the bedrock and convert it to conventional energy. Data from the compressors has been examined, energy usage before and after the installation of the system has been compared and finally an economical calculation of the tenant-owner's association energy consumption has been made. All the main points in this report point to the fact that the system is working properly and that it has contributed to an economical benefit regarding to the energy usage.

Keyword: geothermal heating, energy, geothermal heat pumps, geohydrology, GIS, groundwater, geology

*Department of Earth Science, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala
ISSN: 1401-5765*

Förord

Examensarbetet på Bostadsrättsföreningen Duvan har genomförts efter ett initiativtagande av min ämnesgranskare Per-Olof Hårdén på Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet. Handledare var Arvid Taube på Banverket i Stockholm och examinerator var Allan Rodhe verksam vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet. Jag skulle vilja rikta ett stort tack till alla tre för hjälp och vägledning under arbetet och examinationen. Jag riktar även ett stort tack till Nils Råmbin, Erik Eriksson på AB HydroConsult samt Rolf Lövbom på Skandinavisk Termoekonomi AB för all hjälp under arbetets gång. Jag skulle även vilja tacka Johan Eriksson på Bjerking AB för hjälp med lokalisering av grundvattenrör samt för att jag fick använda deras modell för beräkning av grundvattennivåer.

Uppsala, december 2005.

Joakim Riml

1	INLEDNING	3
2	MATERIAL OCH METODER.....	5
2.1	OMRÅDESBESKRIVNING	5
2.1.1	Beskrivning Brf Duvan	5
2.1.2	Hydrogeologisk översikt över Uppsalaområdet.....	7
2.1.2.1	Geologi	7
2.1.2.2	Hydrologi och grundvatten.....	8
2.2	BERÄKNINGSMETODER.....	11
2.2.1	Teoretisk beräkning av energiuttaget från en energibrunn.....	11
2.2.2	Ekonomisk kalkyl.....	11
2.3	TILLGÄNGLIGA DATA	11
3	TEORI	13
3.1	VÄRMELÄRA.....	13
3.1.1	Värmemängd	13
3.1.2	Värmeöverföring	13
3.1.2.1	Värmeledning	13
3.1.2.2	Konvektion	15
3.1.2.3	Strålning	17
3.1.3	Värmeöverföring och geologi	17
3.1.4	Värmeöverföring och grundvatten	18
3.2	VÄRMEPUMPEN	19
3.2.1	Grundläggande principer.....	19
3.2.2	Värmepumpens olika komponenter och processer.....	19
3.2.2.1	Köldbärarvätskan	20
3.2.2.2	Kylmediet	21
3.2.2.3	Kollektorslangen	21
3.2.3	Energieffekter	22
3.2.3.1	Den ideala processen.....	22
3.2.3.2	Värmefaktorn	23
3.2.3.3	Dimensionering	25
3.2.3.4	Energibrunnens teoretiska värmeuttag i förhållande till borrhjup	26
3.2.4	Beskrivning av olika värmepumpsystem	27
3.2.4.1	Grundvattenvärme	27
3.2.4.2	Sjövattenvärme	28
3.2.4.3	Ytjordvärme	28
3.2.4.4	Bergvärme	28
4	RESULTAT.....	31
4.1	TEMPERATURFÖRÄNDRINGAR	31
4.1.1	Temperaturförändringar i mark och luft.....	31
4.1.2	Temperaturförändringar i djupet.....	32
4.1.3	Temperaturförändringar på köldbärarvätskan.....	33
4.2	ENERGIRESULTAT	35
4.2.1	Kompressorernas drifttid.....	35
4.2.2	Teoretisk beräkning av energiuttaget från energibrunnarna	36
4.2.3	Fjärrvärmeförbrukning	37
4.2.4	Elektricitetsförbrukning	38
4.3	EKONOMISK KALKYL	39
4.3.1	Kostnad för fjärrvärme	40
4.3.2	Kostnad för elektricitet.....	41
4.3.3	Sammanlagd energikostnad.....	41

5	DISKUSSION	43
6	REFERENSLISTA.....	45
7	APPENDIX	47

1 INLEDNING

Intresset för användning av värmepumpar har ökat avsevärt de senaste åren. I nuläget finns ungefär 300 000 värmepumpar i Sverige som sammanlagt producerar ca 15 TWh per år och antalet värmepumpar och således även den energi som de producerar, ökar varje år (Energimyndigheten, 1999). Den del som ökar mest är andelen värmepumpar som installeras för villaägare, men även andelen värmepumpar i större lokaler ökar snabbt. Anledningen till denna ökning är framförallt att priset på konventionell uppvärmning så som till exempel fjärrvärme och olja har ökat kraftig. En annan aspekt som påverkar valet av källa för uppvärmning av hus och lokaler är vilken miljöpåverkan energikällan har. Användandet av en värmepump minskar klimatpåverkan i relation till de konventionella ej förnybara fossila bränslen som tidigare var helt dominerande på marknaden. För att driva värmepumpen används dock el, som om den är kolkondenserad påverkar miljön vid produktionen. Detta leder till att även värmepumpen kan bidra till en viss miljöpåverkan.

De idag vanligaste uppvärmningssystem som använder en värmepump är bergvärmesystem. Med hjälp av en eller flera energibrunnar utnyttjas den energi som lagras i berggrunden för uppvärmning av lokaler. Denna metod kräver lite markyta och är samtidigt energieffektiv. Bostadsrättsföreningen Duvan på Petterslundsgatan i Uppsala installerade i slutet på 1999 ett bergvärmesystem som sattes i drift vid årsskiftet 1999-2000. Projektet var ett av de första i Upplandsområdet av denna storlek och ses som ett pilotprojekt, vilket gör att uppföljningen på hur det har gått är av extra stort intresse både för boende på Brf Duvan och för andra värmepumpsspekulanter. De energiekonomiska kalkylerna för projektet hade förutspått en avsevärd energibesparing och även en kraftig ekonomisk vinst på införandet av det nya systemet.

Målsättningen med detta arbete är att undersöka förändringen av prestanda för ett bergvärmesystem som har varit i drift i flera år. Som bakgrund görs även en litteraturstudie över värmepumpens funktion och förutsättningar för effektiv drift.

2 MATERIAL OCH METODER

För att kunna undersöka och utvärdera effektiviteten hos bergvärmeanläggningen har det aktuella området studerats närmare. Detta har gjorts för att kunna förklara hur situationen ser ut med avseende på geologi, hydrologi och grundvatten, som alla har en stor del i hur stort värmeuttag som kan ske på en speciell plats. För att kunna göra detta har en litteraturstudie genomförts som förklarar värmeöverföringens påverkan i olika miljöer. I detta kapitel finns även teoretiska beräkningar av energiuttaget som behövs för att få en uppskattning om hur mycket energi som kan utvinna för en ideal energibrunn. I slutet på detta kapitel redovisas de tillgängliga data som har använts under studien. Dessa data har sedan använts i syfte att beskriva det energiuttag som skett under den aktuella perioden.

2.1 OMRÅDESBESKRIVNING

2.1.1 Beskrivning Brf Duvan

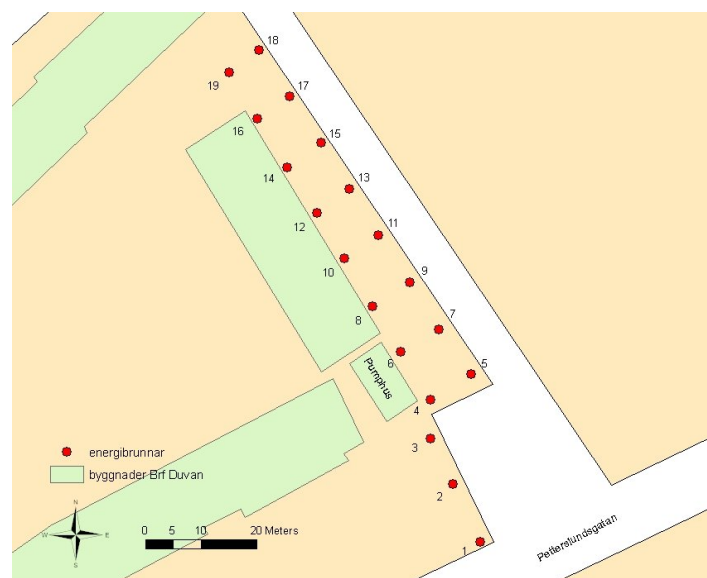
Bostadsrättsföreningen Duvan ligger på Petterslundsgatan i Uppsala (se Figur 1) och byggdes år 1974. Föreningen består av tre hus som byggdes 1970-1974 och har en sammanlagd yta på 8981 m² fördelad på 102 lägenheter och ett antal övriga lokaler. Under åren 1999/2000 installerades en bergvärmeanläggning som skulle ersätta det tidigare behovet av att köpa energi från en utomstående säljare. Bergvärmesystemet består av 19 energibrunnar, där 17 är omkring 200 meter djupa och två är omkring 250 meter djupa. Utöver detta finns det ett värmepumpsystem med kompressorer, pumpar och reglerutrustning. För en komplett komponentförteckning se Appendix 1 och Appendix 2. För förvaring av denna utrustning byggdes ett kombinerat sop- och pumphus som ligger i anslutning till energibrunnarna. Som köldbärarvätska används GEM-12 (se kapitel 3.2) och som kylmedium används tetraflouretan som har formeln CF₂CH₂F och har betäckningen R134a.



Figur 1 Översiktskarta som visar Brf Duvans geografiska position i Uppsala (till vänster), samt de verkliga byggnadernas och brunnarnas position (till höger)

Energibrunnarna ligger i två rader och avståndet mellan brunnarna i en och samma rad är ungefär 10 m, medan avståndet mellan raderna är ungefär 8 m (se

Figur 2). Endast en av brunnarna är gradad¹ och det är brunn nummer 8 som har en lutning på 10°. De slutna systemen av kollektorslangar, i vilka köldbärarvätskan cirkulerar, ligger i en kulvert som är nedgrävd på 1,5 meters djup och går emellan de båda raderna av brunnar och leds sedan in i pumphuset. För att hindra att värme strömmar mellan köldbärarvätskorna och marken ligger ett värmeisolerande material runt varje kollektorslang i den del av kollektorslangen som ligger horisontellt. Detta hindrar även värme från att strömma mellan den uppvärmda köldbärarvätskan som är på väg från energibrunnen till den kallare köldbärarvätskan som är på väg till energibrunnen. Isoleringen anses som fullständigt isolerande och inga värmeförändringar i den del av slangen som ligger horisontellt antas ske. Detta medför att ingen energi kommer att förloras då marktemperaturen är lägre än köldbärarvätskans temperatur (under vinterhalvåret), men även att ingen värme kommer att strömma från marken till köldbärarvätskan när tillstånden är de omvända (under sommarhalvåret). Utan isolering av varje enskild kollektorslang skulle denna del av systemet kunna fungera som ett yttjordvärmesystem då temperaturen är högre i marken än i köldbärarvätskan, och energi skulle kunna utvinna även ur denna del av systemet. I Brf Duvans fall beräknades energiförlusterna under vinterhalvåret vara större än de vinsterna sommartid, vilket gjorde att isoleringssystemet installerades. Detta beror delvis på att det är stora avstånd mellan vissa energibrunnar och värmepumpsystemet, vilket ger väldigt långa sträckor av icke isolerad kollektorslang vintertid.



Figur 2 Beskrivning av energibrunnarnas position och numrering i förhållande till pumphuset

Det maximala avståndet mellan energibrunnen och värmepumpen finns hos energibrunnarna nummer 18 och 19 som har ett avstånd på 74 m till värmepumpsystemet, vilket skulle kunna påverka temperaturen relativt mycket under det kalla vinterhalvåret. Under sommarhalvåret påverkar inte markens temperatur systemet i lika hög grad eftersom temperaturskillnaderna mellan köldbärarvätskan och marken kommer att vara betydligt mindre vilket leder mindre värmeflöden.

¹ När en brunn är gradad innebär det att den är borrar så att den avviker från den tänkta vertikala axeln från markytan ner mot jordens centrum. Vinkeln som den är gradad med är vinkeln mellan axeln och den verkliga brunnen och brukar vara emellan 5-20°. Denna teknik används vid borrhning när ett stort antal brunnar borrar och markytan är begränsad.

2.1.2 Hydrogeologisk översikt över Uppsalaområdet

För att kunna förutbestämma om ett område har rätt förutsättningar för att utvinna energi genom ett bergvärmesystem måste de hydrogeologiska förutsättningarna undersökas. Värmetransporten i berggrunden beror på dess mineralsammansättning där ett specifikt minerals värmekonduktivitet avgör hastigheten för transporten. Även grundvattenströmningar och sprickbildningar i berggrunden har inverkan på värmeöverföringen, vilket leder till att även de hydrologiska aspekterna måste undersökas.

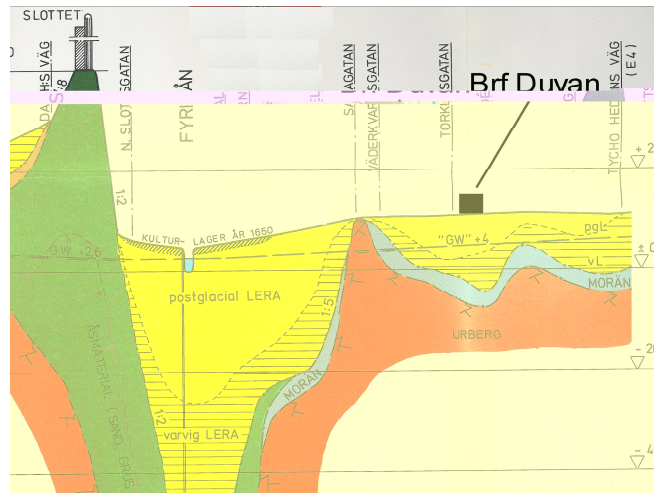
2.1.2.1 Geologi

Berggrunden i Uppsala bildades för ungefär 1 700 miljoner år sedan och består till största delen av granit, hälleflinta och leptit². Det finns också rundhällar, som är berggrund som sticker upp som berg i dagen med en stötsida och en läsida, som är en tydlig produkt av den senaste istiden. Landisen från den senaste glaciala perioden smälte bort från området omkring Uppsala ungefär 7 800 år f. Kr. De förändringar som skett i berggrunden sedan dess beror på rörelser hos kontinentalplattorna i jordskorpan. En geotermisk karta över området kring Uppsala finns i Appendix 3.

Jordarterna i Uppsalaområdet bildades under den senaste glaciala perioden för 100 000 – 10 000 år sedan (Lundin, 1988), och består underst av morän som uppkom som en produkt av det material som isen krossade. I Uppsala finns även en av Sveriges största rullstensåsar, Uppsalaåsen, som sträcker sig från Södertörn i Södermanland upp till området omkring Gävletrakten. Rullstensåsar bildades genom att smältvattnen bildade en tunnel i inlandsisen där strömmande vatten transporterade med sig isälvsmaterial. Detta material avsattes sedan då smältvattnet närmade sig isens slut och dess hastighet minskade, vilket gav upphov till långa åsar. När isen sedan drog sig tillbaka bildades de varviga sediment som kallas glaciallera som lades sig ovan på moränen och utjämnade dalgångar och dylikt. Varvigheten kommer från att det på sommaren bildas ett ljusare lerlager medan på vintern så avsattes ett mörkare lager, vilket gör att det tydligt går att följa årstidsväxlingarna. På vissa delar i Uppsala är mäktigheten på dessa glaciala lerlager mellan 20 och 40 m, medan på andra mer högt belägna områden är det bara ett par meter (Lundin, 1988). När sedan inlandsisen försvann började glaciala leror på grundare havsbottnar att erodera och avsattes sedan på djupare bottnar som postglaciala leror som består av finkornigt material som lera och silt. Landhöjningar längre fram i tiden ledde senare till att de forna havsbottnarna som bestod av lera och silt torrlades, och de används idag i stor utsträckning som jordbruksmark. De postglaciala sedimenten är den jordart som dominerar i Uppsalaområdet, vilket har lett till de jordbruksmarker som finns i området omkring Uppsala. I

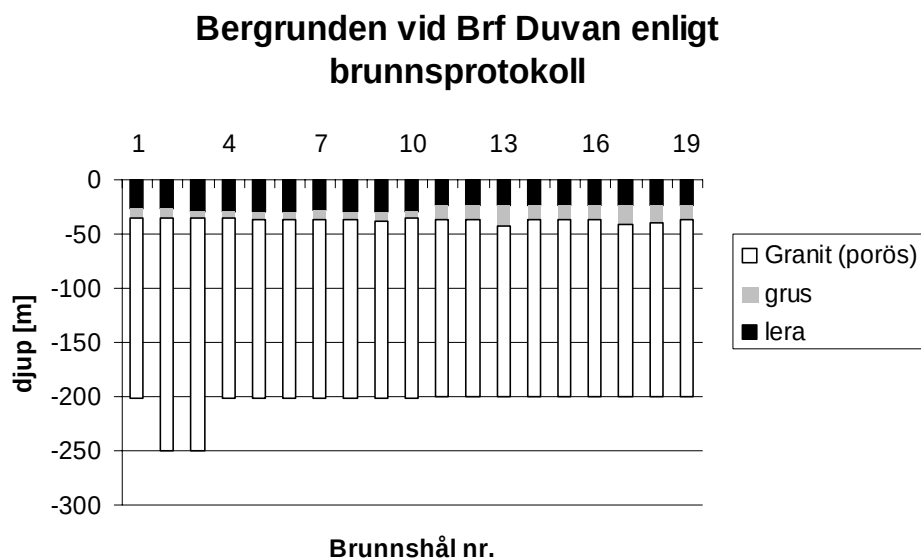
Figur 3 visas ett klipp ur den LIC-avhandling som gjordes 1988 av Lundin. Ett tvärsnitt med ett större djup kan ses i Appendix 4.

²Granit är en magmatisk bergart och består av mineralerna kvarts, kalifältspat, plagioklas, biotit. Granit är den vanligaste djupgergarten i Sveriges. Hälleflinta och leptit är båda metamorfa bergarter som bildats ur vulkanisk aska. Hälleflintan är en lågradig medan leptiten är en medelgradig metamorf bergart. De båda består till största delen av kvarts och fältspat.



Figur 3 Geologisk tvärsnitt genom Uppsala som beskriver vilka jordarter som finns samt visar Brf Duvans position (från Lundin, 1988)

Även brunnsprotokollet som uppfördes av firman som utförde borrning av energibrunnarna beskriver enkelt hur berggrunden ner till maximalt djup på respektive brunn ser ut. Som synes i Figur 4 består berggrunden överst av ett ungefär 20 meter mäktigt lager av lera. Under leran ligger ett friktionslager av grus som är mellan 5-10 meter djupt, innan berggrunden kommer. Den består enligt protokollet av krossad granit.



