

CHALMERS



Säsongslagring av solvärme

Ett sätt att energieffektivisera miljonprogramsbostäderna vid Vaniljgatan

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

SARA LANDERGREN
NIKLAS SKOGSÄTER

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggfysik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2011

Examensarbete 2011:43

Säsongslagring av solvärme

Ett sätt att energieffektivisera miljonprogramsostäderna vid Vaniljgatan

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

SARA LANDERGREN

NIKLAS SKOGSÄTER

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggfysik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2011

Säsongslagring av solvärme
Ett sätt att energieffektivisera miljonprogramsostäderna vid Vaniljgatan
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

SARA LANDERGREN
NIKLAS SKOGSÄTER

© SARA LANDERGREN, NIKLAS SKOGSÄTER, 2011

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2011:43

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggfysik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Fotografiet visar ett av flerbostadshusen vid Vaniljgatan.

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2011

Säsongslagring av solvärme

Ett sätt att energieffektivisera miljonprogramsbestånderna vid Vaniljgatan

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

SARA LANDERGREN

NIKLAS SKOGSÄTER

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggfysik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Fram till år 2050 ska energiförbrukningen halveras jämfört med nivåerna år 1995, enligt miljömålet "God bebyggd miljö". För att klara dessa mål ställs nya hårdare krav på bygg- och fastighetssektorn gällande energihushållning.

Ett välkänt energiproblem är miljonprogrammet. I genomsnitt förbrukar en miljonprogramsbyggnad 220 kWh/m^2 och år. Hos studieobjektet Vaniljgatan ligger den faktiska förbrukningen för år 2010 på 237 kWh/m^2 och år och området kan därför antas representera miljonprogrammet i stort. Stora energibesparing kan göras här.

Solen är en enorm förnyelsebar energikälla. Problemet är att största delen av solenergin kommer sommartid, men behovet av värme är som störst vintertid. Detta skulle kunna lösas med säsongslagring av solvärme.

Syftet med examensarbetet är att belysa möjligheterna kring säsongslagrad värme vid Vaniljgatan och hur detta står sig i förhållande till andra energibesparande åtgärder samt om det finns lönsamhet i lagret.

De vanligaste typerna av säsongslager är bergrum, groplager, slangar i lera, borrhål i berg och akviferlager. En jämförelse av referensobjekt visar på att borrhål i berg är mest lämpad för Vaniljgatan. Principen för metoden är att överskottsenergi från solen förs ner via borrhål till marken där den lagras. När behov uppstår tas värme från lagret.

Värmeberäkning visar att ett solvärmesystem med borrhålslager vid Vaniljgatan skulle minska dess energianvändning till 127 kWh/m^2 första året, ner till 66 kWh/m^2 efter 15 år. Kostnadsberäkningar visar dock att det aldrig blir lönsamt inom en 30 års period med rimliga låneränta och fjärrvärmepris.

Nyckelord: Solvärme, solenergi, solfångare, säsongslager, miljonprogram, energieffektivisering, bergrumslager, groplager, lerlager, slangar i lera, borrhålslager, akviferlager, markvärmepålägg, Vaniljgatan, värmelager

Seasonal storage of solar heating
A way to make Vaniljgatan more energy efficient
Diploma Thesis in the Engineering Programme
Building and Civil Engineering

SARA LANDERGREN
NIKLAS SKOGSÄTER
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Building Technology
Building Physics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

By the year 2050, the energy consumption should be cut in half compared with levels in 1995, according to the Swedish environmental objective “God bebyggd miljö”. To meet these goals, the construction and property sector must take action.

A well known problem in the Swedish property sector is the great energy usage of the so called “miljonprogrammet”, which was built during the years 1965-75. On average, a property from this time has an energy consumption of 220 kWh/m² and year. Our study object, the housings at Vaniljgatan, had an actual energy consumption of 237 kWh/m² during the year 2010; therefore we have assumed that it could represent an overall building from miljonprogrammet. Buildings from this time have potential for huge energy savings if the right methods are applied.

The sun is a huge renewable energy source. The problem is that most part of the energy arrives during the summer, but the need of heating is greatest during the winter. This can be solved by the use of seasonally stored heat.

The purpose of this study is to highlight the opportunities around seasonally stored heat for the housings at Vaniljgatan, and furthermore see how it compares to more commonly used methods for energy conservation.

The most commonly used methods for seasonal storage is cave room, pit storage, pipes in clay, borehole in rock and aquifer storage. A Comparison of the methods has been made and the most suitable method for Vaniljgatan was found to be boreholes into the rock beneath. By collecting the surplus solar energy from the summer and storing it for further distribution during the cold winter months, large energy savings can be made.

Energy calculations predict that a solar heating system combined with borehole heat storage at Vaniljgatan would reduce the energy consumption to 127 kWh/m² in the first year of operation and down to about 66 kWh/m² after 15 years of operation. However, cost estimates show that seasonal heat storage with solar energy will never be profitable within a 30-year period with reasonable loan rates and heating rates.

Key words: solar-energy, sun heat, methods for seasonal heat storage, Vaniljgatan, energy efficiency, methods of energy conservation, miljonprogram, caverns, boreholes, pipes in clay, aquifer, pit storage, environmental objective

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
DIPLOMA THESIS IN THE ENGINEERING PROGRAMME	II
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	2
1.2 Avgränsning	2
1.3 Metod	2
2 MILJONPROGRAMMET	3
2.1 Vaniljgatan	4
3 SOLENERGI, SOLVÄRME OCH SOLFÅNGARE	6
3.1 Vakuumrörsbaserade solfångare	7
3.2 Plana solfångare	8
4 SÄSONGSLAGRING AV SOLVÄRME	9
4.1 Bergrum	11
4.1.1 Lyckebo	12
4.2 Grop	13
4.2.1 Lambohov	14
4.3 Borrhål i berg	15
4.3.1 Lulevärme	16
4.4 Slang i lera	17
4.4.1 Söderköping	18
4.5 Akvifer	19
4.5.1 SAS Frösundavik	20
4.6 Jämförelse	21
5 SÄSONGSLAGER VID VANILJGATAN	22
5.1.1 Värmeberäkningar	24
5.1.2 Kostnadsberäkningar	27
6 RESULTAT	29

7	ANALYS	32
8	SLUTSATS	34
9	DISKUSSION	35
10	REFERENSER	36

Bilaga 1 - Ritningar

Bilaga 2 - Värmeberäkningar

Bilaga 3 - Kostnadsberäkningar

Förord

Följande rapport är den avslutande delen av vår utbildning till byggingenjörer vid Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet omfattar 15 hp och är skrivet under vårterminen 2011, i samarbete med Ramböll.

Vägen från idé till färdigt examensarbete har varit lång och krokig. Vi har fått göra grova antaganden och förenklingar för att ro i hamn vårt arbete. Trots många problem är vi mycket glada över att vi aldrig gav upp, utan kämpade vidare. Resultatet överträffade våra förväntningar med råge.

På vägen har vi stött på ett antal eldsjälar som lagt ner tid och resurser för att hjälpa oss komma vidare i vårt arbete. Vår största stöttepelare har varit Göran Frenning på Ramböll. Utan honom hade det aldrig blivit ett examensarbete. Han har tagit sig tid att vägleda oss, uppmuntrat oss i svåra tider och alltid kommit med en glad historia som berikat vår tillvaro. På Chalmers har vi haft vår handledare Carl-Eric Hagentoft, som har guidat oss genom allt det praktiska med att skriva ett examensarbete. Han har alltid försökt peka oss i rätt riktning och tagit sig tid när ingen tid funnits. När Carl-Eric inte har varit tillgänglig har andra personer tagit hans plats som handledare. Johan Claesson och Jan-Olof Dalenbäck har båda tagit sig tid för att besvara våra frågor när nöden varit stor och hjälpt oss med sin spetskompetens.

Utan dessa eldsjälar hade vi aldrig lyckats med detta examensarbete. Därför vill vi ge dessa fantastiska människor vårt största tack!

Sist men inte minst hoppas vi att detta examensarbete ska bidra, om inte mycket så åtminstone lite grann, till att rädda Jonas hatt.

Göteborg juni 2011

Sara Landergren

Niklas Skogsäter

Beteckningar

Grekiska gemena

η_{panel}	Verkningsgrad på solfångare [%]
λ	Värmeledningsförmåga [W/mK]
λ_{granit}	Värmeledningsförmåga för granit [W/mK]
λ_{iso}	Värmeledningsförmåga för isolering [W/mK]
$\lambda_{plaströr}$	Värmeledningsförmåga för plaströr [W/mK]
λ_{vatten}	Värmeledningsförmåga för vatten [W/mK]
μ_{vatten}	Viskositet för vatten [kg/ms]
ρ	Densitet [kg/m^3]
ρ_{vatten}	Densitet för vatten [kg/m^3]

Latinska versaler

A	Area [m^2]
A_{BOA}	Uppvärmd bostadsyta [m^2]
A_{iso}	Area på lagrets isolerade del [m^2]
A_{mark}	Area på lagrets oisolerade del [m^2]
A_{panel}	Area på solfångare [m^2]
A_{varm}	Area på den uppvärmda ytan från ett borrhål [m^2]
C	Volymetrisk värmekapacitet [Wh/m^3K]
C_{granit}	Volymetrisk värmekapacitet för granit [Wh/m^3K]
C_{vatten}	Volymetrisk värmekapacitet för vatten [Wh/m^3K]
E	Värmeenergi [Wh]
$E_{ack,tr}$	Transient ackumulerad värmeförlust [Wh]
E_{behov}	Värmeenergibehov för Vaniljgatan [Wh]
E_{borr}	Värmeenergi i varje borrhål [Wh]
$E_{direkt solvärme}$	Värmeenergi som tas direkt från solfångarna [Wh]
E_{extra}	Kompletterande värmeenergi från fjärrvärme [Wh]
$E_{förbrukning}$	Energiförbrukning för Vaniljgatan [Wh/m^2]
$E_{förbrukning,ny}$	Energiförbrukning för Vaniljgatan med säsongslager [Wh/m^2]
$E_{förlust}$	Värmeförlust för lagret [Wh]
E_{lagrad}	Värmeenergi som lagras [Wh]
E_{mark}	Värmeförlust mellan marken och lagrets oisolerade del [Wh]
E_{panel}	Värmeenergi från solfångare [Wh]
E_{sol}	Solstrålning [Wh/m^2]
$E_{stat,iso}$	Stationär värmeförlust mellan marken och lagrets isolerade del [Wh]
$E_{stat,mark}$	Stationär värmeförlust mellan marken och lagrets oisolerade del [Wh]
$E_{stationär}$	Stationär värmeförlust [Wh]
$E_{tillfört}$	Total Värmeenergi från solfångare och lager [Wh]
$E_{transient}$	Transient värmeförlust mellan marken och lagrets oisolerade del [Wh]
E_{uttag}	Energimängd uttagen från lagret [Wh]
$E_{vaniljgatan}$	Energiförbrukning för Vaniljgatan [Wh]
$E_{vaniljgatan,ny}$	Energiförbrukning för Vaniljgatan med säsongslager [Wh]
$E_{överskott}$	Energiöverskott från Vaniljgatan [Wh]
NU	Nusselts tal [—]

Pr	Prandtls tal $[-]$
Q	Värmeeffekt $[W]$
Q_{borr}	Värmeeffekt i varje borrhål $[W]$
$Q_{borr,behov}$	Värmeeffekt i varje borrhål baserat på värmebehovet $[W]$
$Q_{borr,möjlig}$	Värmeeffekt i varje borrhål baserat på maxkapacitet $[W]$
Q_{panel}	Värmeeffekt från solfångarna $[W]$
$Q_{stat,iso}$	Stationär värmeeffekt förlust mellan marken och lagrets isolerade del $[W]$
$Q_{stat,mark}$	Stationär värmeeffekt förlust mellan marken och lagrets oisolerade del $[W]$
$Q_{vaniljgatan}$	Värmeeffekt för Vaniljgatan $[W]$
R	Värmemotstånd $[m^2K/W]$
R_{borr}	Värmeövergångsmotstånd mellan rör och mark $[mK/W]$
R_{granit}	Värmeövergångsmotstånd för marken $[mK/W]$
R_{lager}	Totalt värmeövergångsmotstånd mellan fluid och lager $[mK/W]$
$R_{laminärt}$	Totalt värmeövergångsmotstånd vid laminär strömning $[mK/W]$
$R_{rör}$	Värmeövergångsmotstånd för rörväggen $[mK/W]$
$R_{turbulent}$	Totalt värmeövergångsmotstånd vid turbulent strömning $[mK/W]$
R_{vatten}	Värmeövergångsmotstånd mellan fluid och rörvägg $[mK/W]$
RE	Reynolds tal $[-]$
T	Temperatur $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{borr}	Aktuell varm fluidtemperatur i varje borrhål $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{lager}	Aktuell temperatur i lagret $[K]$ $[^{\circ}C]$
$T_{lager,m}$	Medeltemperatur i lagret $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{mark}	Ursprungstemperatur i marken $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{panel}	Aktuell varm fluidtemperatur från solfångarna $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{retur}	Aktuell kyld fluidtemperatur $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{tapp}	Temperatur på kallt kranvatten $[K]$ $[^{\circ}C]$
$T_{ute,m}$	Årsmedeltemperatur för uteluften $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{uttag}	Aktuell varm fluidtemperatur efter uttag $[K]$ $[^{\circ}C]$
T_{vatten}	Vattentemperatur $[K]$ $[^{\circ}C]$
$T_{värmekudde}$	Temperatur på värmekudden runt lagret $[K]$ $[^{\circ}C]$
$T_{överskott}$	Aktuell fluidtemperatur vid laddning $[K]$ $[^{\circ}C]$
U	Värmegenomgångskoefficient $[W/m^2K]$
V	Volym $[m^3]$
V_{lager}	Total volym på lagret $[m^3]$

Latinska gemena

a_{granit}	Värmediffusivitet $[m^2/s]$
c_p	Specifik värmekapacitet $[Wh/kgK]$
d	Materialtjocklek $[m]$
d_{iso}	Isoleringstjocklek $[m]$
e_{tr}	Ackumulerat, dimensionslöst värme flöde $[-]$
$h(h/r, 0.1)$	Värmeförlustfaktor $[-]$
h_{iso}	Höjd på lagrets isolerade del $[m]$
h_{lager}	Total höjd på lagret, längd på borrhål $[m]$
h_{mark}	Höjd på lagrets oisolerade del $[m]$
l	Värmeöverföringslängd för lagret $[m]$

l'	Värmeöverföringslängd för marken och isoleringen [m]
l_{borr}	C-C avstånd mellan borrhål [m]
l_{mark}	Värmeöverföringslängd för marken [m]
n_{borr}	Antal borrhål [st]
$n_{halv\ klart}$	Antal dygn på en månad som är halv klara [$dygn$]
n_{mulet}	Antal dygn på en månad som är mulna [$dygn$]
n_{soligt}	Antal dygn på en månad med sol [$dygn$]
$n_{år}$	Antal år [st]
r_{borr}	Radien på ett borrhål [m]
r_{lager}	Radien på lagret [m]
$r_{rör,inre}$	Radien på insidan av röret [m]
$r_{rör,yttre}$	Radien på utsidan av röret [m]
r_{varm}	Cylinderradie, uppvärmd yta runt varje borrhål [m]
t	tid [h]
$t_{månad}$	Antal timmar på en månad [h]
$t_{år}$	Antal timmar på ett år [h]
$\dot{v}$	Flöde [m^3/s] [l/s]
$\dot{v}_{borr}$	Flöde i ett borrhål [m^3/s] [l/s]
$\dot{v}_{borr,max}$	Maximalt tillåtna flöde i ett borrhål [m^3/s] [l/s]
$\dot{v}_{central}$	Flöde från solfångare fram till borrhålen [m^3/s] [l/s]

1 Inledning

Klimatdebatten är i full gång. En ökad förbränning av fossila bränslen har, enligt de flesta forskare, ett direkt samband med växthuseffekten. Det finns ett stort behov av att minska energianvändningen och hitta alternativa energikällor till fossila bränslen.

Ett stort ansvar i klimatfrågan vilar på byggsektorn, som står för närmare 40 % av Sveriges energianvändning (Boverket, 2005). Regeringen har i miljömålet ”God bebyggd miljö” fastställt att energianvändningen för uppvärmning av bostäder och lokaler ska minska med hälften fram till år 2050 jämfört med år 1995 (Miljömålsportalen, 2010). Ett delmål är dessutom att helt fasa ut de fossila bränslena till år 2020 samt sänka energiförbrukningen med 20 % jämfört med 1995. För att klara dessa mål ställs nya hårdare krav på bygg- och fastighetssektorn gällande energihushållning.

Genom att utnyttja solen som energikälla kan en del av energianvändningen ersättas med förnyelsebar energi. Boverkets byggregler tillåter att den specifika energianvändning för en byggnad reduceras med samma mängd energi, som kan tillgodoses från solpaneler på huset. Solenergi har dock en begränsning. Tillgången av solenergi är som störst på sommaren när energibehovet till uppvärmning är som minst och vice versa på vintern. Detta kan lösas genom att solenergi säsongslagras från sommar till vinter.

Under 1960-talet började miljonprogrammet byggas i Sverige. Miljödebatten hade ännu inte kommit igång och miljonprogrammet byggdes därför utan fokus på energieffektivisering. En genomsnittlig byggnad från denna tid har en energianvändning på 220 kWh/m²år (Energimyndigheten, 2010). Detta kan sättas i förhållande till gällande krav från Boverket på 110 kWh/m²år för nybyggda bostäder i södra Sverige. Det finns således stor potential för energibesparande åtgärder inom miljonprogrammet. Säsongslagrad solvärme skulle kunna vara ett sätt att energieffektivisera miljonprogrammet, för att komma ett steg närmre miljömålet ”God bebyggd miljö”.

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att se över möjligheterna att applicera ett solvärmesystem med säsongslager inom miljonprogramsområden. Fokus ligger på bostäderna vid Vaniljgatan strax nordöst om Göteborg. Arbetet ska ta reda på om det är möjligt att använda säsongslagrad solvärme för att energieffektvisera miljonprogrammet. Arbetet ska också besvara frågor kring kostnader och lönsamhet samt hur ett solvärmesystem med säsongslager står sig mot vanliga renoveringsmetoder, som exempelvis tilläggsisolering. Slutligen ska arbetet visa på hur solvärmesystemet med säsongslager står sig mot miljömål och energikrav från regeringen, för att en hållbarare framtid ska kunna uppnås.

1.2 Avgränsning

Examensarbetet tar endast upp beprövade sensibla värmelagringsmetoder för säsongslager. Vidare har examensarbetet avgränsats till att endast behandla Vaniljgatan, som får representera ett typiskt miljonprogramsområde. Värmeberäkningarna bygger på grova antaganden och förenklingar. Någon djupare studie över systemet ovan mark har inte gjorts. Examensarbetet behandlar inte miljöpåverkan i marken. Ingen djupare studie av hur markens hållfasthet påverkas av olika typer av säsongslager kommer göras.

1.3 Metod

Genom litteraturstudier har fakta samlats kring miljonprogrammet, solpaneler och lagringsmetoder. Därefter görs en jämförelse av befintliga säsongslagringsanläggningar för att kunna avgöra vilken metod som är mest lämpad för bostäderna vid Vaniljgatan.

Vald lagringsmetod kommer att anpassas efter de förutsättningar som finns vid vårt studieobjekt samt de förutsättningar som fås genom litteraturstudier. Dessa förutsättningar utgörs av exempelvis tillgängliga ytor, energibehov och verkningsgrad på solfångare.

Genom värme- och kostnadsberäkningar fås ett resultat för säsongslagret. Beräkningarna görs för hand med Excel som hjälpmedel. Resultatet jämförs med tidigare examensarbete av Johan Andersson, Arjun Gustavsson och Jonas Zachrisson från 2009. Arbetet behandlar ett av husen på Vaniljgatan, och visar energibesparing och lönsamhet vid olika renoveringsalternativ. Resultatet jämförs också med nollalternativet, fjärrvärme.

Kontakt har även tagits med sakkunniga, för att besvara oklarheter i arbetet och för att komplettera litteraturstudierna.

2 Miljonprogrammet

I boken "Att bygga ett land" från 2005 beskriver författarna Thorbjörn Andersson och Claes Caldenby bakgrunden till miljonprogrammet. Under början av 1900-talet kunde livet i staden beskrivas med trångboddhet, låg bostadsstandard och höga hyror. Trots detta fortsatte Sveriges befolkning att flytta in till städerna i hopp om arbete. Följden av detta blev en växande bostadsbrist, som banade väg för miljonprogrammet. Under 1965 till 1974 skulle en miljon nya bostäder byggas i Sverige.

Miljonprogrammet var vägen till det moderna samhället och en högre levnadsstandard, vilket är raka motsatsen till hur miljonprogrammet upplevs idag. Tanken att bygga bort bostadsbristen var god, men i den snabba takt som byggnaderna uppfördes fick kvantitet gå före kvalitet. Det som började som lösningen på den stora bostadsbristen blev istället ett välkänt problem. Redan när miljonprogrammet byggdes kom det att kallas nybyggd slum. Kärnan till problemet är bland annat att miljonprogrammet byggdes i ett skede då industrialiseringen i byggsektorn började komma igång på riktigt. Stadsplanering styrdes efter kranbanorna och naturen anpassades efter byggnaderna, istället för tvärtom. Masstillverkade prefabricerade byggdelar fick miljonprogramsområdena att se nästintill identiska ut. Det skulle gå fort att bygga och dessutom vara kostnadseffektivt, vilket ledde till att byggnaderna präglades av enkla geometriska former, få detaljer och ett monumentalt utseende, se figur 1.



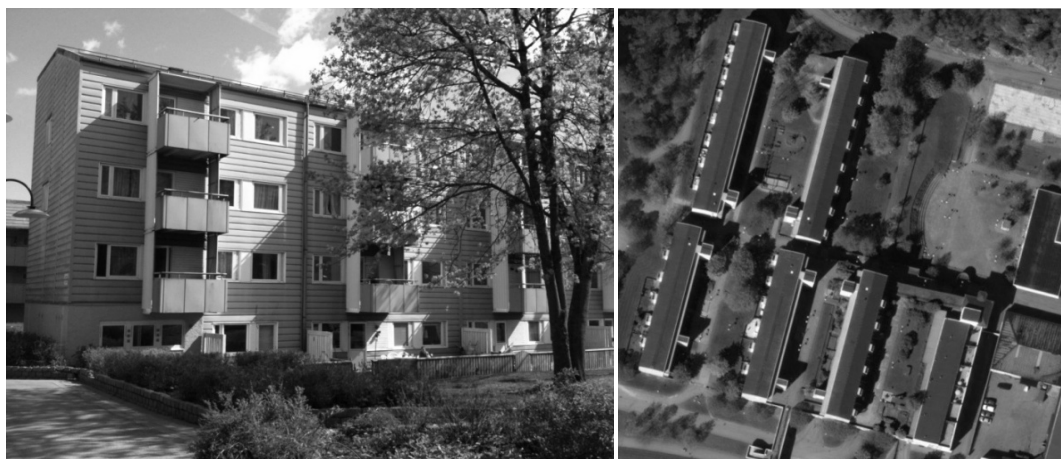
Figur 1: Miljonprogramsområde i Frölunda.

Då miljonprogrammet byggdes hade klimatdebatten ännu inte kommit igång och tillgången till billig energi via fossila bränslen var fortfarande mycket god. Planeringen av miljonprogrammet fokuserade på att höja levnadsstandard med avseende på utrymme och komfort, medan energiförbrukningen kom i andra hand.

Nu 40 år senare, står många av miljonprogrammets byggnader fortfarande kvar, men endast ett fåtal har renoverats. Energimyndigheten har uppskattat att uppemot 64 % av lägenheterna i miljonprogrammet inte har rustats upp sedan de byggdes. Problem med stammar, fukt, mögel, slitage och sociala frågor är vanligt förekommande i dessa byggnader (Frenning, 2011). Ett annat vanligt problem är de höga energiförlusterna på grund av köldbryggor i konstruktionen. Den genomsnittliga energiförbrukning för miljonprogrammet är som tidigare nämnt 220 kWh/m², men hos de orenoverade husen kan förbrukningen vara betydligt större. Det finns byggnader från miljonprogrammet som har en energianvändning uppåt 350 kWh/m² (Frenning, 2011). Under de kommande åren behöver miljonprogramsområdena runt om i landet både renoveras och energieffektiviseras, för att kunna nå upp till dagens bostadsstandard.

2.1 Vaniljgatan

Vaniljgatan ligger i Lövgärdet som är en ort strax nordöst om Göteborg. Här äger och förvaltar Stena Fastigheter 6 stycken flerbostadshus. De 4 våningar höga loftgångshusen byggdes 1974 och omfattar totalt 9 863 m² boyta, fördelat på 148 lägenheter, se figur 2 (Stena Fastigheter AB, 2009). Idag värms fastigheterna på Vaniljgatan med fjärrvärme (Andersson, 2009). Samtliga bostadshus står med kortsidorna mot norr/söder och har en uppskattad taklutning på 29° respektive 9°. Fastigheterna på Vaniljgatan är grundlagda direkt på berg (Frenning, 2011).



