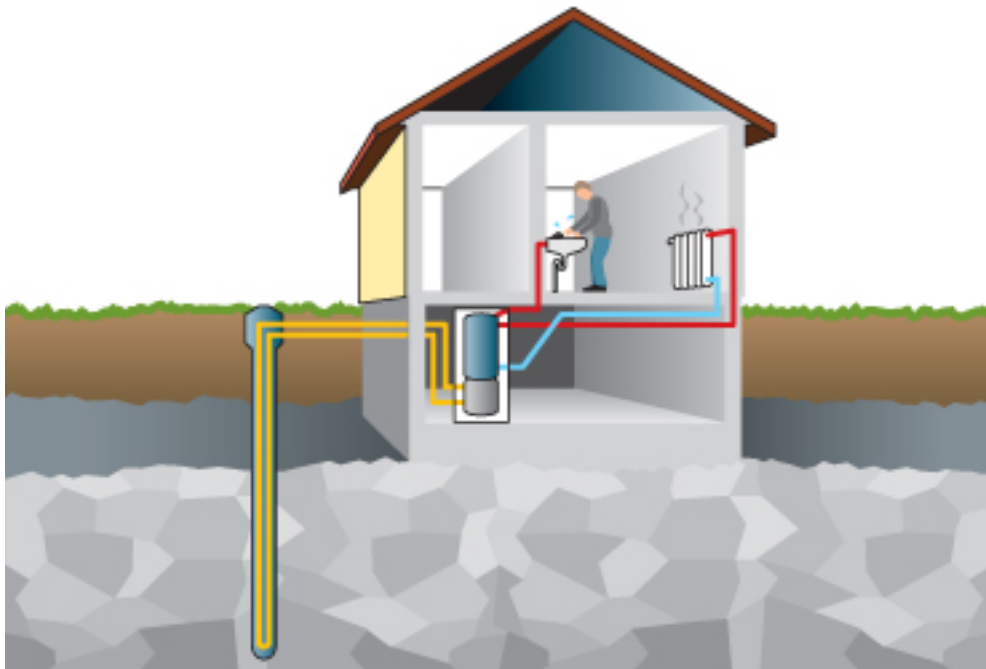




**KTH Industrial Engineering
and Management**

Uppgradera befintlig bergvärmekälla med en ny värmepump

Andreas Kibe



Kandidatexamensarbete

KTH – Skolan för Industriell Teknik och Management

Energiteknik EGI-2014



KTH Industrial Engineering
and Management

Uppgradera befintlig bergvärmekälla med en ny värmepump

Andreas Kibe

Approved	Examiner Catharina Erlich	Supervisor Joachim Claesson
	Commissioner	Contact person

Abstract

Geothermal heating has become a popular alternative in Sweden's cold climate as it uses sustainable energy. Individuals who were early to make use of geothermal heating are nowadays in need to replace their ground source heat pump. The new heat pumps are more efficient and cover a larger percentage of the households heating which may bring some problem. A heat pump with too high efficiency in a short borehole can cause the borehole temperature to decrease and ultimately lead to a lower heating performance. This project seeks to analyze the temperature dip in the borehole when a new heat pump is installed. A number of dimensions of the household, borehole and heat pump were evaluated and compared. The calculation process went as follows: determine the required heating of the households, estimate the radiator curves, choose a fitting heat pump and investigate the change in the borehole temperature over a 10 year time period. The results of the project show similarities in the decreasing borehole temperature between the increased house size and borehole depth. To conclude the project it was established that large houses with shallow boreholes should seek ways to recharge their boreholes during summer.

Sammanfattning

Bergvärme har länge varit populärt i Sveriges kalla klimat som ett hållbart energiutvinningsalternativ. Individer som var tidiga med att installera bergvärme börjar idag behöva byta ut sina värmepumpar. En förnyad standard med värmepumpar dimensionerade för att klara en större andel av hushållets maximala effektbehov kan dock medföra problem vid ett nyinköp. En för hög effekt i värmepumpen i ett för kort borrhål kan sänka borrhålstemperaturen och försämra värmefaktorn för systemet. Detta projekt undersöker temperatursänkningen i borrhålet vid installation av en ny värmepump i ett gammalt system. Ett flertal fall med olika dimensioner av hushåll, borrhål och värmepumpar utvärderas och jämförs. Beräkningarna genomförs i följande ordning: att fastställa uppvärmningsbehovet för hushållet, beräkna raditortemperaturer, välja värmepump och utreda borrhålets temperaturändring efter 10 års bruk. Resultaten visar att direkta likheter av sänkningen i borrhålstemperaturen finns mellan ökningen av husstorlek och minskningen av borrhålsdjup. En slutsats av arbetet är att stora hus med grunda borrhål bör söka kompletterande vägar att återladda sina borrhål över sommaren.

Innehållsförteckning

Abstract.....	3
Sammanfattning.....	4
Nomenklatur.....	6
1 Introduktion.....	7
1.1 Bergvärme.....	7
1.2 Litteraturstudie.....	8
1.3 Avgränsningar	8
2 Problemformulering och Mål.....	8
3 Metod.....	9
3.1 Husuppvärmning.....	9
3.2 Värmepump.....	10
3.3 Radiatortemperatur.....	11
3.4 Borrhålet	13
4 Resultat och Diskussion.....	16
4.1 Känslighetsanalys.....	18
5 Slutsatser och framtida arbete	19
6 Referenser	20
Bilaga 1.....	21
Bilaga 2.....	22