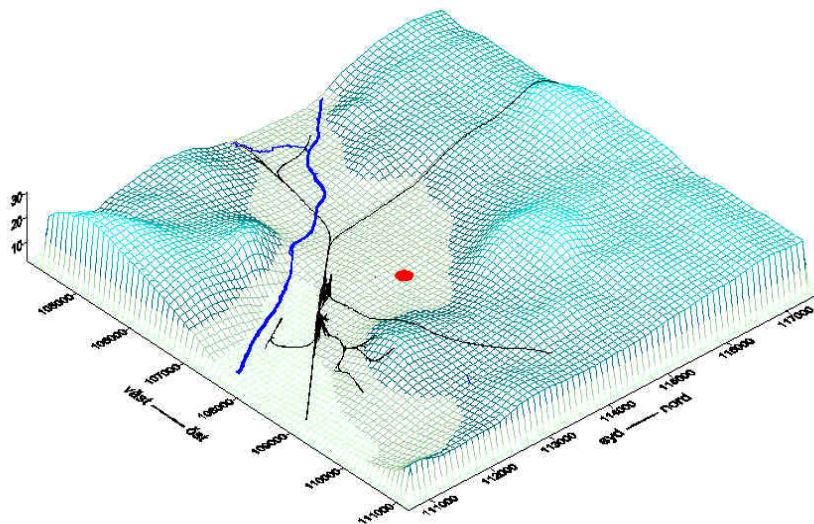
Figur 4 Berggrunden vid Brf Duvan som varierar med djupet. Grafen är framställd med data från det brunnsprotokoll som borrhjman sammanställde

2.1.2.2 Hydrologi och grundvatten

Eftersom Brf Duvan använder ett bergvärmesystem med isolering spelar grundvattenströmmar i jordlagren i området en liten roll sett ur perspektivet att energi överförs direkt från grundvattnet till energibrunnen. Den horisontella delen av kollektorslangen är isolerad och antas inte påverka några energiflöden. Den del av kollektorslangen som ligger vertikalt i brunnen är försedd med ett foderrör ner till

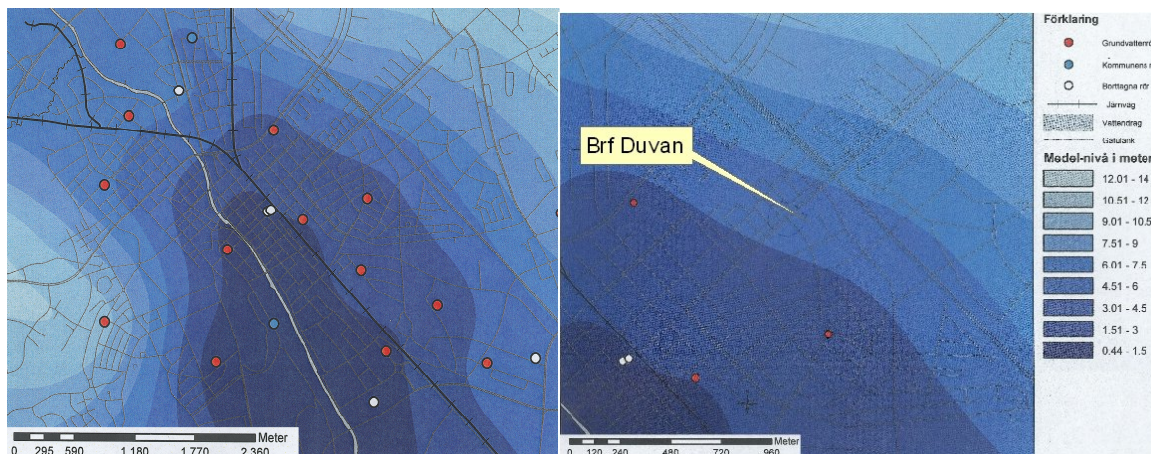
berggrunden och är därmed även den delen ej i direkt kontakt med grundvattnet. Syftet med foderröret är att det ska hindra jord från att rasa ner i energibrunnen. Denna isolering både horisontellt och vertikalt gör att grundvattenströmningar i jordlagren inte har någon betydelse för energiflödet direkt sett. Indirekt kommer dock en stor grundvattenströmning leda till att värme hela tiden transporteras till området vilket i sin tur leder till en kontinuerlig värmetillförsel till berggrunden och ett större energiuttag från brunnen kan då ske. Om berggrunden har en stor sprickighet kommer även det att påverka energiuttaget positivt. En stor sprickighet betyder att vattenströmningar och således tillförsel av värme till berggrunden kommer att vara stor.

Ett förenklat sätt att kunna beskriva grundvattenströmmarna i ett område är att studera topografin i det intressanta området. Höjdskillnader i topografin kommer att leda nederbörden från högre till lägre liggande områden, fungera som en avskiljare för olika avrinningsområden och leda grundvattnet. En höjdmodell över Uppsalaområdet konstruerades i programmet *Golden Software Surfer 7.0* och visas nedan i Figur 5. De höjddata som användes kommer från en höjddatabas som Uppsala kommun har framställt. För att lättare kunna orientera sig i modellen lades även kartor med Fyrisån, järnvägen och en fylld cirkel som markerar Brf Duvan på Petterslundsgatan till.



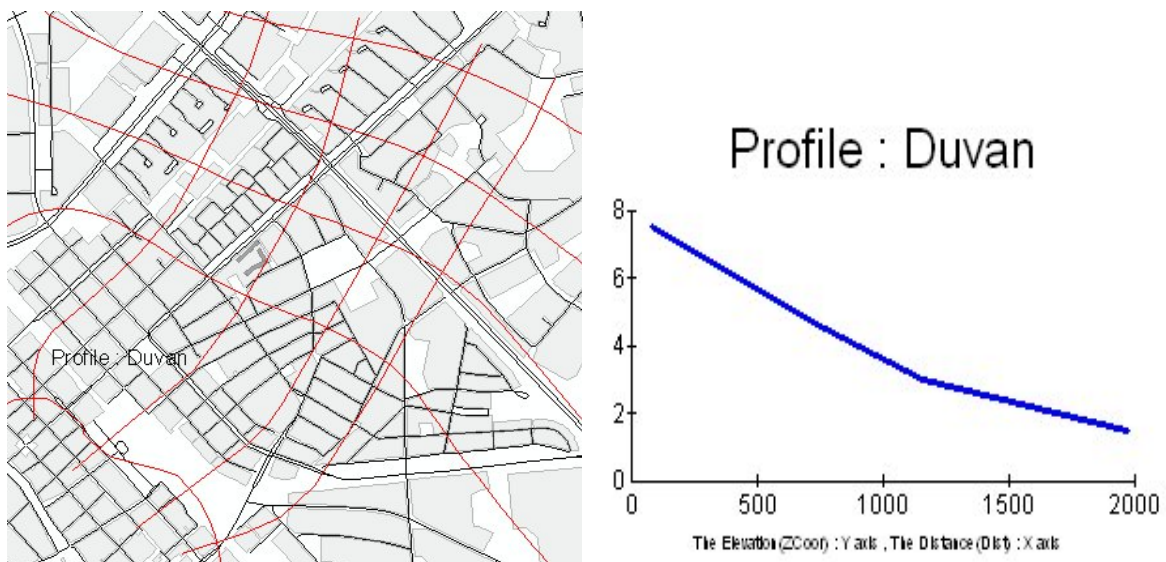
Figur 5 Interpolation av x-, y- och z-koordinater i centrala Uppsala med hjälp av programmet *Surfer* och med interpolationsmetoden Kriging. För att lättare kunna orientera sig har järnvägen (den svarta linjen), fyrisån (den blå linjen) samt Brf Duvans (den fyllda röda cirkeln) position på kartan lagts till

För att få en bättre bild av grundvattenströmningen har en grundvattenmodell använts för att återskapa de verkliga grundvattennivåerna. Modellen konstruerades som ett examensarbete av Malin Quiberg och användes här med tillåtelse av Bjeking AB i Uppsala. Modellen bygger på mätdata från 1981-2001 i 18 rör där grundvattennivån i de centrala delarna av Uppsala har mätts. Med hjälp av dessa mätningar kan sedan en grundvattenytan interpoleras fram med hjälp av programmet. I Figur 6 ses till vänster en översiktskarta över den modellerade grundvattennivån i centrala Uppsala samt till höger området omkring Brf Duvan.



Figur 6 Modellerad grundvattennivån i Centrala Uppsala (till vänster) samt i området omkring Brf Duvan (till höger)

Denna modell följer väl höjdmodellen i Figur 5 vilket är att vänta. Utifrån denna karta över grundvattennivåerna skapades sedan en karta med de aktuella nivåerna i området omkring Brf Duvan i *ArcMap*. Med hjälp av en tilläggsfunktion beräknades en grundvattenprofil över en bestämd linje på kartan. Linjen valdes så att den skar grundvattennivåerna i 90°, vilket borde motsvara den verkliga flödesriktningen för grundvattnet. Till vänster i Figur 7 visas hur den aktuella profillinjen drogs och till höger visas den genererade profilen. I denna bild är y-axeln grundvattennivåns höjd i meter medan x-axeln motsvarar distansen i meter längs den utritade profillinjen.



Figur 7 Modellering av grundvattenprofilen i området omkring Brf Duvan. Till vänster markeras flödeslinjerna med rött, och höjdprofilen för linje nummer två (från vänster) visas till höger där båda axlarnas storheter är i meter

2.2 BERÄKNINGSMETODER

2.2.1 Teoretisk beräkning av energiuttaget från en energibrunn

När en energibrunn planeras kan den teoretiska värmeeffekten, det vill säga den mängd energi som kan utvinnas ur energibrunnen beräknas. Detta har även gjorts för energibrunnarna vid Brf Duvan. Den ekvation som används är en variant på Thiems brunnsekvation för radiell strömning vid stationärt tillstånd (se Ekvation 26). Ekvationen är framförallt beroende av temperaturen i energibrunnen och temperaturen för den ostörda marken, men även på värmeledningsförmågan i marken samt på brunnens djup. Med hjälp av det framräknade teoretiska värdet på värmeeffekten kan sedan antalet brunnar och brunnarnas djup beräknas. Detta är en viktig hjälp när en bergvärmeanläggning ska dimensioneras och medför att brunnens kapacitet blir så lika som det verkliga uttaget som möjligt.

2.2.2 Ekonomisk kalkyl

När bergvärmeanläggningen på Brf Duvan planerades 1997-1998 fanns det givetvis ekonomiska intressen inblandade. Föreningens styrelse hade gjort ekonomiska kalkyler som visade på att bergvärmeanläggningen trots dess stora inköpskostnad skulle vara ett bättre ekonomiskt alternativ i det långa loppet än den nuvarande situationen där fjärrvärme samt elektricitet köptes. För att studera den verkliga ekonomiska utvecklingen sedan bergvärmeanläggningens sattes i bruk har energifakturor från de inblandade energibolagen från tiden före anläggningen installerades jämförts med hur dessa fakturor ser ut efter 5 år. En ekonomisk balansräkning har även genomförts som visar när bergvärmeanläggningen ska vara betald och då Brf Duvan verkligen börjar spara pengar på sin anläggning.

2.3 TILLGÄNGLIGA DATA

För att kunna genomföra examensarbetet har en mängd olika data samlats in. Dessa data har sedan bearbetats och använts i olika delar av arbetet. De olika data som används är:

- Temperaturförändringar i mark och luft – Från Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet hämtades medeltemperaturen för luften samt för marken vid ett djup av 100 cm under perioden 2000-2004.
- Temperatureförändringar i djupet – Från Svensk kärnbränslehantering AB inhämtades den vertikala temperaturförändringen med avseende på djupet från Forsmark som ligger ungefär 80 km nordöst om Uppsala. Den användes för att beräkna en temperatur i jorden och berget som funktion av djupet
- Temperaturdata för köldbärarvätskan - Temperaturen på bergvärmeanläggningens köldbärarvätska har uppmätts veckovis under hela perioden som anläggningen har varit i drift, det vill säga år 2000-2004. Dessa data har samlats in av en tekniker som har hand om underhållet på Brf Duvan. Med hjälp av denna information kan förändringar i energibrunnen analyseras.

- Kompressorernas drifttider – Bergvärmeanläggningens drifttider har dokumenterats veckovis på Brf Duvan under åren 1999-2004 av en tekniker. Dessa data har använts för att undersöka systemets dimensionering samt för att undersöka eventuella avvikelser.
- Energidata - Data över hur mycket elektricitet som använts på Brf Duvan under åren 1999-2004 har samlats in från Björklinge Energi AB. På samma sätt har fjärrvärmeförbrukningen på Brf Duvan samlats in från Vattenfall AB mellan åren 1978-2004. Dessa data har använts för att kunna jämföra energiförbrukningen mellan olika år samt för att kunna utföra en ekonomisk analys.

3 TEORI

3.1 VÄRMELÄRA

För att förstå hur en värmepump fungerar behövs en grundläggande förståelse inom termodynamik och värmelära. Inom dessa två områden finns de begrepp som förklarar hur den lagrade energin i mark, jord eller vatten kan konverteras till konventionell värmeenergi och användas för uppvärmningen av olika lokaler. Ekvationer från nedanstående genomgång kommer från Alvarez (1990) om inget annat anges.

3.1.1 Värmemängd

För att kunna beskriva hur värme överförs mellan olika ämnen i berggrunden och marken måste först begreppet värmemängd introduceras. Värmemängd definieras som den mängd energi som en kropp innehåller, men värmemängden i detta fall är intressant först då den flödar mellan två olika kroppar. Värmemängden som behövs för att öka temperaturen från T_1 till T_2 i en kropp med massa m kan beräknas genom följande ekvation:

$$Q_{12} = m \cdot c_p \cdot \int_{T_2}^{T_1} dT \quad (1)$$

Q = förändringen i värmemängd [J]

m = kroppens massa [kg]

c_p = den specifika värmekapaciteten [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T = temperaturen [K]

Den värmemängd som tillförs en kropp definieras som positiv och den värmemängd som en kropp avger är negativ. Den specifika värmekapaciteten, c_p , är ett mått på hur stor värmemängd som behövs för att höja temperaturen av 1 kg av ett specifikt ämne 1°K .

3.1.2 Värmeöverföring

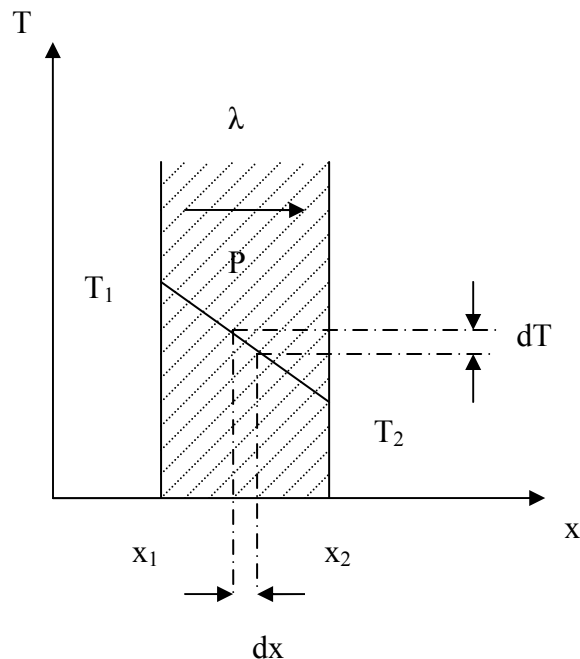
Överföring av värmeenergi sker när en temperaturdifferens finns mellan två olika kroppar eller mellan olika delar av en kropp. Värmeöverföringen äger rum så länge denna temperaturdifferens finns och den sker endast enligt termodynamikens andra lag, det vill säga från en högre temperatur till en lägre (i den negativa temperaturriktningen). Denna transport av värmeenergi kan ske på tre olika sätt:

1. Värmeledning
2. Konvektion
3. Strålning

3.1.2.1 Värmeledning

Överföring av värmeenergi genom ledning sker mellan ämnen som är i fast, flytande eller gasform. Processen bygger på att molekyler med hög temperatur har stor rörelseenergi medan

molekyler med låg temperatur har lite rörelseenergi. Utbytet sker genom att rörelseenergi överförs mellan närliggande partiklar, från molekyler med stor rörelseenergi till dem med lägre. Ett sätt att beräkna den värmemängd som passerar mellan kroppar är att dela upp dem i plana skikt som har en tjocklek δ (se Figur 8) och med hjälp av skiktets värmekonduktivitet λ och temperaturskillnaden mellan skiktets båda väggar så beräknas värmeflödet, P .



Figur 8 Illustration av de parametrar som påverkar värmeledning i ett plant skikt

Värmemängden som passerar väggen är direkt proportionell mot skiktets yta A , som ligger vinkelrätt mot värmeflödets riktning. Värmemängden kan beräknas genom formeln:

$$P = A \cdot \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

P = värmeflödet [W]

A = arean vinkelrätt mot värmeflödet [m^2]

λ = värmekonduktiviteten [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T = temperaturen [K]

x = positionen i x -led [m]

Flödet kommer att gå från den högre temperaturen T_1 till den lägre temperaturen T_2 , enligt termodynamikens andra lag. Värmeflödet genom ett oändligt tunt skikt skulle således kunna beskrivas med formeln:

$$P = -A \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

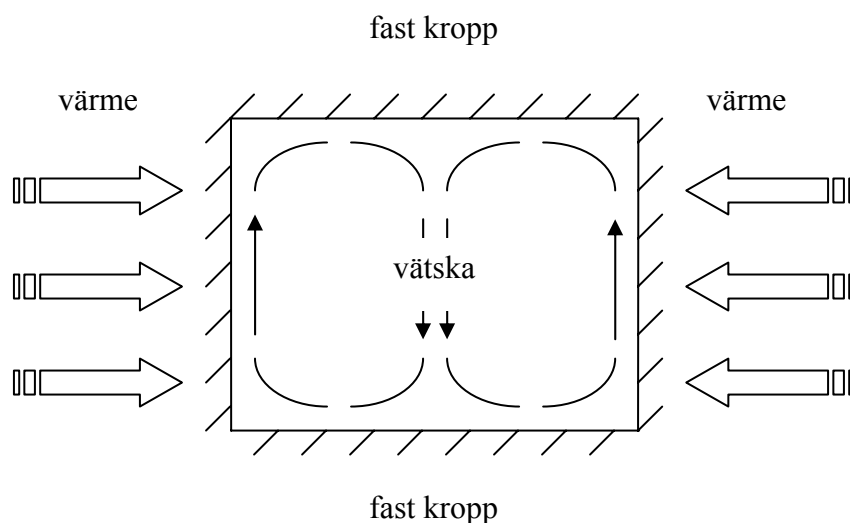
För ett cirkulärcylindriskt skikt med radien r (och tjocklek dr) blir ekvationen:

$$P = -A \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

I ekvationen ovan är dT negativ (temperaturen minskar i värmeflödets riktning) medan dx och dr är positivt, därav det tillagda minustecknet. Genom att dela upp hela kroppen i sådana oändligt små skikt kan sedan värmeflödet genom kroppen samt mellan kroppar beräknas med hjälp av ovanstående ekvation. Detta leder till att man kan beräkna energiupptag och energiförluster i olika delar av systemet.