Figur 2: Vaniljgatan. Bild th: © Lantmäteriet Gävle 2011. Medgivande I 2011/0072

Energimässigt representerar Vaniljgatans fastigheter ett vanligt miljonprogramsområde, se diagram 1. Den genomsnittliga energiförbrukningen för bostäderna uppgick till ungefär 237 kWh/m² för året 2010 enligt uppgifter från Robert Schwartz hos Stena Fastigheter AB. Detta är nästan det dubbla gentemot nuvarande krav vid nybyggnationer, som enligt Boverket är 110 kWh/m² och är i södra Sverige. Det finns stor potential för energibesparande åtgärder, som exempelvis olika typer av renovering eller nyttjande av solenergi.

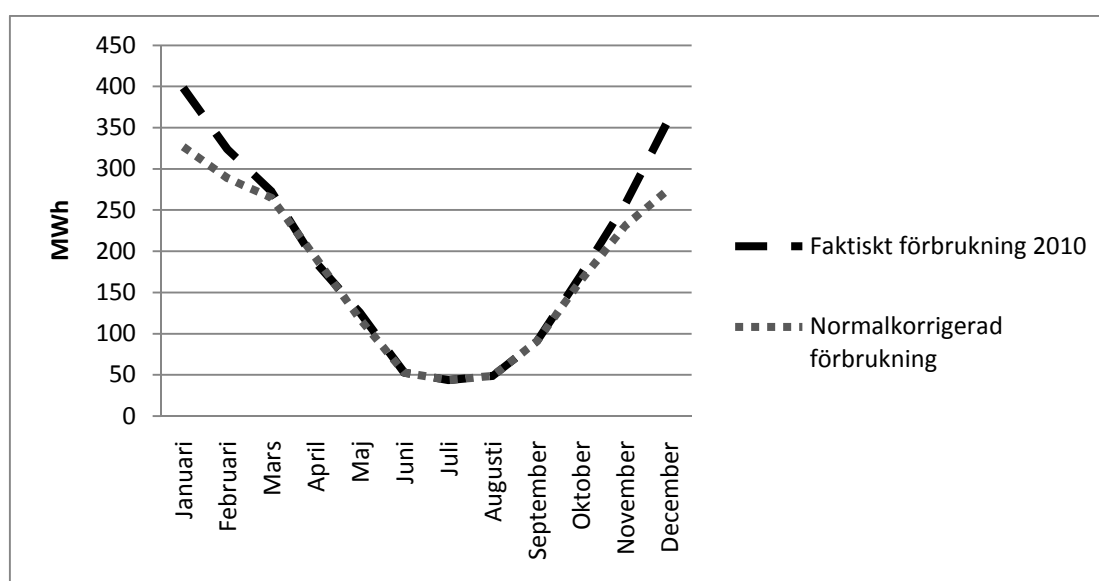


Diagram 1: Energiförbrukning för Vaniljgatan 14 för respektive månad, enligt uppgifter från Robert Schwartz hos Stena Fastigheter AB.

År 2009 gjordes en studie av Vaniljgatan av Johan Andersson, Arjun Gustavsson och Jonas Zachrisson, i samarbete med Ramböll. I rapporten "Energieffektivisering av en miljonprogramsbyggnad" redovisar de resultatet av tre olika renoveringsalternativ, kallade SMALL, MEDIUM och LARGE, se tabell 1. Det är därför intressant att fortsätta studera Vaniljgatan och se över möjligheterna att applicera ett solvärmesystem med säsongslager här.

Metod	Energi-besparing	Ny förbrukning	Kostnad	Förklaring
SMALL	25,1 %	177 kWh/m ²	429 kr/m ²	Tilläggsisolering av vind, snålspolande engreppsblandare, FTX-aggregat
MEDIUM	42,8 %	135 kWh/m ²	1947 kr/m ²	Tilläggsisolering av vind och yttervägg, snålspolande engreppsblandare, byte av fönster, tätning, förbättrad installation
LARGE	71,1 %	68 kWh/m ²	3445 kr/m ²	Samma som för SMALL och MEDIUM med tillägget solfångare

Tabell 1: Redovisning av resultat från rapporten Energieffektivisering av en miljonprogramsbyggnad.

3 Solenergi, solvärme och solfångare

Solen är en nästintill oändlig energikälla, som under ett års tid kan förse jorden med 15 000 gånger mer energi än vad mänskligheten behöver (Block, 2004). Solenergi är dessutom både förnyelsebar och gratis. Varje år har Göteborg en genomsnittlig solenergiinstrålning motsvarande ca 1000 kWh/m² (Hagentoft, 2002). Detta innebär att om all denna energi gick att ta till vara på skulle energianvändningen i ett enplanshus, med dagens energistandard, helt kunna ersättas med solenergi nio gånger om. Problemet är att den största delen av energin kommer på sommaren, men behovet av energi är som störst vintertid, se diagram 2.

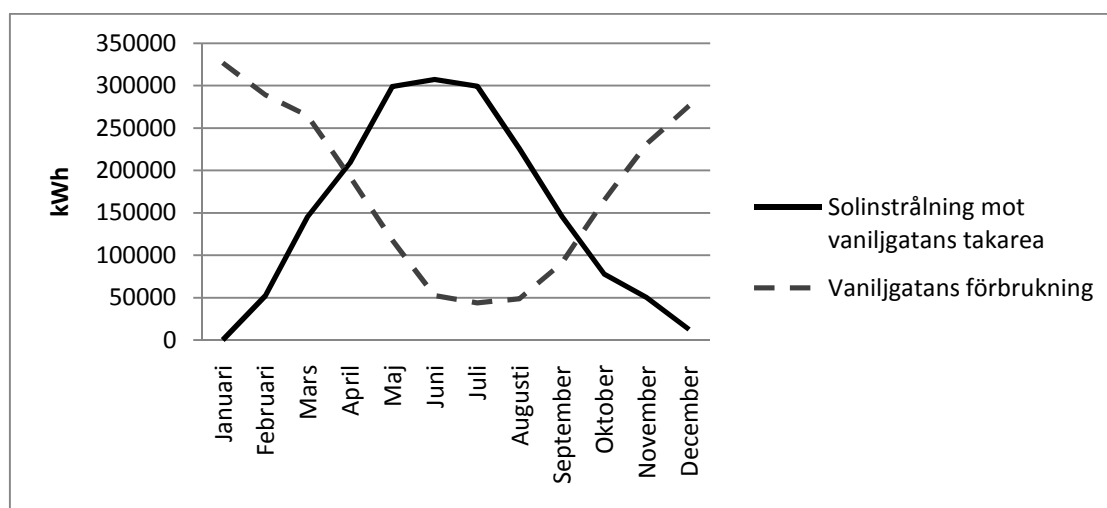


Diagram 2: Fördelning av solinstrålning och energibehov över året.

Solenergi tas till vara genom så kallade solpaneler, det vill säga solceller eller solfångare. Skillnaden är att solceller ger elektricitet medan solfångare främst används till uppvärmning av byggnader och tappvatten (Svenska solenergiföreningen, 2011). Hädanefter kommer projektet rikta in sig mot solfångare och solvärme.

I Sverige finns idag cirka 15 000 solvärmesystem i drift och det tillkommer ungefär 2000 nya varje år (Svenska Solenergiföreningen, 2011). Solfångare integreras med fördel i takkonstruktionen, men kan även monteras på fasaden eller i helt fristående konstruktioner (a. Svesol, 2011). De viktigaste faktorerna vid placering av en solfångare är riktning och lutning. Det mest optimala väderstrecket att rikta solfångaren mot söder (Block, 2004). Sydväst- och sydostläge fungerar också bra, men solfångarna tar då upp något mindre energi. I Sverige står solen på cirka 56 graders höjd under sommaren och cirka 32 graders höjd under höst och vår (Schlyter, 2011). Detta medför att den optimala lutningen mot horisontalplanet varierar med årstiderna. På sommaren bör solfångaren luta omkring 30 grader och under våren samt hösten ungefär 60 grader (Block, 2004). En väl placerad solfångare kan ha en verkningsgrad på upp till 80 % och därmed ge så mycket som 800 kWh/m² och år (a. Svesol, 2011).

Solfångare är nästintill helt underhållsfria och cirkulationspumpen utgör den enda rörliga delen i systemet (a. Svesol, 2011). De vanligast förekommande typerna av solfångare på marknaden är de så kallade plana solfångarna samt de vakuumrörsbaserade solfångarna.

3.1 Vakuumrörsbaserade solfångare

En vakuumrörsbaserad solfångare består av ett antal fristående glasrör, se figur 3. Dessa rör har ett inre och ett yttre skikt, varemellan det råder vakuum. Vakuumet hindrar effektivt den mottagna energin från att lämna röret. När solstrålningen träffar vakuumrören går strålningen igenom det yttre glasskiktet in till det inre röret där de absorberas och omvandlas till värme. Via flänsar förs värmen vidare till en så kallad "heat-pipe" där den ackumuleras. När tillräckligt hög temperatur har ackumulerats så förångas vätskan i röret och stiger upp mot rörets topp, där den kondenserar och avger sin värme till ett samlingsrör. I samlingsröret cirkulerar en svalare fluid som för bort värmen. Den kondenserade vätskan rinner ner mot vakuumrörets botten varefter nästa cykel påbörjas. Ett funktionskrav för denna princip är att solfångaren placeras med en viss lutning. Processen sker individuellt i varje vakuumrör vilket innebär att de vakuumrörsbaserade solfångarna är väldigt driftsäkra. Trasiga vakuumrör kan enkelt ersättas utan att systemet behöver tas ur drift (Solenergiteknik, 2011)



Figur 3: Vakuumrörsbaserad solfångare. Källa: www.volker-quaschnig.se

Solfångaren har en god upptagningsförmåga även då solljuset kommer från sidan tack vare att vakuumrören klarar av att ta upp värme från alla vinklar. Den cirkulära formen hos rören gör att endast en minimal andel solljus reflekteras bort. Verkningsgraden hos den här typen av solfångare är mycket hög, ofta upp mot 80 % (Solenergiteknik, 2011).

Den tekniska livslängden för denna typ av solfångare bedöms vara 25-30 år (Soluteknik, 2011). En klar nackdel är den förhållandevis höga investeringskostnaden, se figur 2 (Solenergiteknik, 2011).

Solfångare	Kostnad	Årsutbyte (50°)	Källa
SveSol Optima III			b. SveSol och SP, 2011
BAXI VI			b. Baxi och SP, 2011
Sfinx THX-15			Sfinxsolar och SP, 2011

Tabell 2: Exempel på Vakuumrörsbaserade solfångare.

3.2 Plana solfångare

En solfångare av plan modell är uppbyggd som en isolerad låda med en aluminiumram, se figur 5. Bakom en stryktålig transparent glasskiva träffar solenergin en absorbatormatta och omvandlas till värme. Isoleringen hos solfångaren bidrar till att hålla kvar värmen inom konstruktionen, vilket är nödvändigt för att uppnå en rimlig verkningsgrad. Värmen förs vidare från absorbatormattan via en slinga med kopparrör där en kall fluid cirkulerar. Fluiden tar upp värmen och transporterar den vidare till nästa modul, där processen börjar om (Solenergiteknik, 2011).



Figur 4: Plan solfångare. Källa: www.wagner-solar.com

De plana solfångarmodulerna seriekopplas med varandra på plats. Eftersom modulerna seriekopplas måste hela systemet tas ur drift och tömmas på vätska om en modul går sönder, vilket påverkar driftsäkerheten.

En solfångare av denna modell har en tålig konstruktion som klarar betydligt större yttre laster än exempelvis de vakuumrörsbaserade alternativen (Solenergiteknik, 2011). Den tekniska livslängden hos plana solfångare är normalt minst 30 år och de är nästintill helt underhållsfria (a. Svesol, 2011).

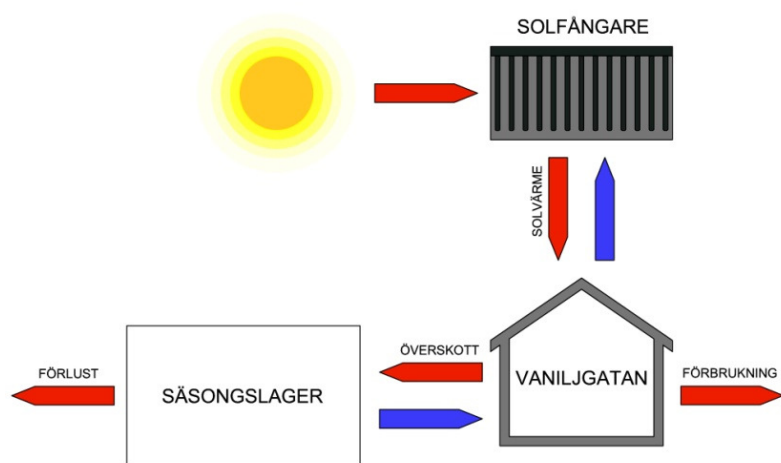
Solfångarna kan monteras horisontellt eller i vinkel, men upptagningsförmågan försämras kraftigt då solens infallsvinkel är låg. Den plana ytan reflekterar bort en stor andel av solinstrålningen, vilket påverkar dess verkningsgrad. De plana solfångarna har en betydligt sämre upptagningsförmåga än de vakuumrörsbaserade modellerna, men har generellt ett mycket lägre pris, se tabell 3 (Solenergiteknik, 2011).

Solfångare	Kostnad	Årsutbyte (50°)	Källa
SveSol Favorit MAX			b. SveSol och SP, 2011
LESOL 5 AR			Sunpower och SP, 2011
BAXI PI			a. Baxi och SP, 2011

Tabell 3: Exempel på plana solfångare.

4 Säsongslagring av solvärme

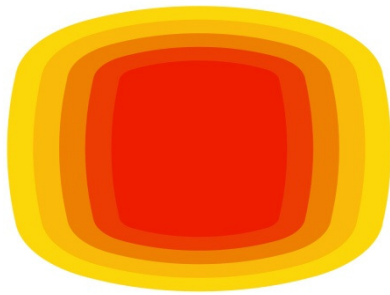
Principen för säsongslagrad solvärme är enkel. Överskottsvärme från sommaren förs ner till ett lagringsmedium i marken, för att sedan användas vintertid då värmebehovet ökar, se figur 5. Det finns en rad olika lagringsmetoder. Bergrum, vattentank, grop i mark, borrhål i berg, slangar i lera och akviferer är alla exempel på sensibla lagringsmetoder, där lagringen sker med hjälp av temperaturdifferenser. Vilken lagringsmetod som är mest lämpad för ett område styrs av en rad parametrar, exempelvis geotekniska förutsättningar, tillgängliga ytor, värmelast och investeringskostnader. Det finns tre olika lagringsmedier för lagringsmetoderna ovan. Värmen kan lagras antingen i lera, vatten eller berg, med värmelagringskapaciteterna 3,4 MWs/m³K, 4,2 MWs/m³K, respektive 2,2 MWs/m³K (Claesson, 1985).



Figur 5: Princip för säsongslager.

Säsongslager för solvärme placeras i regel under markytan, där de yttre förhållandena som lufttemperatur, väderlek och variationer över årstider inte har samma påverkan. Detta beror på att marken har en stor värmetröghet, vilket medför att temperaturförändringarna i marken minskar med markdjupet (Hagentoft, 2002). Vid ett visst djup kommer marktemperaturen endast variera med någon grad mellan sommar och vinter. Under de första 10 metrarna i marken kommer marktemperaturen kretsa kring ortens medeltemperatur, för Göteborg innebär detta 7,9 °C (Petersson, 2008). Därefter kommer marktemperaturen sakta öka med ungefär 1,5 °C per 100 meter (Hagentoft, 2002). Detta innebär att medeltemperaturen i marken ligger omkring 8,5 °C de första 100 metrarna i Göteborg. Marken har också den fördelen att den har en stor värmekapacitet till följd av sina stora, tunga volymer och kan därmed lagra stora mängder energi (Petersson, 2008).

Då ett säsongslager i marken sakta värms upp kommer det så småningom bildas en värmekudde runt lagret, se figur 6 (Claesson, 1985). Detta medför att värmeförlusterna kommer vara som störst under uppvärmningsperioden av lagret, för att sedan minska allt eftersom temperaturen i marken stabiliseras (Claesson, 1985). Beroende på lagrets storlek kan det ta allt från något år till flera decennier innan värmekudden är fullt uppbyggd (Hagentoft, 2002). Andra avgörande faktorer för lagrets värmeförluster är storlek och geometrisk form (Claesson, 1985). En mindre omslutande area per energilagringsvolym innebär mindre exponering mot omgivande mark, vilket i sin tur minskar värmeförlusterna.



Figur 6: Värmekudde, sett ovanifrån.

Ett värmelagringssystem kan under ett år delas upp i fyra olika faser, men alla dessa faser uppträder inte alltid under en och samma lagringscykel. Ofta kan uppladdningsfasen övergå direkt till urladdningsfasen.

1. Uppladdningsfasen:

Lagrets uppladdningsfas sker när solinstrålningen är högre än värmelastens behov, det vill säga när det finns ett värmeöverskott. Överskottet förs ner till lagret där energin lagras till framtida behov.

2. Lagringsfasen:

Lagringsfasen träder i kraft när värmeöverskottet inte är tillräckligt stort för att fortsätta laddningen, men solfångarna kan fortfarande tillgodose värmelastens behov. Energin i lagret fortsätts lagras till framtida behov, men inget tillskott görs.

3. Urladdningsfasen:

När energiunderskott uppstår för värmelasten träder urladdningsfasen in. Värme tas från lagret för att kompensera för underskottet.

4. Vilofasen:

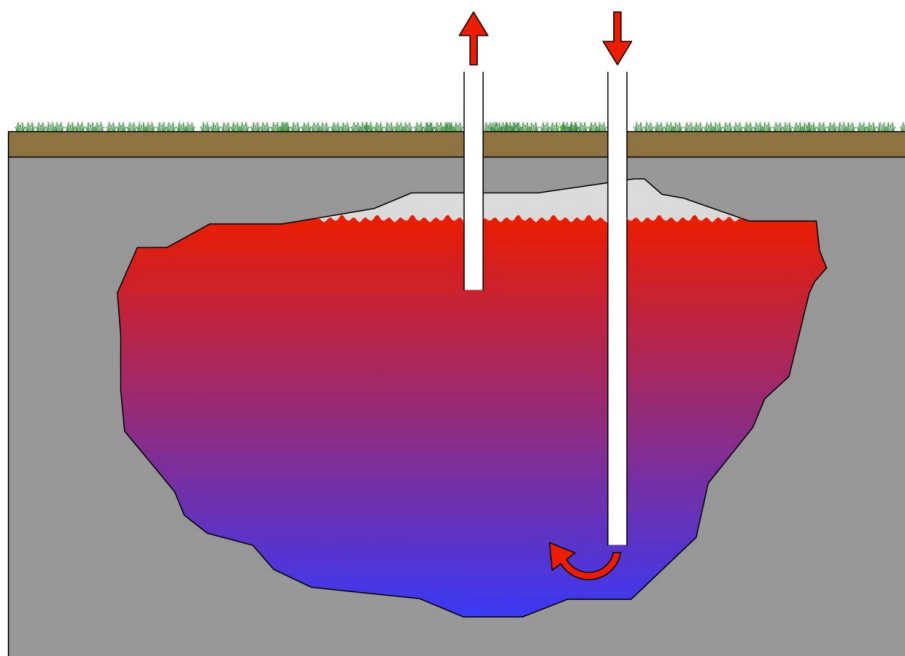
Vilofasen inträffar antingen när det inte är lönsamt att ta upp mer energi ur lagret eller när lagret når sin ursprungstemperatur. Hela systemet är nu stillastående tills nästa lagringscykel kan påbörjas. Den energimängd som finns kvar i lagret efter en lagringscykel bidrar till att bygga upp en värmekudde, vilket leder till minskade framtida förluster.

4.1 Bergrum

Ett bergrumslager består av en eller flera utschaktade volymer i berg. Lagret bör omfatta en volym om minst 100 000 m³ för att värmeförlusterna ska vara acceptabla, om ingen tilläggsisolering skett (Fagerström, 1991). Då bergrum ofta är mycket stora, krävs stora energimängder för att hålla konstant temperatur i lagringsmediet och därför kan överskottsenergi från fjärrvärme vara en lämplig energikälla.

Bergrumsvolymen fylls med vatten som fungerar som värmelagrande medium. Vid injektion av varmt vatten i lagret kommer en temperaturskiktning av vattenvolymen att uppstå, se figur 7. De svalare vattenmängderna sjunker ner mot lagrets botten, på grund av densitetsskillnaden gentemot den uppvärmda delen. Med hjälp av pumpar placerade på olika djup kan vattenuttaget styras efter värmelastens aktuella temperaturkrav (Fagerström, 1991). Lagret kan fyllas med sprängsten eller stenblock för att öka hållfastheten. Värmelagringen sker då både i stenen och hos vattnet. (Fagerström, 1991).

Idag används allt färre bergrum för lagring av oljereserver och andra förnödenheter. Många bergrumsanläggningar har redan avvecklats och fler är på gång (a. SGU, 2011). Sedan 1994 har Sveriges Geologiska Undersökning, SGU haft ansvaret för miljösäkring och avveckling av bergrumsanläggningar runt om i Sverige och har hittills avvecklat 20 anläggningar (b. SGU, 2011). Värmelagring i befintliga bergrum för med sig flera fördelar. De ofta mycket stora volymerna möjliggör för en storskalig energilagring, ofta passande större bostadsområden (Fagerström, 1991). Då schakten redan är utförda tillkommer endast kompletterande anläggningskostnader för konverteringen från oljelager till värmelager (Fagerström, 1991).



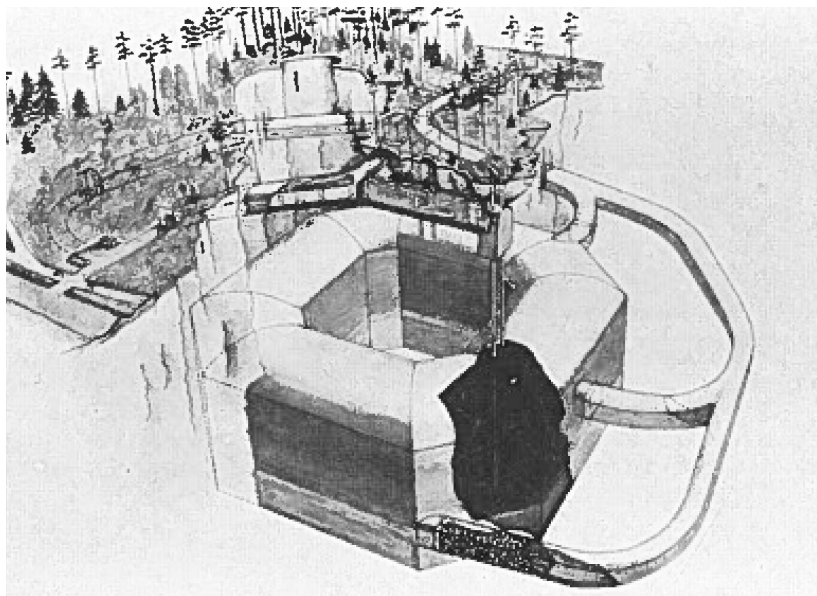
Figur 7: Schematisk bild över bergrumslager.

4.1.1 Lyckebo

Ett exempel på säsongslager med hjälp av bergrum finns i Lyckebo utanför Uppsala. Det byggdes i början av 80-talet och har försörjt 500 bostäder med värme sedan 1983. Värmekällan är ett 4300 m² stort fält med solfångare. Själva lagret består av ett 100 000 m³ vattenfyllt bergrum, placerat 30 meter under markytan. Bergrummet har en cirkulärform med en kärna av berg, se figur 8. Lagrets ytterdiameter är ca 75 meter och bredden strax under 20 meter, vilket ger att kärnan har en radie på cirka 20 meter. Inuti lagret finns vatten, som delar sig i temperaturskikt. Det översta lagrets temperatur är i storleksordningen 60-90 °C och det undre lagrets temperatur varierar mellan 40-60 °C. Lagret har en kapacitet på omkring 5500 MWh/år.

Runt bergrummet finns flera tunnelsystem. En del av tunnlar har används då bergrummet konstruerades och har sedan satts igen, andra tunnlar är vattenfyllda och är en del av lagrets funktion. Expansionskanaler används då det varma vattnet expanderar och en del av vattnet inte längre får plats i bergrummet. Vattnet som går upp i expansionskanalerna kyls genom att det blandades med det åttagradiga grundvattnet, 20 meter ovanför lagrets överyta. När sedan vattnet sögs tillbaka in i lagret var vattnets temperatur betydligt lägre än lagertemperaturen, vilket gjorde att expansionskanalerna medförde stora värmeförluster för säsongslagret. Andra orsaker till värmeförlusterna var höga lagertemperaturer och oönskad cirkulation av vatten som uppstod genom sprickor i berget.

Totalt har värmeförlusterna för lagret uppmätts till omkring 4000 MWh det första året, men allt eftersom lagret har värmts upp har värmeförlusterna minskat. Efter omkring 10 lagringscyklar, det vill säga 10 år, minskade värmeförlusterna till omkring 1700 MWh per år. Viktigt att tänka på för framtida säsongslager i bergrum är att förändra konstruktionen så att problem med vattenströmningar inte uppstår.



Figur 8: Bergrumslager i Lyckebo.

