



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R33:1989

Markvärmeteknik för uppvärmning samt kombinerad värme och kyla

Små markytor

**Jan Sundberg
Lisa Ledskog**

Byggeforskningsrådet

R33:1989

MARKVÄRMETEKNIK FÖR UPPVÄRMNING
SAMT KOMBINERAD VÄRME OCH KYLA

Små markytor

Jan Sundberg
Lisa Ledskog

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 871217-0
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens
Geotekniska institut, Linköping.

REFERAT

Forskningsprojektets syfte var att undersöka om krav på en liten markyta är förenligt med användning av mark som värmekälla till en värmepump. Det är i första hand den värmetekniska funktionen hos markackumulatorn samt tillgängligt investeringsutrymme som har studerats. Tre olika typer av markvärmesystem med krav på små markytor har undersökts.

Användning av mark som värmekälla framför uteluft har flera fördelar. Eftersom en värmepump med mark som värmekälla även kan utnyttjas den kallaste dagen, minskar effektbehovet för tillsatsenergin. Det är särskilt intressant vid elanvändning.

Resultaten visar att betydligt högre energimängder är möjliga att utvinna per markyteenhet än vad som tidigare utförts. Resultaten är tillämpliga på både den vanliga typen av indirekta värmepumpsystem och direktexpansionssystem.

Ekonomi för de olika systemen har studerats. Resultaten visar att ett relativt stort investeringsutrymme finns tillgängligt om el ersätts medan utrymmet är mindre vid ersättande av olja, enligt antagna prisförutsättningar. Systemen bedöms vara speciellt gynnsamma att använda vid kombinerad uppvärmning och kyla.

I Byggnadsforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R33:1989

ISBN 91-540-5028-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	
FÖRORD	
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	
SAMMANFATTNING	
1 INLEDNING	1
2 AKTUELLT KUNSKAPSLÄGE	2
3 SYSTEMPRINCIPER	5
3.1 FLERNIVÅSYSTEM	5
3.2 FÖRVÄRMNING AV UTELUFT	6
3.3 JORDVÄRMEBRUNNAR	6
4 FLERNIVÅSYSTEM	8
4.1 BERÄKNINGSMODELL	8
4.1.1 Allmänt	8
4.1.2 Utdatamöjligheter	8
4.1.3 Lagertyp	9
4.1.4 Frysmodell	10
4.2 INDATA	10
4.2.1 Slang	10
4.2.2 Jordtyp	11
4.2.3 Klimat	13
4.2.4 Belastningsförhållanden	13
4.2.5 Simuleringstid	15
4.3 RESULTAT	15
4.3.1 Energiutbyte	15
4.3.2 Slangläge, antal slangnivåer	17
4.3.3 Marktemperatur	19
5 FÖRVÄRMNING AV UTELUFT	21
5.1 BERÄKNINGSMODELL	21
5.2 INDATA	22
5.2.1 Rör	22
5.2.2 Jord	22
5.2.3 Klimat	22
5.2.4 Belastningsförhållanden	23
5.2.5 Simuleringstid	23
5.3 RESULTAT	24

6	JORDVÄRMEBRUNNAR	28
6.1	BERÄKNINGSMODELL	28
6.1.1	Beskrivning	28
6.1.2	Frysmodell	28
6.2	INDATA	28
6.3	RESULTAT	29
7	EKONOMI	32
7.1	ALLMÄNNA FÖRUTSÄTTNINGAR	32
7.2	EIVÄRME I KOMBINATION MED VÄRMEPUMP	33
7.3	OLJEUPPVÄRMNING I KOMBINATION MED VÄRMEPUMP	37
7.4	FÖRVÄRMNING AV VENTILATIONSLUFT	37
7.5	KOMBINATION AV VÄRME OCH KYLA	39
8	SLUTSATSER	40
	REFERENSER	42

FÖRORD

Denna rapport hänför sig till BFR-projekt 871217-0, samfinansierat av Byggforskningsrådet och Statens geotekniska institut. Projektet behandlar möjligheten att begränsa ytbehovet för markvärmeteknik samt kombinera uppvärmning med kylning av fastigheter, främst lokaler.

Huvuddelen av arbetet har utförts vid Statens geotekniska institut. Projektledare har varit Jan Sundberg. I delar av projektet har ett samarbete med Chalmers Tekniska Högskola bedrivits. På uppdrag av SGI har Anders Johansson, Geologiska institutionen, utfört datorsimuleringar vid förvärmning av uteluft. Per-Åke Franck har utfört datorsimuleringar av jordvärmebrunnars funktion.

Caroline Magnusson och Bengt Rydell har bidragit med värdefulla synpunkter på rapportens innehåll.

Linköping i januari 1989

Jan Sundberg

Lisa Ledskog

SAMMANFATTNING

Användning av mark som värmekälla framför uteluft har flera fördelar. Eftersom en värmepump med mark som värmekälla även kan utnyttjas den kallaste dagen minskar effektbehovet för tillsatsenergin. Detta är speciellt intressant då el används som tillsatsenergi. Energitäckningsgraden blir också högre.