3.1.2.2 Konvektion

Konvektion kallas den process då värme transporteras i en rörlig fluid (vätska eller gas). Det finns två olika sorters konvektion, naturlig konvektion och påtvingad konvektion. Den naturliga konvektionen (se Figur 9) uppkommer när värme överförs från en fast kropp till fluiden, en process som är beroende av avståndet till den varma kroppen och fluiden. En fluidpartikel som ligger nära väggen kommer att ta emot rörelseenergi från de uppvärmda partiklarna som finns i kroppen, vilket leder till att fluidpartiklens rörelseenergi och därmed temperatur kommer att höjas. Eftersom densiteten är beroende av temperaturen kommer fluidens densitet att minska när temperaturen ökar vilket leder till att den uppvärmda fluidpartikeln kommer att stiga uppåt. När denna partikel stiger uppåt ökar avståndet till värmekällan och partikeln svalnar, vilket leder till att den sjunker igen. När partikeln sjunker så värms den på nytt och börjar återigen stiga uppåt.



Figur 9 Schematisk bild som visar hur naturlig konvektion uppstår

Den påtvingade konvektionen bildas genom att liknande strömmar som i fallet när naturlig konvektion uppstår. Vid denna konvektion bildas strömmarna dock på konstgjord väg med hjälp av till exempel en fläkt eller en propeller. Det gemensamma för båda sorters konvektion är att överföringen av värme är beroende av partikelns avstånd till värmekällan, ju närmare en partikel är desto mer värme överförs. Detta leder till att strömmar bildas när varmare partiklar förs bort från platsen för värmeöverföring och svalare partiklar leds till den platsen. På så sätt blandas hela tiden varma och kalla partiklar vilket leder till en temperaturblandning. För beräkning av värmeöverföring genom konvektion används en värmeöverföringskoefficient α . Den beskriver hur effektiv överföringen är mellan en kropp och en fluid, och beror på en rad

olika faktorer som till exempel kroppens form, material och fluidens egenskaper och strömningssätt.

$$P = \alpha \cdot A \cdot (T_k - T_f) \quad (5)$$

P = värmeflödet [W]

α = värmeövergångskoefficienten [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

A = arean vinkelrätt mot värmeflödet [m^2]

T_k = kroppens temperatur [K]

T_f = fluidens temperatur [K]

I sprickor eller rörledningar kommer konvektionsströmmarna att vara vinkelräta mot fluidens huvudströmningssriktning, vilket leder till att värmeöverföring genom konvektion inte kommer att påverka rörledningar eller sprickor med laminärt flöde. Anledningen till detta är att vid laminärt flöde rör sig fluidens partiklar endast i parallella banor som kan beskrivas som olika skikt. Det sker inte någon blandning av partiklar mellan dessa skikt, det vill säga vinkelrätt mot strömriktningen, och således kommer heller inte några konvektionsströmmar att uppkomma (se Figur 10).



Figur 10 Skillnaden mellan laminärt (till vänster) och turbulentflöde (till höger). Vid turbulent flöde har vätskan en större hastighet och partiklarna kommer att blandas i vertikalled, något som inte sker vid laminärtflöde

Detta leder till att värmeöverföring vid laminär strömning till största del består av värmeledning samt strålning, se kapitel 3.1.2.3. Engelsingmannen O. Reynolds har experimentellt härlett en formell som enkelt avgör om en strömning är laminär eller turbulent:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (6)$$

Re = Reynold's tal [dimensionslös]

ρ = fluidens densitet [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v = fluidens hastighet [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

d = cylinderns diameter [m]

μ = fluidens viskositet [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

Om Reynold's tal överstiger 2000-2300 är strömningen turbulent och om talet är mindre är strömningen laminär.

3.1.2.3 Strålning

Alla kroppar som har en temperatur som ligger över den absoluta nollpunkten (-273,15 °C) emitterar värmestrålning. Strålningen fortplantas med ljusets hastighet enligt formeln:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

ν = svängningsrörelsens frekvens [s^{-1}]

c = vågornas fortplantningshastighet [$m \cdot s^{-1}$]

λ = strålningens våglängd [m]

Denna strålning består av elektromagnetiska vågor som sedan absorberas, reflekteras eller transmitteras av den kropp som vågorna faller på. Värmeöverföringen sker genom att den elektromagnetiska strålningen absorberas och omvandlas till värme. Den utstrålade värmeeffekten för en svart kropp (en kropp som absorberar all infallande strålning) kan beskrivas enligt Stefan-Bolzmanns lag:

$$P = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

P = värmeflödet [W]

A = arean vinkelrätt mot värmeflödet [m^2]

σ = Stefan-Bolzmanns konstant = $5,670 \cdot 10^{-8}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

T = temperaturen [K]

3.1.3 Värmeöverföring och geologi

Av de ovan nämnda värmeöverföringsprocesserna är värmeledningen mycket viktig när värme utvinns med hjälp av ett bergvärmesystem, speciellt vid större djup. Värmeledningen är beroende av berggrundens värmekonduktivitet vilket varierar mellan olika jordarter och berggrundsmaterialer.

Tabell 1 Värmekonduktivitet för ett antal olika jord- och bergarter, samt vatten och is (Nordell, 2004)

Jord- eller bergart	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Lera (torr)	0,4-0,9
Lera (våt)	0,9-2,2
Sand, grus	1,8-2,2
Gnejs	1,9-4,0
Granit	2,1-4,1
Kvartsit	3,1-6,6
Vatten	0,6
Is	2,2
Luft	0,02

Tabell 1 visar värmekonduktiviteten för ett antal olika jord- och bergarter. Av de mineral som förekommer mest i berggrunden har kvarts den i särklass högsta värmekonduktiviteten ($7,7 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), vilket gör att mängden kvarts kommer att påverka berggrundens värmekonduktivitet väldigt mycket generellt sett (Thunholm, 1981). I Uppsalaområdet är det

bergarterna urgranit, hälleflinta och leptit som klart dominerar berggrunden och de innehåller alla en stor del kvarts vilket gör att berggrunden i Uppsalaområdet har en värmekonduktivitet på ungefär $3,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (Thunholm, 1981). Även brunnsprotokollen från Brf Duvan beskriver att berggrunden består av granit ner till det maximala borrhjupet för samtliga energibrunnar.

Skillnaden i värmekonduktivitet mellan olika jordarter är liten och skillnaden ligger i att de innehåller olika stor mängd vatten. Värmekonduktiviteten för vatten är $0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ och för luft $0,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (se Tabell 1), vilket förklarar varför en jordart med högre vatteninnehåll har en högre värmekonduktivitet än en jordart med lägre vatteninnehåll. Jordarterna har dock lägre värmekonduktivitet än bergarterna och kommer således inte att kunna leda värmen lika bra som berggrunden.

Värme som överförs genom strålning kommer att påverka marken och berggrunden på två olika sätt i marken. På jordens yta kommer värmestrålning från solen att bidra till att temperaturen höjs, det vill säga att energi lagras i marken som värme. På större djup så kommer naturligt sönderfall av radioaktiva ämnen (främst uran och torium) i berggrunden att leda till en ökad värmeproduktion.

3.1.4 Värmeöverföring och grundvatten

Grundvattennivån kommer att spela en stor roll för energiutvinningen eftersom värmekonduktiviteten för vatten är 25 gånger så stor som för luft. Ligger således systemet nedanför grundvattennivån kommer värmeöverföringen vara mycket effektivare än om det ligger ovanför. Även grundvattenströmmarna kommer att påverka värmeöverföringen eftersom de tillför värme och ibland även kyla. Hur stor värmeöverföring som äger rum beror förutom på temperaturskillnaden mellan grundvattnet och berggrunden, på storlek och hastighet hos grundvattenflödet samt berggrundens värmekonduktivitet. Är berggrunden sprickig kommer en stor mängd grundvatten att strömma i dessa sprickkanaler vilket leder till en större kontaktyta mellan vattnet och berggrunden och således en effektivare värmeöverföring. Sprickkanaler på större djup kommer även de att leda till en bättre värmeöverföring. Värmen överförs då snabbare från grundvattnet direkt till energibrunnen, eller från grundvattnet till berggrunden och sedan till energibrunnen, än om berget saknade sprickkanaler. Ur energisynpunkt kommer detta att medföra att en större mängd energi kan utvinnas ur energibrunnen. Hur stor grundvattenströmning som finns i ett specifikt borrhål, som bland annat beror på hur stor sprickighet berggrunden har, skiljer sig från fall till fall. Detta medför att det är svårt att uppskatta hur stor roll grundvattenströmmarna får för det totala energiupptaget, utan att göra utförliga geologiska undersökningar. Ur dimensioneringssynpunkt leder detta till att man i de flesta fall antar att det inte förekommer någon värmeöverföring på grund av sprickbildning i berggrunden när energiuttaget ska beräknas, och djupet på energibrunnen anpassas efter detta (Löfbom R., muntlig). Detta antagande görs för att eliminera risken att borra för få eller för grunda energibrunnar, vilket skulle leda till att ett för litet energiuttag är möjligt. Skulle det senare visa sig att det förekommer sprickigbildning så kommer det att leda till att energiutbytet blir bättre än beräknat.

3.2 VÄRMEPUMPEN

Värmepumpen är en komplex maskin som genom ett antal processer förflyttar värme från ett område med lägre temperatur till ett område med högre temperatur. Detta uppnås genom värmepumpen delar upp processen i ett antal delprocesser som beskrivs nedan.

3.2.1 Grundläggande principer

Enligt termodynamikens andra lag flödar värme alltid från ett varmare medium till ett kallare, d.v.s. naturen strävar efter att alla temperatur skillnader ska utjämnas. Värmepumpen gör det dock möjligt att transportera värme från ett område med lägre temperatur till ett område med högre temperatur. Detta är den viktigaste processen hos värmepumpen, nämligen att den inte själv skapar energi utan att den utnyttjar lagrad energi i områden med relativt låga temperaturer och förflyttar den till områden med högre temperatur. Detta fungerar genom att man utnyttjar att ämnen upptar och avger värme vid övergångarna mellan olika faser och att temperaturen ökar vid ökat tryck och konstant volym (ideala gaslagen):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (9)$$

P = trycket [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

V = volymen [m^3]

n = mängd [mol]

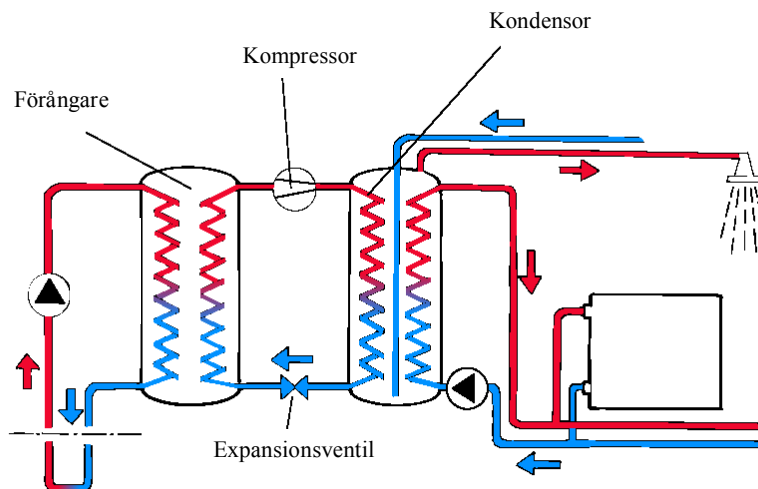
R = den så kallade gaskonstanten som har olika värden för olika gaser [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T = temperaturen [K]

3.2.2 Värmepumpens olika komponenter och processer

Värmepumpen består i huvudsak av fyra olika komponenter där fyra olika processer sker när den lagrade värmeenergin omvandlas till konventionell värmeenergi:

1. Förångare – Processen startas med att värme tas in från omgivningen genom en kollektorslang som är kopplad till förångaren. I förångaren överförs denna värme enligt termodynamikens lagar från köldbäraren i kollektorslangen till ett kallare kylmedium. Kylmediet är ett ämne som har låg kokpunkt (vanligen vid temperaturer $< 0^\circ\text{C}$), vilket leder till att detta ämne övergår från flytande fas till gasfas med hjälp av den tillförda värmen. Med hjälp av expansionsventilen kan trycket i förångaren regleras och således kan även temperaturen då fasomvandlingen sker kontrolleras.
2. Kompressor – Kylmediet, som efter temperaturhöjningen befinner sig i gasform, sugas in i kompressorn där gasen komprimeras vilket leder till att trycket och således även temperaturen ökar.
3. Kondensor – Till kondensorn förs det komprimerade kylmediet som är i gasform. Detta är den del av värmepumpen som står i kontakt med husets värmesystem. På grund av det höga tryck som den komprimerade gasen nu har är temperaturen högre än temperaturen hos värmesystemet, vilket leder till en värmeöverföring till husets värmesystem. När värme flödar från den komprimerade gasen så kyls denna ned och övergår till flytande fas, men trycket är dock fortfarande högt.
4. Expansionsventil – Kylmediet som nu är i vätskeform transporteras vidare till expansionsventilen, där trycket sänks och vätskan expanderar. Kylmediet leds sedan tillbaka till förångaren, för att påbörja ett nytt varv i systemet.



Figur 11 Schematisk bild av värmepumpen och dess viktigaste delar (bild från SVEP, 2005)

För att kunna driva motorerna i kompressorn och således hela processen för omvandling av den lagrade energin behövs ett tillskott av energi. Genom att tillföra elektrisk energi från t.ex. olja, kol eller någon annan energikälla, kan värmepumpen hållas igång. Mängden tillförd elektrisk energi är dock mindre än värmeenergi som kan utvinnas med hjälp av pumpen.

3.2.2.1 Köldbärarvätskan

En viktig komponent både ur miljö- och effektivitetssynpunkt är vätskan som drivs runt i kollektorslangen. Denna vätska kallas köldbärarvätska och har till uppgift att ta upp värme från berggrunden och transportera den till värmepumpen där den sedan konverteras till värmeenergi. Den säkraste köldbäraren ur ett miljöperspektiv är vanligt vatten, där ingen som helst miljöpåverkan sker vid eventuellt läckage. Problemet är dock att marken i Sverige inte är varm nog för att driva en värmepump med endast vatten som köldbärare. För att undvika problem vid lägre temperaturer tillsätts olika ämnen, vissa organiska som till exempel, etanol, glykol och rapsolja, samt vissa oorganiska som kalciumklorid och kaliumkarbonat. Samtliga av dessa ämnen har relativt låg giftighet. En annan aspekt som är viktig att tänka på är vätskans densitet, som bör vara mindre än eller lika stor som densiteten för vatten. Är så fallet kan trycket i kollektorslangen kontrolleras så att det är mindre än trycket i grundvattnet som omger slangen och vid ett eventuellt läckage kommer inte köldbäraren läcka ut utan snarare kommer lite av grundvattnet att sippra in i kollektorslangen. En vanlig köldbärare som använts länge är vatten (3/4) blandat med etanol (1/4) som har en fryspunkt på -15°C och en densitet på $0,97 \text{ kg/dm}^3$ vid en drifttemperatur på 0°C (SVEP, 2005). Det går även att ha en större del etanol, men detta gör att fryspunkten sänks vilket leder till att det blir en större temperaturskillnad mellan köldbärare och kylmedium och värmefaktorn sänks (se kapitel 3.2.3.2). Ett praktiskt köldbärartest har utförts med 7 olika köldbärare (Råmbin, personlig kontakt), som testades vid två olika driftfall; $T_{\text{ute}} = -18^{\circ}\text{C}$ och $T_{\text{ute}} = 0^{\circ}\text{C}$: Resultatet redovisas i Tabell 2 nedan.

Tabell 2 Resultat av test för köldbärare vid de olika utomhustemperaturer -18°C samt 0°C. Tabellen visar värmepumpens erhållna effekt samt verkningsgraden

<i>Köldbärare</i>	<i>T_{ute} = -18°C, Effekt [KW]</i>	<i>T_{ute} = -18°C Verkningsgrad</i>	<i>T_{ute} = 0°C Effekt [KW]</i>	<i>T_{ute} = 0°C Verkningsgrad</i>
GEM-12	225	58 %	135	63%
Etylenglykol-18	196	51 %	122	58%
Etanol-17	193	50,5 %	107	51%
Propyleglykol-18	192	50 %	106	50%
Biotherm 01 -20	191	50 %	106	50%

I Tabell 2 anger siffrorna efter namnet den minimala arbetstemperatur som vätskan fungerar inom. Tabellen visar att GEM fungerar bäst vid båda fallen och skulle således vara ett mycket bra alternativ att använda som köldbärare. Det faktum att GEM bara kan arbeta ned till -12°C innebär dock inget problem i Sverige, eftersom marktemperaturen inte blir lägre än maximalt ett par minus grader.

3.2.2.2 Kylmediet

En annan faktor som spelar en stor roll både för effektiviteten på bergvärmeanläggningen och ur miljöperspektiv är valet av vätska som används som värmeöverförare inne i värmepumpen, det så kallade kylmediet. I äldre värmepumpar användes nästan uteslutande halogenerande kolväten (så kallade freoner) som har den kemiska beteckningen CFC och HCFC som kylmedier. Dessa har dock en starkt nedbrytande effekt på ozonlagret och är även starka växthusgaser, och de är därför enligt lag förbjudna att använda. För CFC gäller att sedan 1998 är det stopp för påfyllnad och 2000 stopp för användning och för HCFC gäller att det sedan 1988 är stopp för nyinstallation och 2002 stopp för påfyllnad (Svensk Kylvnorm, 2005). Idag används mestadels ämnen som går under förkortningen HFC som kylmedier i värmepumpar. Även de är växthusgaser men de är flourerade vilket gör att de inte bryter ned ozonlagret. För en komplett lista över gränsvärden för användning, miljörisker med mera, hänvisas till Svensk Kylvnorm, utgiven av Naturvårdsverket.

3.2.2.3 Kollektorslangen

Kollektorslangen är den slinga av slangar som transporterar köldbärarvätskan i ett slutet system från värmepumpen vidare till energibrunnen och sedan tillbaka igen. Den är vanligtvis tillverkad av polyeten och är 32/40 mm i diameter. För att undvika att det bildas veck på slangen i botten på energibrunnen så svetsas en U-böj fast på slangen. Detta leder till att köldbäraren kan cirkulera utan hinder i det slutna systemet. Den del av slangen som inte ligger i själva energibrunnen kommer att ligga horisontellt (se Figur 2 och Figur 17) och det är viktigt att denna del inte ligger för grunt. Skulle denna ligga ovanför frostdjupet kan problem uppstå om inte kollektorslangen är isolerad eller om inte köldbäraren är anpassad till dessa förhållanden.