Text- och bildkälla: Claesson, 1993

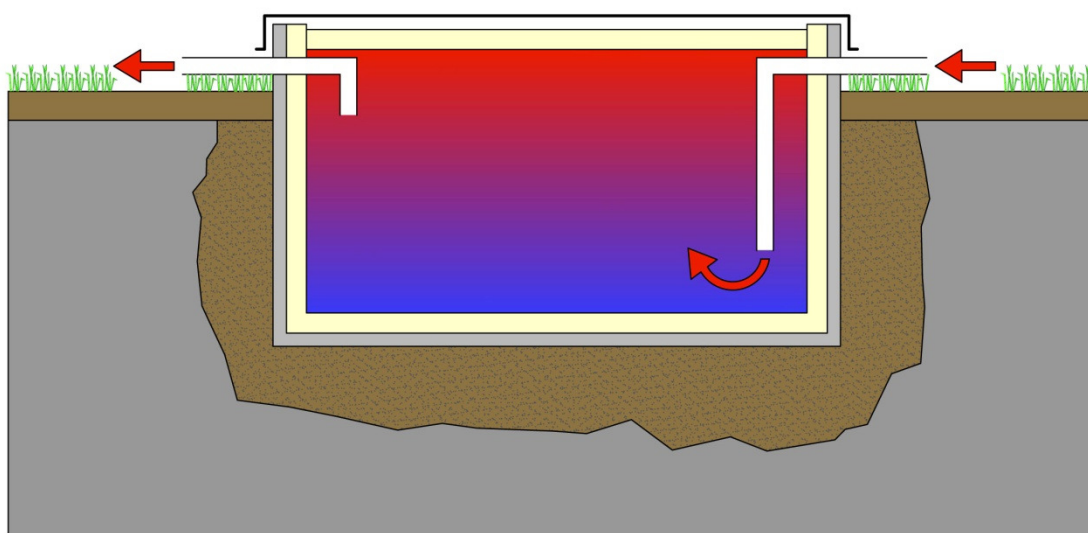
4.2 Grop

Ett gropvärmelager utgörs av ett schakt i marken, ofta med ett djup upp emot 10 meter, se figur 9. För att minska energiförlusterna bör groplagret anläggas ovan grundvattennivån eller där grundvattengenomströmningen är mycket låg, då detta ger upphov till värmeläckage (Fagerström, 1991). Schaktets väggar kan stabiliseras med exempelvis prefabricerad betong (Mangold, 2006). Väggarna förses med isolering samt ett vattenogenomträngligt skikt av gummiduk eller rostfri plåt. Lagret sträcker sig vanligtvis upp till marknivå där ett flytande isolerlock sluter tätt (Fagerström, 1991). Lagervolymen bör vara i storleksordningen 20 000 m³ för att förlusterna ska vara godtagbara. Detta ger en kapacitet som kan tillgodose mindre bostadsområden (Fagerström, 1991).

Groplagret fylls med vatten vars syfte är att uppta och lagra den tillförda energin. Precis som vid värmelagring i bergrum uppstår även här en vertikal temperaturskitning av vattenvolymen, då den varma vattenmängden lägger sig ovanpå den svala. Med hjälp av pumpar på varierande djup kan denna temperaturskitning utnyttjas så att temperaturen hos vattnet blir anpassat efter kraven hos dess ändamål (Fagerström, 1991).

En klar nackdel med lagringsmetoden är den markyta schaktet tar upp, då användningen av denna kraftigt begränsas. Lagret klarar sällan tunga laster och förhindrar således ovan bebyggelse (Fagerström, 1991). I ett groplager vid München i södra Tyskland har man testat att blanda vattnet med grus, vilket innebar att konstruktionen klarade större yttre påfrestningar. Man fann dock att metoden inte tillgodosedde de krav man ställde på skiktning och lagringskapacitet, varefter man återgick till att endast lagra värmen i vatten (Mangold, 2006).

Det har varit många problem med groplager runt om i världen, inte minst i Sverige där flera fullskaliga anläggningar uppförts. Det är särskilt tätskikten och isoleringen som är problematisk, vilket kan leda till höga kostnader (Lundin, 1998).



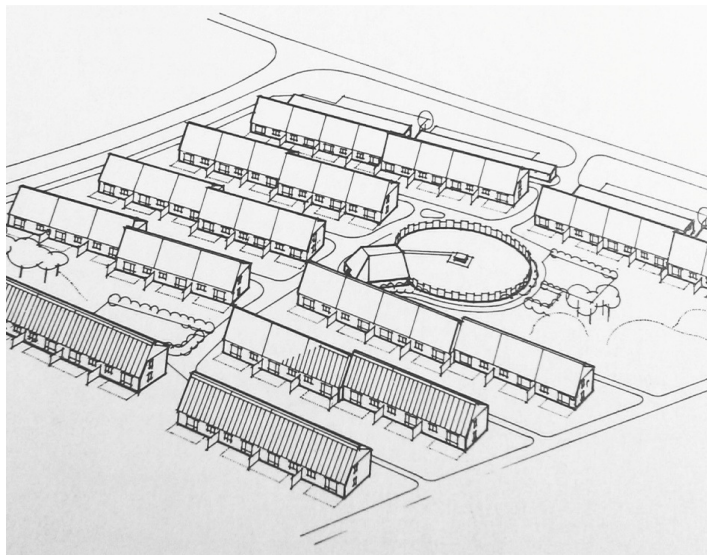
Figur 9: Schematisk bild över groplager.

4.2.1 Lambohov

I Lambohov utanför Linköping byggdes i början av 80-talet ett groplager för säsongslagring av solenergi, se figur 10. Området består av 55 radhus med ett värmebehov på cirka 900 MWh per år. Värmekällan är solfångare som har placerats på radhusens tak, i söderläge. Sammanlagt upptar solpanelerna en yta på 2700 m². Groplaget består av en vattenfylld bassäng med en volym på 10 000 m³, som sprängts in i berggrunden. Diametern på lagret är omkring 32 meter och lagrets djup omkring 12 meter. Väggarna och golvet i lagret har tätats och isolerats. Mellan berget och lagret har dessutom ett dräneringsskikt lagts. Lagret sticker upp ovan mark med en platsgjuten betongmur, som täckts med gummiduk samt isolering som lock. Vattnet i gropen håller en temperatur mellan 30-95 grader och kan lagra cirka 700 MWh solenergi varje år.

Redan från början fann man att lagret hade stora problem. Värmeförlusterna har uppmätts till 250 MWh per år och det är nästan tre gånger så mycket mot förväntat. Framför allt berodde detta på att lagret inte har varit tillräckligt tätt samt att isoleringen har blivit fuktig. Andra bidragande orsaker till de höga värmeförlusterna var de stora temperaturskillnader som fanns mellan vattnet i lagret och omgivande mark och luft. Det har också uppstått problem med värmesystemet på grund av att lufttillförseln till vattnet har varit för stor. Detta har inneburit att partikelhalten har ökade drastiskt, vilket i sin tur ledde till att filter blev igensatta och kapaciteten på hela systemet försämrades.

År 1988 gjorde Jan-Olof Dalenbäck och Torbjörn Jilar vid Chalmers tekniska högskola en utvärdering av groplaget i Lambohov. I rapporten konstaterades att lagret har haft stora problem, men att problemen kan åtgärdas genom att lagret byggs om. Genom att använda nya moderna tekniska lösningar hade stora delar av värmeförlusterna i lagret kunnat begränsas. Rapporten uppskattar att värmeförlusterna vid en ombyggnad skulle minska från 35 % ner till 20 %.

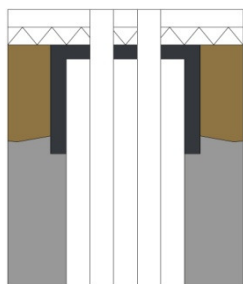


Figur 10: Groplager i Lambohov.

Text- och bildkälla: Dalenbäck, 1988 och Norbäck, 1984

4.3 Borrhål i berg

Ett sätt att lagra värme i mark är via ett så kallat borrhålslager. Lagret utgörs av ett eller flera borrhål i marken där ett antal U-formade slangar förs ner, se figur 12. Borrhålen kan vara upp emot 200 meter djupa och har oftast en diameter mellan 115-150mm (Claesson, 1985). Ett foderrör skjuts ner i hålet tills det når fast berg, där det sedan gjuts fast, se figur 11. Foderröret verkar isolerande och skyddar U-slangarna från det yttre klimatet (Sundström, 2008). Borrhålen placeras med 2-4 meters avstånd i regelbundna mönster, oftast hexagonala eller rektangulära (Claesson, 1985).

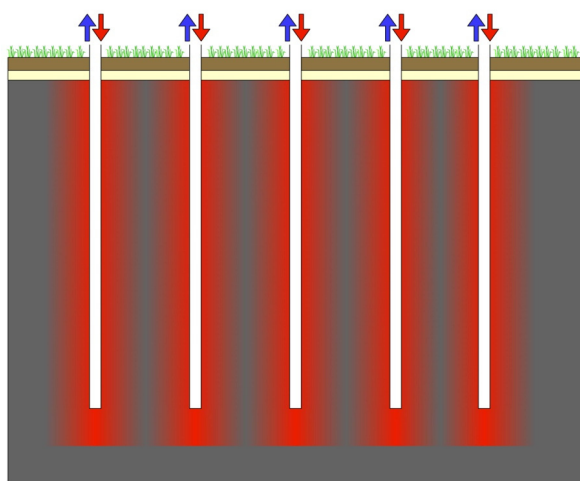


Figur 11: Foderrör över borrhål. Bilden visar ett borrhål med U-slang som skyddas av ett foderrör mellan jord och berg. Ytan är täckt med isolering

I de U-formade slangarna cirkulerar sedan en värmebärande vätska, ofta bestående av en frostsätsande vatten-glykol blandning (Claesson, 1985). Den varma vätskan kyls successivt ner av det omkringliggande berget som tar emot och lagrar värmen. När man sedan vill utvinna den lagrade värmen låter man en svalare vätska cirkulera som då värms upp av det varma berget (Claesson, 1985). Vid behov kan ytterligare temperaturhöjningar ske via en värmepump (Frenning, 2011)

Slangarna i borrhålen kan beroende på driftstrategi antingen parallellkopplas eller seriekopplas radvis från en central punkt. Ett parallellkopplat system innebär att laddning och energiupptag sker i hela systemet samtidigt, medan de seriekopplade borrhålen kan styras radvis (Edstedt, 1994).

Värmeläckage från borrhålslagret medför att markytan runt lagret värms upp. Detta läckage kan utnyttjas genom anläggningen av exempelvis parkeringsplatser, där värmen hjälper till att smälta is och snö (Edstedt, 1994).

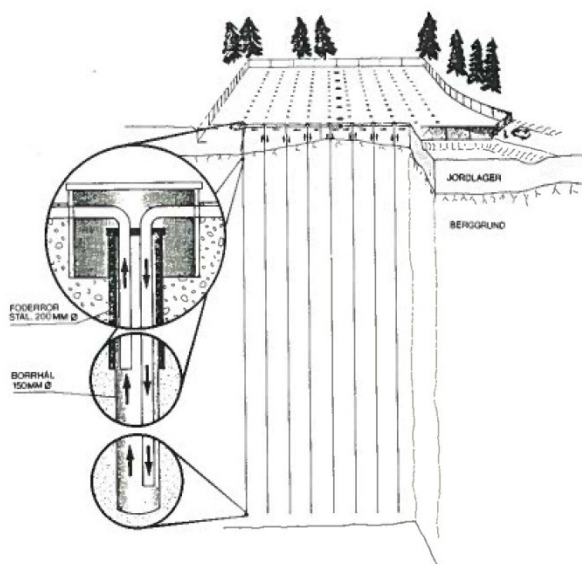


Figur 12: Schematisk bild över borrhål i berg.

4.3.1 Lulevärme

Luleå tekniska universitet förses delvis med energi från ett borrhålsvärmelager. Lagret byggdes i början av 1980-talet och togs i drift 1983. Totalt består lagret av 120 000 m³ berg med 120 st vertikala borrhål placerade inom ett rektangulärt område med måtten 36x44 meter, se figur 13. Varje borrhål har ett djup på 65 meter och en diameter på 150 mm. Mellan borrhålen är det omkring 4 meter. Lagret laddas genom att överskottsvärme från fjärrvärmenätet värmer den cirkulerande fluiden till omkring 70 °C. Det varma vattnet förs sedan i rör, genom borrhålen, där det värmer berget. Värmeväxlingen sker genom ett så kallat öppet system, där vattnet och berget är i direkt kontakt med varandra. Vid uttag av värme har vattentemperaturen sjunkit till 35-50 °C. En värmepump används då lagertemperaturen är för låg. Lagret förser skolbyggnaden med ungefär 50 % av värmebehovet. Värmeenergin som går in i lagret varje år ligger i snitt på 2,3 GWh medan uttagen energin endast är i storleksordningen runt 1 GWh. Värmeförlusterna är således strax över 40 %.

När utvärdering av lagret gjordes, upptäcktes en rad tekniska problem. Rören som för vattnet genom borrhålen var inte centriskt placerade. Detta medförde att rören kom i kontakt med bergväggen, vilket resulterade i värmeförluster. Ett annat problem var flödet av vatten som var betydligt lägre än beräknat, vilket också resulterade i att värmeöverföringen till lagret minskade. Hade rören varit centrerade i borrhålen och hade flödet ökat, hade energimängden vid laddning kunnat ökas med omkring 30 % och uttaget av energi ökat med omkring 50 %. Om borrhålen dessutom fått ett djup på 125 meter istället för 65 meter hade antalet hål kunnat minska till hälften utan att påverka lagringskapaciteten. Resultatet av detta hade blivit att kostnaderna skulle ha minskats med 13 % för projektet, från nästan 6,7 miljoner till omkring 5,8 miljoner i 1983 penningvärde.



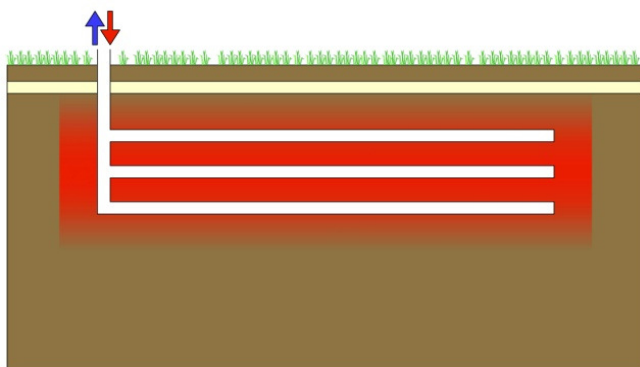
Figur 13: Borrhålslager i Luleå.

Text- och bildkälla: Dimle, 1987 och Norell, 1990

4.4 Slang i lera

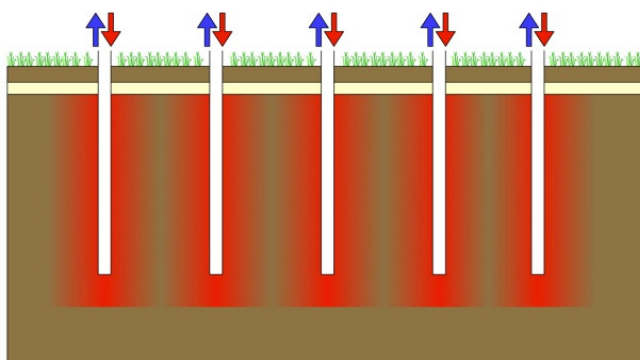
I ett markvärmelager med nedgrävda eller nedtryckta slangar är det den omkringliggande lera som upptar och lagrar värmen. Precis som vid ett borrhålslager låter man uppvärmt vatten cirkulera genom slangarna som successivt kylas ner. Även här kan en frostsättande vätska blandas med värmefluiden för att förhindra frostsador. Denna process sker sedan omvänt när upptag av energi ska ske. Den här typen av markvärmelager kan utformas med liggande nedgrävda slangar, eller med vertikala nedtryckta slangar (Claesson 1985).

Nedgrävda horisontella slangar är den vanligaste metoden för att lagra värme i lera (Fagerström, 1991). En horisontell rörslinga placeras ut i ett regelbundet mönster i gropens botten, se figur 15. Gropen fylls sedan delvis igen så att ytterligare rörslingor kan läggas ut på högre nivåer. Lämpligt vertikalt avstånd mellan slingorna bestäms efter lagrets termiska egenskaper, men är i regel 0,5-2 meter (Fagerström, 1991). Ett markvärmelager med den här utformningen tar upp en stor markyta, som kan bli problematisk att använda till andra ändamål. En fördel är dock att schaktet endast behöver ett djup på cirka 5 meter under marknivå (Fagerström, 1991).



Figur 14: Schematisk bild över horisontellt lerlager.

Ett lerlager kan även utformas med vertikala slangsystem, likt ett borrhålslager, se figur 16. De U-formade slangarna trycks då ned till ett djup på cirka 10-40 meter (Fagerström, 1991). Med den här utformningen upptar lagret inte lika omfattande markyta, vilket kan vara fördelaktigt (Fagerström, 1991).



Figur 15: Schematisk bild över vertikalt lerlager

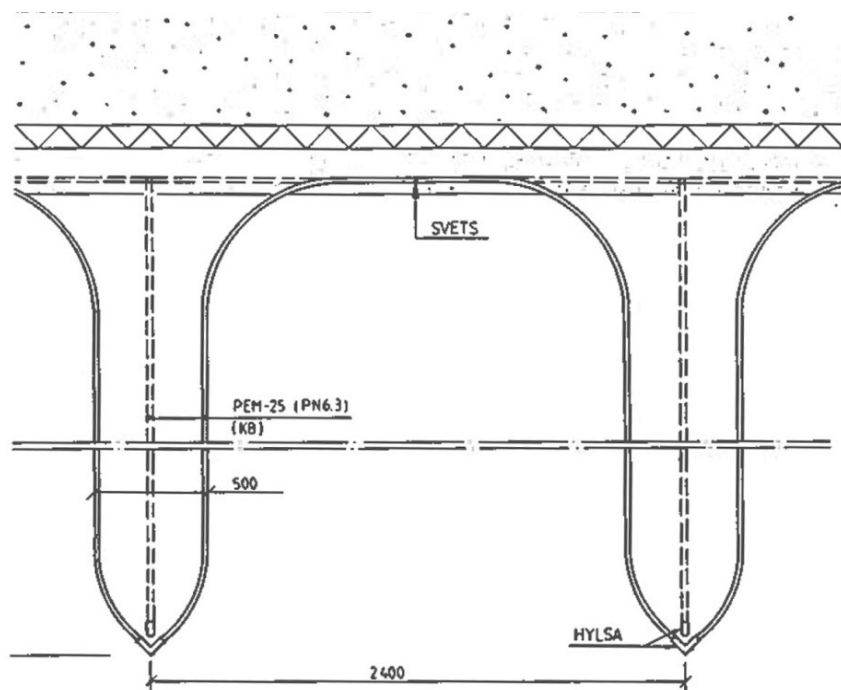
En problematik som följer med de båda utformningarna är risken för sättningar. När andelen vatten i kohesionsjordar som lera börjar minska ökar belastning på volymen, som då krymper (Bjureland, 2010).

4.4.1 Söderköping

I Söderköping har kommunen investerat i ett värmelager i lera, för att minska energin från oljeförbränning. Lagret förser en skola med tillhörande sporthall med värmeenergi. Det byggdes under 1987 och systemet består av uteluftskylare, värmelager och värmepump. Värmekällan är uteluften, men likande lager i Kungsbacka och Kullavik har använt solen som värmekälla. Laddningen av lagret sker genom att värmefluiden värms av uteluften. Därefter förs den varma fluiden ner genom leran i plastslangar och lagret laddas då temperaturen i fluiden är högre än lerans. Vid uttag av energin är fluiden istället kallare än leran och den tar på så vis upp värme från lagret. Temperaturen i lagret är ungefär 30 grader vid laddning och omkring 10 °C vid urladdning. Det är viktigt att lagret aldrig fryser, det vill säga aldrig uppnår temperaturer under 0 °C. Värmebehovet för byggnaden ligger på omkring 2500 MWh per år och lagret kan tillgodose ungefär 36 % av denna energi. Värmeförlusterna är i storleksordningen 25 % av den tillförda energin.

Lagret består av 382 dubbla U-rör placerade korsvis i leran med ett inbördes avstånd på 2,4 meter. Rören har en diameter på 25 mm och har tryckts ner till ett djup av 18 meter. Totalt omfattar lagret 36000 m³ och ytan ovan mark täcks av fyra identiska kvadrater på ett område av 55x36 meter. Ytan ovanför lagret används som parkering, tack vare att lagret har täckts med sand, isolering samt grusmassor.

Vid värmelagring i lera är det viktigt att tänka på de geotekniska förutsättningarna. En viss förändring av de geotekniska förutsättningarna har uppmäts i Söderköping. Det är dock svårt att bedöma om lagret har påverkat de geotekniska förutsättningarna eller om förändringarna är naturliga då undersökningarna inte har gjorts tillräckligt länge.



Figur 16: Lerlager i Söderköping.

Text- och bildkälla: Rydell, 1984 och Magnusson, 1992

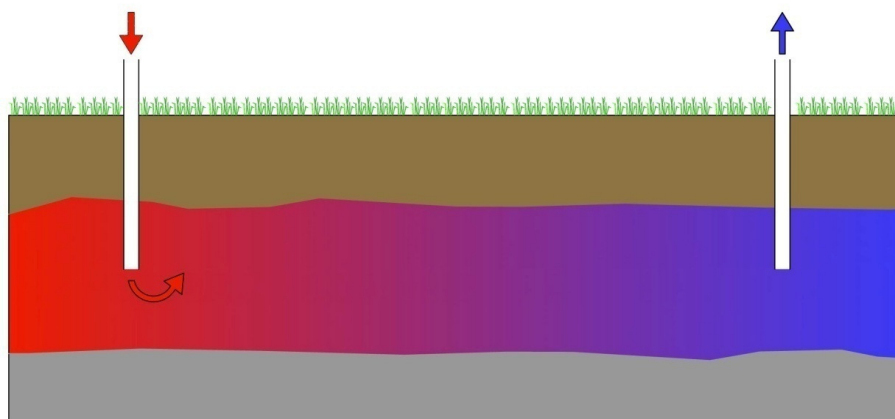
4.5 Akvifer

Akviferer, även kallat grundvattenmagasin, utgörs av porös mark eller bergformationer där grundvatten samlas och är naturligt förekommande i hela landet (Fagerström, 1991). Den vanligaste typen av akviferer i Sverige består mestadels av grus och sand, och är så kallade öppna akviferer. Vattenståndet i dessa akviferer är identiskt med grundvattennivåerna i närområdet, eftersom det råder atmosfärstryck (Nordgaard, 2005). I Sverige återfinns även så kallade slutna akviferer. Dessa förekommer främst i områden med mycket sedimentära bergarter som sand- och kalksten. Ett tätt ovanpåliggande lager av exempelvis lera trycksätter slutna akviferen (Nordgaard, 2005).

Värmelagring är möjlig hos både slutna och öppna akviferer. Slutna akviferer lämpar sig dock inte lika bra till säsongslagring av värme, utan används främst till korttidslager med höga temperaturer. Hos de öppna akvifererna finns ofta förutsättningar för ett säsongslager med temperaturer upp till 20 grader C, utan kemiska svårigheter (Nordgaard, 2005).

Vid värmelagring i akvifer används grundvattnet, i samverkan med omkringliggande mark, som lagringsmedium. Systemet består i sin enklaste form av en injektionsbrunn och en uttagsbrunn i olika sidor av akviferen. Då man via injektionsbrunnen pumpar ner varmt vatten, skapas en temperaturfront i akviferen mellan den uppvärmda delen och den svala delen. Temperaturfronten kan verka vertikalt eller horisontellt, beroende på brunnarnas placering. Detta är fördelaktigt eftersom man under sommaren kan pumpa ner överskottsvärme i injektionsbrunnen, samtidigt som man via uttagsbrunnen nyttjar det svala vattnet till kylning. När vatten tillförs eller tas upp förflyttas temperaturfronten mot respektive brunn (Claesson, 1985). Av denna anledning bör akviferer avsedda för värmelagring vara mycket stora. För att vara ekonomiskt godtagbara bör akviferlager innehålla en volym om minst 1 000 000 m³ (Fagerström, 1991).

Energiförlusterna i en akvifer är beroende av många faktorer. En av dessa är infiltrationen av ytvatten. Det svala ytvattnet har en kylande effekt på det uppvärmda akviferlagret. Det tillkommande vattnet tvingar även ut befintligt uppvärmt vatten ur akviferen då atmosfärstryck råder. En annan betydande faktor är värmelagrets genomströmning av grundvattnen, då även detta för bort värme från lagret. (Claesson, 1985).



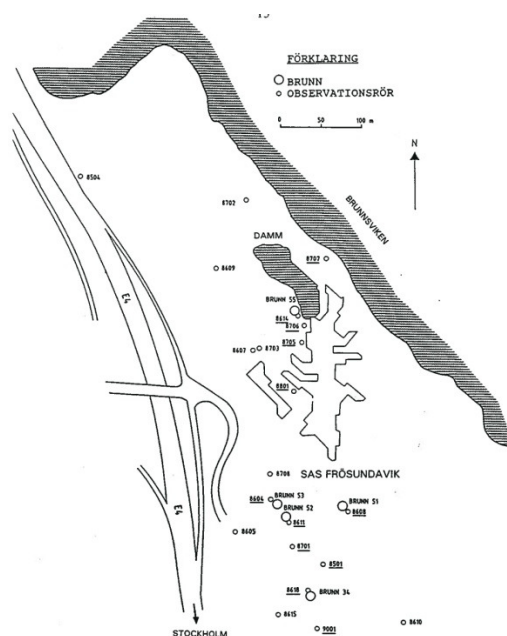
Figur 17: Schematisk bild över akviferlager.