Nomenklatur

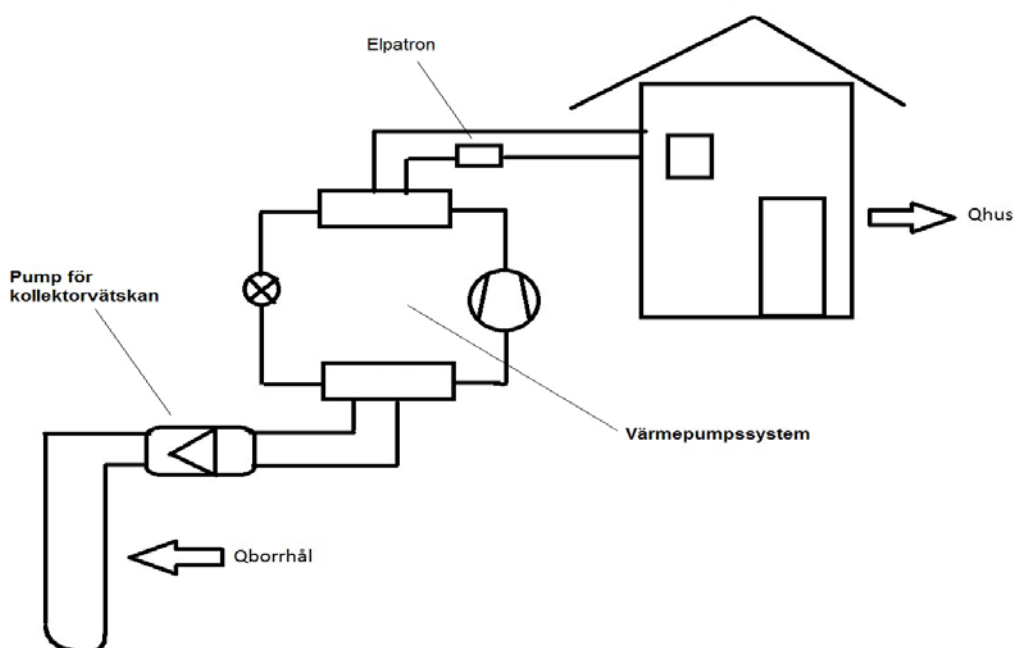
Benämning	Tecken	Enhet
Årsvärmefaktor	SPF	$(1/\text{år})$
Brinetemperatur	T_b	$(^{\circ}\text{C})$
Dimensionerad ute-temperatur	DUT	$(^{\circ}\text{C})$
Densitet	ρ	(kg/m^3)
U-värde	U	$(\text{W}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$
Area	A	(m^2)
Värmekapacitet	c_p	$(\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
Värmeeffekt per grad Celsius	Q_t, Q_v	$(\text{W}/^{\circ}\text{C})$
Ventilationsflöde	q_{vent}	(m^3/s)
Effekt	P	(W)
Volymflöde	\dot{V}	(m^3/s)
Framgående radiatortemperatur	t_{fram}	$(^{\circ}\text{C})$
Returnerande radiatortemperatur	t_{retur}	$(^{\circ}\text{C})$
Värmeeffekt	Q	(W)
Entalpi	h	(J/kg)
Kompressoreffekt	\dot{E}_k	(W)
Borrhålsradie	r	(m)
Konduktivitet	k	$(\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
Termisk diffusivitet	α	(m^2/s)
Tiden	τ	(s)
Borrhålslängd	L	(m)
Borrdjups variabel	z	(m)
Grundtemperatur	T_g	$(^{\circ}\text{C})$
Genomsnittlig temperaturändring	T_1, T_2	$(^{\circ}\text{C})$

1 Introduktion

En stor mängd svenska hushåll använder sig idag av bergvärme sedan tekniken blev introducerad i slutet av 1970-talet. (Nationalencyklopedin, 2014) De äldre installationerna har ofta två tydliga kännetecken, värmepumparna var dimensionerade för att täcka 50 % av hushållets maximala effektbehov samt borrhålen var relativt korta. Bland de individer som var tidiga med att installera bergvärme behöver många idag uppgradera sina gamla värmepumpar. Nuförtiden dimensioneras värmepumpar dock för att klara upp till 70 % av hushållens maximala effektbehov. Installation av en sådan värmepump till ett gammalt borrhål kommer medföra att värmepumpen inte uppnår den utlovade värmefaktorn på grund av ett för kort borrhål. Detta då den nya pumpen är effektivare och kommer extrahera mer värme ur hålet och på så vis sänka brinetemperaturen (temperaturen i borrhålet) som i sin tur sänker värmefaktorn. Alltså blir den nya värmepumpen inte fullt utnyttjad och levererar inte utlovad prestanda. En risk vid för hög energiextrahering per meter borrhål är att borrhålet fryser. (Claesson, 2011)

1.1 Bergvärme

Bergvärme är i grund och botten lagrad solenergi från sommaren. Därmed använder sig tekniken utöver driftenergin delvis av grattis energi och tillhör ett av de hållbara energiutvinningsalternativen. Bergvärme är vida populär i Sverige då klimatet kräver mycket energi för uppvärmning. Processen går ut på att en värmepump hämtar värme från berggrunden och grundvattnet genom att man sänker ner en slang i ett borrhål i vilken man har en strömmande vätska. Den cirkulerande vätskan värms upp nere i borrhålet och möter sen ett nytt slutet system inne i värmepumpen där man använder ett köldmedium med låg förångningstemperatur. En kompressor ökar sen gasens temperatur genom att komprimera den till ett högt tryck och via en kondensor avges värmen sedan ut till huset och kan användas för att värma upp vattnet i både duschar och radiatorer, se figur 1. (NIBE, 2014)



Figur 1: Värmepumpen extraherar värme från $Q_{\text{borrhål}}$ och värmer sedan upp huset som läcker ut värmen Q_{hus} .

Det är möjligt att ha flera borrhål per tomt men det finns ett krav att det skall vara minst 20 meter mellan borrhål till granliggande hushåll för att hålen inte ska kyla och påverka varandra. (Energimyndigheten, 2014)

1.2 Litteraturstudie

Personer som tidigare undersökt området att uppgradera bergvärmepump är bland annat Joachim Claesson, docent på KTH. I ett arbete beräknade han var fortsatt drift med den gamla värmepumpen, installation av en ny värmepump samt installation av både en ny värmepump och en kompletterande uteluftkonvektor. Uteluftkonvektorn skulle komplementera in vid tillräcklig hög utetemperatur och då använda den varma luften till att värma huset. Slutsatser från arbetet var att årsvärmefaktorn SPF förbättrades med den nya värmepumpen. Komplementet av uteluftkonvektorn kunde hjälpa driften för systemet i slutet på värmesäsongen men gav ingen signifikant ökning av årsvärmefaktorn för systemet. (Claesson, 2011)

I en generell rapport om bergvärme beskrevs bland annat problematiken om medeltemperaturen i ett borrhål sjunker kraftigt. Om naturlig återladdning över sommaren ej är tillräcklig kan åtgärder göras för att hjälpa hålet, till exempel med en konvektor som tar värme från luften. En annan möjlighet är att använda sig av en slinga plastslang på ett södervänt tak för att absorbera mer värme under sommartid. Om huset i fråga har ett fläktsystem kan även värmen i frånluften användas till att återladda hålet. Idealt är även om huset behöver kylas under sommaren då kyla kan hämtas ur hålet och därmed bli återladdat (Björk, 2013).

1.3 Avgränsningar

Detta arbete koncentrerar sig på att analysera borrhålstemperaturen och kommer därför ej fördjupa sig i värmeöverföringen mellan radiatorerna och huset. Då arbetets omfattning var större än väntat blev tänkta driftfall i arbetet nedskärda. Istället för ett system med återladdning från konvektorn ner i hålet har endast vanlig bergvärmedrift beräknats. Påverkan från fler hål har ej heller undersökts utan borrhålet antas ligga enskilt.