En markant nackdel som flera markvärmetekniker lidit av är det relativt stora ytbehovet som krävs t.ex. för ytjordvärme. Om jorddjupen varit ringa har bergvärme kunnat användas. Vid större jorddjup har det emellertid ej funnits någon acceptabel teknik. Detta har speciellt hämmat applikationen av markvärmeteknik inom tät bebyggelse.

Projektet har haft som syfte att undersöka om krav på liten markyta är förenligt med användning av mark som värmekälla till värmepump. Det är i första hand den värmetekniska funktionen hos markackumulatören samt tillgängligt investeringsutrymme som har studerats. Frågeställningar som t.ex. ev. tjälhävning och sättning har ej studerats.

För tre olika markvärmesystem har funktionen för markvärmekollektorn datasimulerats vid olika belastningar och klimatzoner. Dessa är flernivåsystem, som kan liknas vid ett ytjordvärmesystem i flera nivåer, jordvärmebrunnar, vilket kan liknas vid ett bergvärmebrunn i jord, samt förvärmning av uteluft för ventilation eller uteluftvärmepump. Resultaten visar att betydligt högre energimängder är möjliga att utvinna per markyteenhet än vad som tidigare utnyttjats. Om stora energiuttag görs från kollektorn blir det nödvändigt med en artificiell temperaturåterställning av marken för att funktionen skall bibehållas. Energi till artificiell laddning kan erhållas om kylbehov föreligger i fastigheten eller mha t.ex. vindkonvektorer.

För flernivåsystem är det möjligt att utan artificiell temperaturåterställning ta ut ca 90-110 kWh/m²,år vid en lägsta brinetemperatur av ca -5 °C (120-140 kWh/m²,år om -10 °C kan accepteras, t.ex. direktexpansions system). Med återladdning om ca 50 kWh/m²,år kan ca 20% högre energimängder tas ut. Om en värmepumpinstallation täcker ca 50 % av toppeffektbehovet innebär ovanstående energiuttag att det krävs ca 10-15 m² markyta per kW (toppeffekt). Ett bostadshus varaktighet av energiuttaget har förutsatts.

För jordvärmebrunnar i lera är uttag om ca 10 W/m vertikalt nedstick möjliga utan återladdning. Med återladdning kan energiuttaget ökas till 15-20 W/m beroende på återladdningens storlek. Vid ett jorddjup av 20 m innebär detta att 7-15 nedstick på en linje med cc 2 m är nödvändigt för att klara ett enbostadshus med toppeffektbehovet 10 kW. Effekttäckningen för värmepumpen antas även i detta fall vara ca 50 %.

Resultaten från förvärmning av uteluft visar att 20-40 meters rörlängd är i mark ofta är tillräckligt för att höja temperaturen till ca 0°C. Under extrema klimatförhållanden kan 60 m vara nödvändigt. Beroende på luftflödets storlek kan flera rör parallellkopplas. Rapporten visar också att effektbehovet för ventilation av enbostadshus kan reduceras med 50-60 % genom förvärmning av tilluften genom mark.

Ekonomi för de olika markvärmesystem och för luftvärmepump har studerats i form av möjligt investeringsutrymme utifrån de energislag som ersätts och olika klimatzoner. Differentierade taxor har använts för både elvärme och drivenergi till värmepumpar. Olika prisscenarior har nyttjats för både el och olja. Resultaten visar att ett relativt stort investeringsutrymme finns tillgängligt om el ersätts medan utrymmet är mindre vid ersättning av olja. Systemen bedöms vara speciellt gynnsamma att använda vid kombinerad uppvärmning och kylning.

För värmepump med luft som värmekälla lokaliserad till mellansverige kan mellan 35,000 och 70,000 kronor investeras för att ersätta elvärmme, beroende på investeringstidpunkt (1990-2010) och energiförbrukning (25000-35000 kWh). Om anläggningen lokaliseras till norra norrland minskar investeringsmarginalen till mellan 27,000 och 55,000 kronor, dvs en minskning med drygt 20 %.

Om istället mark används som värmekälla ökar investeringsmedlen ytterligare med 7,000 resp. 11,000 kronor för mellansverige och 15,000 resp. 28,000 kronor i norra norrland.

Resultaten innebär att värmepump med framförligt mark som värmekälla i många fall är konkurrenskraftigt vid ersättande av elvärme om ett värmedistributionssystem redan finns installerat. Skall direktelvärme ersättas beror systemens konkurrenskraft på utfallet av de utvecklingsinsatser som görs inom området värmedistributionssystem.

Om uteluftvärmepumpen kompletteras med förvärmning av dess tilluft fås en kombination av uteluftvärmepumpens bättre värmefaktor under vårsommar-höst och jordvärmepumpens bättre effektäckning vintertid. En sådan anläggning bör därför få ett något bättre resultat än jordvärmepumpen ovan.