4.5.1 SAS Frösundavik

SAS Frösundavik består av fem sammanbundna kontorsbyggnader med en total yta på 64 000 m². Under byggnadskomplexet finns ett akviferlager som har varit i drift sedan 1988, se figur 18. Lagrets volym är uppmätt till 1 500 000 m³ och sträcker sig ner till ett djup av 30 meter under markytan, med ett medeldjup på 15 meter. Akviferen består av ett naturligt grundvattenmagasin som finns i en ås av grus och sand. För att kunna ta tillvara på energin har fem brunnar av stål borrhats ner till akviferen. Två av dessa brunnar är varma, med vattentemperaturer på 14-17 °C. De tre andra brunnarna är kalla och har ungefär samma temperatur som grundvattnet, det vill säga omkring 8 °C.

Lagret förser SAS Frösundavik med både värme och kyla. Vintertid tas varmt vatten från lagret genom de varma brunnarna och detta används sedan till att värma byggnaden. När vattnet avger värme kyls det och det kalla vattnet förs tillbaka till lagret genom de kalla brunnarna. Sommartid fungerar lagret omvänt. Kallt vatten tas upp och används till kylning av byggnaden. Allt eftersom vattnet värms upp av byggnaden förs det sedan tillbaka till de varma brunnarna.

Energin i lagret varierar med byggnadens energibehov, som till stor del styrs av utetemperatur och väderförhållanden. Sedan start har lagret uppvisat relativt stabila förhållanden, där summan av genomsnittligt uttag och inlagring av energi har legat på cirka 5 500 MWh/år. Skillnaden mellan sommarens uppladdning och vinterns urladdning har uppmätts till ett genomsnitt av 13 MWh/år. Detta medför att kapaciteten för lagret anses vara tillräcklig under ett år med normala väderförhållanden. Problem kan dock uppstå under exempelvis flera extremt kalla vintrar på följd.



Figur 18: Akviferlager i Frösundavik.

Text- och bildkälla: Berglund, 1997

4.6 Jämförelse

För att hitta den mest lämpade lagringsmetoden för Vaniljgatan görs en jämförelse av ovanstående exempel. Förutsättningarna för att metoden ska vara applicerbar i den befintliga bebyggelsen är att den inte ska förstöra, hindra eller göra anspråk på för stor yta. Metoden ska också vara möjligt att genomföra både tekniskt och ekonomiskt.

Bergrum är en fungerande säsongslagringsmetod, men förutsätter ett bergrum. Avsaknaden av befintligt bergrum i närheten av Vaniljgatan gör att denna metod inte bedöms möjlig. Att schakta ut ett nytt bergrum bedöms inte heller möjligt på grund av de höga kostnaderna.

Groplager är fullt möjligt att använda som säsongslager i ett miljonprogramsområde. Dock har tidigare pilotprojekt uppvisat mycket problem, vilket gör metoden osäker. Groplager för också med sig risker för personolyckor, eftersom locket normalt inte går att beträda. Detta gör att lagret måste inhägnas. Groplager vid Vaniljgatan bedöms därför som olämpligt.

Slang i lera bedöms också vara fullt möjligt, både för vertikalt och horisontellt lager. Marken på Vaniljgatan består dock av berg och därför väljs denna metod bort.

Borrhål i berg bedöms även den som en fullt applicerbar metod vid Vaniljgatan. Värmeförlusterna är något högre än för andra lagertyper, men detta kompenseras av metodens enkelhet.

Akviferlager är en bra säsongslagringsmetod så länge ett lämpligt grundvattenmagasin finns i anslutning till miljonprogramsområdet. Då det inte finns en akvifer under Vaniljgatan bedöms metoden inte vara möjlig.

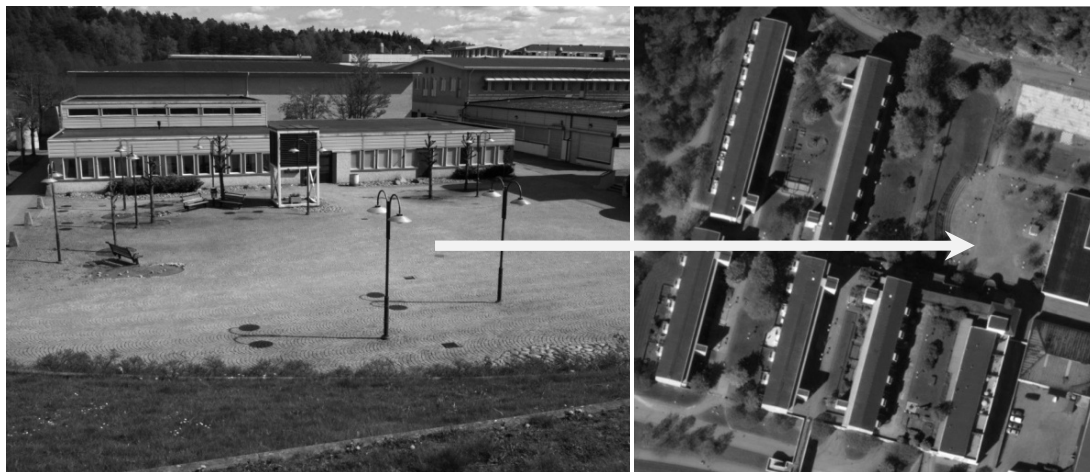
Lagringsmetod	Kommentar	Bedömning
Bergrum	Kräver bergrum	Bergrum finns ej vid Vaniljgatan
Grop	Problem, tar plats	Möjlig, men olämplig vid Vaniljgatan
Slang i lera	Risk för sättningar	Ej möjlig ty berggrund vid Vaniljgatan
Borrhål i berg	Lite högre förluster	Möjlig, berggrund vid Vaniljgatan
Akvifer	Kräver Akvifer	Akvifer finns ej vid Vaniljgatan

Tabell 4: Jämförelse mellan lagringsmetoder.

Utifrån sammanställningen i tabell 4 dras slutsatsen att borrhålslager är den mest lämpade metoden för Vaniljgatans bostäder. Vidare bedöms denna typ av säsongslager vara den enklaste metoden att anpassa efter ett redan befintligt område.

5 Säsongslager vid Vaniljgatan

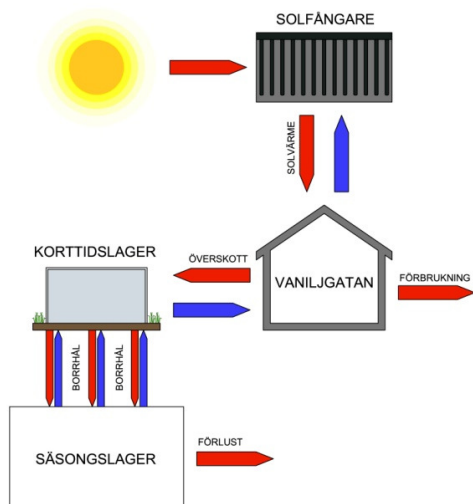
I direkt närhet till Vaniljgatans sex bostadshus ligger ett mindre torg, se figur 19. Denna yta utgör den tänkta placeringen av vårt fiktiva borrhålslager. Lagret består av 37 stycken borrhål placerade i ett hexagonalt mönster. Varje borrhål har en diameter på 150 mm och mellan borrhålen är det ett avstånd på 4 meter. Totalt har lagret en diameter på 25,5 meter. Borrhålen är 100 meter djupa, vilket ger en volym på cirka 51 000 m³. Ritningar finns i bilaga 1.



Figur 19: Borrhålslagrets tänkta placering. Bild th: © Lantmäteriet Gävle 2011. Medgivande I 2011/0072

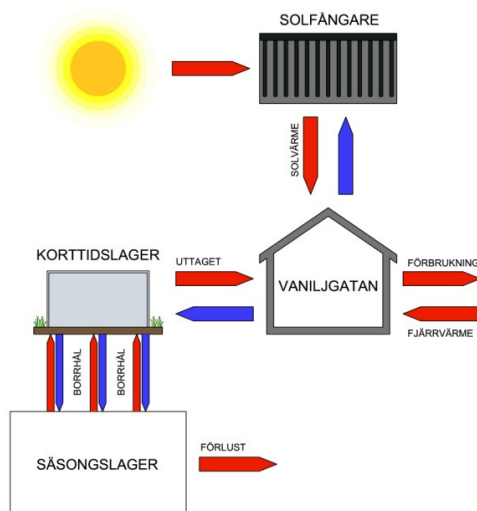
På taken till de 6 huskropparna kommer solfångare placeras. Arean av solfångarna har uppskattats till 3 000 m². Varje tak med solfångare har en egen cirkulationspump, som för värmen ner till ackumulatortankarna i respektive byggnad. En större central pump för sedan vidare värmen från ackumulatortankarna till lagret, via de 37 borrhålen. Vattnet cirkulerar i ledningar från byggnaderna till borrhålen och uppskattas ha en total längd på 118 meter.

I figur 20 visas principen för borrhålslagret under uppladdningsperioden. Solfångarna tar emot solenergin och omvandlar den till värme. Värmen förs sedan till bostäderna vid Vaniljgatan där värmebehovet tillgodoses i första hand. Därefter kommer eventuellt överskott att föras ner till säsongslagret. Så fort lagret blir varmare än omgivande mark kommer värmeförluster uppstå.



Figur 20: Systemskiss över borrhålslagret, uppladdningsperiod.

Omvänt visar figur 21 hur urladdningsperioden fungerar. Även här tar solfångarna emot solenergi och omvandlar det till värme. Värmen förs ner till Vaniljgatan och en del av värmebehovet kan tillgodoses, men inte allt. Ett värmebehov uppstår som i första hand tillgodoses med värme från lagret. Skulle inte den upptagna värmen räcka, måste ytterligare energi tillföras i form av fjärrvärme.



Figur 21: Systemskiss över borrhålslagret, urladdningsperiod.

Det kan vara värt att notera att solfångarna på taket kommer att ändra husens karaktär och kommer troligtvis att kräva bygglov från Göteborgs kommun (Energimyndigheten, 2011). Även en anmälan till miljöförvaltningskontoret krävs för att få tillstånd att borra i marken (Svensson, 2005).

5.1.1 Värmeberäkningar

Att göra värmeberäkningar på ett säsongslager är mycket komplicerat och för att kunna göra handberäkningar krävs grova förenklingar och antaganden. Här nedan följer en kort beskrivning av hur beräkningarna är gjorda. En sammanfattning av beräknade värden finns i tabell 5. Samtliga beräkningarna finns i bilaga 2 – värmeberäkningar. Där finns även beräkningar för värmeövergångsmotstånd, stationära värmeförluster och transienta värmeförluster. Dessa värmeberäkningar baseras till stor del på formler från Johan Claesson m.fl., 1985.

Det första som beräknades var hur mycket solenergi som strålar in mot Göteborg varje månad. Solinstrålningen för Göteborg är uppskattad som ett medelvärde mellan solinstrålningen för Malmö och Västerås under klarblå dagar. Samtliga dagar under en månad är dock inte soliga och hänsyn har därefter fått tas för påverkan från mulna och halvklara dagar. Taken på Vaniljgatan är inte helt plana, men eftersom de endast har en svag lutning har denna försumrats beräkningsmässigt. Solinstrålningen har därför beräknas utifrån en horisontell yta.

$$E_{sol} = \frac{E_{sol}^{Malmö} + E_{sol}^{Västerås}}{2} \cdot (0,25 \cdot n_{mulna\ dagar} + 0,65 \cdot n_{halv\ klara\ dagar} + n_{soliga\ dagar})$$

När solenergin är känd, kan värmeenergin som solfångarna producerar beräknas. För att kunna räkna på detta krävs kunskap om antal solfångare samt deras totala area och verkningsgrad. Ytan är grovt uppskattat till 3000 m², vilket innebär att samtliga 6 huskroppar får hela taken täckta med solfångare. De bästa vakuumrörsbaserade solfångarna har en verkningsgrad uppemot 80 %, men eftersom variationer av verkningsgrader kommer förekomma under året har verkningsgraden satts till 75 %. Solfångarna förutsätts vara aktiva under hela året, så länge fluidtemperaturen in och ut från panelerna är över fryspunkten men under kokpunkten.

$$E_{panel} = E_{sol} \cdot \eta_{panel} \cdot A_{panel} \quad \text{då} \quad 0^\circ\text{C} < T_{panel} < 100^\circ\text{C}$$

Solvärmen från panelerna tillgodoser i första hand det värmebehov som finns på Vaniljgatan. Därefter kommer det uppstå ett värmeöverskott eller ett värmeunderskott. Då värmeöverskott råder sker uppladdningsperioden, som enligt beräkningarna i bilaga 2 sker mellan april och september.

$$E_{överskott} = E_{panel} - E_{vaniljgatan}$$

För att beräkningarna inte ska bli allt för komplicerade måste värmeeffekten ner till lagret vara konstant. I verkligheten kommer solfångarna inte producera någon energi nattetid, vilket gör att effekten kommer variera under dygnet. För att ta hänsyn till denna variation men ändå få en konstant effekt ner i lagret har en tänkt ackumuleringsstank använts som korttidslager mellan Vaniljgatan och lagret.

Mellan solfångarna och lagret har värmeförlusterna ansetts vara försumbara. Detta innebär att all överskottsenergi kommer överföras via den värmebärande fluiden till säsongslagret. Detta kommer också innebära att temperaturen på fluiden kommer vara konstant från Vaniljgatan till borrhålen och att den aldrig kommer vara varmare än temperaturen från solfångarna. En förenkling som har gjorts är att fluiden har antagits ha konstant temperatur genom borrhålen och att en kylning av fluiden sker först när den lämnar lagret och är påväg tillbaka till den fiktiva tanken. I verkligheten kommer fluiden kylas allt eftersom den avger energi till lagret. Värmeöverskottet kommer fördelas jämnt över de 37 borrhålen. För att all värmeenergi från samtliga borrhål ska

kunna överföras till lagret måste det vara känt om flödet är laminärt eller turbulent, då värmeövergångsmotståndet varierar mellan dessa två förhållanden.

$$Q_{borr} = \frac{E_{\text{överskott}}}{t_{\text{månad}} \cdot n_{\text{borrhål}}} = \frac{1}{R_{\text{lager}}} \cdot 2h_{\text{lager}} \cdot (T_{\text{borr}} - T_{\text{lager}}) \rightarrow$$

$$T_{\text{borr}} = T_{\text{överskott}} = \frac{Q_{\text{borr}} \cdot R_{\text{lager}}}{2h_{\text{lager}}} + T_{\text{lager}}$$

Uppladdningen av lagret kommer att ske så länge flödet i borrhålen håller sig inom rimligt intervall. Flödet får inte bli större än det flöde som rören i borrhålen klarar av. I detta fall måste flödet vara mindre än 0,7 l/s. Flödet får inte heller blir negativt. Inträffar detta innebär det att fluidens temperatur ner i lagret är lägre än den som kommer upp, vilket i sin tur innebär att lagret kommer värma fluiden istället för tvärtom. När flödet inte är inom rimligt intervall upphör laddningen av lagret och säsongslagret går in i lagringsfasen eller urladdningsfasen beroende på när i laddningsperioden detta inträffar.

$$0 \text{ l/s} < \dot{v}_{\text{borr}} < 0,7 \text{ l/s} \quad \text{för} \quad \dot{v}_{\text{borr}} = \frac{Q_{\text{borr}}}{C_{\text{vatten}} \cdot (T_{\text{borr}} - T_{\text{retur}})}$$

Så fort lagret är varmare än marken runtomkring kommer en del av den lagrade energin gå förlorad. Ju varmare lagret är i förhållande till marken desto större kommer värmeförlusterna att bli. Det gäller därför att hitta en bra balans så att lagret får en temperatur där så mycket energi som möjligt kan överföras från fluiden, men där så lite energi som möjligt försvinner ut i omkringliggande mark.

$$E_{\text{lagrad}} = E_{\text{överskott}} - E_{\text{förlust}} = C_{\text{granit}} \cdot V_{\text{lager}} \cdot (T_{\text{lager}} - T_{\text{lager}}^{\text{före}}) \rightarrow$$

$$T_{\text{lager}} = \frac{E_{\text{lagrad}}}{C_{\text{granit}} \cdot V_{\text{lager}}} + T_{\text{lager}}^{\text{före}}$$

Urladdningsperioden börjar enligt beräkningarna i bilaga 2 i oktober och varar mars månad ut. Under denna period råder det ett värmeunderskott, då solfångarna inte kan tillgodose Vaniljgatan med hela dess energibehov.

$$E_{\text{behov}} = E_{\text{vaniljgatan}} - E_{\text{panel}}$$

Värmebehovet ska i första hand tillgodoses med energi från lagret. Hur mycket energi som tas upp från lagret styrs av två faktorer, dels vilket värmebehov Vaniljgatan har och dels hur mycket energi fluiden kan ta upp. Lagret ska inte tömmas på mer energi än vad som är nödvändigt. Här har ett antagande gjorts om att fluiden som pumpas ner i borrhålen är ouppvämt tappvatten på ungefär 10°C.

$$Q_{\text{borr}} = \min \left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{borr,behov}} = \frac{E_{\text{behov}}}{t_{\text{månad}} \cdot n_{\text{borr}}} \\ Q_{\text{borr,möjlig}} = \frac{1}{R_{\text{lager}}} \cdot 2h_{\text{lager}} \cdot (T_{\text{lager}} - T_{\text{tapp}}) \end{array} \right. \rightarrow$$

$$E_{\text{uttag}} = Q_{\text{borr}} \cdot t_{\text{månad}} \cdot n_{\text{borr}}$$

Temperaturen på fluiden har antagits värmas till samma temperatur som lagret har. Detta innebär att den uttagna temperaturen kommer variera mellan ungefär 10°C och 40°C, vilket i sin tur innebär att värmepump kommer bli nödvändig.

Precis som vid uppladdningen av lagret är det viktigt att flödet håller sig inom givna intervaller och att rätt övergångsmotstånd används beroende på om flödet är turbulent eller laminärt. Är inte flödet inom givet intervall upphör upptaget av energi från lagret.

$$0 \text{ l/s} < \dot{v}_{\text{borr}} < 0,7 \text{ l/s} \quad \text{för} \quad \dot{v}_{\text{borr}} = \frac{Q_{\text{borr}}}{C_{\text{vatten}} \cdot (T_{\text{uttag}} - T_{\text{tapp}})}$$

Under de riktigt kalla månaderna kommer inte värmebehovet på Vaniljgatan att helt kunna tillgodoses med den tillförda energin från solfångarna och den upptagna energin från lagret. Detta innebär att det under dessa månader kommer behövas ett tillskott i form av fjärrvärme, vilket blir den nya energiförbrukningen för Vaniljgatan.

$$E_{extra} = E_{vaniljgatan} - E_{panel} - E_{uttag}$$

Urladdningsfasen kommer fortsätta fram tills dess att lagertemperaturen sänkts till ungefär 10°C. Därefter kommer vilofasen inträda. Temperaturen i lagret bör inte vara lägre än markens ursprungstemperatur när lagret återigen börjar sin uppladdningsfas. Det är därför viktigt att balansera sina beräkningar innan resultatet beräknas.

År	$T_{lager,m}$	$E_{överskott}$	E_{uttag}	Förluster	Ny förbrukning
0	22°C	1053 MWh	219 MWh	79 %	127 kWh/m ²
5	22°C	1053 MWh	721 MWh	32 %	76 kWh/m ²
10	23°C	1053 MWh	781 MWh	26 %	69 kWh/m ²
15	23°C	1053 MWh	817 MWh	22 %	66 kWh/m ²
Stationärt	23°C	1053 MWh	832 MWh	21 %	64 kWh/m ²

Tabell 5: Summering av värmeberäkningar. För mer detaljer se bilaga 2.

5.1.2 Kostnadsberäkningar

En investering av det här slaget för med sig många kostnadsposter. För att dessa ska bli lättöverskådliga har de delats upp i fyra kategorier. Dessa är solfångarsystem, borrhålslager, drift samt övrigt, där kringutrustning och arbetskostnad ligger. En del kostnadsuppskattningar har gjorts för återställande av mark och montering av utrustning, exempelvis montering av solfångare. Tabell 6 visar en sammanställning av kostnaderna för solvärmesystemet med säsongslager. Samliga priser redovisas inklusive moms. En mer detaljerad sammanställning av kostnaderna återfinns i bilaga 3.

Sfinx THX-15 är en vakuumsrörsbaserad solfångare med "heat-pipe". Denna anses lämplig på Vaniljgatan. Valet baseras på de jämförelser som finns presenterade i kapitel 3, där just denna modell hade den bästa upptagningsförmågan och priset. Kostnaderna för dessa moduler har beräknats utifrån de jämförelsepriser som finns specificerade i tabell 2.

Säsongslagret har ett borrhjup och diameter som överrensstämmer med dagens standard för energibrunnsborrning. Även de rörledningar och kringarbeten som projekterats liknar de för en energibrunn. En kostnadsuppskattning har därför gjorts utifrån gällande prislista för entreprenören, Stenkullens Mark och Brunnsborrning AB. Liknande uppgifter har även funnits hos andra entreprenörer.

Driftkostnader för cirkulationspumpar samt värmepumpar har uppskattats efter uppgifter från Ramböll och är beräknade på ett elpris på 1,25 kr/kWh. Även kringutrustning för driften av hela systemet har approximerats efter uppgifter från Ramböll. Här återfinns kostnadsuppskattningar för cirkulationspumpar, värmepumpar, fördelare samt styr och reglercentraler.

Kostnadspost	Totalt pris	Förklaring
Solvärmesystem	9 998 kkr	Solfångare, ack.tank, expansionskärl
Borrhålslager	1 028 kkr	Borrning, markledning, schaktning
Drift	115 kkr	Årlig kostnad för samtliga pumpar
Övrigt	3 440 kkr	Kringutrustning och arbetskostnad

Tabell 6: Kostnadssammanställning. För mer detaljer se bilaga 3.

Den tekniska livslängden hos de olika åtgärderna är begränsad. Hänsyn har tagits till detta genom att de olika alternativen endast jämförs under en 30 års period. Efter denna period anses åtgärdernas funktion ha försämrats till den grad att behov av en nyinvestering krävs.

Kostnaden för fjärrvärmen vid Vaniljgatan är 73 öre per kWh, vilket med stöd av diagram 3 får anses vara normalt. Diagram 3 visar även att en stabil kostnadsutveckling av fjärrvärmen har skett under föregående år.

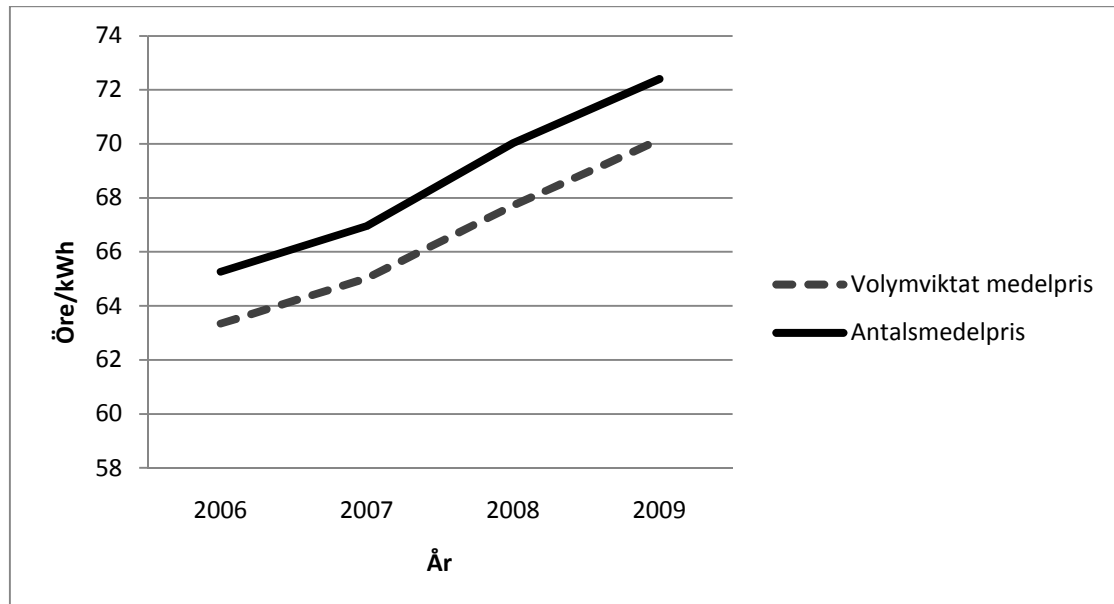


Diagram 3: Kostnadsutveckling för fjärrvärme. Källa: Svensk Fjärrvärme

6 Resultat

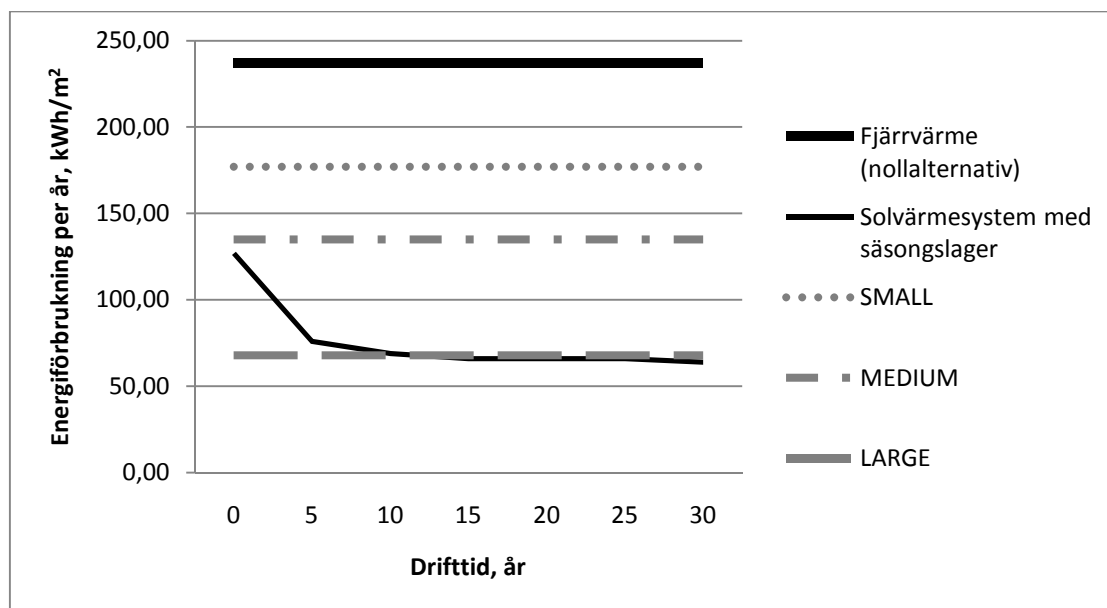


Diagram 4: Energieffektivisering av Vaniljgatan

Diagrammet visar förbrukningen efter respektive åtgärd. Här framgår det att Solvärmesystemet med säsongslager är likvärdigt med LARGE efter cirka 10 år.