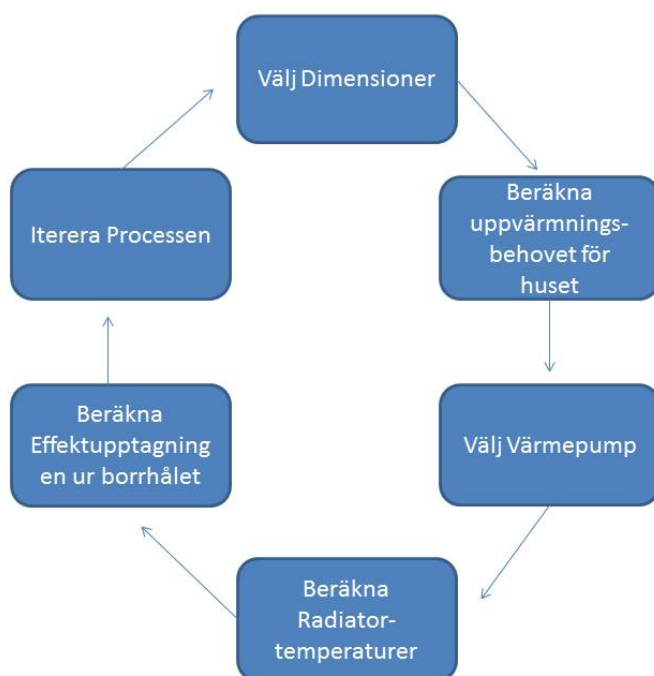
2 Problemformulering och Mål

Gamla bergvärmesystem har ofta jämförelsevis korta borrhål jämfört med de bergvärmesystem som installeras idag. Projektet undersöker hur en gammal bergvärmekälla påverkas av installation av en ny värmepump utan att borra på nytt. Ett flertal driftsfall med varierande dimensioner på hushåll, borrhål och värmepump jämfördes. Modellering och beräkningar av de olika fallen kommer utvärdera hur brinetemperaturen i borrhålet ändras efter lång drift. Målet var att undersöka hur mycket brinetemperaturen sjunker efter 10 år och vilken inverkan borrhåls längden och husstorleken har på detta.

3 Metod

Som tidigare stycke beskrivit beaktades flera dimensioner av borrhål, hushåll och värmepump. Figur 2 söker att beskriva arbetsprocessen för varje fall. Varje simulering har utförts över en tidsperiod på 10 år med ett tidsintervall på 24 timmar på ett hushåll i Bromma. Samtliga matematiska beräkningar i projektet har utförts i programmet MATLAB.

Arbetsprocessen startade med att en husarea och ett borrhålsdjup antogs. Husets uppvärmningsbehov beräknades och en lämplig värmepump valdes. Radiatortemperaturer beräknades för varje dag på året och effektupptagningen ur borrhålet kunde därmed beräknas för var dag. Effektpulserna dagarna emellan användes för att iterera fram hur temperaturen ändrades under 10 år. Processen börjar om med att ett nytt borrhålsdjup och en ny husarea beaktas.



Figur 2: Modellvisualisering av arbetsprocessen.

3.1 Husuppvärmning

För att lösa angivet problem har småhus byggt på 70-talet med tre olika bostadsareor uppskattats. Husen antas vara utan källare och ha två våningar med takhöjd på 2,4 meter samt golvareor på 120, 160 respektive 240m². För att avgöra behövd uppvärmning utfördes en energibalans och värmeförluster på huset beräknades. Isoleringen i de olika delarna av huset beskrivs med ett så kallat U-värde som beror av husets termiska resistans. U-värdena tillsammans med areorna för de olika delarna av husen behövdes i värmeförlustsberäkningarna, se tabell 1. I ekvation (1) har påverkan av köldbryggor inkluderats i U-värdena.

Tabell 1: U-värden och areaytor av olika delar av huset. U-värdena är tagna från en beräkningsrapport av ATON Teknikkonsult AB. (ATON, 2007)

Byggnadsdel	U-värden ($W/m^2\text{°C}$)	Area hus 1 (m^2)	Area hus 2 (m^2)	Area hus 3 (m^2)
Tak	0,31	60	80	120
Ytterväggar	0,30	139,6	156,8	191,2
Golv (mot mark)	0,16	60	80	120
Fönster	1,35	14	16	20

Transmissionsförluster på huset kan nu beräknas

$$Q_t = \sum_i U_i \cdot A_i \quad (1)$$

Vidare måste hänsyn till ventilationen tas innan husets totala uppvärmningsbehov kan avgöras. Från hus byggda på mitten av 70-talet domineras ventilationssystem av frånluftsventilationen typ tillsammans med någon form av fläktinstallation. Ett sådant system hade genomsnittligt luftomsättning på 0.24 l/s, m^2 och har i detta arbete antagits ha konstant drifttid. Vidare i ekvation (2) ingår luftens densitet på $1,2 \text{ kg/m}^3$ och värmekapacitet på 1000 J/kg°C . (ATON, 2007)

$$Q_v = \rho \cdot c_p \cdot q_{vent} \quad (2)$$

För att avgöra lämplig värmepump beräknas uppvärmningsbehovet för huset vid dimensionerad vinterutetemperatur(DUT) som i Bromma är $-17,1\text{°C}$ (Boverket, 2009). Inomhustemperaturen har valts till 21°C då det är en allmänt rekommenderad temperatur och med resultatet från ekvation (1) och (2) kan nu det totala effektbehovet för hushållens uppvärmning beräknas i ekvation (3). (ATON, 2007)

$$P = (Q_v + Q_t) \cdot (t_{inne} - t_{ute}) \quad (3)$$

3.2 Värmepump

Utifrån beräknat värde i ekvation (3) kunde sedan en lämplig värmepump väljas vars avgivna värmeeffekt helst skall överensstämja med den nya standarden på 70 % av husets totala effektbehov. En modern och effektiv värmepump som valts är NIBE F1226 som går att beställa i olika storlekar och därmed har valts i tre olika dimensioner för att överensstämja med husets uppvärmningsbehov, se tabell 2.

Data för värmepumpens eleffekt i kompressorn \dot{E}_k har tagits från pumpens produktblad, se bilaga 2. Driftfall 0/45 användes vilket står för ingående brinetemperatur samt utgående radiatortemperatur. Värmepumpen använder sig av kylmediet R407C och från datablad, se bilaga 1, med dess köldmediumegenskaper sammanställs värden för respektive temperatur. (BOC, 2014) Värden på köldmediumet som använts i beräkningarna var densiteten ρ_0 vid

ingående brinetemperatur samt entalpiskillnaden Δh_1 utifrån returnerande radiatortemperatur samt ingående brinetemperatur. Volymflödet genom värmepumpscykeln samt ingående brinetemperatur ändras ytterst lite och volymflödet har antagits konstant. Utifrån kompressoreffekten kan volymflödet nu beräknas för de tre olika värmepumpsdimensionerna med följande formel. (Havtun, 2013)

$$\dot{V} = \frac{\dot{E}_k}{(\rho_0 \cdot \Delta h_1)} \quad (4)$$

Värdet ur ekvation (4) kan hittas i tabell 2 och behövs senare i beräkningen av effektuttaget ur borrhålet.

Tabell 2: Areor och uppvärmningsbehov vid DUT för huset samt avgiven värmeeffekt från värmepumpen. (NIBE, 2014)

Husarea (m ²)	120	160	240
Maximalt uppvärmningsbehov (kW)	5,30	6,59	9,18
Uppvärmningseffekt från Värmepump (kW)	3,77	4,58	6,74
Volymflödet i Värmepumpen (l/s)	0,43	0,49	0,67

3.3 Radiatortemperatur

Framgående radiatortemperatur är temperaturen på vattnet som värmts av värmepumpen och som sedan går ut till radiatorerna i huset. När det är riktigt kallt ute och uppvärmningsbehovet överskrider de 70 % pumpen är dimensionerad för värms vattnet ytterligare av en elpatron monterad till pumpen, se figur 1. Efter att vattnet gått igenom radiatorerna och värmt huset går det tillbaks till värmepumpen där det kallas för returnerande radiatortemperatur. Radiatortemperaturerna beror av husets uppvärmningsbehov som står i direkt relation mellan temperaturskillnaden ute och inomhus.