1 INLEDNING

Användning av mark som värmekälla till värmepump framför uteluft har flera fördelar. Eftersom en värmepump med mark som värmekälla även kan användas den kallaste dagen minskar effektbehovet för tillsatsenergin då värmepumpen är deltäckande. Detta är speciellt intressant då el används som tillsatsenergi. Energitäckningsgraden blir också högre.

En markant nackdel som flera markvärmetekniker lidit av är det relativt stora ytbehovet som krävts, t.ex. för ytjordvärme. Om jordddjupen varit ringa har bergvärme kunnat användas. Vid större jordddjup har det emellertid ej funnits någon acceptabel teknik. Detta har speciellt hämmat applikationen av markvärmeteknik inom tät bebyggelse.

Denna rapport har inriktat sig att undersöka några olika markvärmekollektorer som har mindre krav på markyta. Resultaten är tillämpbara på både den vanliga typen av indirekta värmepumpsystem och direktexpansionssystem. Skillnaden dem emellan är att markvärmekollektorn i det senare fallet är en del av värmepumpens värmeupptagande köldmediakrets medan den i det förra fallet är separerad med en värmeväxlare. Fördelen med direktexpansionssystem är att temperaturfallet över värmeväxlaren undviks och möjliggör därmed en lägre temperatur i markvärmekollektorn. Detta i sin tur medför att större energiuttag är möjligt med bibehållen förångningstemperatur jämfört med indirekta system. Kostnaden för direktexpansionssystem kan också nedbringas med i storleksordningen 10 %. Nackdelen med direktexpansion är en större köldmediafyllning, större läckagerisk av köldmedium eftersom köldmediet cirkulerar i rör i mark samt en försvårad reglerfunktion.

Vid stora energiuttag från en markkolektor krävs någon form av återställning av temperaturen i marken. System med kombinerat värmeuttag vintertid och värmeladdning sommartid (luftkonditionering) är därför en intressant lösning. Marginalkostnaden för en kombinationslösning bör vara relativt liten eftersom komfortkylanläggningen ändå är nödvändig.

Det är i första hand den värmetekniska funktionen hos markackumulatören samt tillgängligt investeringsutrymme som har studerats i denna rapport. Frågeställningar som t.ex. ev. tjälhävning och sättning har ej studerats.

2 AKTUELLT KUNSKAPSLÄGE

Under framförallt första hälften av 1980-talet bedrevs i Sverige ett intensivt FoU-arbete kring utnyttjande av mark som värmekälla för värmepump. Även utomlands bedrevs ett FoU-arbete om än inte lika omfattande som i Sverige.

Horisontellt förlagda rörsystem i jord, ytjordvärme, dimensionerades inledningsvis mycket försiktigt. Efterhand har dock FoU-resultat visat att markkollektorn kan belastas betydligt hårdare, se t.ex. Johansson (1984), Rhen et al (1986) och Jansson & Lundin (1984). Ytjordvärmekollektorn kan också användas för VVS-system med kombinerad uppvärmning och kylning, vilket har visats av Rhen et al (1984).

Förvärmning av tilluft för småhus har följts upp i Västerås. Resultaten finns redovisade i Persson (1987).

Vertikal jordvärmebrunnar finns ej redovisade i någon svensk FoU-rapport. Någon eller några anläggningar finns dock utförda med denna teknik. I USA nyttjas tekniken i viss omfattning för kombinerad uppvärmning och kylning av enbostadshus.

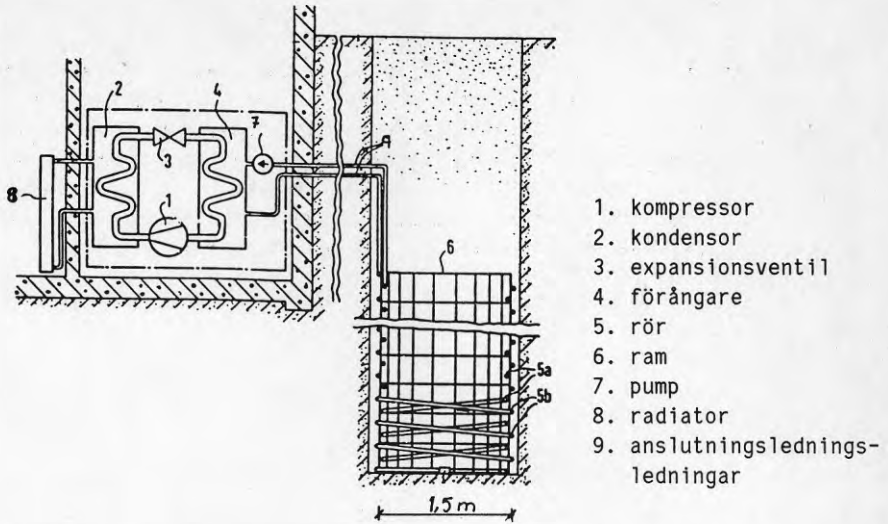
Vid litteratursökning påträffades en rad olika system med markkollektor. Merparten har dock ansetts vara av föga intresse. Två tyska patent refereras emellertid nedan.