3.2.3 Energieffekter

3.2.3.1 Den ideala processen

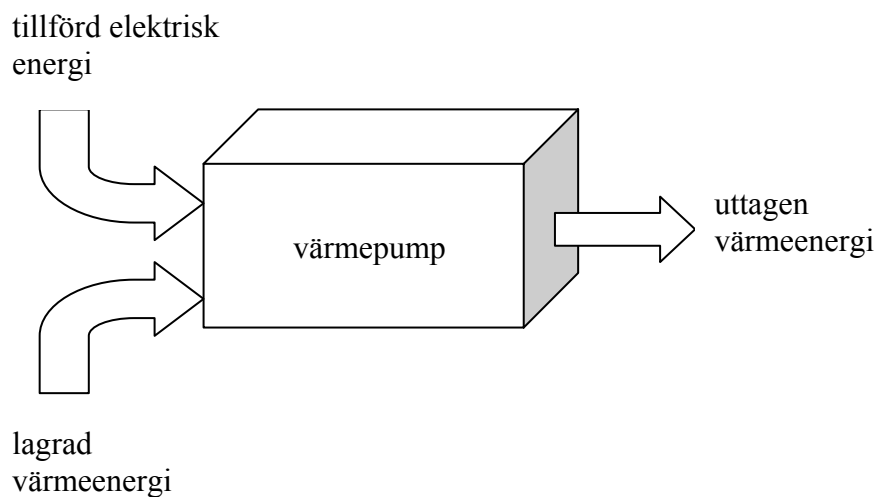
För att kunna bestämma värmepumpens prestanda beräknas hur effektiv värmepumpen är på att överföra den tillförda energin från värmekällan till energi som kan användas i uppvärmningssyfte. I den ideala processen skulle energin från värmekällan tillsammans med den tillförda elektriska energin som behövs för att driva kompressorerna i värmepumpen vara lika stor som energin som kan tas ut från pumpen i form av energi till uppvärmning (se Figur 12):

$$Q_{ut} = Q_{in} + E \quad (10)$$

Q_{ut} = uttagen värmeenergi [J]

Q_{in} = tillförd värmeenergi från värmekällan [J]

E = tillförd elektrisk energi [J]

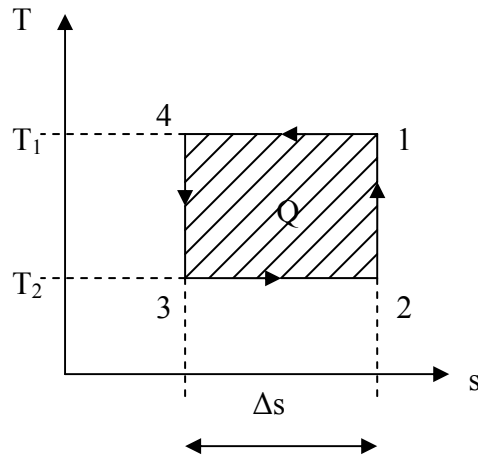


Figur 12 Den ideala processen där den lagrade värmen från energikällan och den tillförda elektriska energin ska vara lika stor som den uttagna värme energin

Den ideala processen som beskrivs ovan är en enklare förklaring av en process som kallas den omvända Carnot-processen. Det är en teoretisk process som beskriver den mest effektiva termodynamiska maskin som arbetar mellan temperaturerna T_1 och T_2 . Processen är en reversibel cyklisk process i fyra olika steg enligt:

- 4-3: Isentrop kompression ($Q = \text{konst}$), temperaturen går från T_1 till T_2 där $T_1 > T_2$
- 3-2: Isotermisk expansion ($T = \text{konst}$), värmemängd q_{tillf} upptas
- 2-1: Isentrop expansion från punkt, temperaturen går från T_2 till T_1 där $T_1 > T_2$
- 1-4: Isotermisk kompression, värmemängd q_{bortf} avges

Detta visas nedan i Figur 13:



Figur 13 En illustration hur den omvända Carnot-processen som teoretiskt arbetar. Carnot processen har en maximal verkningsgrad för en termodynamisk maskin som arbetar mellan två temperaturer

Detta gör att den tillförda och den avgivna värmen för en hel cykel blir (Alvarez, 1990):

$$q_{tillf} = T_1 \cdot \Delta s \quad (11)$$

$$q_{bortf} = T_2 \cdot \Delta s \quad (12)$$

q_{tillf} = värdet av den bortförde värmen [J]

q_{bortf} = värdet av den tillförda värmen [J]

T_1 = temperaturen ut från systemet [K]

T_2 = temperaturen in till systemet [K]

Δs = systemets entropiändring [$J \cdot K^{-1} \cdot K^{-1}$]

3.2.3.2 Värmefaktorn

På grund av bland annat termodynamiska förluster i värmepumpens olika delar är den ideala processen inte möjlig. En värmepumps effektivitet anges med hjälp av dess värmefaktor (Coefficient Of Performance, COP) som definieras som förhållandet mellan avgiven värme från kondensorn och tillförd elektrisk effekt i kompressorn. Värmefaktorn (Alvarez, 1990) blir således:

$$\Phi = \frac{|q_{bortf}|}{|w|} \quad (13)$$

Φ = värmefaktorn [dimensionslös]

q_{bortf} = absoluta värdet³ av den bortförde värmen [J]

w = absoluta värdet av kompressorarbetet [J]

³ Absolutbeloppen $|w|$ och $|q_{bortf}|$ används eftersom q_{bortf} är den bortförda värmen och är definierad som < 0 och w är arbete som utförs och är således även den < 0 . Detta leder till att absolutbeloppen på de båda termerna behövs för att få en värmefaktor som är > 0 .

Termodynamikens första lag säger att energi varken kan skapas eller förintas, och anpassat till värmepumpen så ger detta:

$$q_{tillf} - |q_{bortf}| - |w| = 0 \quad (14)$$

Omflyttning ger att den avgivna värmen är summan av den tillförda värmen och det utförda arbetet:

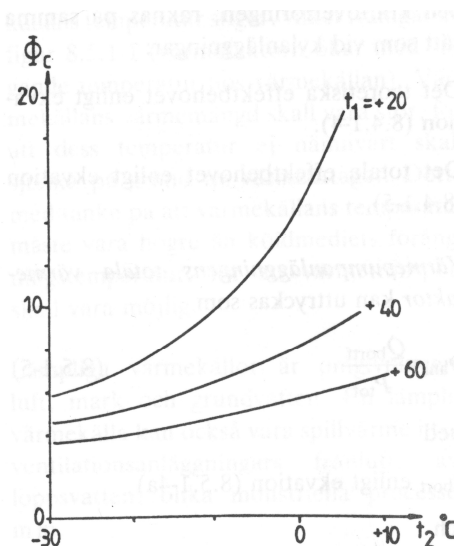
$$|q_{bortf}| = q_{tillf} + |w| \quad (15)$$

Detta gör att värmefaktorn alltid är större än 1 på grund av att den tillförda energin alltid kommer att vara > 0 . Det är ekvationen ovan som är det kritiska sambandet som förklarar hur värme kan strömma från ett område med relativt låg temperatur till ett område med hög temperatur. Det visar att den uttagna värmen är summan av den tillförda värmen och det utförda arbetet.

Om man teoretiskt antar att värmepumpsprocessen är en omvänd Carnot-process så leder detta till, efter insättning av ekvationerna ovan, i att den största värmefaktor som kan uppnås är (Alvarez, 1990):

$$\Phi_c = \frac{|q_{bortf}|}{|w|} = \frac{1 - T_2}{T_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (16)$$

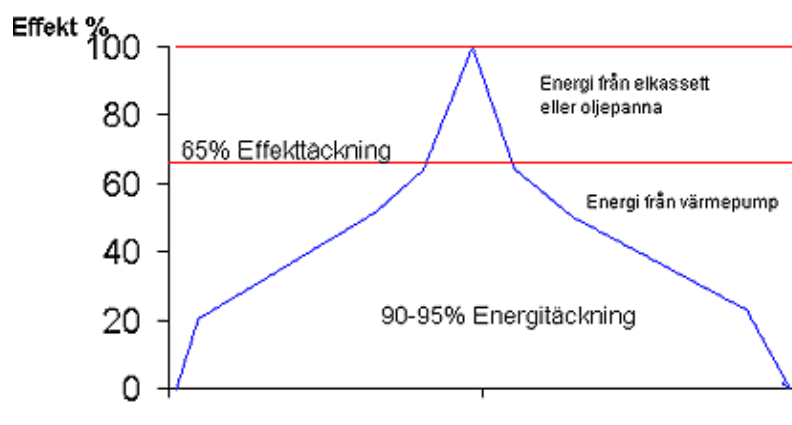
För att förklara värmefaktorn lite mera explicit så betyder detta att om en värmepump har en värmefaktor på tre innebär det att för varje enhet tillförd effekt av elektrisk energi som driver kompressorn kommer tre gånger så mycket effekt i form av värmeenergi att kunna utvinnas ur värmepumpen. Eftersom temperaturförändringar kommer att påverka processen ändras värmefaktorn vid olika temperaturer se Figur 14. Denna och även ekvationen ovan visar att en mindre skillnad i temperaturen mellan kylmediet och köldbäraren kommer att leda till en högre värmefaktor. Eftersom värdet på värmefaktorn ändras vid olika temperaturer finns det standardiserade mätvärden för två olika driftfall för värmepumpar. Det första fallet är en temperatur på $\pm 0^\circ\text{C}$ på det inkommande kylmediet och $+35^\circ\text{C}$ på den utgående vätskan från värmepumpen (betecknas 0/35), och det andra fallet är $\pm 0^\circ\text{C}$ in till värmepumpen och $+50^\circ\text{C}$ ut från pumpen (betecknas 0/50). En bra värmepump som används för utvinning av energi från jord- eller bergvärme har värden som ligger runt 4,7 vid 0/35 och 3,4 vid 0/50 (SEV, 2005). En lägre temperaturhöjning leder till en högre värmefaktor på grund av att kompressorn behöver arbeta mindre när temperaturdifferensen är mindre.



Figur 14 Carnots värmefaktor Φ_c som funktion av temperaturen hos kylmediet, t_1 , och temperaturen hos köldbäraren, t_2 , (bild från Alvarez, 1990)

3.2.3.3 Dimensionering

När en värmepump ska dimensioneras görs först en energistudie för de lokaler som pumpen ska försörja. För att undvika alltför stora slitage på värmepumpen och en för stor förbrukning av elektricitet, genom alltför många starter och stopp som en 100 % effekttäckning skulle medföra (Råmbin. N., muntlig), dimensioneras värmepumpen mellan 60-65 % av det högsta effektbehovet. Detta leder till att ungefär 90-95 % av energiförbrukningen under ett helt år härstammar från värmepumpens energiutvinning (SEV, 2005). De tillfällen då effekten överstiger pumpens kapacitet används tillsatsenergi som vanligtvis kommer från elpatroner, fjärrvärme eller annan energikälla.



Figur 15 Effekttuttagsdiagram som visar hur en dimensionering av pumpen på 65 % täcker 90-95 % av effektbehovet. Endast de dagar med de allra lägsta utomhustemperaturerna och således största effektbehoven behöver tillsatsenergi (bild från SEV, 2005)

3.2.3.4 Energibrunnens teoretiska värmeuttag i förhållande till borrhjup

För att undersöka om ett tilltänkt område är lämpligt för bergvärmeupptag kan den teoretiska kyleffekten undersökas. Den beskriver hur mycket energi som kan tas ur berget för olika borrhjup, och kan härledas med hjälp av Ekvation 4 och av flödesekvationen som beskriver det radiella värmeflöden i berggrunden, antaget att det är stationära förhållanden. Vidare gäller för temperaturdifferensen:

$$(T_o - T_b) \cdot \lambda = \phi \quad (17)$$

Flödesekvationen blir:

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr} = 0 \quad (18)$$

Ersättning av $\phi' = \frac{d\phi}{dr}$ ger efter integration:

$$r\phi' = C_1 = \text{konst.} \quad (19)$$

Återgång till begynnelsevariabler och förnyad integration ger:

$$\phi = (T_o - T_b) \cdot \lambda = C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (20)$$

Värmeflödet genom varje cylinder med radien r måste vara lika med uttaget P:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot r \cdot \frac{d\phi}{dr} \quad (21)$$

Vilket leder till att:

$$r \cdot \frac{d\phi}{dr} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot H} \quad (22)$$

Vilket efter integration ger:

$$\phi = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot H} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) + C_3 \quad (23)$$

Efter jämförelse med Ekvation 20 fås:

$$C_1 = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot H} \quad (24)$$

Ekvation 17, 20 och 24 leder då till:

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot \lambda \cdot (T_o - T_b)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} + C_3 \quad (25)$$

P = det stationära värmeuttaget [W]

H = energibrunnens djup [m]

T_b = temperaturen i energibrunnen [K]

T_o = ostörda marktemperaturen [K]

D = brunnens diameter [m]

λ = värmekonduktiviteten hos bergrunden [W·m⁻¹·K⁻¹]

r₁ = energibrunnens influensradie [m]

r₂ = energibrunnens radie [m]

I denna ekvation antas det stationära värmeuttaget utanför energibrunnens influensradie vara noll, vilket leder till att C₃ är noll. Den slutgiltiga ekvationen blir således:

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot \lambda \cdot (T_o - T_b)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (26)$$

Denna ekvation kan användas för att undersöka det teoretiska energiuttaget ur en energibrunn med ett viss djup. Den kan även användas till att uppskatta ett visst borrhjup då den energi som ska utvinnas är bestämd.

3.2.4 Beskrivning av olika värmepumpsystem

Det finns ett antal olika system som använder den naturliga uppvärmningen av jorden och med hjälp av en värmepump konverterar den till värme för värmereglering av t.ex. bostadshus eller andra lokaler. De fyra vanligaste systemen är:

1. Grundvattenvärme
2. Sjövattenvärme
3. Ytjordvärme
4. Bergvärme

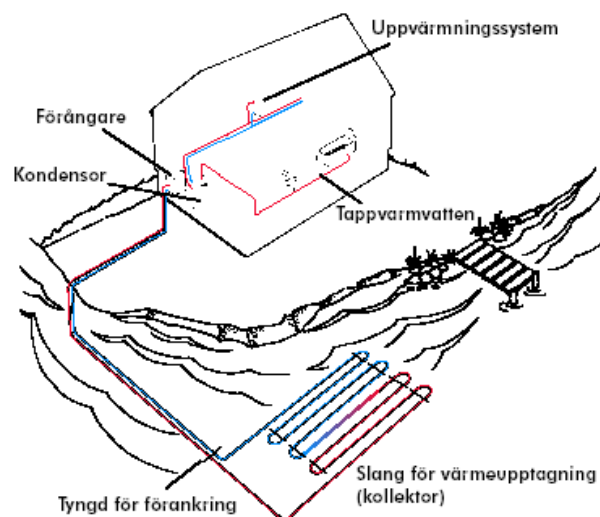
3.2.4.1 Grundvattenvärme

Grundvattenvärmesystem utnyttjar grundvattnet direkt som värmekälla. I en djupborrad brunn pumpas vattnet upp och förs vidare till en värmepump där omvandling till värmeenergi sker. Vattnet pumpas sedan vidare ut tillbaka till akvifären genom ytterligare en brunn eller genom ett annat vattendrag. Problemet med detta system, som inte finns hos de andra systemen, är att grundvattnet kontinuerligt flyttas ifrån sin akvifär, vilket innebär att ett krav för installation är att tillgången på grundvatten är god. Det är även viktigt att infiltrationen tillbaka fungerar korrekt annars kommer akvifären hela tiden tappas på vatten vilket resulterar i en grundvattensänkning. Detta påverkar de naturliga förhållandena, den egna driften av brunnen och kanske även andra brunnar i närheten. En annan fara är risken för föroreningar,

framförallt eftersom felaktigt konstruerade brunnar är en väg för pesticider och andra föroreningar ner till underliggande akvifärer.

3.2.4.2 Sjövattnenvärme

Vid utvinning av värmeenergi från sjövattnen utnyttjas det faktum att temperaturen vid botten i en sjö är stabil oberoende av årstiden. En lång slang placeras på sjöbotten och för att denna ska ligga kvar fästs vikter som tynger ner systemet (se Figur 16). Slangen innehåller en köldbärare som värms upp av det omkringliggande varmare bottenvattnet och förs sedan vidare upp till värmepumpen där energi utvinns. Att placera den del av slangen som leder den kallare köldbärarvätskan från värmepumpen till sjön en bit ifrån den del av slangen som leder den varmare köldbärarvätskan som förs från sjön till värmepumpen leder till att även värmeöverföringseffekter från yttjordvärme kan utnyttjas (se kapitel 3.2.4.3 nedan).



Figur 16 Schematisk bild på ett system med sjövattnenvärmepump (bild från SVEP, 2005)

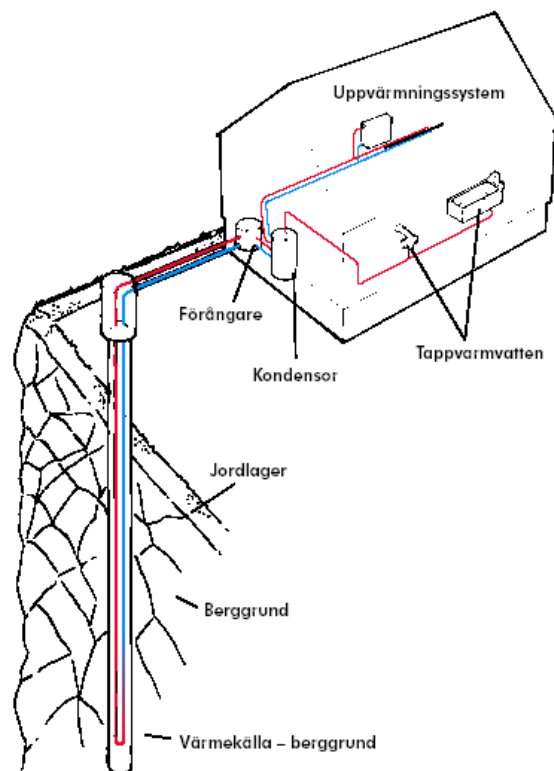
3.2.4.3 Yttjordvärme

Genom att använda samma princip som sjövattnenvärme men istället placera en slang på ett djup större än frostdjupet (cirka 1-1,5 m i Sverige) kan värmen i marken utnyttjas. På vilket djup slangen bör ligga beror bl.a. på anläggningens geografiska läge. I slangen cirkulerar en köldbärare som värms upp och förs vidare till värmepumpen. En viktig aspekt är att inte lägga slangarna för tätt eftersom det kan leda till för stort värme uttag och tjälbildning runt slangarna. Detta system passar bra för bostadsuppvärmning där stora ytor kan utnyttjas för utplaceringen av slangen. Mark med hög vattenhalt leder även till bättre överföring av värmen från marken till köldbärarvätskan.