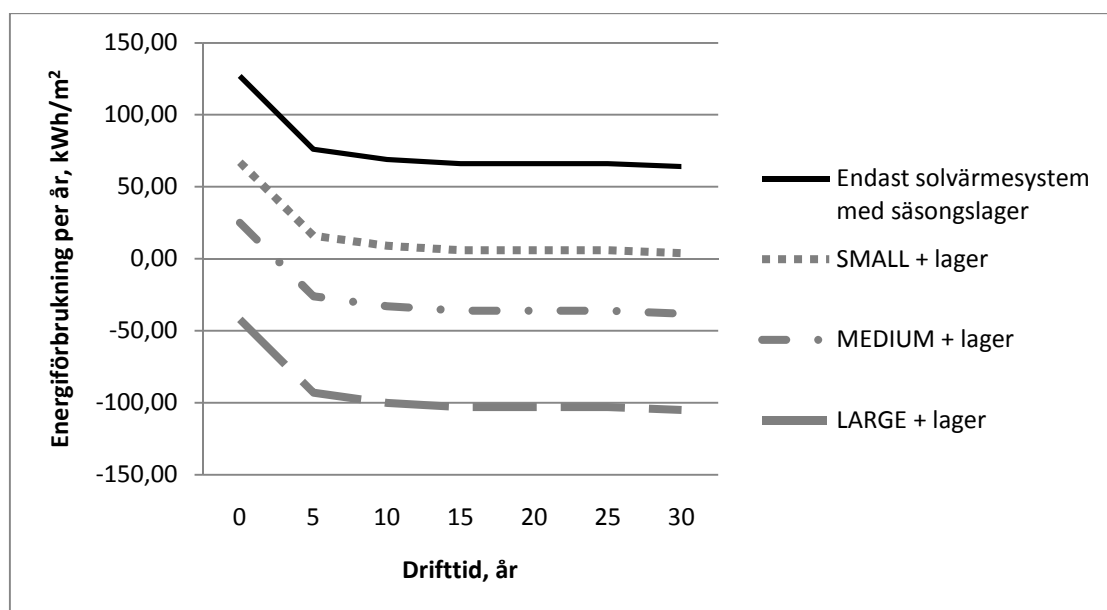


Diagram 5: Kombination av solvärmesystem med säsongslager och renoveringsalternativet SMALL, MEDIUM och LARGE.

Kombineras solvärmesystemet med säsongslager tillsammans med någon av de presenterade renoveringsmetoderna sker ytterligare energibesparingar. Då energiförbrukningen blir negativ produceras mer värme än vad som behövs.

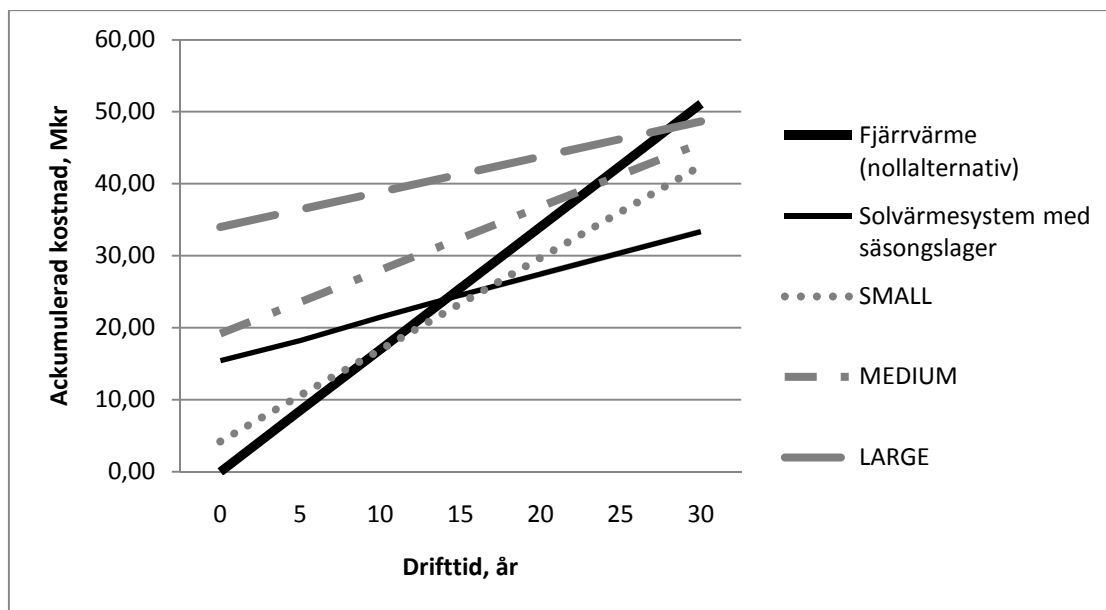


Diagram 6: Ackumulerad kostnad vid 0 % ränta, fjärrvärmepris 73 öre per kWh

Om de energibesparande åtgärderna betalas kontant utan lån samt under förutsättningen att fjärrvärmepriset är oförändrat, kommer en investering i ett solvärmesystem med säsongslager att löna sig efter 15 år.

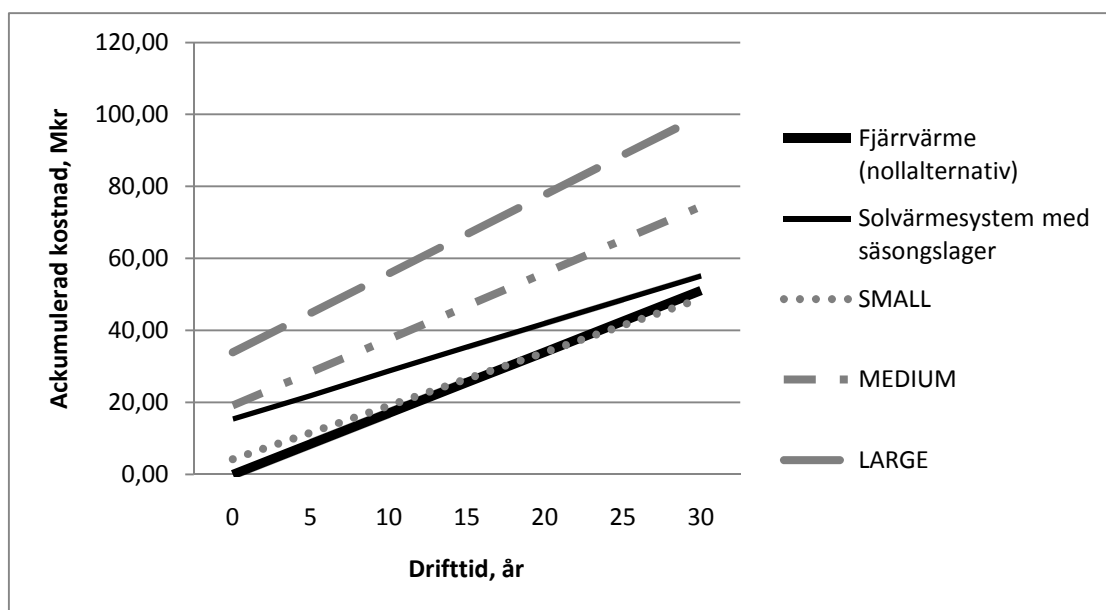


Diagram 7: Ackumulerad kostnad vid 5 % ränta, fjärrvärmepris 73 öre per kWh

Vid ett scenario där en mycket fördelaktig låneränta erhålls och fjärrvärmen inte stiger i pris, förändras situationen. Solvärmesystemet med säsongslager hinner inte återbetala sig inom 30 år.

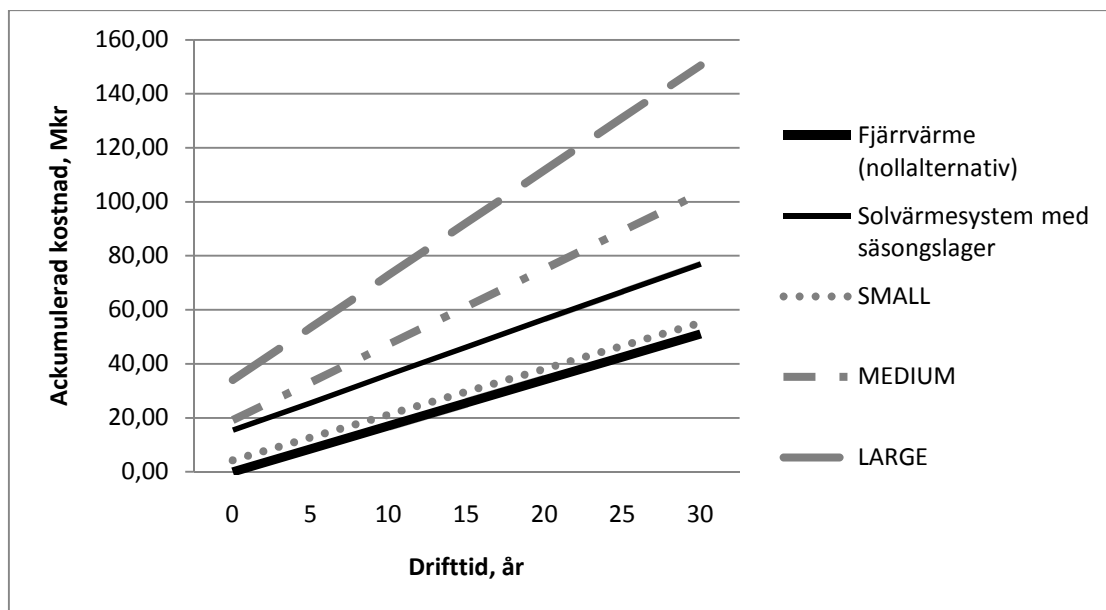


Diagram 8: Ackumulerad kostnad vid 10 % ränta, fjärrvärmepris 73 öre per kWh

I ett mer troligt scenario där en låneränta på 10 % beaktas och fjärrvärmepriset förblir oförändrat, kommer Solvärmesystemet med säsongslager aldrig kunna bli lönsamt. För att lönsamhet ska kunna uppnås måste fjärrvärmepriset ökas.

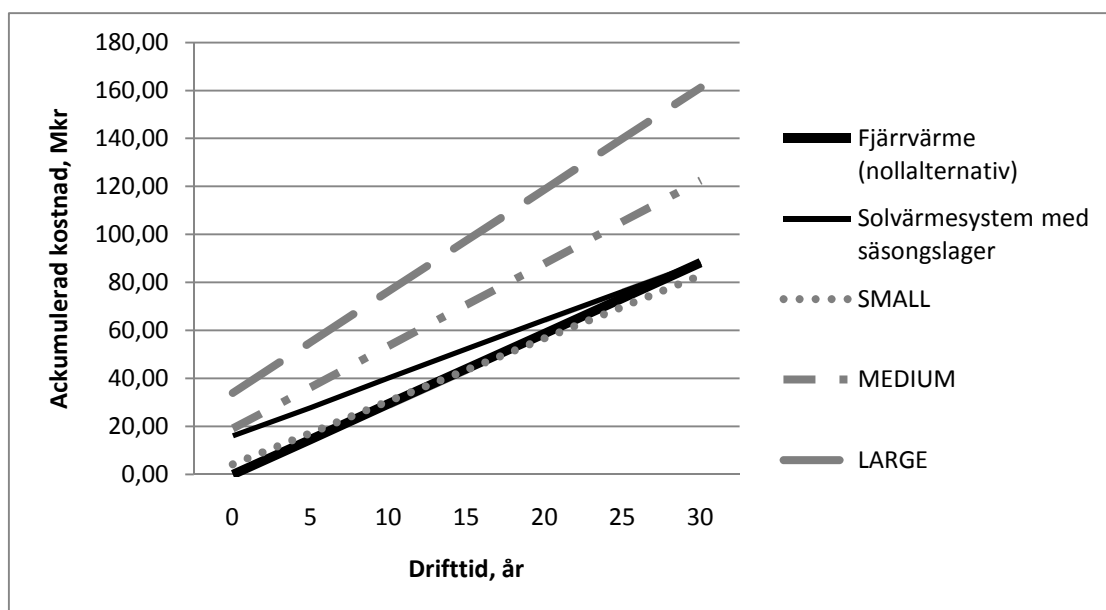


Diagram 9: Ackumulerad kostnad vid 10 % ränta, fjärrvärmepris 126 öre per kWh

I ett sista scenario där låneräntan är satt till 10 % och fjärrvärmepriset antas stiga till 126 öre per kWh hinner solvärmesystemet med säsongslager precis att återbetala sig.

7 Analys

Det finns många vägar att gå när man ska investera i och uppgradera en befintlig fastighet. Ekonomi, hållbarhet, återbetalningstid, sociala effekter och marknadsföring är alla exempel på nyckelord i detta sammanhang. Den dominerande faktorn vid alla investeringar är kapitalet. Är investeringen inte ekonomiskt tilltalande förkastas den snabbt. Förutsättningarna för en investering kan i dagens samhälle ändras mycket fort. Låneräntor varierar, regler och förordningar förändras och boende ställer nya krav. Det enda som med rimlig säkerhet kan förutspås är energipriset. En stadig kostnadsutveckling av fjärrvärmepriset har skett under föregående år och förväntas öka ytterligare, se diagram 3.

Resultatet visar olika energibesparande åtgärderna under flera olika förutsättningar. De olika åtgärdernas återbetalningstid jämförs under olika räntenivåer och även då en kraftig kostnadsökning på fjärrvärme har skett. Den effektiva låneräntan styr i stor grad hur god en investering egentligen blir. Detta framgår tydligt i diagram 6, där samtliga investeringsalternativ har hunnit återbetala sig själv inom tidsramen, men redan vid en låg låneränta förändras situationen helt, se diagram 7. Vid tio procent effektiv låneränta och ingen prisutveckling på fjärrvärmen är det nollalternativet som blir mest ekonomiskt lönsamt, se diagram 8. Det är troligt att prisutvecklingen på fjärrvärme kommer att fortsätta, inte minst då det ställs nya hårdare krav på energihushållning. I diagram 9 redovisas ett scenario med tio procent effektiv låneränta och en kraftig kostnadsökning på fjärrvärmen upp till 126 öre per kWh. Detta utgör brytpunkten för när solvärmesystemet med säsongslager blir lönsamt. Scenariot i diagram 9 innebär också att renoveringsalternativet SMALL nästan blir likvärdigt med fjärrvärme. De övriga åtgärderna är samtliga för kostsamma för att hinna återbetala sig inom rimlig tid. Kommer kostnadsutvecklingen på fjärrvärme fortsätta likt utvecklingen i diagram 3, blir ett fjärrvärmepris på 126 öre per kWh först aktuellt om cirka 17 år.

En investering kan även medföra andra värden än rent ekonomiska. I ”God bebyggd miljö” har Boverket föreskrivit att energiförbrukningen för bostadshus ska minskas med en femtedel fram till och med år 2020, jämfört med energiförbrukningen år 1995. Det finns även ett liknande mål uppsatt för år 2050, där energiförbrukningen ska ha halveras jämfört med ursprungsläget år 1995. För att nå dessa mål krävs att fastighetssektorn börjar energieffektivisera sina bostäder. För en hållbar fastighetssektor måste hänsyn ges till värden som är svårt att mäta i pengar. De sociala effekterna av en investering kan betyda mycket för ett områdes utveckling. Vi har även ett ansvar mot kommande generationer att hushålla med energi och materialflöden. Bygg- och fastighetssektorn måste börja inse vikten av detta och redan nu planera för hur målet år 2050 ska uppnås.

För att belysa hur energimålen uppnås för de olika alternativen kan diagram 4 studeras. Det mest kostnadseffektiva förslaget SMALL räcker till för att nå upp till målet i ”God bebyggd miljö” år 2020, men under den efterföljande 30-års perioden kommer nya energibesparande behöva göras för att målet år 2050 ska kunna uppnås. Inte heller en investering i renoveringsalternativet MEDIUM räcker till att halvera förbrukningen till år 2050. Endast LARGE och solvärmesystem med säsongslager klarar av att halva energiförbrukningen för Vaniljgatan till år 2050. Samtliga diagram i resultatkapitlet visar att solvärmesystemet med säsongslager är det mest fördelaktiga alternativet av de två.

I diagram 5 visas vad som händer när solvärmesystem med säsongslager kombineras med antingen SMALL, MEDIUM eller LARGE. I kombinationen med SMALL kommer 2050 målet att uppnås med marginal. Kombinerat lagret med MEDIUM eller LARGE kommer Vaniljgatan gå plus energimässigt, vilket skulle likställa det med ett plusenergihus. Det är också värt att notera att renoveringsalternativet LARGE redan innefattar solfångare och att investeringen för ett säsongslager till detta är en mindre kompletterande kostnad. Detta på grund av att säsongslagret utgör omkring en tiondel av kostnaden för solfångarna.

Ett solvärmesystem med säsongslager innebär under en 30-års period ett kostnadspålägg jämfört med nollalternativet fjärrvärme, men under rätt ränteläge och fjärrvärmepris blir detta pålägg marginellt. De sociala effekterna av investeringen kan däremot bli mycket omfattande. Miljonprogramsområden är generellt gråa och tråkiga. En investering i en klimatsmart och miljövänlig energikälla som solenergi skulle helt kunna förändra människors syn på området. Ett miljonprogramsområde med ett solvärmesystem framstår som högteknologiskt och trendig, och skulle bli pionjär inom området.

8 Slutsats

Av de lagringsmetoder som har studerats i rapporten har borrhål i berg, slangar i lera och groplager visat sig vara de tre rimligaste metoderna att applicera i ett befintligt miljonprogramsområde. Av dessa lagringsmetoder bedöms borrhål i berg vara den metod som lämpar sig bäst för Vaniljgatan. Genom att använda ett solvärmesystem med borrhålslager vid Vaniljgatan kan energiförbrukningen minska till 127 kWh/m^2 första året jämfört med Vaniljgatans nuvarande förbrukning på 237 kWh/m^2 . Efter 10 år kommer den nya energiförbrukningen att vara nere i 69 kWh/m^2 . Detta är samma energiförbrukning som fås efter renoveringsalternativet LARGE. En skillnad är att ett solvärmesystem med säsongslager är betydligt billigare. Jämfört med renoveringsalternativet MEDIUM kommer säsongslagret att både bli billigare och göra större energibesparingar.

Från och med år två kommer ett solvärmesystem med borrhålslager vid Vaniljgatan att uppfylla kraven med halverad energiförbrukning, vilket är miljömålet 2050. Det kommer också uppfylla boverkets krav vid nybyggnationer i södra Sverige på 110 kWh/m^2 .

Det är dock inte troligt att säsongslager med solvärme kommer att bli ekonomiskt lönsamt jämfört med fjärrvärme, som är energikällan idag. För att solvärmesystemet med säsongslager ska kunna bli lönsamt krävs att fjärrvärmeprisen går upp till minst 126 öre per kWh.

Bygg- och Fastighetsbranschen verkar hittills enbart ha sett till investeringar som är ekonomiskt lönsamma, vilket inte längre är hållbart. Branschen måste göra en helomvändning och arbeta med utgångspunkten att målet 2050 ska uppfyllas. Så fort bygg- och fastighetssektorn börjar se längre än till kostnaderna och börjar fokusera på miljömålen, kommer ett solvärmesystem med säsongslager få en enorm potential.

9 Diskussion

Denna studie visar endast på möjligheten och potentialen som kan finnas i ett säsongslager för solvärme. Ska ett verkligt lager projekteras krävs djupare förstudier och mer detaljerade beräkningar än vad som har gjorts i rapporten.

När det gäller beräkningar skulle dessa ha blivit betydligt mer noggranna om beräkningsprogram hade använts. Handberäkningsmetoder kräver att grova förenklingar och antaganden görs. Detta innebär att resultatet i rapporten inte kommer att överensstämma med verkligheten.

Examensarbetet bygger till stor del på böcker skrivna under 80-talet. Under de 30 år som har gått sedan böckerna skrevs har teknikutvecklingen gått stadigt framåt. Idag kanske det finns andra moderna metoder för att säsongslagra värme och nya tekniker för att förbättra de redan befintliga.

För att kunna svara på frågan om säsongslagring av solvärme är applicerbart på ett miljonprogramsområde krävs fler studier av andra miljonprogram än Vaniljgatan. Genom att endast applicera metoden på Vaniljgatan, kan en skev bild ha fåtts som inte representerar miljonprogrammet i stort.

10 Referenser

Andersson, J., Gustavsson, A. och Zachrisson, J. (2009) *Energieffektivisering av en miljonprogramsbyggnad - Kostnads- och energibesparing för tre åtgärds paket*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Examensarbete inom institutionen för arkitektur)

Andersson, T., Caldenby, C. (1998) *Att bygga ett land*. Stockholm: Byggeforskningsrådet.

a. BAXI. (2011) *Perifalpannan Sol P1 - Plana solfångare*. http://www.baxi.se/visa_produkt.asp?produktid=159&Kategori=35&Produkttyp=9. (2011-05-06)

b. BAXI. (2011) *Perifalpannan Sol VI, Vakuumsolfångare med dubbelglas*. http://www.baxi.se/visa_produkt.asp?produktid=158&Kategori=36&Produkttyp=9. (2011-05-06)

Berglund, S., Johansson, S. (1997) *Teknisk och ekonomisk utvärdering av energianläggningen vid SAS Frösundavik*. Stockholm: Byggeforskningsrådet. (A2:1997)

Bjureland, W. (2010) *Uttorkning av lera – orsaker och följd*. Västerås: Mälardalens högskola. (Examensarbete inom akademien för hållbar samhälls- och teknikutveckling)

Block, M., Bokalders, V. (2004) *Byggekologi, kunskaper för ett hållbart byggande*. Stockholm: Svensk byggtjänst.

Boverket. (2009) *Boverkets byggregler, BBR, avsnitt 9*. www.boverket.se/Global/Webbokhandel/Dokument/2008/BBR_15/BBR_avsnitt9_supplement_energiushallning.pdf. (2011-03-02)

Boverket. (2005) *Piska och morot – Boverkets utredning om styrmedel för energieffektivisering i byggnader*. www.boverket.se/Om-Boverket/Webbokhandel/Publikationer/2005/Piska-och-morot. (2011-03-02)

Claesson, J. Efrting, B. och Hillström C-G. (1993) *Säsongslagering i bergrum, utvärdering av värmeförluster i Lyckebo Uppsala*. Stockholm: Byggeforskningsrådet. (R3:1993)

Claesson, J. m.fl. (1985) *Markvärme, en handbok om termiska analyser: del 1-3*. Stockholm: Byggeforskningsrådet.