Vid beräkningen av radiatortemperaturerna har husets värmeöverföringsegenskaper förenklats med två konstanter, K_1 och K_2 , se ekvation (5) och (6). Dessa fastställs vid DUT för att sedan ingå i beräkningarna av de varierande temperaturerna. Beroende på hushåll sätts standardiserade värden på t_{fram} och t_{retur} vid DUT och temperaturerna 55°C respektive 45°C har antagits då de var vanliga radiatortemperaturer för hus byggda förr som värmepumparna dimensioneras efter. Radiatorexponenten sätts till $n = 0,3$ och detta ger (Claesson, 2010)

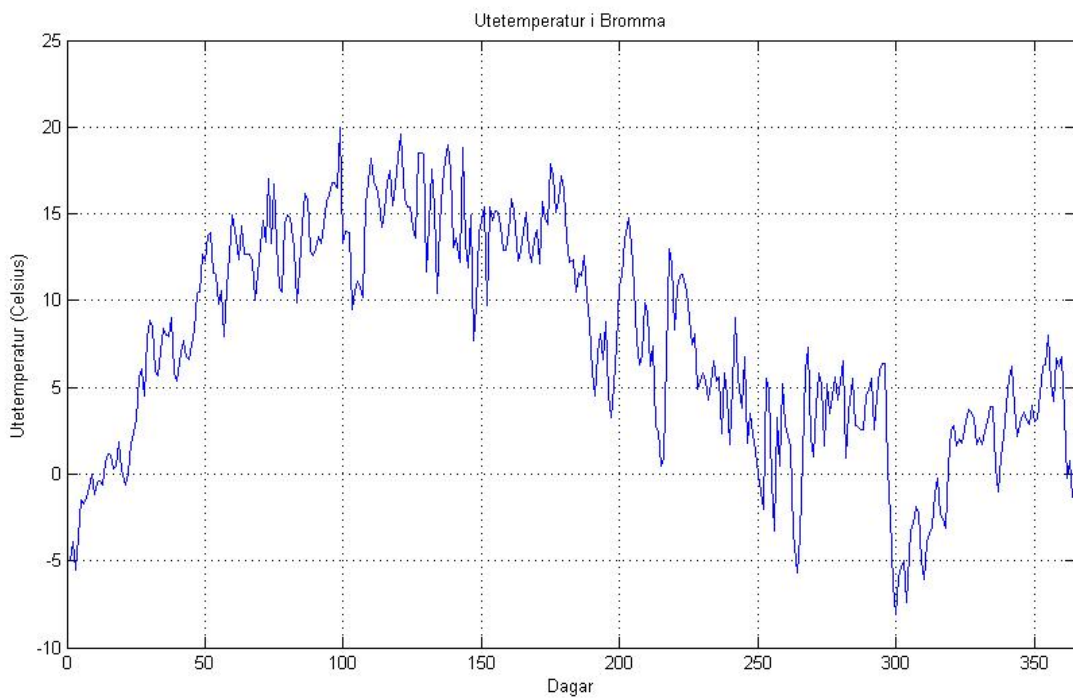
$$K_1 = \frac{\left(\frac{t_{fram} - t_{retur}}{\ln \left(\frac{t_{fram} - t_{inne}}{t_{retur} - t_{inne}} \right)} \right)^{1+n}}{t_{fram} - t_{retur}} \Bigg|_{DUT} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{t_{inne} - t_{ute}}{t_{fram} - t_{retur}} \Bigg|_{DUT} \quad (6)$$

Vidare förkortas temperaturuttrycken och gör dem mer överskådliga om två hjälpvariabler α och β införs, se ekvation (7) och (8). Temperaturerna i ekvationerna är inomhus temperaturen på 21°C och den varierande utetemperaturerna som ses i figur 3.

$$\alpha = K_2 \cdot e^{\frac{\ln \left(\frac{K_1 \cdot (t_{inne} - t_{ute})}{K_2} \right)}{1+n}} \quad (7)$$

$$\beta = e^{\frac{t_{inne} - t_{ute}}{\alpha}} \quad (8)$$



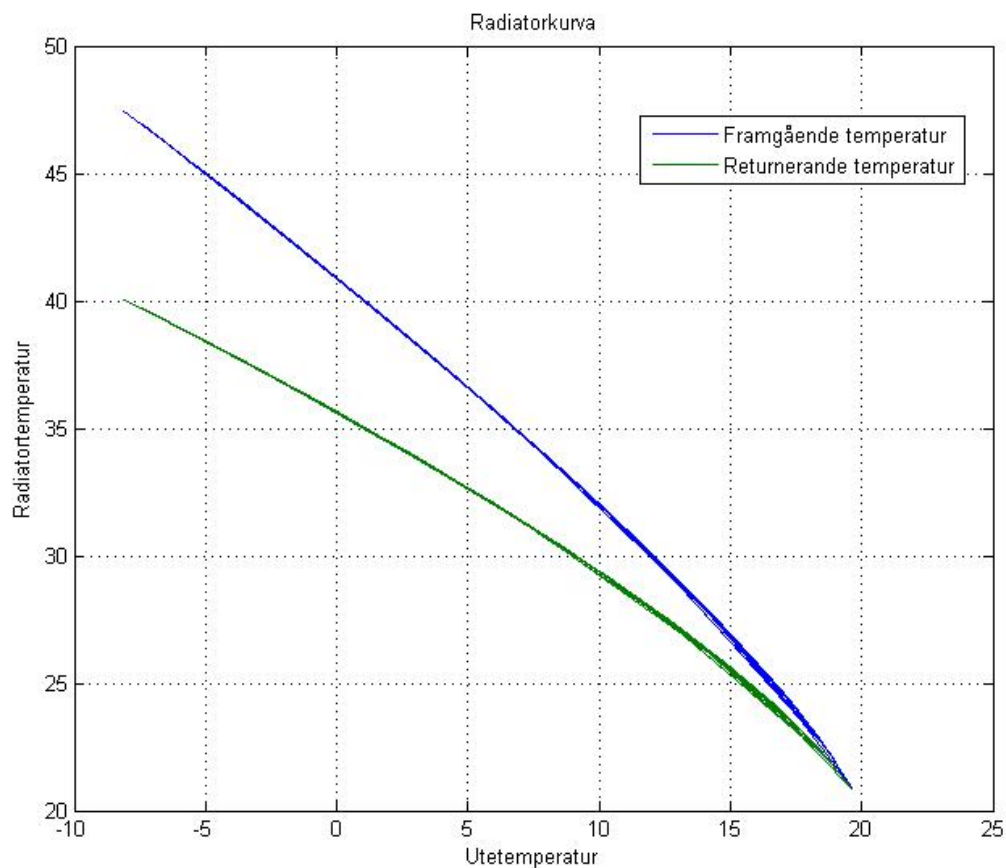
Figur 3: Utetemperaturen i Bromma 2013/03/01-2014/03/01 (Temperatur, 2014)