3.2.4.4 Bergvärme

Genom att placera slangen vertikalt istället för horisontellt som i fallet vid energiutvinning med hjälp av yttjordvärme, används den lagrade värmen i berggrunden. Detta leder till att en mindre yta behövs för anläggningen av systemet. En, eller flera i kontakt med varandra djupa

brunnar (upp till ca 200 m) borrar och i dem förs en u-slang ner, den så kallade kollektorslangen. Kollektorslangen bildar således ett slutet system vilket leder till att köldbärarvätskan aldrig kommer i kontakt med grundvattnet (se Figur 17). På detta sätt så transporteras det uppvärmda köldbärarvätskan på ett säkert sätt upp till värmepumpen, där den lagrade värmen i berggrunden omvandlas till konventionell värmeenergi.



Figur 17 Schematisk bild på ett bergvärme system (bild från SVEP, 2005)

I Tabell 3 redovisas fördelar samt nackdelar för de 4 vanligaste systemen som utvinner energi från mark, jord, berggrund eller vatten med hjälp av ett värmepumpsystem.

Tabell 3 Översikt över de fyra vanligaste systemen för utvinning av värmeenergi

System	Värmekälla	Fördelar	Nackdelar
Grundvattenvärme	Grundvatten	Inga ämnen i köldbäraren som är farliga för naturen	- Risk för sänkning av grundvatten nivån - Risk för förorening av grundvattnet
Sjövattenvärme	Sjövatten	- Ingen borrhning krävs - Konstant temp. på bottenvattnet	- Närhet till vattendrag måste finnas - Relativt låg temp.
Ytjordvärme	Ytjorden 1,0-1,5 m ner i jorden	Ingen borrhning krävs	- Stor markareal krävs - Relativt låg temp.
Bergvärme	Berggrunden, ner till ung. 300 m	- Hög temp. på stort djup - Liten markareal krävs	Djup borrhning krävs

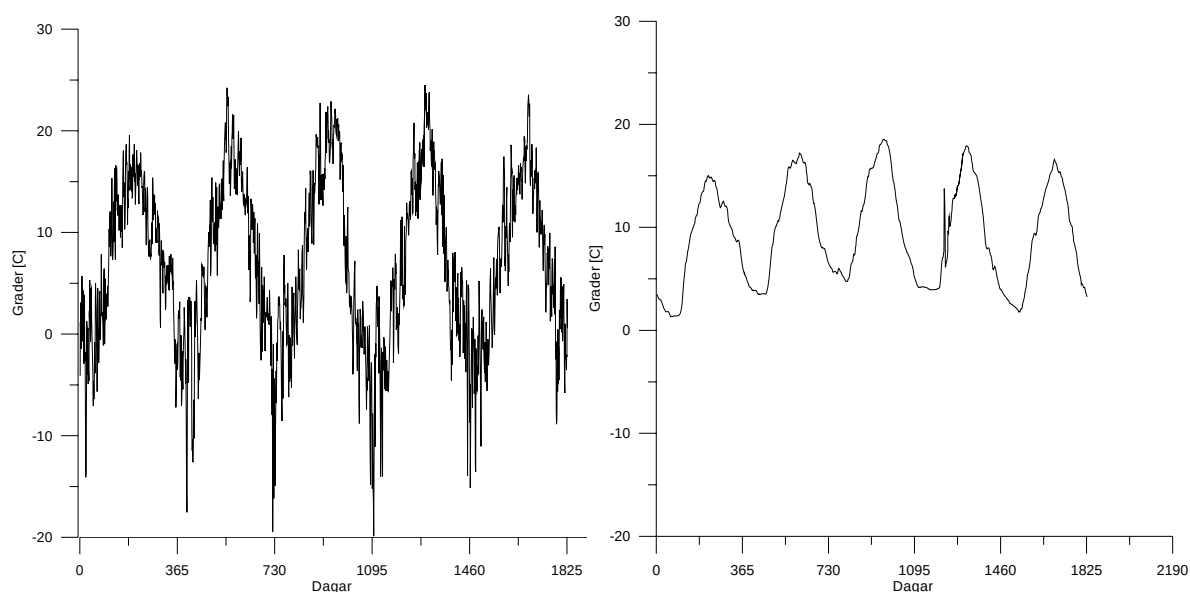
4 RESULTAT

4.1 TEMPERATURFÖRÄNDRINGAR

Temperaturförändringar i marken, luften och grundvattnet sker hela tiden med olika storlekar beroende på vilken tidsrymd man studerar. Dessa temperaturförändringar kommer att leda till att även bergvärmesystemets effektivitet påverkas, och således även hur mycket tillsatsenergi som måste köpas.

4.1.1 Temperaturförändringar i mark och luft

För att en rättvis bedömning av värmepumpssystemets prestanda ska kunna göras, krävs även en undersökning av hur temperaturen har förändrats under den aktuella perioden. För att göra detta erhöles data från Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet. De data som fanns att tillgå och som var relevant var dagliga temperaturmedelvärden på luften från 2000-01-01 (dag 1) till 2004-12-31 (dag 1827), samt temperaturer under samma period på ett markdjup av 100 cm.

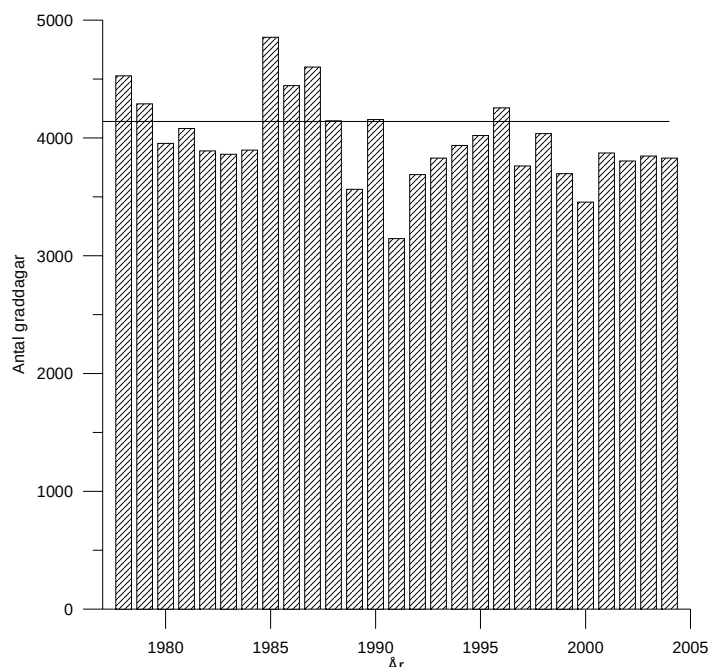


Figur 18 Dygnsmedeltemperaturen för luften i Uppsala i luften till vänster, och på ett markdjup av 100 cm till höger. I båda figurerna motsvaras dag 1 av 2000-01-01 och dag 1827 av 2004-12-31

Som ses i Figur 18 följer de båda temperaturgraferna varandra vilket är att vänta. Den stora skillnaden som ses redan på ett så litet djup som 100 cm är att temperatursvängningarna är mycket mindre. De dagliga temperatursvängningarna existerar knappt på 100 cm djup, utan de variationer som syns är årstidsvariationerna. På 100 cm djup går temperaturen aldrig under 0°C, vilket är viktigt när ett bergvärmesystem undersöks med tanke på den del av kollektorslangen som ligger horisontellt mellan energibrunnen och värmepumpssystemet. Ett mått som visar hur temperaturen har förändrats mellan år är antalet graddagar. Det är ett mått på hur temperaturen under det aktuella året har varit och definieras i detta sammanhang som, summerat över ett år, antalet grader per dag då temperaturen understiger 17°C. Detta visas nedan med en enkel matematisk formel:

$$\sum_i^n (17 - T_i) \quad \text{för } T_i \leq 17 \text{ och } i \leq 365, \text{ där } i = \text{dagnummer}$$

En normalgrad för Uppsala är 4140° (Energimyndigheten, 2005).

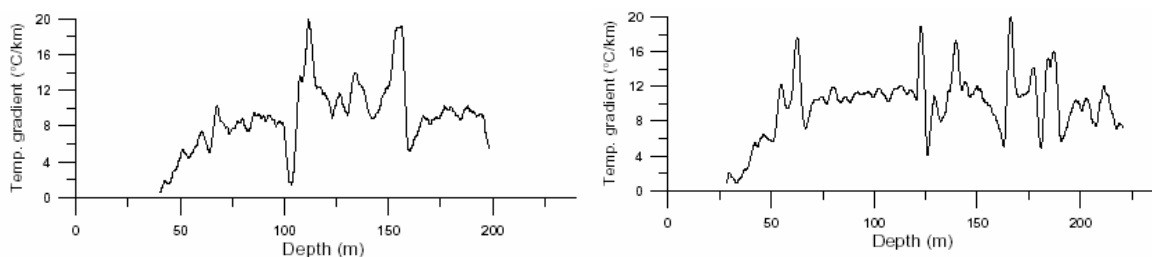


Figur 19 Antalet graddagar, det vill säga antalet grader per dag då temperaturen understiger 17° under ett år, för Uppsala från åren 1978-2004. En normalgrad för Uppsala är 4140 och den visas i grafen med en linje.

I Figur 19 kan en avtagande trend för den aktuella tidsperioden. I 19 av de totalt 27 åren har ett lägre antal graddagar än de som anses vara ett normalt värde. Detta betyder att temperaturen under perioden har ökat.

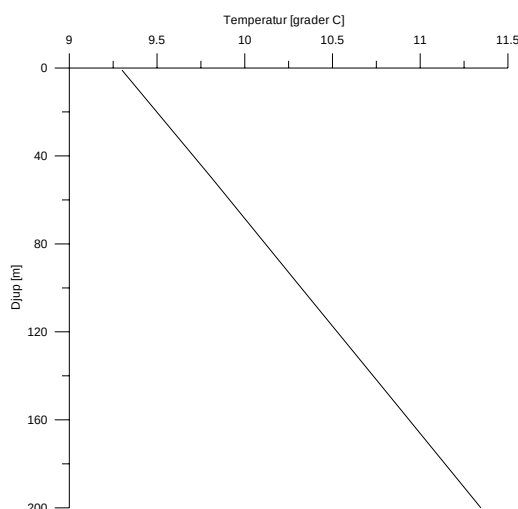
4.1.2 Temperaturförändringar i djupet

Den vertikala temperaturförändringen i marken spelar en stor roll för hur mycket värme som kan överföras från berggrunden och grundvattnet till köldvätskan i kollektorslangen. En högre temperatur på berggrunden och grundvattnet leder till att mer energi kan utvinnas ur energibrunnen och användas för uppvärmning. Svensk kärnbränslehantering AB (SKB) har utfört en rad djupare borrhål för studier av berggrunden vid deras provtagningsområden i Forsmark, som ligger ungefär 80 km nordväst om Uppsala. Berggrunden vid dessa platser domineras av bergarter som har en mineralsammansättning som motsvaras av granit (Mattson m.fl., 2004, samt Thunehed, 2004) och de kan därför jämföras med berggrunden vid Brf Duvan på Petterslundsgatan. Den vertikala temperaturgradienten är beräknad från grundvattentemperaturer uppmätta i sektioner om 9 meter och visar temperaturförändringen i °C/km. I Figur 20 visas temperaturgradienten i 2 av dessa provtagningsborrhål.



Figur 20 Den vertikala temperaturgradienten i grundvattnet som funktion av djupet vid 2 stycken av SKB:s provtagningsbrunnar i Forsmark. Till höger från provtagningsbrunn HMF05 och till vänster HMF04 (från Thunehed, 2004)

En kraftig minskning av temperaturgradienten är en följd av att en vertikal sprickbildning finns på detta djup. En vertikal sprickbildning leder till att vattnet snabbt transporteras i vertikalled vilket leder till en lägre temperatur på vattnet än vad som annars skulle vara fallet. Temperaturmedelvärdet för temperaturgradienten i de 6 provtagningsborrhål som SKB har redovisat i sina rapporter är på $10,2^{\circ}\text{C}/\text{km}$. En graf som visar temperaturen som funktion av djupet visas i Figur 21.



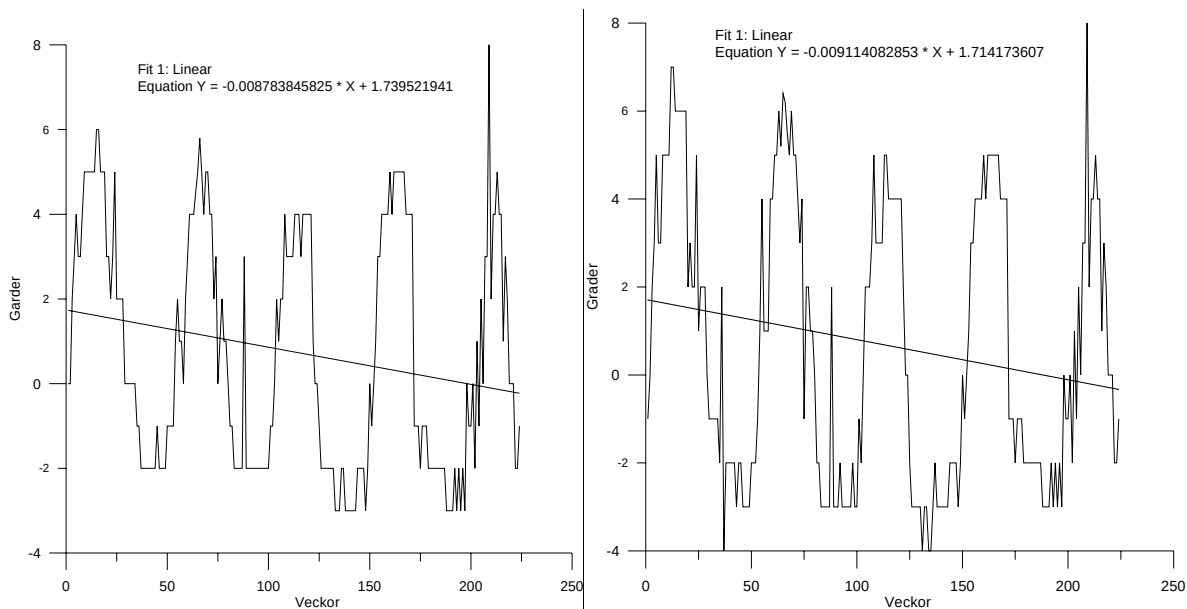
Figur 21 Temperaturen som funktion av djupet, beräknat från SKB:s rapporter

Denna figur baseras endast på aktuell temperatur i marken på 100 cm djup och den beräknade temperatur gradienten. Som temperatur på markytan användes de data från Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet där medeltemperaturen under de 4 åren på 100 cm markdjup var $9,3^{\circ}\text{C}$ (se Figur 18). Med en temperaturgradient på $10,2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ kommer temperaturen på 200 meters djup att vara $11,3^{\circ}\text{C}$ och på 250 meters djup kommer den att vara $11,8^{\circ}\text{C}$.

4.1.3 Temperaturförändringar på köldbärarvätskan

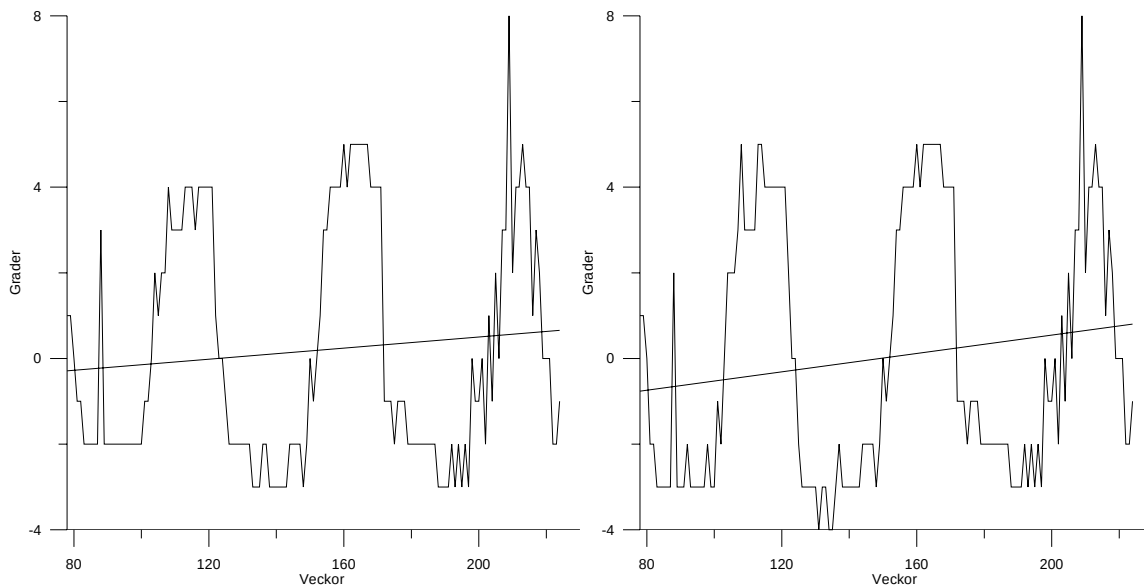
Temperaturen i energibrunnen är en av de parametrar som avgör hur stort energiuttaget är och således väldigt viktigt. Ett sätt att prediktera temperaturförändringen i energibrunnen är att kontinuerligt mäta temperaturen på köldbärarvätskan, både in och ut från värmepumpen. Temperaturen på dessa vätskor har undersökts för Brf Duvan och resultaten av dessa mätningar visas i Figur 22 där köldbärarvätskan in till värmepumpen (det vill säga ifrån

energibrunnen) visas till vänster och ut från värmepumpen (det vill säga in till energibrunnen) visas till höger. Dataserien har veckovis dokumenterats från 2000-04-25 som har veckonummer 1, och pågår fram till 2004-10-26 som har nummer 235. Vad man kan se i båda graferna är att temperaturen på köldbärarvätskan konstant har minskat sedan systemet sattes i bruk. Detta beroende på att berggrundens temperatur har minskat lika mycket under perioden. Man har som en tumregel att det tar ungefär 5 år innan värmebalansen i berggrunden stabiliseras när ett bergvärmesystem installeras, och att temperaturen under denna period kommer att minska med 1-2°C (Löfbom R., muntlig).



Figur 22 Köldbärarvätskan in (till vänster) och ut (till höger) från värmepumpen som en funktion av tiden. Vecka nummer 1 i figuren motsvaras av 2000-04-25 och vecka nummer 236 av 2004-10-26

När temperaturen på den inkommande köldbärarvätskan sjunker kommer värmepumpen att kompensera för detta och även sänka temperaturen på den utgående köldbärarvätskan för att inte energiuttaget ska minska. Som figuren visar kommer det att leda till att temperaturförändringarna kommer att följa varandra. Det är nu 5 år sedan bergvärmesystemet i Brf Duvan sattes igång och den negativa temperaturförändringen i berggrunden borde plana ut för att sedan bli konstant. Detta visas även nedan i Figur 23. I denna figur har temperaturen på köldbärarvätskan både in och ut från värmepumpen som funktion av tiden de 3 senaste åren plottats, där vecka nummer 78 motsvarar 2001-10-16 och vecka nummer 224 motsvarar 2004-08-03. Här ser man tydligt att när en linjär anpassning till grafen görs så är dess lutning aningen positiv både för den ingående och för den utgående köldbärarvätskan. Dessa skulle kunna visa att temperaturen i berget slutat sjunka och blivit stabil.