Dalenbäck, J-O., Jilar T. (1988) *Solvärmecentral Lambohov i Lindköping, förslag till handlingsplan för en genomgripande ombyggnad*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (1988:3)

Dimle, P., Wilhelmsson, M. (1987) *Borrhålsvärmelager i Luleå, värmeteknisk utvärdering*. Stockholm: Statens råd för byggeforskning. (R80:1987)

Edstedt, U., Nordell, B. (1994) *Borrhålslager - förutsättningar, erfarenheter, möjligheter*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. (1994:22)

Energimyndigheten. (2010) *Det går att halvera energibehovet i miljonprogramshus*. www.energimyndigheten.se/sv/Press/Pressmeddelanden/Pressmeddelanden-2010/Det-gar-att-halvera-energibehovet-i-miljonprogramshus. (2011-03-02)

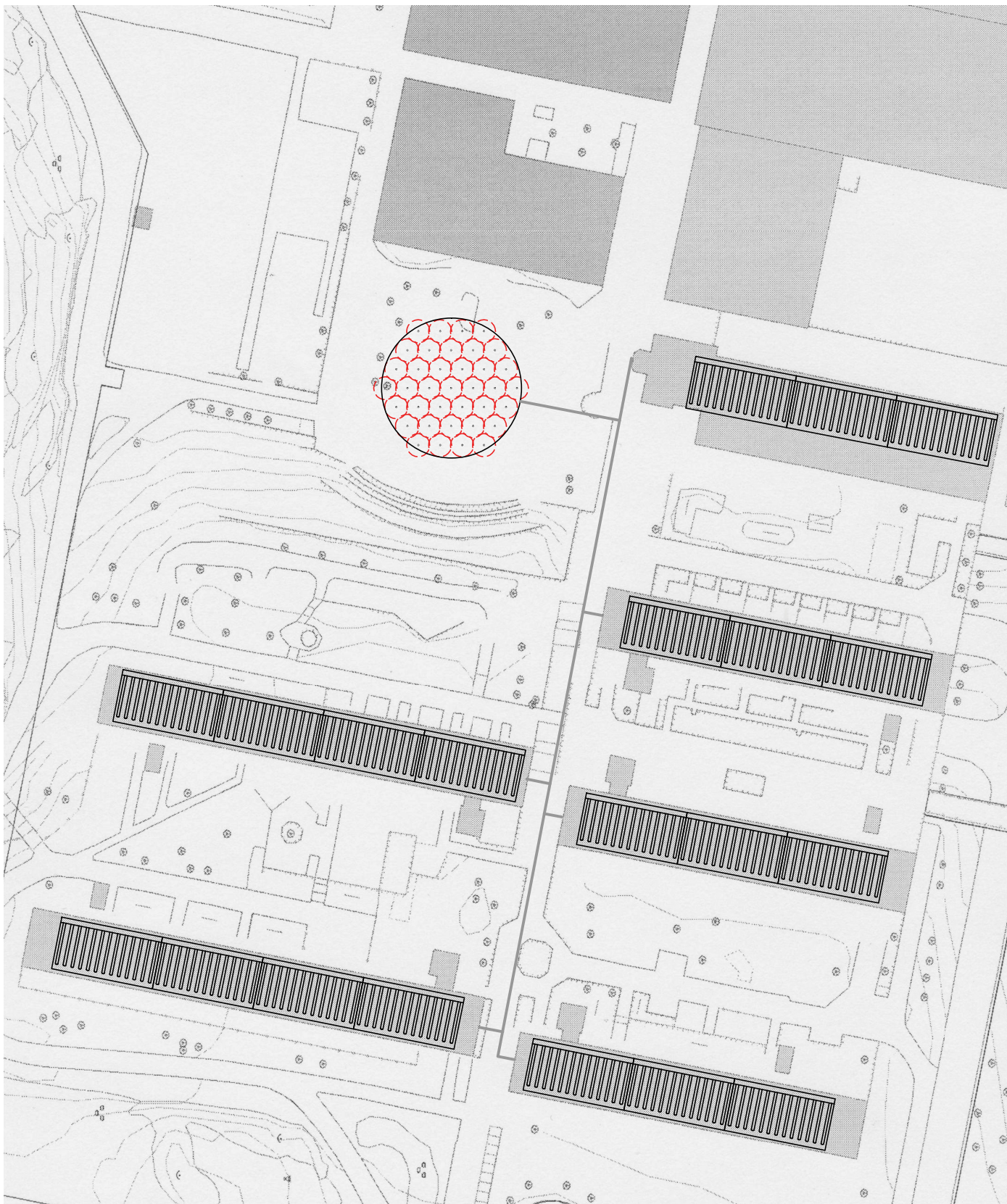
- Energimyndigheten. (2011) *Solvärme*. <http://energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/Solvärme/>. (2011-05-23)
- Frenning, G (Affärsområdeschef, installation, Ramböll Göteborg) diverse handledningstillfällen under våren 2011.
- Hagentoft, C-E. (2002) *Vandrande fukt, strålande värme: så fungerar hus*. Lund: Studentlitteratur.
- Häggström, S. (2009) *Hydraulik för samhällsbyggare*. Upplaga 1. Stockholm: Liber AB.
- Fagerström, Å. (red). (1991) *Energilagring för bebyggelse*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. (1991:2)
- Lundin, S-E. (1998) *Lagra energi och effekt – del 1: Energilagring en teknik för framtiden*. Energimagasinet nr 1/98. <http://www.energimagasinet.com/EM98/01-elagring.html>. (2011-05-02)
- Magnusson, C. (1992) *Värmelager i lera, utvärdering av Söderköping*. Stockholm: Byggforskningsrådet. (R21:1992)
- Mangold, D. Schmidt, M. (2006) *The new central solar heating plants with seasonal storage in Germany*. Konferens: EuroSun. 27-30 juni 2006, Glasgow.
- Miljömålsportalen. (2010) *Energianvändning m.m. i byggnader (2020/2050)*. www.miljomal.nu/15-God-bebyggd-miljo/Delmal/Energianvandning-m-m-i-byggnader-20202050. (2011-03-02)
- Norbäck, K. (1984) *Utvärdering av solvärmecentral i Lambohov*. Stockholm: Byggforskningsrådet. (R92:1984)
- Nordell, B. (1990) *A borehole heat store in rock at University of Luleå, the Lulevärmeprojekt 1982-1988*. Stockholm: Statens råd för byggforskning. (D12:1990)
- Nordgaard, E., Sehlin, J. (2005) *Säsongslagring av energi i akviferer*. Umeå: Umeå universitet. (Projektrapport kursen Energilagringsteknik)
- Petersson, B-Å. (2008) *Tillämpad byggnadsfysik*. Upplaga 3:2. Ungern: Elanders Hungary Kft.
- Rydell, B.(1984) *Värmelagring i lera för skola och sporthall i Söderköping*. Stockholm: Statens råd för byggforskning. (R181:1984)
- Schlyter, P. (2011) *Upp-/nedgångar 2011 I Göteborg*. stjarnhimlen.se/2011/goteborg.html. (2011-04-26). Hänvisning från Johan Ekwall, SMHI, via e-post 2011-03-11.
- Schwartz, R. (Stena Fastigheter AB). Uppgifter om Vaniljgatan, via e-post 2011-05-04.
- Sfinx Solar. (2011) *Sfinx THX-15*. <http://sfinxsolar.e-butik.se/?artnr=Sfinx+THX>. (2011-05-06)
- a. SGU, Sveriges Geologiska Undersökning. (2011) *Avveckling av oljelagersanläggningar*. <http://www.sgu.se/sgu/sv/samhalle/miljo/avveckling/index.html>. (2011-05-06)
 - b. SGU, Sveriges Geologiska Undersökning. (2011) *Bergrumsanläggningar under avveckling*.

- http://www.sgu.se/sgu/sv/samhalle/miljo/avveckling/bergrum_info_s.htm. (2011-05-06)
- Solar-teknik. (2011) *Solfångare*. <http://www.solar-teknik.com/solfangare.html> (2011-04-19)
- Solenergiteknik (2011) *Solpaneler*, solenergiteknik.se/solenergi/solpaneler.html. (2011-04-19)
- SP, Sveriges tekniska forskningsinstitut. (2011) *Förteckning P-märka och övriga solfångare*. http://www.sp.se/sv/units/energy/Documents/ETk/Forteckning_P-markta_och_ovriga_solfangare.pdf. (2011-05-05)
- Stena Fastigheter AB. (2009) *Våra orter: Vaniljgatan 7-18*. www.stenafastigheter.se/V%C3%A5raOrter/G%C3%B6teborg/20241.htm. (2011-04-26)
- Stenkullens Mark & Brunnsborrning AB. (2010) *Prislista energiborrning*. <http://www.denniselbr.se/5.html>. (2011-05-11)
- Sundström, U. (2008) *Installera bergvärmens rätt*. www.byggahus.se/artiklar/installera-bergvarmen-ratt. (2011-05-06)
- Svenska solenergiföreningen. (2011) *Om solenergi*. www.svensksolenergi.se. (2011-03-20)
- Svensson, N. (2005) *Borrning för värme kan strida mot lagen*. Göteborgs Posten, 31 oktober 2005.
- a. Svesol. (2011) *Om solenergi*. <http://www.svesol.se/system/visa.asp?HID=993&FID=923&HSID=22031>. (2011-03-22)
- b. Svesol. (2011) *Prislista 2011-1, gäller från 2011-04-01*. http://websystem.gismo.se/gismo/files/993/993.Prislista%20Svesol%202011-04-01_n.pdf (2011-05-06)

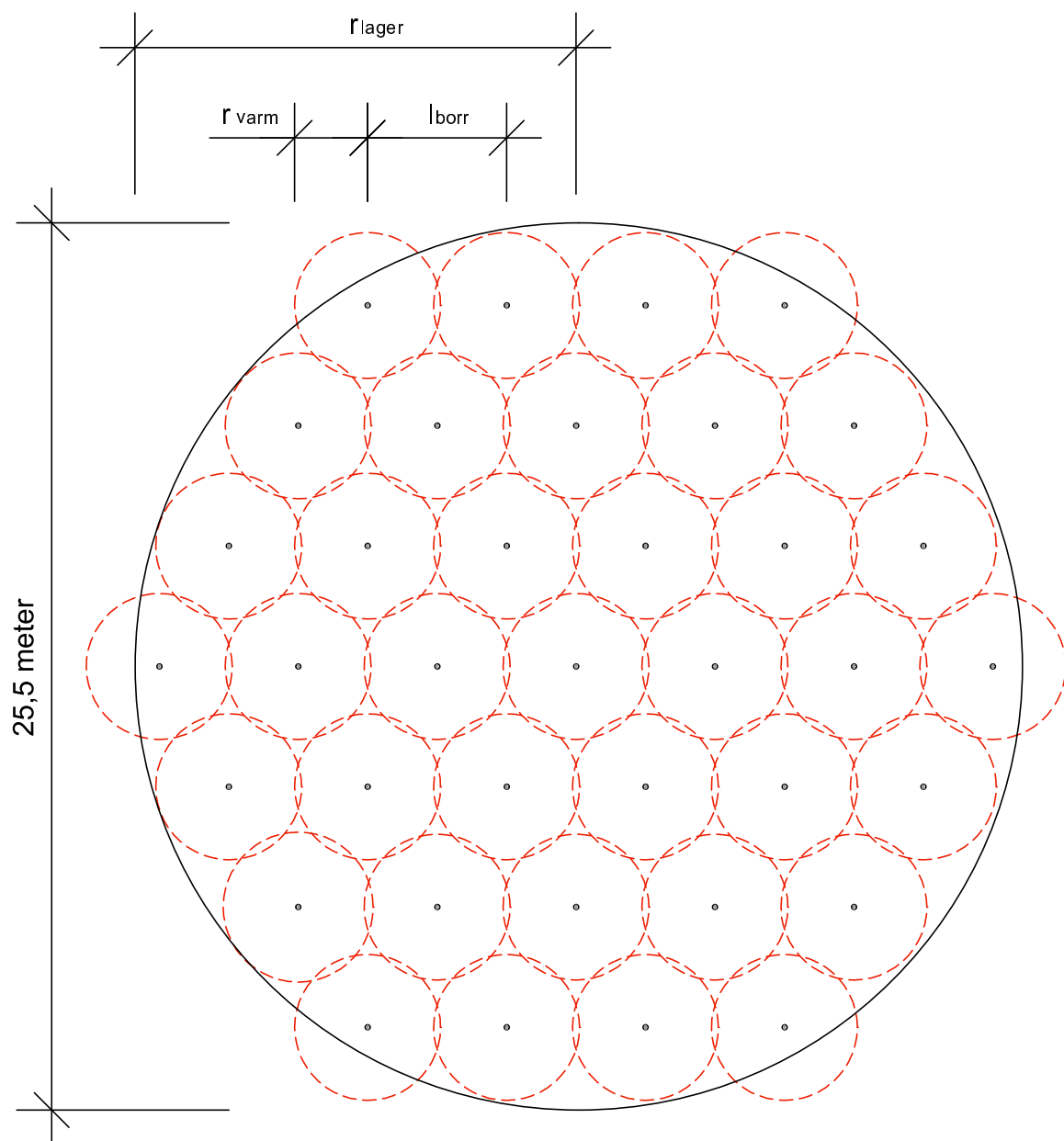
Bilder utan källhänvisning är författarnas egna.

Bilaga 1

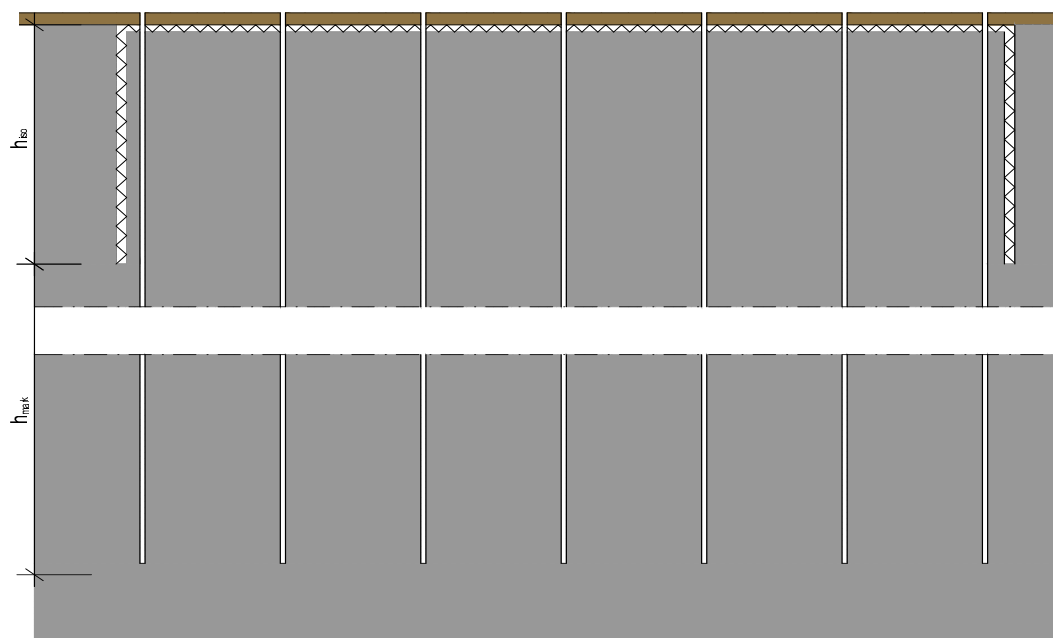
Ritningar



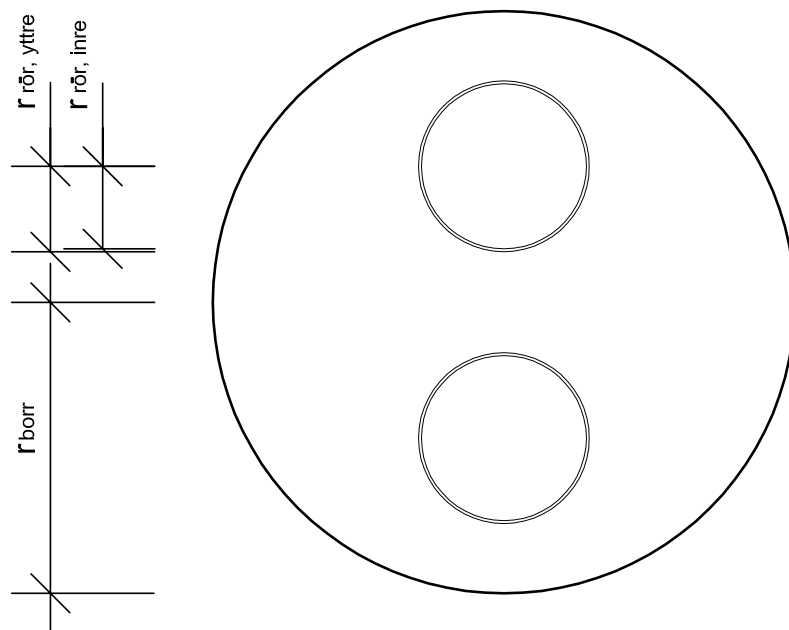
Primärkarta över bostadshus på Vaniljgatan med placering av lager och solfångare
(1:1000 A4). Primärkarta: © Stadsbyggnadskontoret Göteborg



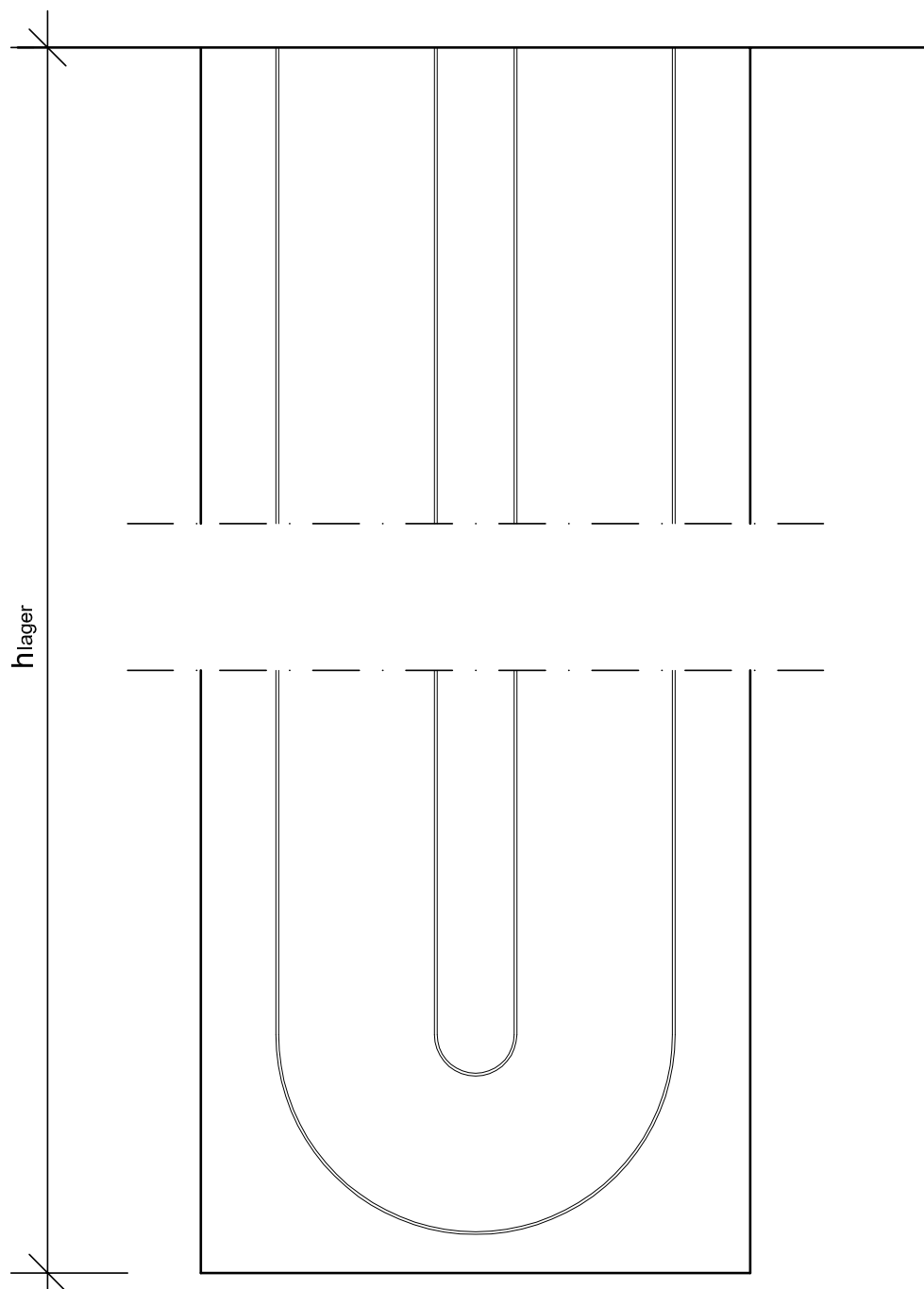
Planritning över placering av borrhål



Sektion genom lager. Visar tänkt isolering runt lagret.



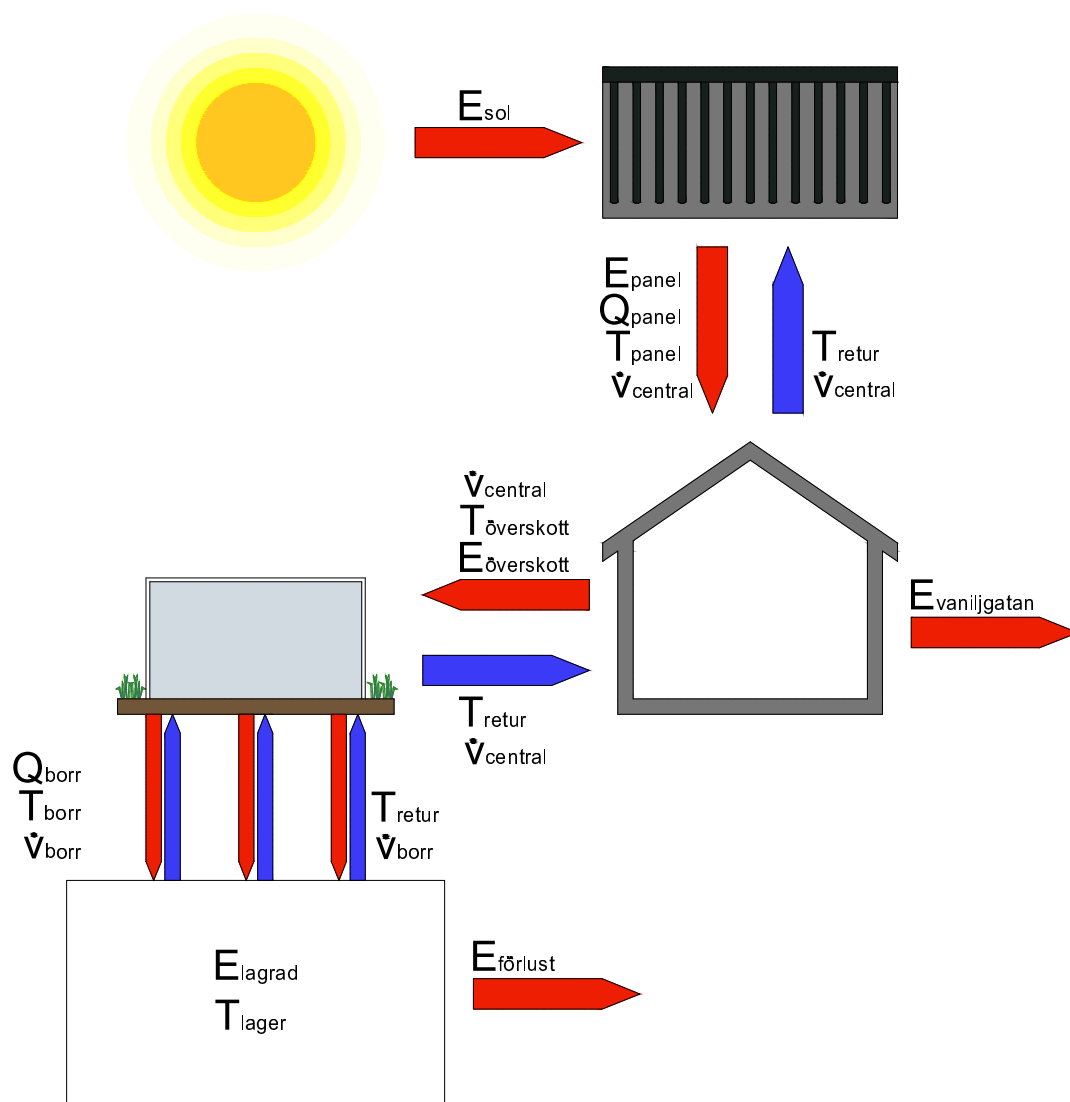
Planritning över placering av rör i borrhål