- Heating or cooling device with heat pump (Gohn, 1983).
- Collector of heat from the earth for heat pumps (Strop et al, 1983).

Patenten är delvis nya typer av markkollektorer kopplade till värmepumpar.

"Heating or Cooling device with heat pump" är en värme- och kylanordning bestående av två slutna kretsar, en värmepump och ett spiralformat rörsystem. Spiralrören sitter på en ram \varnothing 1,5 meter vilken är placerad i ett borrhål som återfyllts med jord. Ramen är gjord av en stålväv. Anordningen tar liten plats och ryms i en trädgård.

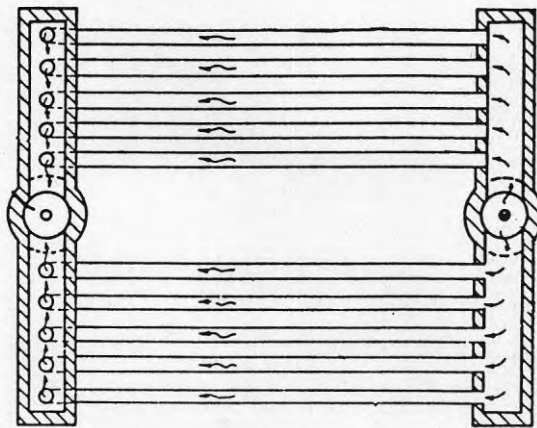
Temperaturen hos mediet i kollektorn ligger under den omgivande jordens fryspunkt. Systemet kan användas för uppvärmning och kylning. Det är även möjligt att koppla flera rörspiraler till en värmepump.



Figur 2.1. Jordvärmekollektor och luftvärmepump enligt patentet "Heating or Cooling device with heat pump".

"Collector of heat from the earth for heat pumps" är ett system för förvärmning av uteluft. (Jmf. kap. 5 Förvärmning av uteluft).

Systemet består av en markvärmekollektor med 10 - 20 meter långa, parallella rör, kopplad till en luftvärmepump. Rördiametern är 100 - 200 mm. Rören placeras horisontellt i jorden och är anslutna till ett förgreningsrör.



Figur 2.2. Jordvärmekollektor för uppvärmning av luft enligt patentet "Collector of heat from the earth for heat pumps".

Värmefaktorn i värmepumpen är beroende av temperaturdifferensen mellan jorden och rören. Båda systemen är kompakta och tar liten plats. Det innebär bland annat måttliga schaktningsarbeten vid installation och att jorden runt slangarna fryser vid relativt små energiuttag.

Energiuttaget är begränsat. Dessutom uppges att systemen inte lönsamma när temperaturen är allt för låg, för det sistnämnda systemet är gränsen cirka -10°C .

3 SYSTEMPRINCIPER

De här redovisade systemen baseras på värmepump i kombination med tre olika markvärmesystem; jordvärmebrunnar, horisontella flernivåsystem samt förvärmning av uteluft i mark.

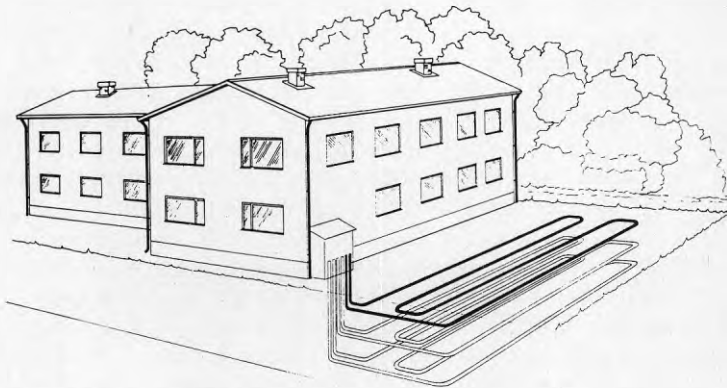
I denna rapport har marklagrets funktion studerats på basis av schabloniserade värme- och återladdningsbehov. Studier av marklagrets funktion har också prioriterats. Värmeuttagets varaktighet baserar sig på uppvärmnings- och tappvarmvattenbehov för ett bostadshus. Om markkolektorn belastas hårt blir återladdning nödvändig. Återladdningsenergin kan baseras på tex vindkonvektorer eller komfortkyla. I det senare fallet måste även krav ställas på lagrets förmåga att upprätthålla kyl-effekten.

Alla system har det gemensamt att de utnyttjar den energi som frigörs då porvattnet i jorden fryser, det s.k. frysvärmet.