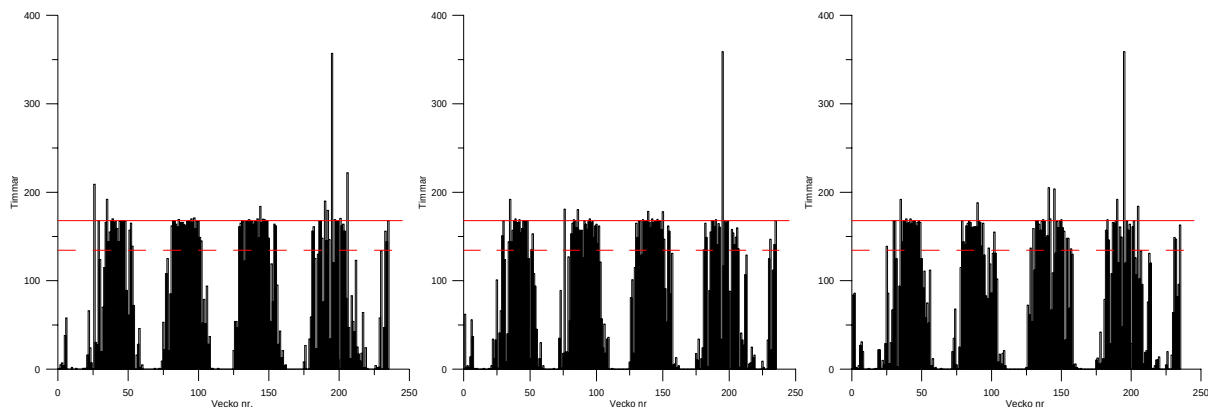
Figur 23 Köldbärarvätskan in (till vänster) och ut (till höger) från värmepumpen som en funktion av tiden de senaste 3 åren. Vecka nummer 78 motsvaras av 2001-10-16 och vecka nummer 224 av 2004-08-03

4.2 ENERGIRESULTAT

För att kunna studera hur bergvärmesystemet verkligen fungerar har olika energianalyser utförts. Dels har kompressorernas drifttider undersökts, energiuttaget per brunn har teoretiskt beräknats och även en analys över energiförbrukningen gjorts, som baserats på den faktiska förbrukningen enligt de energibolag som anlitats. Detta beskriver hur mycket energi som gick åt innan pumpen installerades och hur mycket som användes år 2004, 5 år efter det att pumpen har installerats.

4.2.1 Kompressorernas drifttid

En viktig aspekt ur energisynpunkt är att bergvärmesystemet är rätt dimensionerat. Över- eller underdimensionering leder bland annat till en energiutvinning som ej är optimal och slitage på värmepumpens komponenter. För att utreda detta har kompressorernas drifttider undersökts. I Figur 24 visas drifttiden per vecka för 3 av de 6 kompressorerna som används för utvinning av värmeenergi ur energibrunnarna (för samtliga se Appendix 5). Värden för den ackumulerade drifttiden för de individuella kompressorerna har veckovis dokumenterats från april 2000 och framåt. Eftersom detta har skett för hand och inte automatiskt lagrats i en dator, så fattas ett antal avläsningar. För att ändå kunna beräkna den veckovisa drifttiden så har de veckor som saknas interpolerats fram med räta linjens ekvation. I figuren har även en linje lagts till för att visa 100 % drifttid för en vecka (168 timmar), samt en streckad linje för 80 % drifttid för en vecka (134,4 timmar). Dessa värden används för att undersöka systemets dimensionering.



Figur 24 Drifttider för 3 av de 6 kompressorerna som används för att utvinna energi ur energibrunnarna på Brf Duvan. Vecka nummer 1 motsvaras av 2000-04-25 och vecka nummer 236 av 2004-10-26

På x-axeln i figuren visas veckonumren som startar den 2000-04-25 med veckonummer 1, och kontinuerligt löper till den sista veckan, 2004-10-26, som har nummer 236. Anledningen till att det finns värden i graferna som ligger över nivån för 100 % drifttid beror på att avläsningarna inte alltid skedde med exakt sju dagars mellanrum, vilket påverkar den ackumulerade drifttiden. Vad som genererade det extremt höga värdet vecka 135 (januari 2004) finns ingen förklaring till, förmodligen är detta en felavläsning.

Det intressanta ur dimensioneringssynpunkt är att undersöka när och hur ofta kompressorerna arbetar på 100 %, eller nästan 100 % drifttid. När man dimensionerar en värmepump så dimensionerar man den till 60-65 % av effektbehovet vilket leder till att ungefär 90-95 % av energibehovet under ett år har sitt ursprung från värmepumpen (SEV, 2005) se kapitel 3.2.3.3. Detta medför att kompressorerna ska ha en drifttid på 100 %, och därmed gå kontinuerligt, under de kalla vintermånaderna när mycket energi används för uppvärmning. Kompressorerna i Brf Duvan har en drifttid som uppgår till 100 % under de kallaste veckorna (motsvaras av veckorna 32-44, 84-96, 136-148, 188-200 i figuren) och är därför enligt Figur 24 bra dimensionerad ur kompressor synpunkt. Om en större del av året har en drifttid på 100 % betyder det att systemet är underdimensionerat och att en alltför stor mängd tillsatsenergi behövs under de kallare månaderna vilket är ekonomiskt olönsamt. Om å andra sidan kompressorerna sällan eller aldrig kommer upp i 100 % drifttid betyder det att systemet är överdimensionerat. Det leder till att kompressorerna sällan går kontinuerligt och istället ofta startar vilket kommer att leda till en stor förbrukning av elektricitet samt ett stort slitage på kompressorns delar (Råmbin N., muntlig).

4.2.2 Teoretisk beräkning av energiuttaget från energibrunnarna

Enligt Ekvation 26 kan den teoretiska värmeeffekten för en energibrunn beräknas. Ekvationen beskriver värmeöverföringen för ett cirkulärcylindriskt skikt, och är även en variant av Thiems brunnsekvation för radiell strömning vid stationärt tillstånd. I ekvationen antas medeltemperaturen på köldbärarvätskan in till värmepumpen under den tid som systemet har varit i drift ($= 0,75^{\circ}\text{C}$) vara lika med temperaturen i energibrunnen, det vill säga att värmekonduktiviteten för kollektorslangen är optimal. Den temperatur som används som temperatur i ostört berg sattes till $11,3^{\circ}\text{C}$ på ett djup av 200 meter och $11,8^{\circ}\text{C}$ på 250 meters djup efter avläsning i Figur 21. Det totala uttaget för en energibrunn med ett djup på 200 meter blir då:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 3,5 \cdot (11,3 - 0,75)}{\ln\left(\frac{200}{0,168}\right)}$$

$$Q = 6552 \text{ W}$$

För en pump med ett djup på 250 meter blir $Q = 8316 \text{ W}$. Detta gör att det totala energiuttaget för 17 energibrunnar med ett djup på 200 meter och 2 energibrunnar med ett djup på 250 blir:

$$17 \cdot 6551,9 + 2 \cdot 8316,0 = 119056 \text{ W}$$

Detta motsvarar ett årligt energiuttag på 1121 MWh/år. Den verkliga medelenergiförbrukningen som faktiskt ägde rum 1978-1999 enligt energibolagens rapporter var 1440 MWh/år. När bergvärmeanläggningen är i drift förbrukas även fjärrvärme i form av tillsatsenergi för de kallaste dagarna på året. För att få ett bättre värde på hur mycket energi som utvunnits ur energibrunnen måste den förbrukade tillsatsenergin subtraheras från förbrukningen. Årsmedelvärdet av energiförbrukningen från de år då bergvärmesystemet var i drift det vill säga 2000-2004 var 288 MWh/år. Värdet av energiförbrukningen som bergvärmesystemet står för, med antagandet att energiförbrukningen har hållits konstant under åren blir då:

$$1440 - 288 = 1152 \text{ MWh/år}$$

I tabellform blir då jämförelsen:

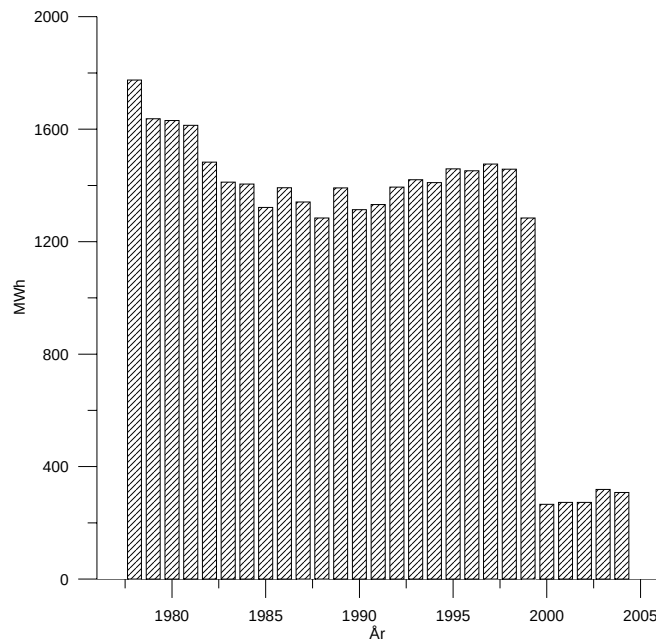
Tabell 4 Jämförelse mellan verklig och teoretisk förbrukning av energi

Verklig utvinning [MWh/år]	Teoretiskt utvinning [MWh/år]
1152	1121

Detta visar att den verkliga energiutvinningen ur energibrunnen är mycket lika den som beräknats fram med hjälp av Ekvation 26. Värdet på den teoretiska utvinningen är dock osäker. Små förändringar, speciellt i temperaturerna på respektive djup, spelar en stor roll för det beräknade energiutvinnandet. En annan orsak till inkorrekta värden kan vara grundvattenströmningen i berggrunden, vilken kommer att öka temperaturen i berggrunden och således öka den energimängd som kan utvinnas. Några justeringar för detta har ej tagits med utan temperaturer och ekvationer utgår ifrån det sämsta tänkbara förhållandet, det vill säga att det inte finns någon sprickbildning och således inte heller någon grundvattengenomströmning.

4.2.3 Fjärrvärmeförbrukning

Innan installationen av bergvärmesystemet användes fjärrvärme för att värma upp lägenheter och lokaler i Brf Duvan. Detta gjorde att fjärrvärmeanvändningen var mycket hög (se Figur 25) från 1978 fram till och med år 1999.



Figur 25 Fjärrvärmeanvändningen 1978-2004 för Brf Duvan. År 2000 installerades bergvärmesystemet

När sedan bergvärmesystemet installerades år 2000 så skedde en kraftig minskning av fjärrvärmeanvändningen. Fjärrvärme används dock fortfarande eftersom värmepumpen inte har en 100 % effekttäckning, och vid mycket kalla dagar behövs det tillsatsenergi, som i Brf Duvans fall kommer från fjärrvärme. Figur 25 visar även att fjärrvärmeanvändningen är någorlunda konstant från 2000 fram till och med 2004. De förändringar som existerar beror på att innetemperaturen i lägenheterna har reglerats, vilket leder till att mer eller mindre fjärrvärme går åt under de kalla dagarna då tillsats energi behövs (Löfbom R., muntlig). Förbrukningsdata beskrivs även i Tabell 5, där även den framräknade förändringen redovisas. Förändringen i förbrukning mellan t.ex. år 1999 och 2004 uppgår till en minskning på 896 MWh eller 75 %, vilket är ett mycket bra värde.

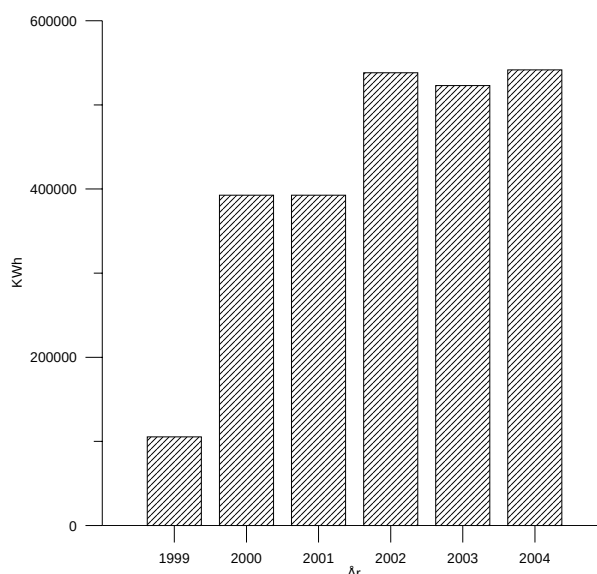
Tabell 5 Beskrivning av fjärrvärmeförbrukningen 1999-2004 samt den aktuella energiförändringen som bergvärmesystemet har medfört

År	Förbrukning [MWh]	Förändring från år 1999 %
1999	1187	0 %
2000	233	-80 %
2001	260	-78 %
2002	257	-78 %
2003	303	-74 %
2004	291	-75 %

4.2.4 Elektricitetsförbrukning

Användning av ett bergvärmesystem kommer att leda till en större förbrukning av elektricitet på grund av att det är den energikälla som driver kompressorerna i värmepumpsystemet. I Figur 26 visas en graf över elektricitetsförbrukningen under perioden 1999-2004. Ökningar i förbrukningen efter det att bergvärmesystemet har installerats beror bland annat på att det tar tid för bergvärmesystemet att "ställa in sig". Detta gör att medeltemperaturen i berget sjunker med 1-2 grader på en 4-5 års period, för att sedan plana ut och vara konstant. För att kunna

hålla ett konstant energiuttag så leder denna temperaturminskning till att kompressorernas drifttid ökar och mer elektricitet förbrukas, något som kan ses i Figur 26. Med tanke på att anläggningens tid i drift så borde berggrunden ha nått denna balans och dess temperatur borde inte sjunka mer.



Figur 26 Förbrukningen av elektricitet på Brf Duvan under perioden 1999-2004

Innan installationen av bergvärmesystemet användes elektricitet för belysning av innergården, trapphus samt övrig elkonsumtion i gemensamma lokaler, och nu efter installationen tillkommer också drift av kompressorerna. I Tabell 6 så visas elförbrukningen för Brf Duvan år 1999 samt 2004.

Tabell 6 Beskrivning av elektricitetsförbrukningen 1999-2004 samt den aktuella energiförändringen som bergvärmesystemet har medfört

År	Förbrukning kWh	Förändring från år 1999 [%]
1999	105 382	0 %
2000	392 594	373 %
2001	392 595	373 %
2002	538 217	511 %
2003	522 879	496 %
2004	541 453	514 %

I tabellen ovan finns även den beräknade förändringen som för elkonsumtionen uppgår till en ökning med 436 071 kWh, eller 414 % mellan t.ex. år 1999 och år 2004. Detta värde är den energi som det går åt för att driva kompressorerna i värmepumpanläggningen under förutsättningen att övrig elkonsumtion är konstant.

4.3 EKONOMISK KALKYL

En viktig del i denna studie är att undersöka hur övergången från att använda fjärrvärme till att använda lagrad energi som utvinns av en bergvärmeanläggning har gått rent ekonomiskt. De uträkningar som utförs i detta kapitel är ingen djupgående ekonomisk analys utan ren jämförelse mellan energiräkningar från 1999-2004 från de aktuella energileverantörerna.

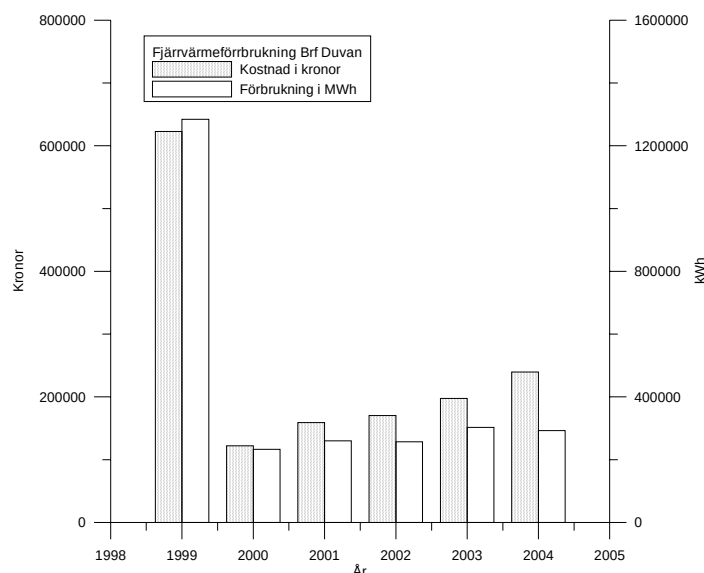
4.3.1 Kostnad för fjärrvärme

Kostnaderna för fjärrvärme har givetvis minskat avsevärt sedan bergvärmeanläggningen sattes i bruk. Anledningen till detta är att förbrukningen har gått ner 75 %, vilket är ett resultat av att berggrunden värmeenergi är den primära energikällan. I Tabell 7 visas kostnaderna för köp av fjärrvärme för åren 1999-2004.

Tabell 7 Beskrivning av fjärrvärmekostnaden 1999-2004 samt den aktuella kostnadsförändringen som bergvärmesystemet har medfört

<i>År</i>	<i>Priser [SEK]</i>	<i>Förändring från år 1999 [SEK]</i>	<i>Förändring från år 1999 [%]</i>
1999	673 920	0	0 %
2000	122 136	-551 784	-82 %
2001	159 058	-514 862	-76 %
2002	170 464	-506 456	-75 %
2003	197 488	-476 432	-71 %
2004	239 662	-434 258	-64 %

I Tabell 7 visas även kostnadsförändringen som gjorts på den minskade användning av fjärrvärme. Brf Duvan har minskat kostnaden för sina fjärrvärmeinköp med 383 078 kr, eller 64 % vid en jämförelse mellan t.ex. år 1999 och år 2004. Anledningen till att den procentuella förändringen inte stämmer vid jämförelse av förbrukningen (75 %) och kostnad för inköp (64 %) är att priset på fjärrvärme har gått upp. Figur 27 visar förbrukningen och kostnaden för användningen av fjärrvärme år 1999-2004. I denna graf visas tydligt den kraftiga prishöjningen som skett de senaste 5 åren. Förbrukningen av fjärrvärme är relativt konstant medan priset förändras väsentligt. Prishöjningen uppgår till så mycket som 44 % de senaste 5 åren, vilket påverkar kostnaderna för fjärrvärme väsentligt (Uppsala Nya Tidning, 2005).