Därmed kan radiatortemperaturerna för varje hämtad utetemperatur över ett år bestämmas så att en konstant innetemperatur bibehålls. (Claesson, 2010)

$$t_{fram} = \frac{\beta \cdot (t_{inne} - t_{ute}) + K_2 \cdot t_{inne} \cdot (\beta - 1)}{K_2 \cdot (\beta - 1)} \quad (9)$$

$$t_{retur} = \frac{(t_{inne} - t_{ute}) + K_2 \cdot t_{inne} \cdot (\beta - 1)}{K_2 \cdot (\beta - 1)} \quad (10)$$

Temperaturerna från ekvation (9) och (10) visualiseras i förhållande mot utetemperaturen i figur 4. Vidare kan värmepumpens effektuttag ur borrhålet för varje dag bestämmas.



Figur 4: Radiatorkurva på framgående och returnerande temperaturer

3.4 Borrhålet

I detta projekt har ett approximativt värde på effektuttaget från borrhålet beräknats. Volymflödet från ekvation (4), köldmediumegenskaper för R407C vid uträknade radiatortemperatur ur ekvation (10) samt inkommande brinetemperatur till pumpen sätts in i ekvation (11). (Havtun, 2013).

$$Q_{borrhål} = \rho_{T_b} \cdot \dot{V} \cdot (h_{T_b} - h_{t_{retur}}) \quad (11)$$

Köldmediumegenskaperna som använts, se bilaga 2, är definierade för varje grad i heltal. Därför har radiatortemperaturerna avrundats till närmaste heltal innan varje uträkning per iteration skett. Detta kan medföra ett potentiellt fel och därför har uträkningar där varje temperatur avrundats uppåt samt nedåt utförts i ekvation (11). En procentuell avvikelse mellan värdena har sedan beräknats i ekvation (12).

$$fel = \frac{\sum Q}{\sum Q_{max,min}} \quad (12)$$

För att beräkna hur temperaturen i borrhålen ändras med tiden behövs flera av hålets dimensioner vars värden förutom längden ej ändrats för samtliga av fallen, se tabell 3. Förhållandet med borrhålets dimensioner och dess termiska resistans beskrivs av en integral, se ekvation (13), som brukar betecknas som g-funktionen som används vid temperaturberäkningen av borrhålet. (H. Yang a, 2010)

Tabell 3: Borrhålsdimensioner och vattenmediedata. (Claesson, 2011)

Borrhålsradie (m)	r	0,7m
Vattendensitet (kg/m³)	ρ	1000
Markkonduktivitet (W/m · °C)	k	0.3
Värmekapacitet för vatten (J/kg°C)	c _p	1000
Termisk diffusivitet (m²/s)	α = k/(ρ · c _p)	7,14 · 10 ⁽⁻⁸⁾
Tiden (s)	τ	—
Borrhålslängd (m)	L	80 / 100 / 132,5
Variabel av borrhåldjupet (m)	z	L/2

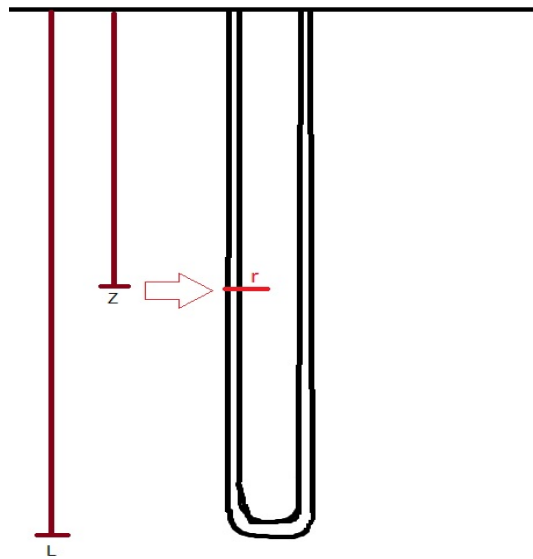
$$g = \int_0^L \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-l)^2}}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-l)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+l)^2}}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+l)^2}} \right) dl \quad (13)$$

Med g-funktionen och $Q_{borrhål}$ kända kan temperaturen i borrhålen undersökas samt hur temperaturen ändras per tidsenhet där i detta projekt tidssteget är en dag. Tiden τ är definierad

i sekunder enligt ekvation (14) där t är en växande variabel per dag som i beräkningarna börjar på 1 och går till sista dagen utav beräkningsprocessen på 3650 dagar.

$$\tau = 8640 \cdot t \quad (14)$$

Integrering görs för varje tidpunkt med avseende på l som täcker hela borrhålslängden L . Konstanten z bestämmer vid vilket djup i hålet som temperaturen ska beräknas och som vanligtvis definieras vid halva djupet för att så nära som möjligt få ett medelvärde på brinetemperaturen. Radien r kan också varieras för att jämföra temperaturen i tvärsnittet av kollektorn men blev i detta arbete placerad i borrhålsranden då det är vanligast samt att vattenvolymen där beräknas vara i stationärt läge, se figur 5.



Figur 5: Temperaturen i borrhålet beräknas vid radien r ute i hålranden och på halva djupet z .

För att beräkna hur brinetemperaturen sjunker summeras effektipulserna ur hålet för varje dag t , alltså differensen av en dags effektturtag jämfört med effektturtaget dagen innan. Vid dag ett har ingen värme extraherats ur borrhålet innan och $Q_{borrhål}(0)$ är således noll. Starttemperaturen T_g är den orörda grundtemperaturen i Bromma som är 8°C .

Den första effektipulsen inverkar på borrhålstemperaturen över hela tidsbeloppet medan den nästkommande effektipulsen endast påverkar från och med den nya tidpunkten. Därmed används för varje iteration den sista tidpunkten τ_n minus en tidpunkt innan den nuvarande beräkningstidpunkten τ_{t-1} . Serien får en tidsdifferens som krymper för varje tidsintervall och ser enligt Yavuzturk och Spitler ut på följande vis. (Yavuzturk, 1999)

$$T_b = T_g + \sum_{t=1}^{n=3650} \frac{Q(t) - Q(t-1)}{4 \cdot k \cdot \pi \cdot L} \cdot g(\tau_n - \tau_{t-1}) \quad (15)$$