3.1 FLERNIVÅSYSTEM

Flernivåsystemet kan sägas vara en utveckling av det konventionella ytjordvärmesystemet. Genom att förlägga slangsystemet i flera nivåer är det möjligt att öka energiuttaget per m^2 markyta utan att oacceptabelt låga köldbärartemperaturer erhålls, se figur 3.1. Större kylmängder kan därvid också lagras om lagret används för kombinerad värme- och kyl drift.

Överskrider det årliga energiuttaget från marken en viss given nivå kan marken ej längre återladdas på naturlig väg. Artificiell återställning av marktemperaturen blir då nödvändig om lika stor energimängd skall kunna tas ut från marken under nästkommande säsong.



Figur 3.1 Flernivåsystem.

3.2 FÖRVÄRMNING AV UTELUFT.

Genom att leda uteluft genom grova slangar i mark kommer luften att uppvärmas om lufttemperaturen är lägre än marktemperaturen. Genom att använda den förvärmade luften till ventilation av enbostadshus minskar fastighetens energibehov men framförallt effektbehovet för ventilation. Förvärmningen av luften blir allt mer effektiv vid minskande utetemperatur. Sommartid återställs temperaturen i marken kring slangen genom att varm ventilationsluft kyls i marken och leds in i fastigheten. På så sätt erhålls även ett enkelt luftkonditioneringsystem. Förvärmning av ventilationsluft har tex utförts i Västerås och finns beskrivet av Persson (1987).

På liknande sätt kan luften till uteluftvärmepumpar förvärmas. På detta sätt erhålls en något förbättrad värmefaktor. Den största vinsten erhålls emellertid genom att värmepumpens gångtid ökar genom att den kan användas även den kallaste dagen samt att dess avgivna effekten höjs.

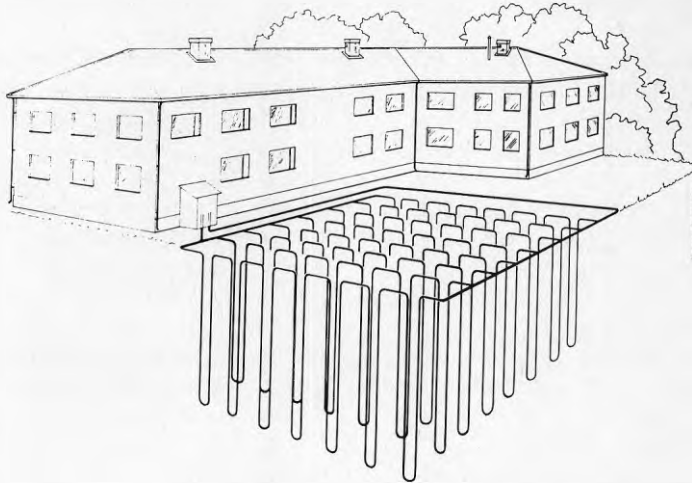
3.3 JORDVÄRMEBRUNNAR

Värmepumpar i kombination med bergvärmebrunnar är sedan många år tillbaka en vedertagen teknik. På många håll är emellertid djupet till berg stort. Kostnaden för jordborring är också hög. Förutsättningarna för att använda vertikalt installerade slangar i lösa sediment har därför undersökts. Tekniken är känd från utförande av värmelager med vertikalt installerade slangsystem. FoU-resultat har också visat att det är möjligt att använda lätt geoteknisk utrustning för installation av slangarna.

Den termiska funktionen av jordvärmebrunnar skiljer sig från bergvärmebrunnar genom den lägre värmekonduktiviteten och den stora latentvärmen i jord som frigörs då vatten fryser till is. De lokala termiska förloppen runt en jordvärmebrunn bör på kort sikt medföra en bättre funktion för jordvärmebrunnen jämfört med en liknande i berg. På lång sikt kommer emellertid funktionen styras av den globala värmetransporten till brunnen. Eftersom denna kommer att vara lägre för en brunn i jord än i berg kommer någon form av återladdning att vara nödvändig om höga energiuttag skall vara möjliga att ta ut.

Eftersom mäktigheten av lösa sediment vanligen är begränsad till ca 10-25 meter kommer flera slangnerstick att vara nödvändiga om energiuttaget skall bli lika högt som för en bergvärmeanläggning. Beroende på om syftet med anläggningen är enbart uppvärmning eller kombinerad uppvärmning och kylning av en fastighet kan olika konfigurationer av nedsticken tänkas. Om kylbehovet i förhållande till värmebehovet antingen är litet eller stort bör markkollektorn utformas på ett sådant sätt att

yta mot omgivande jord blir så stor som möjligt (placering av nedstick längs en linje i horisontalplanet). Är värme och kylbehoven ungefär lika kan en mera kompakt placering av nedsticken vara att föredra.



Figur 3.2. Exempel på vertikalt installerade slangsystem för kombinerad värme- och kyltillämpning.