Figur 27 Jämförelse mellan förbrukning och kostnad för fjärrvärme 1999-2004

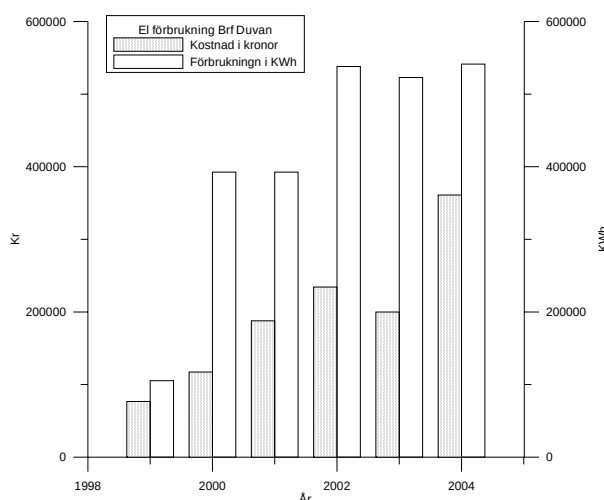
4.3.2 Kostnad för elektricitet

Elförbrukningen för Brf Duvan har ökat sedan installationen av bergvärmesystemet som beskrivs i kapitel 4.2.4. Nedan i Tabell 8 beskrivs kostnaden för inköp av elektricitet åren 1999-2004.

Tabell 8 Beskrivning av elektricitetskostnaden 1999-2004 samt den aktuella kostnadsförändringen som bergvärmesystemet har medfört

År	Kostnad [SEK]	Förändring från år 1999 [SEK]	Förändringen från år 1999 [%]
1999	76 676	0	0 %
2000	117 361	40 685	153 %
2001	187 790	111 114	250 %
2002	234 351	157 675	306 %
2003	200 045	123 369	261 %
2004	361 189	284 513	471 %

Av tabellen ovan framgår det att Brf Duvan har ökat sina kostnader för elektricitet med 284 513 kr mellan t.ex. år 1999 och år 2004, vilket motsvarar en höjning av kostnaderna med 371 %. Vid en jämförelse mellan förändringen av kostnad (471 %) och förbrukning (414 %) av elektricitet så framgår det att det varit en höjning av priset under perioden. I detta fall är det skatten på elektricitet som har ökat medan både det rörliga och det fasta priset för nätet har varit konstant under perioden. Skatten har ökat med 0,09 kr/KWh (Björklinge energi AB, personlig kontakt) från 2000-2004, vilket har påverkat kostnaderna.



Figur 28 Jämförelse mellan förbrukning och kostnad för elektricitet 1999-2004

4.3.3 Sammanlagd energikostnad

För att få en överblick över förändringen av den totala kostnaden för köp av energi år 1999-2004 så adderas kostnaderna för fjärrvärme och elektricitet. Dessa data redovisas i Tabell 9 nedan.

Tabell 9 Totala kostnader för inköp av energi till Brf Duvan år 1999 och 2004

<i>År</i>	<i>Fjärrvärme [SEK]</i>	<i>Elektricitet [SEK]</i>	<i>Totalt [SEK]</i>
1999	673 920	76 676	750 596
2000	112 136	117 361	229 497
2001	159 058	187 790	346 848
2002	170 464	234 352	404 816
2003	197 488	200 046	397 534
2004	239 662	361 189	600 851

I Tabell 9 ovan finns även den totala kostnadsförändringen för energiinköp mellan t.ex. år 1999 och år 2004, vilket uppgår till en kostnadsminskning på 149 745 kronor eller 20,0 %. Den ackumulerade förändringen under perioden 2000-2004 visas nedan i Tabell 10.

Tabell 10 Den ackumulerade förändringen under perioden 2000-2004

<i>Fjärrvärme [SEK]</i>	<i>Elektricitet [SEK]</i>	<i>Totalt [SEK]</i>
-2 480 792	717 358	-1 763 434

Detta värde motsvarar alltså bara förändringen under den aktuella perioden och referensvärdet är kostanden för den energi som förbrukades innan installationen av bergvärmeanläggningen, det vill säga år 1999. Detta skulle medföra en ackumulerad vinst på 1 763 434 kr under denna 5 års period. Kostnader för inköp, installation eller dylikt finns inte med i dessa beräkningar, utan det är bara baserat på inköp av energi.

5 DISKUSSION

Genom denna rapport får man en inblick i hur bergvärmesystemet på Brf Duvan fungerar och vilka parametrar, både i bergvärmesystemet och i berggrunden, som ändrats sedan installationen år 2000. De undersökningar som gjorts pekar på att systemet är både väl dimensionerat och att det fungerar som det ska göra. Både resultaten av drifttider för kompressorerna och energianalysen ser bra ut och visar att de processerna fungerar korrekt. Även temperaturförändringen i köldbärarvätskan, och således även temperaturen i berggrunden visas efter de två första åren då temperaturen minskade med 2°C vara relativt stabil. Rent energimässigt tyder det på att energiuttaget inte är för stort, utan bra anpassat till djupet och antalet energibrunnar. Skulle istället temperaturen fortsätta att minska skulle det kunna vara ett tecken på att energiuttaget är ur energibrunnarna är för stort.

En aspekt som har varit ifrågasatt är avståndet mellan energibrunnarna, som vid Brf Duvan är 8-10 meter, vilket anses vara lite, speciellt om brunnarna inte är gradade. Enligt Svenska Värmepumpföreningen bör avståndet mellan brunnarna vara minst 15 meter. Risken med att ha ett för litet avstånd är att för mycket energi tas ut från ett för litet område, vilket leder till att temperaturen på berggrunden sjunker. Om detta pågår en längre tid kommer temperaturen i berggrunden att sänkas tills det att ett permanent lager av is täcker berggrundsområdet omkring energibrunnarna. Denna permanenta isbildning kommer givetvis att påverka temperaturen på köldbärarvätskan in till värmepumpen och således värmeenergiuttaget negativt. Figur 23 motbevisar dock detta på grund av att en relativt konstant temperatur i energibrunnarna de tre senaste åren har uppmätts vilket tyder på att energiuttaget inte är för stort. Detta betyder även att avståndet mellan brunnarna inte är för litet. Detta gäller dock bara för detta bergvärmesystem med den energimängd som tas ut idag. Osäkerheten i dessa data är relativt stor eftersom temperaturerna inte automatiskt lagras utan läses av för hand av föreningens fastighetsskötare, samt avrundats till heltal. Vissa veckor saknas mätdata och dessa veckor har ett värde interpolerats fram med hjälp av räta linjens ekvation. Hur stor påverkan detta har är svårt att säga men det borde inte ha någon större inverkan på slutresultatet.

Rent ekonomiskt är systemet mycket lönsamt jämfört med innan installationen. Under den 5-års period som systemet har varit i drift har energikostnaderna gått ner kraftigt. Vid en direkt jämförelse mellan kostnaderna för inköp av energi mellan år 1999 och år 2004 så uppgår kostnaden till -149 745 kr. Vad som inte har tagits med i dessa beräkningar är att priset på både fjärrvärme och elektricitet har ökat kraftigt. Detta har lett till att den rena ekonomiska förändringen inte är lika hög som mängden sparad energi. En mer ”rättvis” ekonomisk kalkyl skulle kanske även ha innehållit avdrag för prishöjningar, vilket bättre skulle ha speglat de besparingar som har ägt rum i och med övergången till bergvärme. Vad som inte heller har tagits med i den ekonomiska kalkylen är priset på värmepumpskomponenterna samt borrhning och installation. Dessa utgifter uppgår till ungefär 3,5 miljoner kronor (Råmbin, N. muntlig). Hur snabbt dessa kostnader har tjänats in beror på hur prisutvecklingen kommer att bli i fortsättningen. Om man räknar på att nu efter 5 år har energiförbrukningen stabiliserats vilket gör att man gör en vinst på 149 745 kr per år de åren som kommer. Den totala ackumulerade vinsten plus denna vinst per år i framtiden gör att systemet är betalat på ungefär 17 år från det att installationen gjordes det vill säga under år 2017. I dessa beräkningar har inte ränta på ett eventuellt lån tagits med.

Bergvärmesystemet verkar fungera alldeles utmärkt ur många perspektiv, men trots detta kan alltid förbättringar göras. Grundtanken med dessa förbättringar är att öka temperaturen i energibrunnarna. Detta leder till att köldbärarvätskans temperatur ökar, vilket gör att värmepumpens värmefaktor kommer att öka. En ökning av värmefaktorn bidrar direkt till att mer energi utvinns ur systemet och mindre tillsats energi behöver användas och kompresorernas drifttid kommer att minskas. Rent konkret betyder det att bergvärmesystemet blir mer energieffektivt och mer pengar kan sparas. Nedan beskrivs ett antal förbättringar som skulle kunna vara användbara just för Brf Duvan:

- Användning av frånluften för att värma upp köldbärarvätskan ut från värmepumpen. Detta leder till att temperaturen i berggrunden ”laddas”, det vill säga skulle ökas vilket gör att effekten från värmepumpen höjs och drifttiderna för kompressorerna minskar.
- Borra ytterligare borrhål, vilket skulle göra att belastningarna på redan befintliga energibrunnar skulle minska. Detta skulle leda till en temperaturhöjning av berggrunden och mer energi skulle kunna utvinnas ur systemet.
- Övriga åtgärder som minskar energiförluster som till exempel byte av fönster skulle även de bidra till en mindre belastning på energibrunnar och kompressorer.

Vad som dock bör undersökas innan någon av dessa åtgärder utförs är att det nya energitillskottet, som sparad eller nytillförd energi, inte leder till att systemet blir överdimensionerat. Detta skulle medföra att kompressorerna kommer att ha en drifttid som inte är optimal, vilket kommer leda till höga elektricitetskostnader samt slitage på värmepumpens komponenter. Eftersom alla bergvärmesystem är dimensionerade för ett visst energiuttag kommer alla förbättringar av systemet leda till att denna dimensionering blir felaktig, och systemet kommer inte att utnyttjas optimalt. Därför är det viktigt att innan man byter till ett värmesystem med värmepump bör övriga energisparande åtgärder utföras. Skulle man istället börja med att dimensionera och installera en värmepump och sedan utföra stora energisparande åtgärder kommer systemet att vara fel dimensionerat, och systemet kommer inte att fungera i den utsträckning som det var tänkt.

Även kostnader för att installera den nya tekniken samt hur mycket energi som går åt för att driva detta system bör undersökas så att inte dessa utgifter blir för stora i förhållande till den energi som sparas.

6 REFERENSLISTA

Litteratur:

Alvarez, H., (1990). *Energiteknik*. Studentlitteratur AB, Lund

Carlsson L., Gustafson G., (1991). *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*, Byggforskningsrådet R66:1991, Byggforskningsrådet, Stockholm

Eklundh, L., (RED) (2001). *Geografisk informationsbehandling, metoder och tillämpningar*. Byggforskningsrådet, Stockholm

Enquist, P., Müllern, C.-F. och Söderholm, H., (1983). *Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Uppsala län*. Sveriges Geologiska Undersökning

Energimyndigheten (1999). *Värmepumpar – Energimyndigheten informerar. Artikel nr. 1139*

Hiscock, K., (2005). *Hydrogeology, principles and practice*. Blackwell Science

Lundin, S.-E., (1988). *Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala*. LIC-avhandling, Kwartärgeologiska avdelningen, Uppsala Universitet

Mattsson, H., Thunehed, H. och Keisu, M., (2004). *Forsmark site investigation. Interpretation of borehole geophysical measurements in KFM01A, KFM01B, HFM01, HFM02 and HFM03*. Svensk Kärnbränslehantering AB, P-04-80

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., (1996). *Earth, An Introduction to Physical Geology*. Prentice-Hall

Thunehed, H., (2004). *Forsmark site investigation. Interpretation of borehole geophysical measurements in KFM02A, KFM03A, KFM03B and HFM04 to HFM08*. Svens Kärnbränslehantering AB, P-04-98

Thunholm, B., (1981). *Energiekologisk översikt av Västmanlands län*. Kwartärgeologiska avdelningen, Uppsala Universitet

VIKA AB, Svenska hydrologiska rådet, (1988). *Grundvattenförsörjning, geohydrologi i praktiken*. Dokumentation av symposiet den 4:e maj 1988

Qiuberg M., (2002). *Grundvattennivån i centrala Uppsala – GIS-modellering utifrån mätningar*. Examensarbete inom civ. ing. programmet Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala tekniska högskola, institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet

Internet:

Dickinson, M. H., Fannelli, M., (2004). What is Geothermal Energy? Fakta dokument, <http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php> (2004-12-17)

Energimyndigheten (2005). Fakta bas,
<http://www.stem.se/web/otherapp/ekunskap.nsf/0/C3F18C174E71566EC1256B74004371AE?OpenDocument&Start=1&Count=1000&ExpandView> (2005-03-12)

Kylbranschens samarbetsstiftelse (2005). Information om Svensk kylnorm,
<http://www.kys.se/knorm.htm> (2005-08-24)

Nordbygg (2005). Inormationsblad,
<http://www.siki.se/downloads/borrhal.pdf> (2005-10-11)

Svenska Energi- och värmepumpföreningen (2005). http://www.sev.nu/faq_vp.shtml#8
(2005-02-16)

Sveriges geologiska undersökning (2005). Information om bergarslära,
http://www.sgu.se/sgu/sv/geologi_samhalle/vad_geologi/berg/bergart_s.htm 05-02-13

Svenska värmepumpföreningen (2005). Faktabas,
<http://www.svepinfo.se/tekniskinformation.php?PHPSESSID=c7c0f13b7220bc0a01d7aaa3742329b0> (2005-01-05)

Svenska värmepumpföreningen (2005). Faktabas,
<http://www.svepinfo.se/dbcontent.php?action=a&id=16> (2005-02-16)

Muntliga:

Eriksson, Erik (mars 2005). Scientific advisor Hydroconsult

Löfbom, Rolf, (april 2005 – september 2005) Skandinavisk Termoeekonomi AB

Råmbin, Nils. (februari 2005 – september 2005) Energikonsult

7 APPENDIX

Appendix 1 Beskrivning av Brf Duvans komponentlista för el

Komponent	Fabrikat	Typ	Beteckning	Spänning	Eleffekt [kW]	Ström [A]
Värmepump	Aka	Quattro				
	Kyla	ZZ32	VP1:1	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka	Quattro				
	Kyla	ZZ32	VP1:2	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka	Quattro				
	Kyla	ZZ32	VP1:3	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka	Quattro				
	Kyla	ZZ32	VP1:4	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka					
	Kyla	Chill ZZ32	VP2:1	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka					
	Kyla	Chill ZZ32	VP2:2	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka	Chill ZZ32				
	Kyla	VV	VP3:1	3*400/50	19,0	22,00
Värmepump	Aka	Chill ZZ32				
	Kyla	VV	VP3:2	3*400/50	19,0	22,00
Pump, Radiator	Flygt	AT 1065/160	P2-RAD	3*400/50	0,37	2,20
Pump, Hetvatten	Flygt	OKN 101C3	P1-HET	3*400/50	0,55	1,75
Pump, VVC	Flygt	ASV-27/2-85	P3-VVC	3*400/50	0,25	0,70
Pump, Köldbärare	Wilo	IPn 65/250-4/4	P4-KB	3*400/50	4,0	8,80
Pump, VV-laddning	Wilo	TOP-Z 30	P8-VV	1*230/50	0,175	0,88
Pump, Värmebärare	Wilo	IPL 205-11/0,75	P5-VB	3*400/50	0,75	1,80
Pump, Värmebärare	Wilo	IPL 204-11/0,55	P6-VB	3*400/50	0,55	1,35
Pump, Värmebärare	Wilo	IPL 204-11/0,55	P7-VB	3*400/50	0,55	1,35

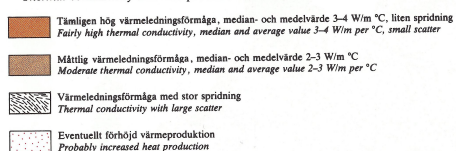
Appendix 2 Beskrivning av Brf Duvans komponentlista för värmesystemet

Komponent	Fabrikat	Typ	Beteckning
Ackumulatortank	Nibe	EKS-500	ACK1
Ackumulatortank	Nibe	EKS-500	ACK2
Ackumulatortank	Nibe	AKIL-500	ACK3
Ackumulatortank	Nibe	AKIL-500	ACK4
Hetvattenpump	Flygt	OKN 101C3	P1-HET
Radiatorpump	Flygt	AT 1065/160	P2-RAD
VVC-Pump	Flygt	ASV-27/2-85	P3-VVC
Köldbärarepump	Wilo	IPN 65/250-4/4	P4-KB
Värmebärarpump	Wilo	IPL-205-11/0,75	P5-VB
Värmebärarpump	Wilo	IPL-204-11/0,55	P6-VB
Värmebärarpump	Wilo	IPL-204-11/0,55	P7-VB
Ladd-Pump	Wilo	Star-Z 25/6	P8-VV

Appendix 3 En geotermisk karta över området omkring Uppsala Hämtad ur S-E Lundin LIC-avhandling, Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala, 1988



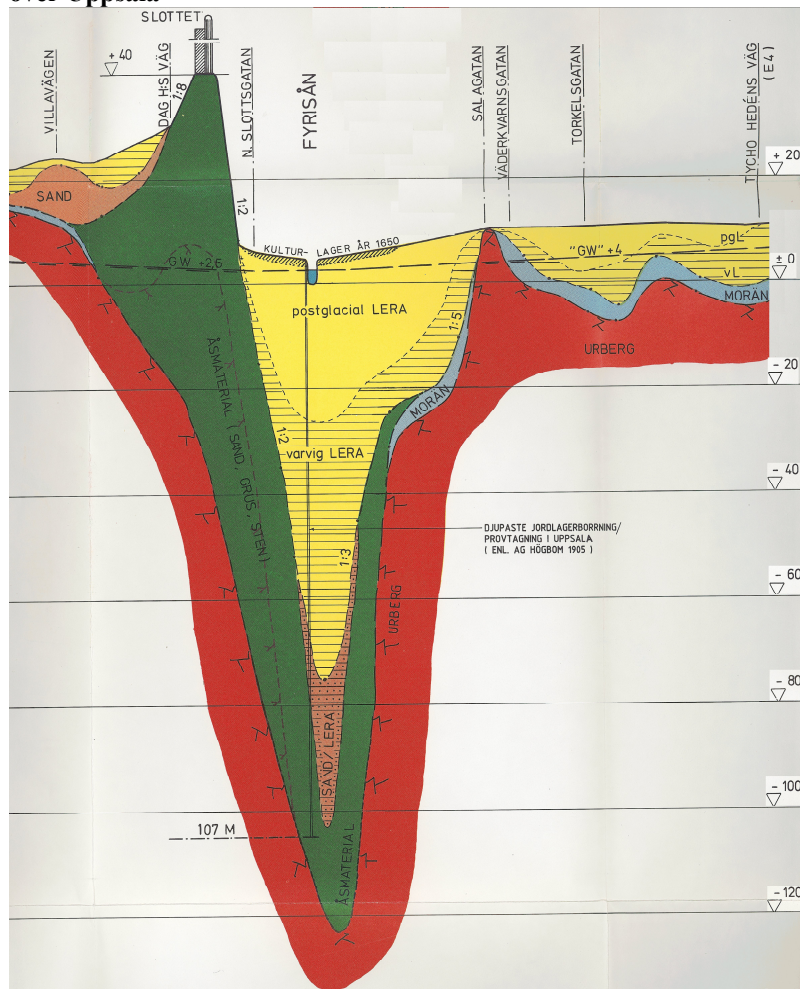
Värmeledningsförmåga och värmeproduktion i berggrunden
Thermal conductivity and heat production in bedrock