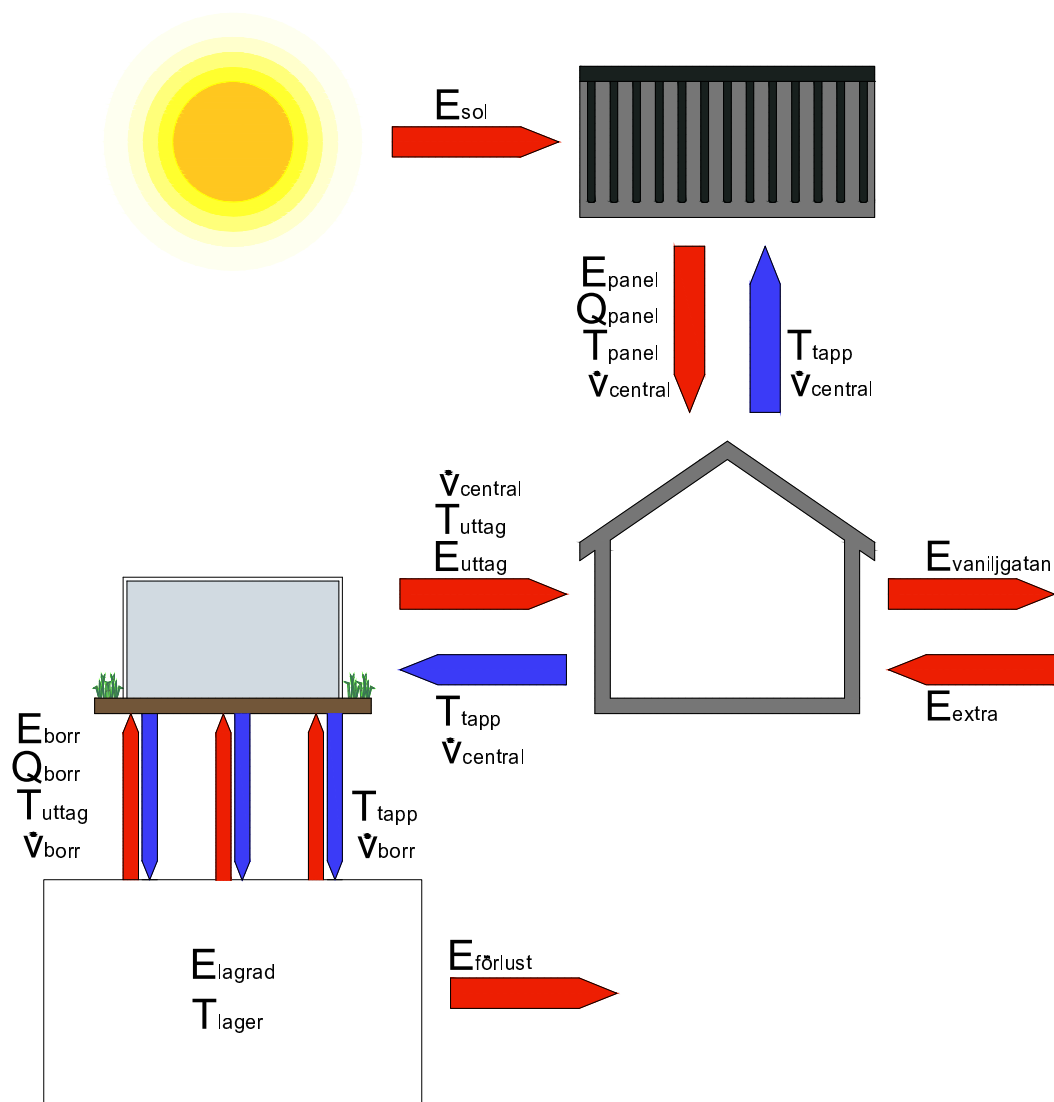
Sektion genom borrhål

Bilaga 2

Värmeberäkningar

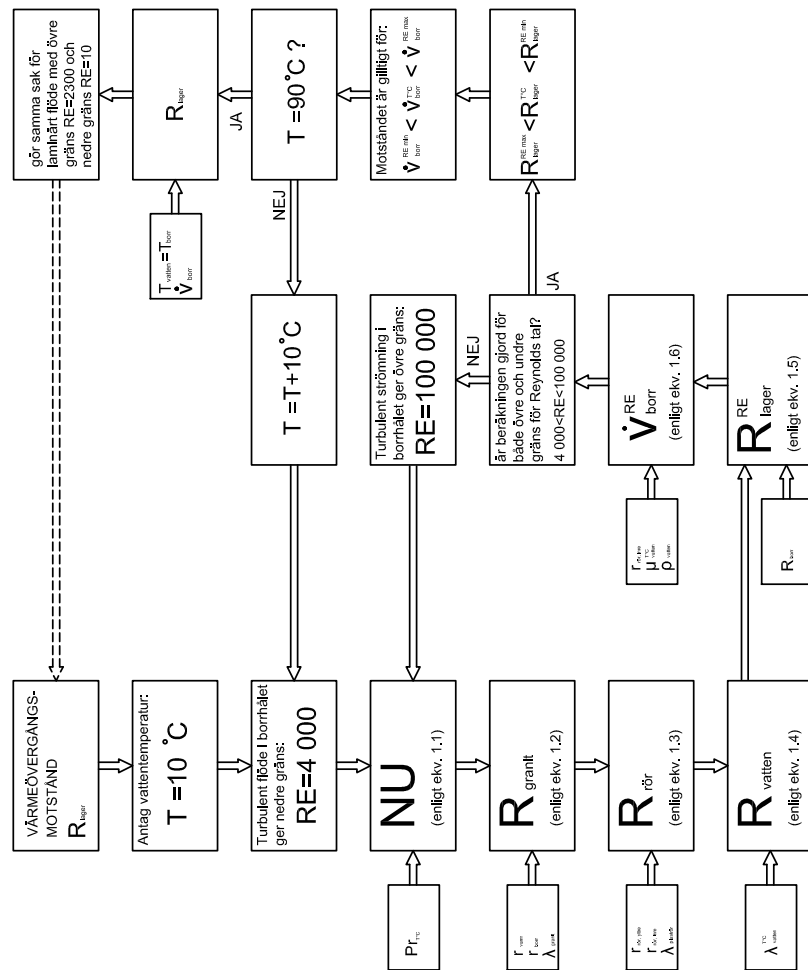


Schematisk bild över uppladdningsperioden

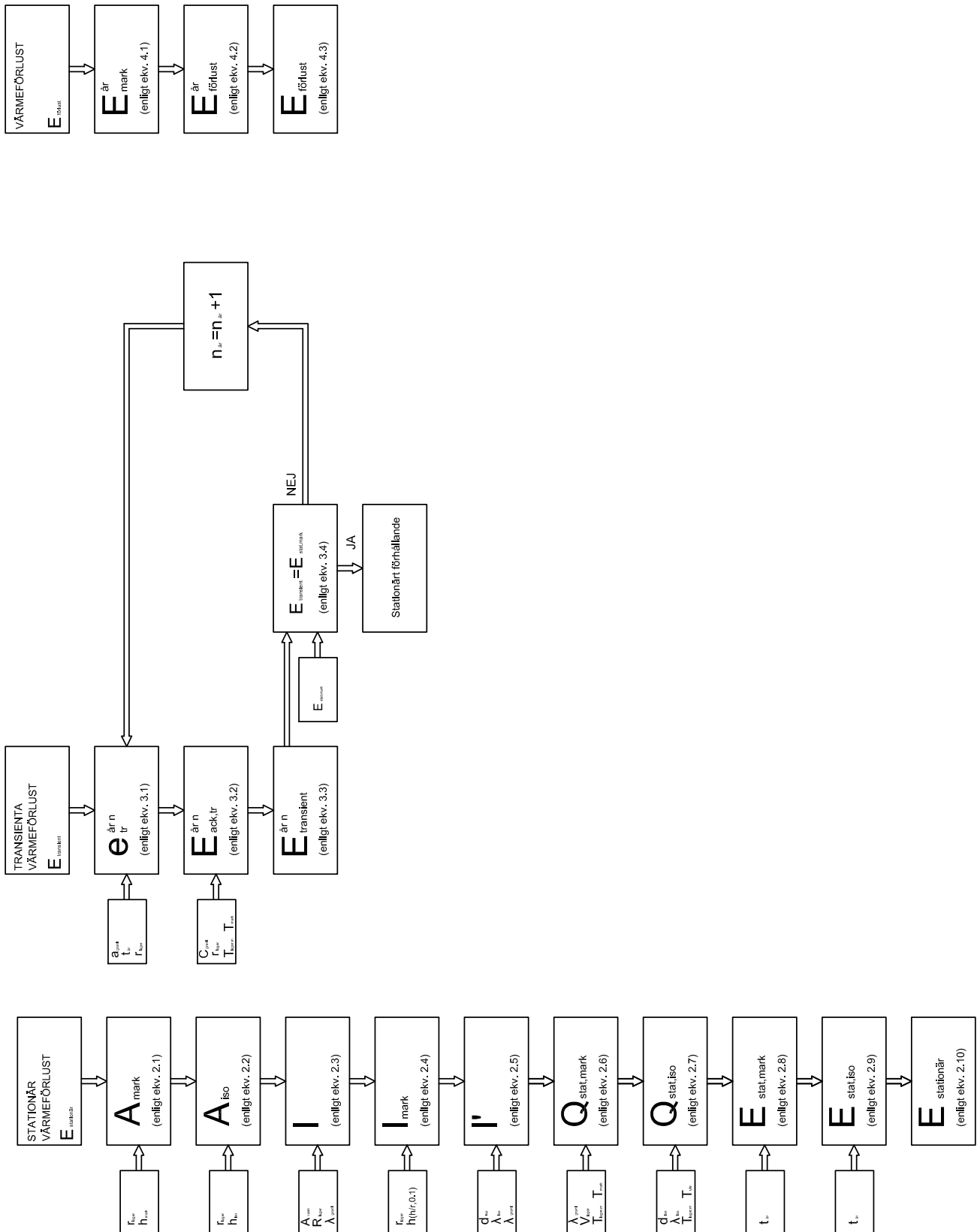


Schematisk bild över urladdningsperioden

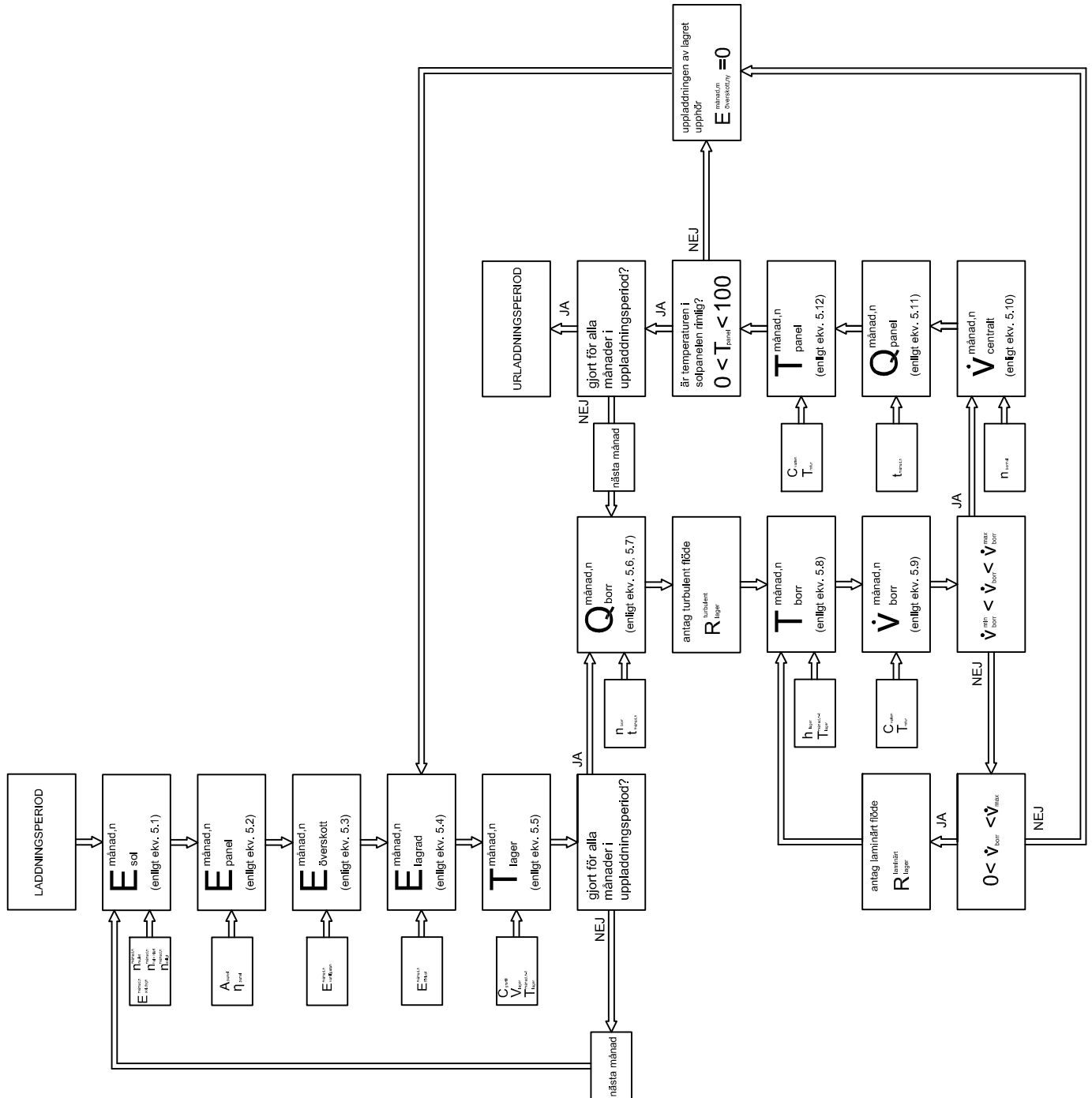
Beräkningsgång värmeövergångsmotstånd



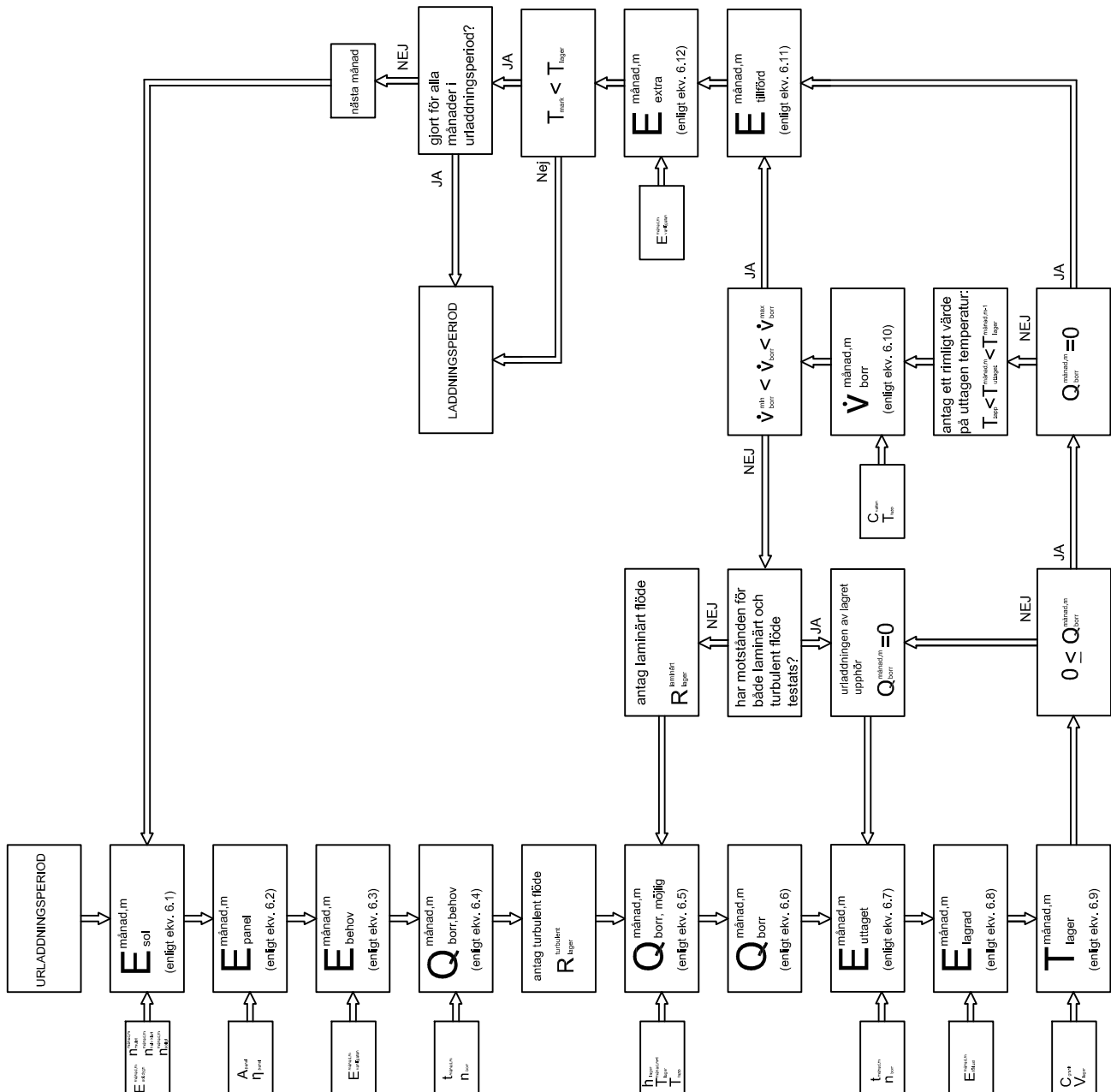
Beräkningsgång värmeförluster



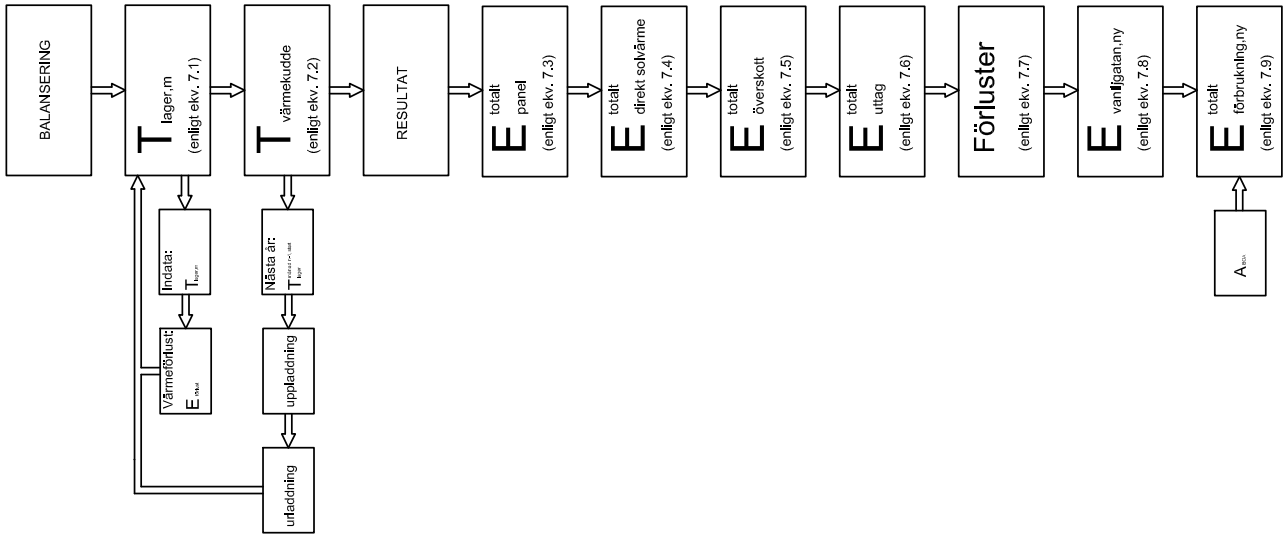
Beräkningsgång uppladdningsperioden



Beräkningsgång urladdningsperiod



Beräkningsgång balansering och resultat



Ekvationer till beräkningar

Nr.	Ekvation - Grundläggande	Enhet	Källa
Ekv. a	$U = \frac{1}{R} = \frac{\lambda}{d}$	[W/m ² °C]	Petersson, 2008
Ekv. b	$C = c_p \cdot \rho$	[Wh/m ³ °C]	Petersson, 2008
Ekv. c	$E = C \cdot V \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = Q \cdot t$	[Wh]	Petersson, 2008
Ekv. d	$Q = C \cdot \dot{V} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = U \cdot A \cdot (T_{\max} - T_{\min})$	[W]	Petersson, 2008
Ekv. e	$\Sigma \dot{V}_{\text{in i given punkt}} = \Sigma \dot{V}_{\text{ut i given punkt}}$	[l/s]	Häggström, 2009

Nr.	1. Ekvationer - Värmeövergångsmotstånd	Enhet	Källa
Ekv. 1.1	$NU = \begin{cases} RE > 10000 \rightarrow 0,023 \cdot RE^{0,8} \cdot Pr_{T^{\circ}C}^{1/3} \\ RE < 2300 \rightarrow \sim 4 \end{cases}$	[–]	Claesson, 1985
Ekv. 1.2	$R_{\text{granit}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{varm}}}{r_{\text{borr}}}\right) - \frac{3}{4}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{granit}}}$	[mK/W]	Claesson, 1985
Ekv. 1.3	$R_{\text{rör}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{rör,yttre}}}{r_{\text{rör,inre}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{plaströr}}}$	[mK/W]	Claesson, 1985
Ekv. 1.4	$R_{\text{vatten}} = \frac{1}{NU \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{vatten}}}$	[mK/W]	Claesson, 1985
Ekv. 1.5	$R_{\text{lager}} = R_{\text{granit}} + R_{\text{rör}} + R_{\text{vatten}} + R_{\text{borr}}$	[mK/W]	Claesson, 1985
Ekv. 1.6	$\dot{V}_{\text{borr}}^{\text{RE}} = \frac{RE \cdot \pi \cdot \mu_{\text{vatten}} \cdot 2 \cdot r_{\text{rör,inre}}}{4 \cdot \rho_{\text{vatten}}} \cdot 1000$	[l/s]	Claesson, 1985

Nr.	2. Ekvationer – Stationär värmeförlust	Enhet	Källa
Ekv. 2.1	$A_{\text{mark}} = \pi \cdot r_{\text{lager}}^2 + \pi \cdot 2 \cdot r_{\text{lager}} \cdot h_{\text{mark}}$	[m ²]	
Ekv. 2.2	$A_{\text{iso}} = \pi \cdot r_{\text{lager}}^2 + \pi \cdot 2 \cdot r_{\text{lager}} \cdot h_{\text{iso}}$	[m ²]	
Ekv. 2.3	$l = \sqrt{\lambda_{\text{granit}} \cdot R_{\text{lager}} \cdot A_{\text{varm}}}$	[m]	Claesson, 1985
Ekv. 2.4	$l_{\text{mark}} = \frac{A_{\text{mark}}}{r_{\text{lager}} \cdot h(h/r, 0.1)}$	[m]	Claesson, 1985
Ekv. 2.5	$l' = \frac{A_{\text{iso}}}{l + \frac{\lambda_{\text{granit}} \cdot d_{\text{iso}}}{\lambda_{\text{iso}}}} + \frac{A_{\text{mark}}}{l + l_{\text{mark}}}$	[m]	Claesson, 1985
Ekv. 2.6	$Q_{\text{stat,mark}} = \frac{\lambda_{\text{granit}} \cdot l' \cdot (T_{\text{lager,m}} - T_{\text{mark}})}{1 - \frac{l'^2}{V_{\text{lager}}}}$	[W]	Claesson, 1985
Ekv. 2.7	$Q_{\text{stat,iso}} = \frac{\lambda_{\text{iso}}}{d_{\text{iso}}} \cdot A_{\text{iso}} \cdot (T_{\text{lager,m}} - T_{\text{ute,m}})$	[W]	Ekv a, Ekv. d
Ekv. 2.8	$E_{\text{stat,mark}}^{\text{år}} = Q_{\text{stat,mark}} \cdot t_{\text{år}}$	[Wh]	Ekv c
Ekv. 2.9	$E_{\text{stat,iso}}^{\text{år}} = Q_{\text{stat,iso}} \cdot t_{\text{år}}$	[Wh]	Ekv c
Ekv. 2.10	$E_{\text{stationär}}^{\text{år}} = E_{\text{stat,mark}}^{\text{år}} + E_{\text{stat,iso}}^{\text{år}}$	[Wh]	Ekv c

Nr.	3. Ekvationer – Transient värmeförlust	Enhet	Källa
Ekv. 3.1	$\frac{a_{\text{granit}} \cdot n_{\text{år}} \cdot t_{\text{år}}}{r_{\text{lager}}^2} \rightarrow \text{Diagram} \rightarrow e_{\text{tr}}$	[–]	Claesson, 1985
Ekv. 3.2	$E_{\text{ack,tr}} = C_{\text{granit}} \cdot (T_{\text{lager,m}} - T_{\text{mark}}) \cdot r_{\text{lager}}^3 \cdot e_{\text{tr}}$	[Wh]	Claesson, 1985
Ekv. 3.3	$E_{\text{transient}}^{\text{år}} = E_{\text{ack,tr}}^{\text{år},n} - E_{\text{ack,tr}}^{\text{år},n-1}$	[Wh]	Claesson, 1985
Ekv. 3.4	$E_{\text{transient}} = E_{\text{stat,mark}} \rightarrow \text{Stationärt förhållande råder}$	[Wh]	Claesson, 1985

Nr.	4. Ekvationer – Värmeförluster	Enhet	Källa
Ekv. 4.1	$E_{\text{mark}}^{\text{år}} = \begin{cases} \text{Stationära förhållanden} \rightarrow E_{\text{stat,mark}}^{\text{år}} \\ \text{Ej stationära förhållanden} \rightarrow E_{\text{tr,mark}}^{\text{år}} = E_{\text{transient}}^{\text{år}} \end{cases}$	[Wh]	Claesson, 1985
Ekv. 4.2	$E_{\text{förlust}}^{\text{år}} = E_{\text{mark}}^{\text{år}} + E_{\text{stat,iso}}^{\text{år}}$	[Wh]	
Ekv. 4.3	$E_{\text{förlust}}^{\text{månad}} = \frac{E_{\text{förlust}}^{\text{år}}}{12}$	[Wh]	