4 FLERNIVÅSYSTEM

4.1 BERÄKNINGSMODELL

4.1 Allmänt

Ett datorprogram har utvecklats på institutionen för matematisk fysik vid Lunds Tekniska Högskola. På uppdrag av SGI har programmet vidareutvecklats av Carl-Erik Hagentoft. Programmet har följande möjligheter:

- Rörformat värmeuttag (tvådimensionellt) som kan varieras med tiden. Det totala effektuttaget ur lagret anges månadsvis.
- Valfritt antal horisontellt förlagda slangar.
- Jordan indelas i rektangulära beräkningsceller som kan ges olika materialparametrar; värmeledningsförmåga, värmekapacitet och latent värme.
- Eventuell fryspunktsnedsättning vid fasomvandling, frysning/upptining, approximeras med linjär interpolation mellan 0°C och vald temperatur.
- Randtemperaturen kan varieras stegvis i tid och rum.
- Isolering mellan valfria celler.
- Övergångsmotstånd i markytan (snö) kan varieras med tiden.
- Valfritt flöde hos köldbäraren.

4.1.2 Utdatamöjligheter

- Utskrift av indata, med eller utan förklarande text.

Vid valfritt tidssteg:

- Temperatur och frysandel i cellerna,
- Värmefflöde mellan cellerna,
- Köldbärartemperatur i varje slang,
- Medelvärde av köldbärartemperatur i varje sektion,
- Effekt från mark,
- Energi från mark.

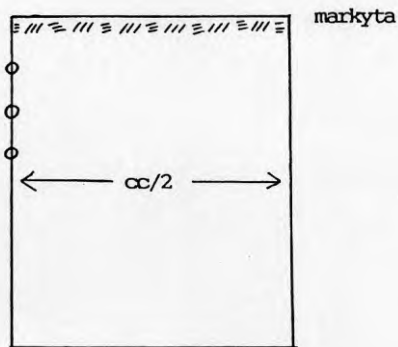
4.1.3 Lagertyp

Figur 4.1 visar en schematisk plan av markvärmelagret. I slangarna cirkulerar en vätska vilken upptar eller anger värme från jorden. Slangarna kan förläggas i flera nivåer.



Figur 4.1 Plan över markvärmelager med slangar.

Vid beräkning av temperaturen i marken utnyttjas symmetrin i lagret. Det är ofta tillräckligt att beräkna temperaturen i den del av marken som visas i figur 4.2.

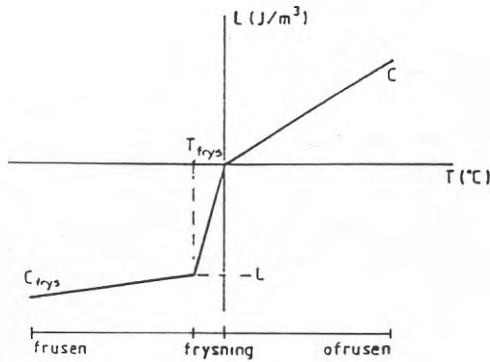


Figur 4.2. Representativ markdel för lagret (sektion).

4.1.4 Frysmode'll

I finkorniga jordarter fryser ej allt vatten vid 0°C . I modellen fryser jorden kontinuerligt mellan 0°C och en vald temperatur, T_{frys} , vid vilken marken är helt frusen.

I varje cell finns ett valt latent värme, L (J/m^3) samt värmekapacitet, C ($\text{J}/\text{m}^3, ^{\circ}\text{C}$) i ofruset och fruset tillstånd. Summan av värmekapaciteten för ett visst temperaturintervall och latent värmet kan ses som ett totalt energiinnehåll. Detta är en funktion av jordtemperaturen, se figur 4.3. Vid temperaturer över 0°C är latent värmet definitionsmässigt lika med noll.



Figur 4.3 Värmeinnehåll per volymsenhet som funktion av temperaturen.

4.2 INDATA

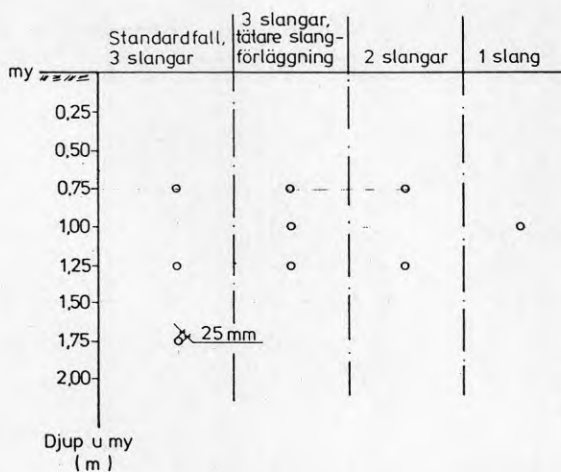
4.2.1 Slang

Simuleringarna har utförts med slangtyp PEM med ytterdiameter 25 mm. I standardfallet var slangarna förlagda i tre nivåer; 0.75, 1.25 och 1.75 meter under markytan. Utöver standardfallet gjordes tre jämförande beräkningar:

3-nivåsystem, slangförläggning 0.75, 1.0 resp 1.25 meter under markyta

2-nivåsystem, -----"----- 0.75 resp 1.25 -----"-----

1-nivåsystem, -----"----- 1.0 ----- " -----



Figur 4.4 Profil över slangarnas förläggning i simuleringarna, ett standardfall och tre alternativ. Angående slangförläggning se även figur 4.5 och 4.6.