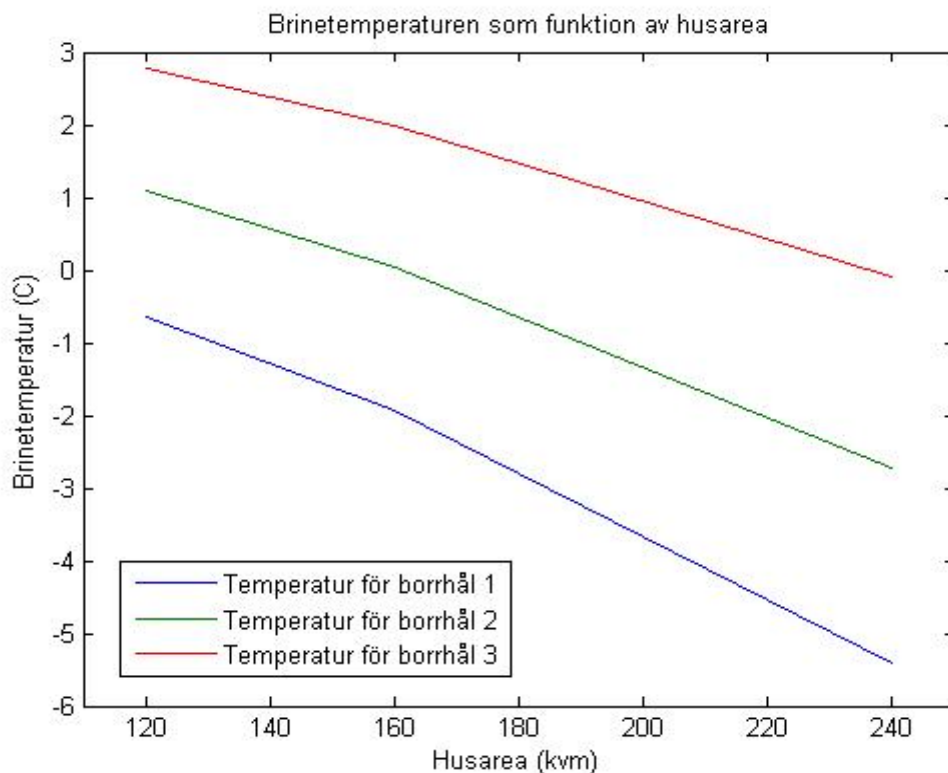
4 Resultat och Diskussion

Temperaturen i borrhålsranden som beräknats i ekvation (15) är vad rapporten huvudsakligen ämnar diskutera. Denna temperatur har beräknats efter drift på 3650 dagar och för 9 olika dimensionskompositioner. Resultatet av dessa driftsfall redovisas i tabell 4.

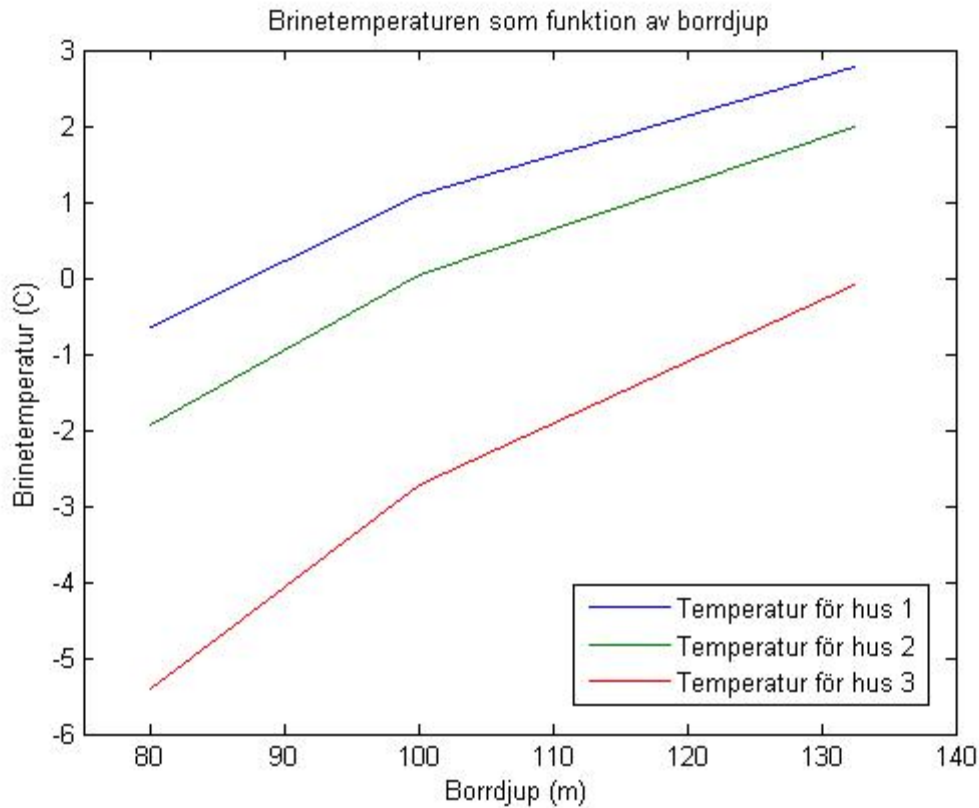
Tabell 4: Brinetemperaturen för de olika dimensionerna efter 10 år.

	Husarea (120m ²)	Husarea (160m ²)	Husarea (240m ²)
Borrdjup (80m ²)	-0,65°C	-1,94°C	-5,40°C
Borrdjup (100m ²)	1,08°C	0,05°C	-2,72°C
Borrdjup (132,5m ²)	2,78°C	2,00°C	-0,09°C

Alla temperaturer startade på 8°C så temperaturerna har sjunkit med över 5°C även för det minsta huset med djupast borrhål och 13,4°C för det största huset med grundast borrhål. Hur temperaturerna ändras med dimensionsändringarna blir lättare överskådlig i figur 7 och 8.



Figur 6: Diagram på hur brinetemperaturen sjunker med ökande area



Figur 7: Diagram på hur brinetemperaturen ökar med djupare borrhål

Utifrån diagramen går det att urskilja linjära likheter mellan temperaturdifferenser vid ökande husstorlek och minskande borrhåldjup. Utifrån beräknade värden kan förhållanden mellan de två dimensionsändringarna på brinetemperaturen utvärderas. I översta beräkningen nedanför uppskattas en genomsnittlig temperatursänkning per kvadratmeterökning för de tre borrhålen och i den undre beräkningen uppskattas en genomsnittlig temperaturökning per ökad borrhålsmeter för de tre hushållen.

$$\frac{T_1}{\Delta A} = \frac{|(T_{b3} - T_{b1})| + |T_{b6} - T_{b4}| + |(T_{b9} - T_{b7})|}{3(A_3 - A_1)} = \frac{4,85 + 3,8 + 2,78}{3 \cdot 120} \approx 0,032 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{T_2}{\Delta L} = \frac{|(T_{b7} - T_{b1})| + |T_{b8} - T_{b2}| + |(T_{b9} - T_{b3})|}{3(L_3 - L_1)} = \frac{3,43 + 3,94 + 5,31}{3 \cdot 52,5} \approx 0,080 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$$

Vid division av ovanstående resultaten fås ett förhållande hur temperaturen ändras mellan ökad borrhåldjup och ökad husarea.

$$\frac{0,080}{0,032} = 2,5$$

Resultatet ovan kan avläsas till att temperaturen i borrhålet påverkas ungefär lika mycket av ett $2,5\text{m}^2$ större hus och 1 meter djupare borrhål.