Nr	5. Ekvationer - Uppladdningsperiod	Enhet	Källa
Ekv. 5.1	$E_{\text{sol}}^{\text{månad},n} = \frac{E_{\text{sol}}^{\text{Malmö}} + E_{\text{sol}}^{\text{Västerås}}}{2} \cdot (0,25 \cdot n_{\text{mulet}}^{\text{månad},n} + 0,65 \cdot n_{\text{halv klart}}^{\text{månad},n} + n_{\text{soligt}}^{\text{månad},n})$	[Wh/m ²]	Petersson, 2008
Ekv. 5.2	$E_{\text{panel}}^{\text{månad},n} = E_{\text{sol}}^{\text{månad},n} \cdot \eta_{\text{panel}} \cdot A_{\text{panel}}$	[Wh]	
Ekv. 5.3	$E_{\text{överskott}}^{\text{månad},n} = E_{\text{panel}}^{\text{månad},n} - E_{\text{vaniljgatan}}^{\text{månad},n}$	[Wh]	
Ekv. 5.4	$E_{\text{lagrad}}^{\text{månad},n} = E_{\text{överskott}}^{\text{månad},n} - E_{\text{förlust}}^{\text{månad},n}$	[Wh]	
Ekv. 5.5	$T_{\text{lager}}^{\text{månad},n} = \frac{E_{\text{lagrad}}^{\text{månad},n}}{C_{\text{granit}} \cdot V_{\text{lager}}} + T_{\text{lager}}^{\text{månad},n-1}$	[°C]	Ekv. b, Ekv. c
Ekv. 5.6	$E_{\text{borr}}^{\text{månad},n} = \frac{E_{\text{överskott}}^{\text{månad},n}}{n_{\text{borr}}}$	[Wh]	
Ekv. 5.7	$Q_{\text{borr}}^{\text{månad},n} = \frac{E_{\text{borr}}^{\text{månad},n}}{t_{\text{månad},n}}$	[W]	Ekv. c
Ekv. 5.8	$T_{\text{borr}}^{\text{månad},n} = T_{\text{överskott}}^{\text{månad},n} = \frac{Q_{\text{borr}}^{\text{månad},n} \cdot R_{\text{lager}}}{2h_{\text{lager}}} + T_{\text{lager}}^{\text{månad},n-1}$	[°C]	Ekv a, Ekv. d
Ekv. 5.9	$\dot{V}_{\text{borr}}^{\text{månad},n} = \frac{Q_{\text{borr}}^{\text{månad},n}}{C_{\text{vatten}} \cdot (T_{\text{borr}}^{\text{månad},n} - T_{\text{retur}})} \cdot \frac{1000}{3600}$	[l/s]	Ekv. b, Ekv. d
Ekv. 5.10	$\dot{V}_{\text{central}}^{\text{månad},n} = \dot{V}_{\text{borr}}^{\text{månad},n} \cdot n_{\text{borr}}$	[l/s]	Ekv. e
Ekv. 5.11	$Q_{\text{panel}}^{\text{månad},n} = \frac{E_{\text{panel}}^{\text{månad},n}}{t_{\text{månad},n}}$	[W]	Ekv. c
Ekv. 5.12	$T_{\text{panel}}^{\text{månad},n} = \frac{Q_{\text{panel}}^{\text{månad},n}}{C_{\text{vatten}} \cdot \dot{V}_{\text{central}} \cdot \frac{3600}{1000}} + T_{\text{retur}}$	[°C]	Ekv. b, Ekv. d

Nr	6. Ekvationer - Urladdningsperiod	Enhet	Källa
Ekv. 6.1	$E_{sol}^{månad,m} = \frac{E_{sol}^{Malmö} + E_{sol}^{Västerås}}{2} \cdot (0,25 \cdot n_{mulet}^{månad,m} + 0,65 \cdot n_{halv\ klart}^{månad,m} + n_{soligt}^{månad,m})$	[Wh/m ²]	Petersson, 2008
Ekv. 6.2	$E_{panel}^{månad,m} = E_{sol}^{månad,m} \cdot \eta_{panel} \cdot A_{panel}$	[Wh]	
Ekv. 6.3	$E_{behov}^{månad,m} = E_{vaniljgatan}^{månad,m} - E_{panel}^{månad,m}$	[Wh]	
Ekv. 6.4	$Q_{borr,behov}^{månad,m} = \frac{\frac{E_{behov}^{månad,m}}{n_{borr}}}{t_{månad,m}}$	[W]	Ekv. c
Ekv. 6.5	$Q_{borr,möjlig}^{månad,m} = \frac{1}{R_{lager}} \cdot 2h_{lager} \cdot (T_{lager}^{månad,m-1} - T_{tapp})$	[W]	Ekv a, Ekv. d
Ekv. 6.6	$Q_{borr}^{månad,m} = \min \begin{cases} Q_{borr,behov}^{månad,m} \\ Q_{borr,möjlig}^{månad,m} \end{cases}$	[W]	
Ekv. 6.7	$E_{uttag}^{månad,m} = Q_{borr}^{månad,m} \cdot t_{månad,m} \cdot n_{borr}$	[Wh]	Ekv. c
Ekv. 6.8	$E_{lagrad}^{månad,m} = -E_{uttag}^{månad,m} - E_{förlust}^{månad,m}$	[Wh]	
Ekv. 6.9	$T_{lager}^{månad,m} = T_{lager}^{månad,m-1} + \frac{E_{lagrad}^{månad,m}}{C_{granit} \cdot V_{lager}}$	[°C]	Ekv. b, Ekv. c
Ekv. 6.10	$\dot{V}_{borr}^{månad,m} = \frac{Q_{borr}^{månad,m}}{C_{vatten} \cdot (T_{uttag}^{månad,m} - T_{tapp})} \cdot \frac{1000}{3600}$	[l/s]	Ekv. b, Ekv. d
Ekv. 6.11	$E_{tillförd}^{månad,m} = E_{panel}^{månad,m} + E_{uttag}^{månad,m}$	[Wh]	
Ekv. 6.12	$E_{extra}^{månad,m} = E_{vaniljgatan}^{månad,m} - E_{tillförd}^{månad,m}$	[Wh]	

Nr	7. Ekvationer – Balansering och Resultat	Enhet	
Ekv. 7.1	$T_{lager,m} = \frac{\sum T_{lager}^{uppladdning} + \sum T_{lager}^{urladdning}}{12}$	[°C]	Balansera
Ekv. 7.2	$T_{värmekudde} = T_{lager}^{sist\ i\ urladdning}$	[°C]	Balansera
Ekv. 7.3	$E_{panel}^{totalt} = \sum E_{panel}$	[Wh]	Resultat
Ekv. 7.4	$E_{direkt\ solvärme}^{totalt} = \sum E_{vaniljgatan}^{uppladdningsperiod} + \sum E_{panel}^{urladdningsperiod}$	[Wh]	Resultat
Ekv. 7.5	$E_{överskott}^{totalt} = \sum E_{överskott}$	[Wh]	Resultat
Ekv. 7.6	$E_{uttag}^{totalt} = \sum E_{uttag}^{urladdningsperiod}$	[Wh]	Resultat
Ekv. 7.7	$Förluster = 1 - \frac{E_{uttag}^{totalt}}{E_{överskott}^{totalt}}$	[%]	Resultat
Ekv. 7.8	$E_{vaniljgatan,ny} = \sum E_{extra}$	[Wh]	Resultat
Ekv. 7.9	$E_{förbrukning,ny} = \frac{E_{ny\ förbrukning}}{A_{BOA}}$	[Wh/m ²]	Resultat

Indata för beräkningar

Indata				
Beteckning	Värde	Enhet	Förklaring	Källa
a_{granit}	0,0000016	m^2/s	Markens temperaturlledningstal	Claesson, 1985
A_{panel}	3000	m^2	Total area av solfångare	
A_{varm}	13,85	m^2	Uppvärmad yta runt borrhål	Claesson, 1985
d_{iso}	0,30	m	Markisoleringens tjocklek	
C_{granit}	611	$\text{Wh}/\text{m}^3\text{°C}$	Volymetrisk värmekapacitet	Claesson, 1985
C_{vatten}	1167	$\text{Wh}/\text{m}^3\text{°C}$	Volymetrisk värmekapacitet	Claesson, 1985
$E_{\text{sol,dygn}}$	enligt tabell 1	Wh/m^2	Solinstrålningen per dygn molnfri dag	Petersson, 2008
$E_{\text{vaniljgatan}}$	enligt tabell 1	Wh	Energiförbrukning för Vaniljgatan	Schwartz, 2011
$h(h/r=8,0.1)$	33	-	Skalfaktor, avläses i diagram	Claesson, 1985
h_{iso}	10	m	Isolerad lagerhöjd	Claesson, 1985
h_{lager}	100	m	Lagrets totala höjd	
h_{mark}	90	m	Oisolerad lagerhöjd	
l_{borr}	4	m	C-C avstånd mellan borrhål	Claesson, 1985
n_{borr}	37	st	Antal borrhål	
Pr	enligt tabell 2	-	Prandtls tal för vatten	Claesson, 1985
r_{borr}	0,075	m	Radie på ett borrhål	
r_{lager}	12,77	m	Total radie på hela lagret	
$r_{\text{rör,inre}}$	0,040	m	Inre radie på plaströret	
$r_{\text{rör,yttre}}$	0,043	m	Yttre radie på plaströret	
r_{varm}	2,10	m	Cylinderradie	Claesson, 1985
R_{borr}	0,035	$\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$	Värmeövergångsmotstånd över borrhål	Claesson, 1985
T_{retur}	10	°C	Temperatur på returvatten	
T_{tapp}	10	°C	Temperatur på returvatten	
T_{mark}	8,5	°C	Markens medeltemperatur	Hagentoft, 2002
$T_{\text{lager,m}}$	23,2	°C	Lagrets medeltemperatur	
$T_{\text{ute,m}}$	7,9	°C	Årsmedeltemperaturen för Göteborg	Petersson, 2008
V_{lager}	51261	m^3	Volymen på lagret	
ρ_{vatten}	1000	kg/m^3	Densitet på vatten	Petersson, 2008
λ_{granit}	3,5	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$	Värmeledningsförmåga	Claesson, 1985
λ_{iso}	0,036	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$	Värmeledningsförmåga	Petersson, 2008
$\lambda_{\text{plaströr}}$	0,43	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$	Värmeledningsförmåga	Claesson, 1985
λ_{vatten}	enligt tabell 2	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$	Värmeledningsförmåga	Claesson, 1985
η_{panel}	75%		Verkningsgrad på solfångare	
μ_{vatten}	enligt tabell 2	kg/ms	Viskositet	Claesson, 1985

Indata för beräkningar

Indata tabell 1: Energiförbrukning och Solinstrålning för Vaniljgatan				
2010	t	E _{vaniljgatan}	Q _{vaniljgatan}	E _{sol,dygn}
[Månad]	[h]	[Wh]	[W]	[Wh/m ²]
Januari	744	398441000	535539	675
Februari	672	323853000	481924	1805
Mars	744	272581000	366372	3620
April	720	186548000	259094	5975
Maj	744	125638000	168868	7595
Juni	720	52645000	73118	8590
Juli	744	43765000	58824	8185
Augusti	744	48757000	65534	6570
September	720	90794000	126103	4365
Oktober	744	171469000	230469	2480
November	720	257000000	356944	990
December	744	361667000	486112	460
Totalt	8760	2333158000	266342	51310

Indata tabell 2: Materialegenskaper för vatten			
T _{vatten}	Pr	λ _{vatten}	μ _{vatten}
[°C]	[-]	[W/m°C]	[kg/ms]
0	13,4	0,56	0,00180
10	9,4	0,58	0,00130
20	7,0	0,60	0,00100
30	5,4	0,62	0,00080
40	4,3	0,63	0,00065
50	3,5	0,64	0,00055
60	3,0	0,65	0,00047
70	2,5	0,66	0,00040
80	2,2	0,67	0,00036
90	1,9	0,68	0,00031

Beräkning av värmeövergångsmotstånd vid turbulent flöde

Värmeövergångsmotstånd för olika vattentemperaturer vid turbulent strömning										Resultat	
T _{vatten} [°C]	RE [-]	NU [-]	R _{grnit} [m°C/W]	R _{rör} [m°C/W]	R _{vatten} [m°C/W]	R _{turbulent} [m°C/W]	ḡ _{borr} [l/s]			R _{lager} [m°C/W]	ḡ _{borr,max} [l/s]
0	4000	41,60	0,12	0,027	0,0137	0,19	0,45			0,2	0,7
0	100000	546,30	0,12	0,027	0,0010	0,18	11,31				
10	4000	36,96	0,12	0,027	0,0148	0,19	0,33				
10	100000	485,40	0,12	0,027	0,0011	0,18	8,17				
20	4000	33,50	0,12	0,027	0,0158	0,20	0,25				
20	100000	439,97	0,12	0,027	0,0012	0,18	6,28				
30	4000	30,73	0,12	0,027	0,0167	0,20	0,20				
30	100000	403,51	0,12	0,027	0,0013	0,18	5,03				
40	4000	28,48	0,12	0,027	0,0177	0,20	0,16				
40	100000	374,01	0,12	0,027	0,0014	0,18	4,08				
50	4000	26,59	0,12	0,027	0,0187	0,20	0,14				
50	100000	349,21	0,12	0,027	0,0014	0,18	3,46				
60	4000	25,26	0,12	0,027	0,0194	0,20	0,12				
60	100000	331,72	0,12	0,027	0,0015	0,18	2,95				
70	4000	23,77	0,12	0,027	0,0203	0,20	0,10				
70	100000	312,16	0,12	0,027	0,0015	0,18	2,51				
80	4000	22,78	0,12	0,027	0,0209	0,20	0,09				
80	100000	299,14	0,12	0,027	0,0016	0,18	2,26				
90	4000	21,69	0,12	0,027	0,0216	0,20	0,08				
90	100000	284,87	0,12	0,027	0,0016	0,18	1,95				

→

Beräkning av värmeövergångsmotstånd vid laminärt flöde

Värmeövergångsmotstånd för olika vattentemperaturer vid icke turbulent strömning							
T _{vatten} [°C]	RE [-]	NU [-]	R _{granit} [m°C/W]	R _{rör} [m°C/W]	R _{vatten} [m°C/W]	R _{laminärt} [m°C/W]	ḡ _{borr} [l/s]
0	10	4	0,12	0,027	0,142	0,32	0,0011
0	2300	4	0,12	0,027	0,142	0,32	0,2601
10	10	4	0,12	0,027	0,137	0,32	0,0008
10	2300	4	0,12	0,027	0,137	0,32	0,1879
20	10	4	0,12	0,027	0,133	0,31	0,0006
20	2300	4	0,12	0,027	0,133	0,31	0,1445
30	10	4	0,12	0,027	0,128	0,31	0,0005
30	2300	4	0,12	0,027	0,128	0,31	0,1156
40	10	4	0,12	0,027	0,126	0,31	0,0004
40	2300	4	0,12	0,027	0,126	0,31	0,0939
50	10	4	0,12	0,027	0,124	0,30	0,0003
50	2300	4	0,12	0,027	0,124	0,30	0,0795
60	10	4	0,12	0,027	0,122	0,30	0,0003
60	2300	4	0,12	0,027	0,122	0,30	0,0679
70	10	4	0,12	0,027	0,121	0,30	0,0003
70	2300	4	0,12	0,027	0,121	0,30	0,0578
80	10	4	0,12	0,027	0,119	0,30	0,0002
80	2300	4	0,12	0,027	0,119	0,30	0,0520
90	10	4	0,12	0,027	0,117	0,30	0,0002
90	2300	4	0,12	0,027	0,117	0,30	0,0448

→

Resultat	
R _{lager} [m°C/W]	ḡ _{borr,max} [l/s]
0,3	0,7

Beräkning av stationära värmeförluster
 samt beräkning av värmeförlust

Stationär värmeförlust för h/r=8 under turbulenta förhållanden

A_{mark} [m ²]	A_{varm} [m ²]	I [m]	I_{mark} [m]	I' [m]	$Q_{stat,mark}$ [W]	$Q_{stat,iso}$ [W]	$E_{stat,mark,år}$ [Wh]	$E_{stat,iso,år}$ [Wh]	$E_{stationär,år}$ [Wh]	
7736	1315	13,85	3,04	18,35	402,6	22327	2415	195582034	21153081	216735115

Stationär värmeförlust för h/r=8 under laminära förhållanden

A_{mark} [m ²]	A_{varm} [m ²]	I [m]	I_{mark} [m]	I' [m]	$Q_{stat,mark}$ [W]	$Q_{stat,iso}$ [W]	$E_{stat,mark,år}$ [Wh]	$E_{stat,iso,år}$ [Wh]	$E_{stationär,år}$ [Wh]	
7736	1315	13,85	3,94	18,35	386,8	22538	2415	197433848	21153081	218586929

Resultat

$E_{mark,år}$ [Wh]	$E_{förlust,år}$ [Wh]	$E_{förlust,månad}$ [Wh]
197433848	218586929	18215577

Om värmekudden ej är uppbyggd för gällande år →

Om värmekudden ej är uppbyggd för gällande år
 beräknas markvärmeförlusterna utifrån de
 transienta värmeförlusterna enligt nästa sida

Beräkning av transienta värmeförluster

Transient värmeförlust för h/r=8					
n _{år} [år]	at/r _{lager} ² [-]	e _{tr} [-]	E _{ack,tr} [Wh]	E _{tr,år} [MWh]	
1	0,3	42	780647674	781	
2	0,6	61	1143826688	363	
3	0,9	78	1465820453	322	
4	1,2	95	1778453935	313	
5	1,5	112	2091087416	313	
6	1,8	128	2392488556	301	
7	2,2	142	2652704448	260	
8	2,5	156	2912920339	260	
9	2,8	169	3171264174	258	
10	3,1	183	3422119781	251	
11	3,4	196	3661743048	240	
12	3,7	208	3890133975	228	
13	4,0	220	4118524901	228	
14	4,3	232	4337555543	219	
15	4,6	243	4554714129	217	
16	4,9	254	4762512431	208	
17	5,2	265	4960950449	198	←

e_{tr} fås i diagram från boken Markvärme del1 av Claesson, 1985

T _{lager, med} [°C]
23,2

Stationära förhållanden uppnås ej efter 17 år
dock börjar marken stabilisera sig, jämför med E_{stat,mark,år}

Beräkning av uppladdningsperioden

$T_{\text{lager}, n-1}$ [°C]
9,8

Energi och temperatur i lagret under uppladdningsperioden					
	E_{sol} [Wh/m ²]	E_{panel} [Wh]	$E_{\text{överskott}}$ [Wh]	E_{lagrad} [Wh]	T_{lager} [°C]
30 april	99603	224107313	37559313	19343735	10,42
31 maj	142254	320072288	194434288	176218710	16,04
30 juni	146245	329050688	276405688	258190110	24,29
31 juli	142583	320811075	277046075	258830498	32,55
31 augusti	111624	251154675	202397675	184182098	38,43
30 september	69447	156256088	65462088	47246510	39,94

Kontroll av flöde i borrhål				
	E_{borr} [Wh]	Q_{borr} [W]	T_{borr} [°C]	$\dot{u}_{\text{borr}}$ [l/s]
April	1015117	1410	11	0,29
Maj	5254981	7063	22	0,14
Juni	7470424	10376	33	0,11
Juli	7487732	10064	49	0,06
Augusti	5470207	7352	50	0,04
September	1769246	2457	44	0,02

Kontroll av temperatur i solfångare				
	$\dot{u}_{\text{central}}$ [l/s]	Q_{panel} [W]	T_{panel} [°C]	Kontroll
April	10,9	311260	16,8	ok
Maj	5,3	430205	29,3	ok
Juni	4,0	457015	37,0	ok
Juli	2,3	431198	54,8	ok
Augusti	1,6	337573	59,9	ok
September	0,6	217022	90,9	ok

Beräkning av urladdningsperioden

	E_{sol} [Wh/m ²]	E_{panel} [Wh]	E_{behov} [Wh]	$Q_{\text{borrh, behov}}$ [W]	$Q_{\text{borrh, möjlig}}$ [W]	E_{uttag} [Wh]	E_{lagrad} [Wh]	T_{lager} [°C]
31 oktober	37101	83476800	87992200	3196	18713	87992200	-106207777	36,5
30 november	11969	26930475	230069525	8636	16593	230069525	-248285102	28,6
31 december	5883	13237650	348429350	12657	11639	320391868	-338607445	17,8
31 januari	9683	21786469	376654531	13683	4882	134388939	-152604516	12,9
28 februari	24828	55862494	267990506	10778	1837	45667672	-63883250	10,9
31 mars	51929	116840025	155740975	5658	506	13921616	-32137194	9,9

Kontroll av flöde i borrhålen samt fördelning av energi till Vaniljgatan				
	T _{uttag} [°C]	Ů _{borr} [l/s]	Kontroll	$\frac{E_{tillförd}}{E_{extra}}$ [Wh]
Oktober	39,9	0,149	laminärt	171469000 0
November	36,5	0,149	laminärt	257000000 0
December	28,6	0,149	laminärt	333629518 28037482
Januari	17,8	0,149	laminärt	156175407 242265593
Februari	12,9	0,149	laminärt	101530166 222322834
Mars	10,9	0,134	laminärt	130761641 141819359

Balansering och Resultat									
$T_{\text{lager,m}}$	$T_{\text{värmekudde}}$	$E_{\text{panel, totalt}}$	$E_{\text{direkt solvärme}}$	$E_{\text{överskott, tot}}$	$E_{\text{uttag, tot}}$	Förluster	$E_{\text{vanliggatan, ny}}$	$E_{\text{förbrukning, ny}}$	$E_{\text{förbrukning}}$
[°C]	[°C]	[MW/h]	[MW/h]	[MW/h]	[MW/h]	[%]	[MW/h]	[kW/h/m ²]	[kW/h/m ²]
23,2	9,9	1920	866	1053	832	21%	634	64	237

Beräkning av resultat

År1									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
18,0	9,8	1920	866	1053	219	79%	1248	127	237

År2									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
21,6	9,8	1920	866	1053	672	36%	794	81	237

År3									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
22,0	9,8	1920	866	1053	711	33%	756	77	237

År5									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
22,1	9,8	1920	866	1053	721	32%	746	76	237

År10									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
22,7	9,8	1920	866	1053	781	26%	685	69	237

År15									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
23,0	9,8	1920	866	1053	817	22%	650	66	237

Stationära förhållanden									
T _{lager,m}	T _{värmekudde}	E _{panel,totalt}	E _{direkt solvär}	E _{överskott,tot}	E _{uttag,tot}	Förluster	E _{vaniljgatan,n}	E _{förbrukning,i}	E _{förbrukning}
[°C]	[°C]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[%]	[MWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
23,2	9,9	1920	866	1053	832	21%	634	64	237

Bilaga 3

Kostnadsberäkningar

Borrhålslager					
Kostnadspost:	å-pris [kr]	Enhet:	Antal: [st]	Summa [kr] - inkl. moms	Prisuppgift:
Borring inkl. kollektor och värmebärare	262,00 kr	kr/m	3700	969 400,00 kr	Stenkullens Mark & Brunnborrning AB (2011-05-06)
Markledning inkl. isolering och värmebärare	95,00 kr	kr/m	236	22 420,00 kr	Stenkullens Mark & Brunnborrning AB (2011-05-06)
Grävning (för markledningar)	312,00 kr	kr/m	118	36 816,00 kr	Stenkullens Mark & Brunnborrning AB (2011-05-06)
				1 028 636,00 kr	

Solfångarsystem					
Kostnadspost:	å-pris [kr]	Enhet:	Antal: [st]	Summa [kr] - inkl. moms	Prisuppgift:
Sfinx THX-15 (HPSC 58-1800-15)	2 232,00 kr	kr/m ²	3000	6 696 000,00 kr	sfinxsolar (2011-06-06)
Akkumulatortank 750 L	11 325,00 kr	st	266	3 012 450,00 kr	Svesol (2011-06-06)
Expantionskärl 80 L	3 625,00 kr	st	80	290 000,00 kr	Svesol (2011-06-06)
				9 998 450,00 kr	

Övriga kostnader					
Kostnadspost:	å-pris [kr]	Enhet:	Antal: [st]	Kostnad [kr]	Prisuppgift:
Pumpar inkl. styr- och fördelningssystem				340 000,00 kr	Ramböll
Värmepumpar				1 500 000,00 kr	Ramböll
Återställande av mark				100 000,00 kr	Uppskattat kostnad
Montage av solfångare mm				1 500 000,00 kr	Uppskattat kostnad
				3 440 000,00 kr	

Summering av investeringskostnader					
Kostnadspost:	å-pris [kr]	Enhet:	Antal: [st]	Kostnad [kr]	Prisuppgift:
Säsongslager	-	-	-	1 028 636,00 kr	Enligt ovan
Solfångarsystem	-	-	-	9 998 450,00 kr	Enligt ovan
Övrigt	-	-	-	3 440 000,00 kr	Enligt ovan
				14 467 086,00 kr	

Löpande kostnader					
Kostnadspost:	å-pris [kr]	Enhet:	Antal: [st]	Kostnad [kr]	Prisuppgift:
Drift av cirkulationspumpar				95 000,00 kr	Uppskattad av Ramböll
Drift av värmepumpar				20 000,00 kr	Uppskattad av Ramböll
				115 000,00 kr	

Beräkningar för solvärmesystem med säsongslagret