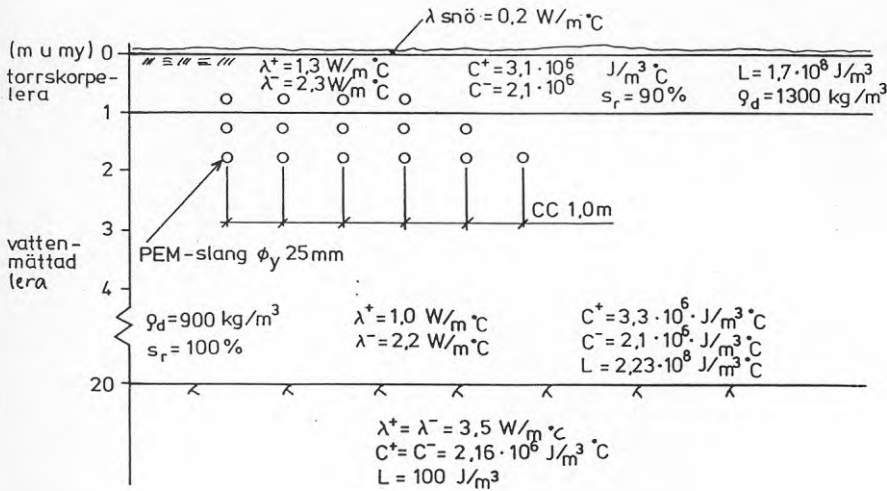
Värmeövergångsmotståndet från vätskan över slangen till jorden var $0.065 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. I plan var slangarna förlagda med centrumavståndet 1.0 meter.

4.2.2 Jordtyp

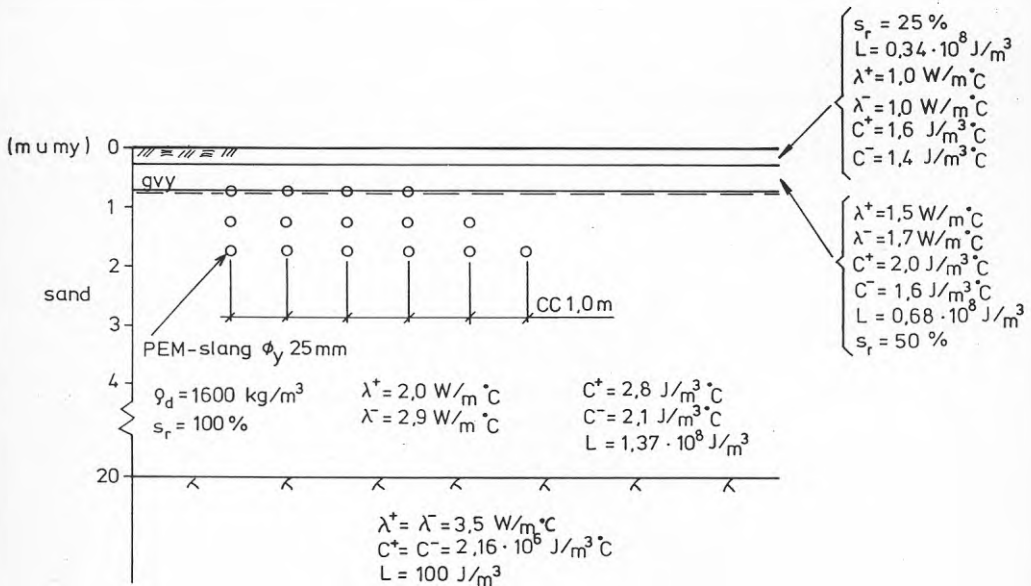
I simuleringarna har två olika jordar använts, en lera och en sand. Jordarna underlagras av berg 20 meter under markytan.

I sanden simulerades en grundvattenyta på nivån 0.75 meter under markytan. Lerans torrskorpa var 1.0 meter mäktig. Under torrskorpan var leran vattenmättad. I simuleringarna frös jorden i temperaturintervallet 0.0 till $-1.5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Slangförläggning och lerans och sandens värmeöverförande egenskaper framgår av figur 4.5 och 4.6. Grundvärdet av värmeövergångsmotståndet i markytan var $0.1 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.