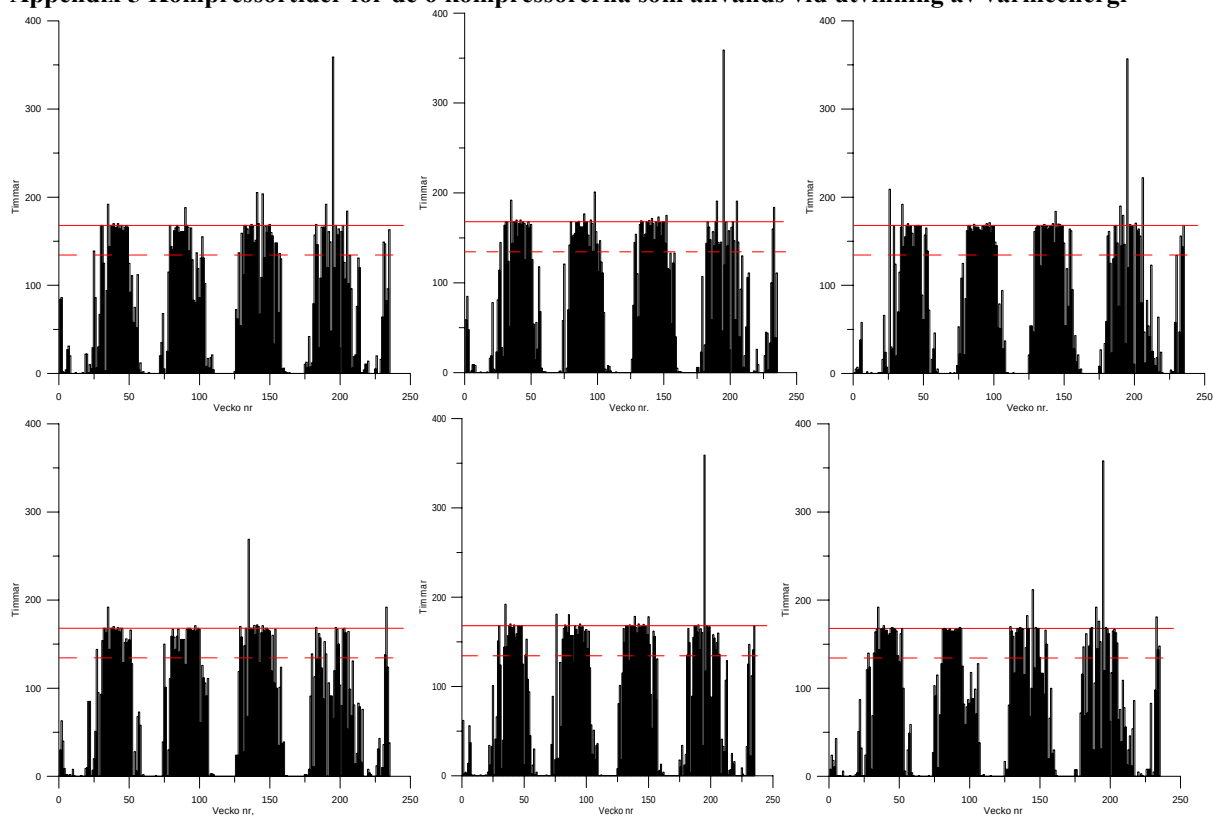
Energitillgångar i sand- och grusakviferer
Energy reserves in sand and gravel aquifers



Appendix 4 Tvärsnittskarta framställd av S-E Lundin i hans LIC-avhandling . Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala



Appendix 5 Kompressortider för de 6 kompressorerna som används vid utvinning av värmeenergi



Appendix 6 Exelfil över kompressortiderna

Månad	Datum	komp 1-1	komp 1-2	komp 1-3	komp 1-4	komp 2-1	komp 2-2
April	2000-04-25	3040	3118	3018	3068	2975	3094
Maj	2000-05-02	3099	3119	3048	3130	2983	3178
Maj	2000-05-09	3184	3124	3111	3132	3007	3264
Maj	2000-05-16	3232	3131	3151	3136	3025	3266
Maj	2000-05-23	3232	3135	3160	3138	3036	3267
Maj	2000-05-30	3234	3173	3162	3152	3079	3271
Juni	2000-06-06	3243	3231	3164	3208	3080	3298
Juni	2000-06-13	3252	3231	3165	3245	3081	3329
Juni	2000-06-20	3260	3231	3167	3246	3082	3349
Juni	2000-06-27	3260	3231	3167	3246	3082	3349
Juli	2000-07-04	3260	3233	3175	3241	3088	3349
Juli	2000-07-11	3260	3233	3176	3247	3088	3349
Juli	2000-07-18	3261	3233	3176	3247	3088	3350
Juli	2000-07-25	3261	3234	3176	3247	3088	3350
Augusti	2000-08-01	3261	3234	3176	3247	3088	3350
Augusti	2000-08-08	3261	3234	3176	3248	3089	3350
Augusti	2000-08-15	3261	3234	3177	3248	3089	3350
Augusti	2000-08-22	3262	3234	3177	3248	3089	3351
Augusti	2000-08-29	3262	3235	3177	3248	3089	3351
September	2000-09-05	3278	3236	3186	3249	3091	3373
September	2000-09-12	3297	3237	3196	3249	3095	3395
September	2000-09-19	3375	3253	3281	3253	3146	3396
September	2000-09-26	3379	3319	3366	3287	3233	3406
Oktober	2000-10-03	3381	3343	3367	3299	3265	3411
Oktober	2000-10-11	3404	3350	3374	3332	3266	3440
Oktober	2000-10-17	3485	3350	3394	3433	3267	3579
Oktober	2000-10-24	3599	3559	3445	3434	3291	3665
Oktober	2000-10-31	3755	3471	3589	3475	3412	3671
November	2000-11-07	3772	3617	3684	3541	3552	3701
November	2000-11-14	3790	3785	3684	3692	3676	3768
November	2000-11-21	3954	3785	3684	3692	3676	3768
November	2000-11-28	4122	3929	3931	3984	3753	4104
December	2000-12-05	4290	3999	4099	3992	3893	4229
December	2000-12-12	4414	4114	4267	4032	4057	4232
December	2000-12-19	4465	4280	4430	4176	4224	4326
December	2000-12-27	4657	4472	4622	4368	4416	4518
Januari	2001-01-02	4801	4616	4766	4512	4560	4662
Januari	2001-01-09	4969	4771	4934	4669	4727	4830
Januari	2001-01-16	5137	4939	5102	4837	4895	4998
Januari	2001-01-23	5307	5109	5227	5007	5066	5168
Januari	2001-01-30	5458	5275	5438	5173	5232	5333
Februari	2001-02-06	5624	5442	5604	53339	5398	5499
Februari	2001-02-13	5794	5601	5773	5508	5558	5669
Februari	2001-02-20	5958	5745	5937	5662	5720	5833
Februari	2001-02-27	6126	5912	6105	5821	2888	6001
Mars	2001-03-06	6292	6080	6273	5989	6057	6169
Mars	2001-03-13	6418	6248	6402	6157	6225	6331
Mars	2001-03-20	6582	6416	6554	6324	6392	6497
Mars	2001-03-27	6750	6583	6710	6492	6557	6665
April	2001-04-03	6911	6672	6862	6617	6694	6831
April	2001-04-10	7076	6733	7017	6619	6824	6956
April	2001-04-17	7202	6890	7183	6764	6986	7048
April	2001-04-24	7256	7055	7311	6917	7154	7159
Maj	2001-05-01	7270	7194	7312	7025	7254	7217
Maj	2001-05-09	7326	7266	7340	7119	7260	7292
Maj	2001-05-15	7352	7266	7346	7164	7260	7344
Maj	2001-05-22	7470	7282	7414	7166	7290	7456

Maj	2001-05-29	7538	7310	7487	7178	7339	7460
Juni	2001-06-05	7543	7356	7545	7208	7398	7472
Juni	2001-06-12	7544	7358	7545	7209	7402	7473
Juni	2001-06-19	7545	7363	7547	7213	7403	7475
Juni	2001-06-26	7546	7363	7547	7213	7403	7475
Juli	2001-07-03	7546	7363	7547	7213	7403	7475
Juli	2001-07-10	7546	7363	7547	7213	7403	7475
Juli	2001-07-17	7546	7363	7547	7213	7404	7446
Juli	2001-07-24	7546	7363	7547	7213	7404	7476
Juli	2001-07-31	7546	7363	7547	7213	7404	7476
Augusti	2001-08-07	7546	7363	7547	7213	7404	7476
Augusti	2001-08-14	7546	7363	7547	7214	7404	7476
Augusti	2001-08-21	7546	7364	7548	7214	7404	7476
Augusti	2001-08-28	7546	7364	7548	7214	7404	7476
September	2001-09-04	7547	7364	7548	7214	7405	7476
September	2001-09-11	7549	7365	7548	7249	7405	7496
September	2001-09-18	7549	7365	7548	7338	7405	7531
September	2001-09-25	7607	7374	7587	7339	7432	7599
Oktober	2001-10-02	7728	7427	7737	7357	7535	7604
Oktober	2001-10-09	7728	7449	7838	7538	7626	7604
Oktober	2001-10-16	7733	7557	7839	7422	7741	7629
Oktober	2001-10-22	7803	7682	7869	7577	7751	7744
Oktober	2001-10-30	7945	7703	7980	7704	7821	7912
November	2001-11-06	8113	7788	8139	7759	7949	8056
November	2001-11-13	8264	7950	8306	7912	8116	8196
November	2001-11-20	8417	8118	8468	8077	8284	8358
November	2001-11-27	8572	8286	8608	8246	8451	8523
December	2001-12-04	8739	8450	8767	8413	8616	8691
December	2001-12-11	8906	8611	8934	8573	8782	8857
Januari	2002-01-15	9737	9441	9668	9351	9611	9688
Januari	2002-01-22	9905	9603	9835	9519	9778	9856
Januari	2002-01-29	10073	9770	10003	9683	9945	10022
Februari	2002-02-05	10226	9938	10171	9841	10114	10161
Februari	2002-02-12	10366	10106	10338	10008	10282	10326
Februari	2002-02-19	10536	10276	10503	10178	10407	10455
Februari	2002-02-26	10702	10442	10669	10334	10489	10538
Mars	2002-03-05	10837	10613	10840	10511	10548	10618
Mars	2002-03-12	11038	10772	11005	10660	10627	10755
Mars	2002-03-19	11195	10939	11173	10822	10714	10874
Mars	2002-03-26	11338	11106	11340	10986	10797	10960
April	2002-04-03	11450	11255	11401	11128	10915	11091
April	2002-04-09	11597	11400	11527	11290	11003	11246
April	2002-04-16	11720	11452	11639	11411	11091	11377
April	2002-04-24	11831	11531	11745	11468	11190	11479
April	2002-04-30	11898	11582	11836	11499	11261	11487
Maj	2002-05-07	11902	11676	11947	11543	11389	11504
Maj	2002-05-14	11903	11704	11947	11561	11427	11510
Maj	2002-05-21	11911	11741	11950	11595	11427	11528
Maj	2002-05-28	11918	11742	11953	11631	11428	11549
Juni	2002-06-04	11920	11743	11955	11631	11430	11553
Juni	2002-06-11	11920	11743	11955	11631	11430	11553
Juni	2002-06-18	11920	11743	11955	11632	11430	11553
Juni	2002-06-25	11920	11743	11955	11632	11430	11553
Juli	2002-07-02	11921	11744	11955	11632	11430	11553
Juli	2002-07-09	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Juli	2002-07-16	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Juli	2002-07-23	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Juli	2002-07-31	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Augusti	2002-08-06	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Augusti	2002-08-13	11921	11744	11955	11632	11431	11553

Augusti	2002-08-20	11921	11744	11955	11632	11431	11553
Augusti	2002-08-27	11921	11744	11955	11632	11431	11553
September	2002-09-03	11921	11744	11955	11632	11431	11553
September	2002-09-10	11921	11744	11955	11632	11431	11553
September	2002-09-17	11921	11765	11955	11640	11448	11555
September	2002-09-24						
Oktober	2002-10-01	12011	11873	12003	11822	11464	11689
Oktober	2002-10-08	12156	11920	12122	11840	11545	11826
Oktober	2002-10-15	12310	12081	12292	11955	11715	11880
Oktober	2002-10-22	12420	12246	12450	12120	11880	12039
Oktober	2002-10-29	12482	12414	12478	12268	12039	12151
November	2002-11-05	12647	12581	12626	12437	12156	12319
November	2002-11-12	12816	12703	12794	12605	12319	12487
November	2002-11-19	12984	12870	12862	12734	12487	12651
November	2002-11-26	13134	13038	13131	12903	12655	12808
December	2002-12-03	13288	13207	13299	13071	12824	12975
December	2002-12-10	13456	13375	13467	13239	12992	13144
December	2002-12-17	13623	13542	13635	13407	13159	13311
Januari	2003-01-07	14127	14039	14139	13911	13603	13815
Januari	2003-01-14	14293	14209	14309	14081	13771	13985
Januari	2003-01-21	14441	14357	14438	14247	13839	14052
Januari	2003-01-28	14609	14541	14601	14414	13939	14161
Februari	2003-02-11	14944	14876	14937	14750	14274	14496
Februari	2003-02-18	15111	15045	15105	14918	14443	14663
Februari	2003-02-25	15263	15213	15273	15085	14611	14823
Mars	2003-03-04	15431	15381	15439	15243	14779	14991
Mars	2003-03-11	15599	15529	15604	15421	14914	15160
Mars	2003-03-18	15743	15583	15724	15568	15604	15320
Mars	2003-03-26	15918	15702	15884	15659	15148	15476
April	2003-04-01	16034	15778	15990	15712	15241	15509
April	2003-04-08	16148	15942	16157	15874	15407	15657
April	2003-04-15	16281	16104	16257	16036	15557	15805
April	2003-04-22	16335	16199	16292	16115	15577	15874
April	2003-04-29	16457	16227	16393	16246	15643	16010
Maj	2003-05-06	16590	16270	16517	16251	15743	16140
Maj	2003-05-13	16630	16283	16554	16257	15769	16145
Maj	2003-05-20	16635	16304	16593	16270	15799	16151
Maj	2003-05-27	16636	16308	16594	16272	15806	16153
Juni	2003-06-03	16637	16313	16595	16276	15807	16154
Juni	2003-06-10	16638	16313	16595	16276	15807	16154
Juni	2003-06-17	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juni	2003-06-24	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juli	2003-07-01	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juli	2003-07-08	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juli	2003-07-15	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juli	2003-07-22	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Juli	2003-07-29	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Augusti	2003-08-04	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Augusti	2003-08-12	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Augusti	2003-08-19	16638	16313	16595	16276	15807	16155
Augusti	2003-08-26	16638	16313	16595	16276	15807	16155
September	2003-09-09	16650	16348	16599	16304	15822	16178
September	2003-09-16	16650	16348	16599	16338	15822	16184
September	2003-09-23	16673	16348	16607	16338	15822	16226
September	2003-09-30	16780	16382	16698	16350	15894	16233
Oktober	2003-10-07	16781	16441	16837	16374	16010	16245
Oktober	2003-10-14	16812	16597	16848	16509	16157	16324
Oktober	2003-10-21	16956	16758	16961	16674	16226	16481
Oktober	2003-10-28	17124	16883	17130	16823	16388	16650
November	2003-11-04	17286	16906	17263	16826	16460	16796

November	2003-11-11	17434	17036	17425	16915	16608	16825
November	2003-11-18	17493	17203	17582	17070	16776	16933
November	2003-11-25	17650	17371	17705	17238	16945	17099
December	2003-12-02	17791	17519	17793	17406	16975	17264
December	2003-12-09	17959	17595	17946	17567	17081	17432
December	2003-12-17	18150	17785	18085	17736	17273	17624
December	2003-12-23	18295	17930	18085	17877	17418	17744
Januari	2004-01-13	18629	18290	18085	18236	17778	18102
Januari	2004-01-22	18988	18647	18439	18595	18136	18461
Januari	2004-01-27	19108	18767	17559	18712	18256	18581
Februari	2004-02-03	19276	18936	18728	18880	18425	18749
Februari	2004-02-10	19417	19103	18895	19046	18592	18906
Februari	2004-02-17	19575	19271	19045	19213	18754	19070
Februari	2004-02-24						
Mars	2004-03-02	19762	19452	19229	19389	18934	19260
Mars	2004-03-09	19930	19614	19396	19547	19099	19428
Mars	2004-03-16	20077	19778	19564	19701	19266	19554
Mars	2004-03-23	20136	19934	19727	19842	19429	19661
April	2004-04-06	20393	20236	19945	20151	19645	19947
April	2004-04-13	20512	20283	20044	20287	19721	20081
April	2004-04-20	20605	20295	20113	20289	19760	20177
April	2004-04-27	20735	20378	20244	20330	19869	20183
Maj	2004-05-04	20741	20432	20325	20363	19947	20202
Maj	2004-05-11	20760	20474	20339	20390	20003	20223
Maj	2004-05-18	20811	20597	20365	20497	20016	20299
Maj	2004-05-25	20917	20622	20448	20626	20046	20430
Juni	2004-06-02	21028	20639	20527	20627	20092	20550
Juni	2004-06-08	21028	20648	20543	20633	20104	20551
Juni	2004-06-15	21028	20666	20619	20640	20158	20552
Juni	2004-06-22	21028	20730	20619	20665	20244	20556
Juli	2004-07-08	21031	20756	20619	20694	20244	20577
Juli	2004-07-15	21057	20757	20627	20694	20249	20591
Juli	2004-07-23	21066	20757	20631	20694	20249	20591
Juli	2004-07-29	21066	20757	20633	20694	20252	20591
Augusti	2004-08-03	21066	20757	20633	20694	20253	20591
Augusti	2004-08-10	21066	20757	20633	20694	20253	20591
Augusti	2004-08-17	21066	20757	20633	20703	20253	20596
Augusti	2004-08-24	21085	20761	20645	20705	20261	20616
September	2004-09-07	21174	20765	20719	20705	20277	20616
September	2004-09-14	21177	20823	20719	20738	20360	20632
September	2004-09-21	21210	20957	20729	20863	20361	20696
September	2004-09-28	21310	20957	20765	21010	20366	20845
Oktober	2004-10-05	21470	21004	20903	21032	20464	20992
Oktober	2004-10-12	21654	21160	21095	21144	20645	21074
Oktober	2004-10-19	21693	21304	21219	21285	20789	21170
Oktober	2004-10-26	21804	21472	21257	21453	20937	21333