4.1 Känslighetsanalys

Felkällor i detta projekt kan hittas lite varstans. Till att börja med så har vikten i projektet legat på borrhålet och inte husets specifika energianvändning. Därav har inget simuleringsprogram använts för att hitta exakta effekttågängen från hushållet. Approximativa värden utifrån ATONs statistik har därför använts i beräkningarna och man bör därför ej förlita sig på att ens eget hus med liknande area byggt i samma tidsperiod har samma energianvändning. Beräkningarna syftar dock till att ge ett gott exempel till vilka värden som krävs för att gå vidare och analysera borrhålet. Därför bör man se på dimensionernas procentuella påverkan och lägga mindre vikt på den exakta gradtalspåverkan.

De intagna utetemperaturerna är över ett år och har sedan upprepats för att simulera ett längre tidsintervall. Därmed finns risken för att ett ovanligt varmt eller kallt år har använts och därmed ge missvisande värden.

Dessutom har som tidigare tagits upp i rapporten avrundningar i beräkningarna av effektuttagningen ur hållet gjorts. Utifrån dessa kunde konstateras att det största felet fanns i jämförelsen mot negativa avrundningar och att effektvärdena som mest skulle kunna vara 0,27 % för stora. Då effektuttaget står i direkt negativ relation tillsammans med g-funktionen mot hur temperaturen ändras kan det maximalt ge ett utslag på 0,27 % för höga brinetemperaturer.

5 Slutsatser och framtida arbete

Ur resultatet kan avläsas att ur det mest påfrestande fallet med grundast hål och störst hus sjunker temperaturen med $13,4^{\circ}\text{C}$ vilket sänker värmefaktorn för värmepumpen avsevärt. Rekommenderade åtgärder för sådant fall är definitivt att försöka återladda hålet ytterligare under sommaren. Exempelvis att installera en uteluftkonvektor eller att ha en slinga plastslang på ett södervänt tak med cirkulerande vätska för att absorbera mer värme under sommaren.

Då detta arbete endast undersökt i hushåll i Bromma kan en intressant vidareutveckling på arbetet vara att genomföra jämförelser med andra orter både norr och söderut i landet. I och med ändrat klimat finns potentiellt en möjlighet att inverkan av area på huset och borrhålsdjupet får nya proportioner.

6 Referenser

ATON. 2007. *Energideklarering av bostadsbyggnader.* 2007.

Björk, m.fl. 2013. *Bergvärme för den intresserade-En handbok för dig som äger eller funderar på att köpa en bergvärmepump.* 2013.

BOC. 2014. BOC-A Member of The Linde Group. [Online] 2014. [Citat: den 02 05 2014.]

Boverket. 2009. *www.boverket.se.* [Online] den 16 11 2009.

Claesson, Joachim. 2011. *Performance Evaluation of Combined Heat Sources for Innovative.* 2011.

Claesson, m.fl. 2010. *Beräkningsmetoder för årsvärmefaktorn för värmepumpsystem för jämförelse, systemval och dimensionering.* 2010.

Energimyndigheten. 2014. <https://www.energimyndigheten.se/Hushall/Din-uppvarmning/Varmepump/Bergvarme/>. [Online] 2014. [Citat: den 24 03 2014.]

H. Yang a, P. Cui , Z. Fang. 2010. *Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems.* 2010.

Havtun, Hans. 2013. *Applied Thermodynamics- Collection of Formulas.* 2013.

Lars Jensen, Bearbetad av Catarina Warfvinge. 2001. *Värmebehövsberäkning.* 2001.

Nationalencyklopedin. 2014. [Online] 2014. [Citat: den 24 03 2014.] <http://www.ne.se/lang/jordvärmesystem>.

NIBE. 2014. <http://www.nibe.se/Produkter/Bergvarmepumpar/Funktion/>. [Online] 2014. [Citat: den 24 03 2014.]

Temperatur. 2014. *temperatur.nu.* [Online] den 01 03 2014.

Yavuzturk, Spitler. 1999. *A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers.* 1999.

Bilaga 1

Tekniska data för köldmediet R407C



R407C

Temp	Pressure (L)	Pressure (V)	Density (L)	Density (V)	Enthalpy (L)	Enthalpy (V)	Entropy (L)	Entropy (V)	Mass frac. (L)	Mass frac. (L)	Mass frac. (L)	Mass frac. (V)	Mass frac. (V)	Mass frac. (V)
[C]	[bar]	[bar]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/K·kg]	[kJ/K·kg]	[R32]	[R125]	[R134a]	[R32]	[R125]	[R134a]
-25	2.308	1.74	1323	7.719	165.7	395.7	0.8693	1.809	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-24	2.402	1.817	1319	8.044	167	396.2	0.8747	1.808	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-23	2.499	1.897	1316	8.379	168.4	396.8	0.88	1.806	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-22	2.599	1.979	1313	8.725	169.7	397.3	0.8854	1.805	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-21	2.702	2.064	1310	9.082	171.1	397.9	0.8907	1.803	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-20	2.807	2.152	1306	9.451	172.4	398.4	0.896	1.801	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-19	2.917	2.243	1303	9.831	173.8	399	0.9013	1.8	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-18	3.029	2.337	1300	10.22	175.1	399.5	0.9066	1.798	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-17	3.145	2.434	1296	10.63	176.5	400.1	0.9118	1.797	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-16	3.264	2.534	1293	11.05	177.8	400.6	0.9171	1.795	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-15	3.386	2.637	1289	11.48	179.2	401.2	0.9224	1.794	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-14	3.512	2.744	1286	11.92	180.6	401.7	0.9276	1.792	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-13	3.641	2.853	1283	12.38	181.9	402.2	0.9328	1.791	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-12	3.774	2.966	1279	12.85	183.3	402.7	0.9381	1.79	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-11	3.911	3.083	1276	13.33	184.7	403.3	0.9433	1.788	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-10	4.052	3.203	1272	13.83	186.1	403.8	0.9485	1.787	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-9	4.196	3.326	1269	14.35	187.4	404.3	0.9537	1.785	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-8	4.344	3.453	1265	14.88	188.8	404.8	0.9588	1.784	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-7	4.497	3.584	1262	15.42	190.2	405.4	0.964	1.783	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-6	4.653	3.719	1258	15.98	191.6	405.9	0.9692	1.781	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-5	4.813	3.857	1255	16.56	193	406.4	0.9743	1.78	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-4	4.977	4	1251	17.15	194.4	406.9	0.9795	1.779	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-3	5.146	4.146	1248	17.76	195.8	407.4	0.9846	1.778	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-2	5.319	4.297	1244	18.39	197.2	407.9	0.9898	1.776	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
-1	5.496	4.452	1240	19.04	198.6	408.4	0.9949	1.775	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
0	5.678	4.61	1237	19.7	200	408.9	1	1.774	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
1	5.865	4.774	1233	20.39	201.4	409.3	1.005	1.773	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
2	6.055	4.941	1229	21.09	202.8	409.8	1.01	1.772	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
3	6.251	5.113	1226	21.81	204.3	410.3	1.015	1.77	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
4	6.451	5.29	1222	22.55	205.7	410.8	1.02	1.769	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
5	6.656	5.471	1218	23.31	207.1	411.2	1.025	1.768	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
6	6.866	5.657	1214	24.1	208.5	411.7	1.031	1.767	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
7	7.081	5.847	1211	24.9	210	412.2	1.036	1.766	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
8	7.301	6.043	1207	25.73	211.4	412.6	1.041	1.765	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
9	7.526	6.243	1203	26.58	212.9	413.1	1.046	1.764	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
10	7.756	6.449	1199	27.45	214.3	413.5	1.051	1.762	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
11	7.991	6.659	1195	28.35	215.8	414	1.056	1.761	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
12	8.232	6.875	1191	29.27	217.2	414.4	1.061	1.76	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
13	8.478	7.096	1187	30.22	218.7	414.8	1.066	1.759	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
14	8.729	7.323	1183	31.19	220.1	415.3	1.071	1.758	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
15	8.986	7.554	1179	32.18	221.6	415.7	1.076	1.757	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
16	9.249	7.792	1175	33.21	223.1	416.1	1.081	1.756	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
17	9.517	8.035	1171	34.26	224.6	416.5	1.086	1.755	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
18	9.791	8.283	1167	35.34	226	416.9	1.091	1.754	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
19	10.07	8.538	1163	36.45	227.5	417.3	1.096	1.753	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
20	10.36	8.798	1159	37.59	229	417.7	1.101	1.752	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
21	10.65	9.065	1155	38.76	230.5	418.1	1.106	1.751	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
22	10.95	9.337	1151	39.96	232	418.5	1.111	1.75	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
23	11.25	9.616	1146	41.19	233.5	418.8	1.116	1.748	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
24	11.56	9.901	1142	42.46	235.1	419.2	1.121	1.747	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
25	11.88	10.19	1138	43.76	236.6	419.6	1.126	1.746	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
26	12.2	10.49	1133	45.09	238.1	419.9	1.131	1.745	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
27	12.53	10.79	1129	46.46	239.6	420.3	1.136	1.744	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
28	12.87	11.1	1124	47.87	241.2	420.6	1.141	1.743	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
29	13.21	11.42	1120	49.32	242.7	420.9	1.146	1.742	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
30	13.56	11.75	1116	50.8	244.3	421.3	1.151	1.741	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
31	13.92	12.08	1111	52.33	245.8	421.6	1.156	1.74	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
32	14.28	12.42	1106	53.9	247.4	421.9	1.161	1.739	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
33	14.65	12.76	1102	55.51	249	422.2	1.166	1.738	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
34	15.03	13.12	1097	57.16	250.5	422.5	1.171	1.737	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
35	15.41	13.48	1092	58.86	252.1	422.8	1.176	1.736	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
36	15.8	13.84	1087	60.61	253.7	423	1.181	1.734	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
37	16.2	14.22	1083	62.41	255.3	423.3	1.187	1.733	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
38	16.61	14.6	1078	64.25	256.9	423.5	1.192	1.732	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
39	17.03	14.99	1073	66.15	258.5	423.8	1.197	1.731	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
40	17.45	15.39	1068	68.11	260.1	424	1.202	1.73	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
41	17.88	15.8	1063	70.11	261.8	424.2	1.207	1.729	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
42	18.31	16.21	1058	72.18	263.4	424.4	1.212	1.728	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52
43	18.76	16.64	1052	74.31	265.1	424.6	1.217	1.726	0.23	0.25	0.52	0.23	0.25	0.52

Bilaga 2

Tekniska data



Typ		5	6	8	11
Effektdata vid nom flöde <small>Avser prestanda för värmepump utan cirkulationspumpar</small>					
0/35					
Avgiven effekt	kW	4,60	5,56	7,63	11,01
Kyleffekt	kW	3,51	4,33	6,01	8,59
Eleffekt	kW	1,09	1,24	1,62	2,42
COP	-	4,22	4,50	4,71	4,55
0/50					
Avgiven effekt	kW	3,63	4,45	6,32	10,32
Kyleffekt	kW	2,42	3,06	4,44	7,14
Eleffekt	kW	1,21	1,39	1,88	3,18
COP	-	3,01	3,20	3,36	3,25
Effektdata enligt EN 14511					
0/35					
Avgiven effekt	kW	4,41	5,34	7,33	10,65
Eleffekt	kW	1,14	1,31	1,70	2,62
COP _{EN14511}	-	3,87	4,09	4,31	4,06
0/45					
Avgiven effekt	kW	3,77	4,58	6,74	10,14
Eleffekt	kW	1,20	1,38	1,86	3,11
COP _{EN14511}		3,14	3,31	3,62	3,26
Tillsatseffekt	kW	1/2/3/4/5/6/7 (omkopplingsbar till 2/4/6/9)			
Elektrisk data					
Märkspänning		400V 3NAC 50 Hz			
Max driftström kompressor (Inkl. Styrsystem & Cirk.Pumpar)	A _{rms}	9,5 (1-fas)	4,6	6,6	9,0
Startström	A _{rms}	23	18	23	29
Max tillåten impedans i anslutningspunkt ¹⁾	ohm	-	-	-	-
Max driftström värmepump inkl 1 — 2 kW elpatron (Rekomenderad Avsäkring)	A _{rms}	18(20)	13(16)	15(16)	18(20)
Max driftström värmepump inkl 3 — 4 kW elpatron (Rekomenderad Avsäkring)	A _{rms}	18(20)	13(16)	15(16)	18(20)
Max driftström värmepump inkl 5 — 6 kW elpatron (Rekomenderad Avsäkring)	A _{rms}	18(20)	13(16)	15(16)	18(20)
Max driftström värmepump inkl 7 kW elpatron, leveranskopplad (Rekomenderad Avsäkring)	A _{rms}	18(20)	19(20)	21(25)	23(25)
Max driftström värmepump inkl 9 kW elpatron, kräver omkoppling (Rekomenderad Avsäkring)	A _{rms}	24(25)	19(20)	22(25)	24(25)
Effekt, KB-pump	W	80 - 140	80 - 140	80 - 140	130 - 250
Effekt, VB-pump	W	50 - 80	50 - 80	50 - 80	80 - 140
IP-klass		IP 21			
Köldmediekrets					
Typ av köldmedium		R407C			
Fyllnads mängd	kg	1,1	1,4	1,5	1,5
Brytvärde pressostat HP	bar	29			
Differens pressostat HP	bar	-7			
Brytvärde pressostat LP	bar	1,5			
Differens pressostat LP	bar	1,5			
Köldbärarkrets					
Max systemtryck köldbärare	bar	3			
Min flöde	l/s	0,18	0,22	0,30	0,43
Nominellt flöde	l/s	0,22	0,30	0,42	0,64
Extern tillg. tryck vid nom flöde	kPa	57	49	39	57
Max/Min Inkommande KB-temp	°C	se diagram			
Min Utgående KB-temp	°C	-10			