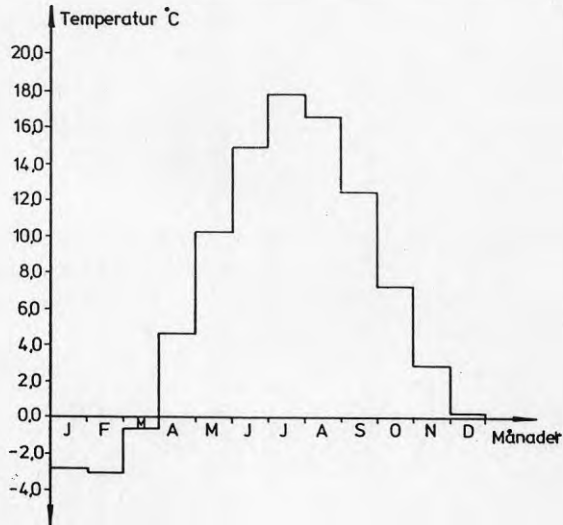
Figur 4.5 Profil genom lera. Värmetekniska data och slangförläggning. λ =värmeledningsförmåga och C=värmekapacitet i ofruset (+) och fruset (-) tillstånd. L=latent värme.



Figur 4.6 Profil genom sandjord. Värmetekniska data och slangförläggning. λ =värmeledningsförmåga och C=värmekapacitet i ofruset (+) och fruset (-) tillstånd. L=latent värme.

4.2.3 Klimat

Som nämnts ovan arbetar datormodellen med stegvis konstanta värden på klimatdata. I simuleringarna har klimat från mellansvenska inlandet använts. Simulerade värden på utelufttemperatur och snödjup framgår av figur 4.7 och 4.8.



Figur 4.7 Utelufttemperaturer använda i simuleringarna. Normalårsvärde för mellansverige.

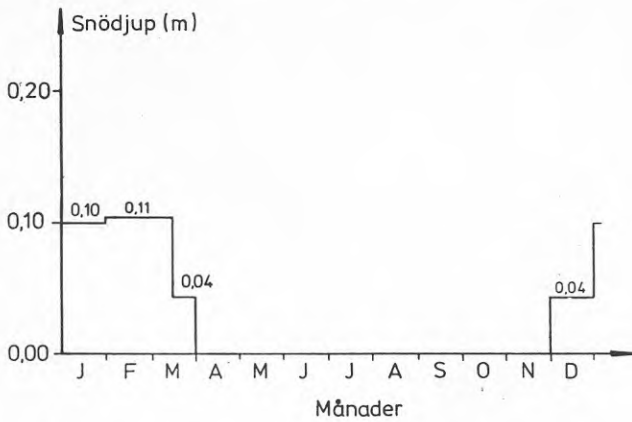
Jordtemperaturens startvärde var $+6,6^{\circ}\text{C}$, vilket är lufttemperaturens årsmedelvärde. I simuleringarna började vattnet i jorden frysa vid $\pm 0,0^{\circ}\text{C}$ och var helt fruset vid $-1,5^{\circ}\text{C}$. All isbildningsvärme antogs då vara frigjord.

Snöns värmeledningsförmåga var $0.2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ och snödjupet var stegvis konstant, se figur 4.8.

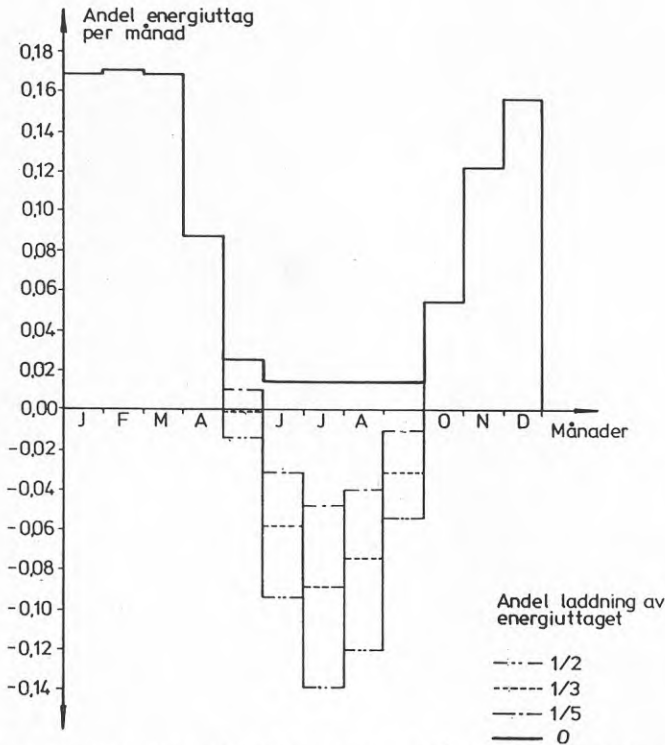
4.2.4 Belastningsförhållanden

Energiuttaget varierades i olika simuleringar mellan 50 och $150 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$ och laddningen mellan 0 och $100 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$. Energiutbytet fördelades på stegvis konstanta månadsvärden. I figur 4.9 nedan åskådliggörs olika fall med laddning och uttag. Den heldragna kurvan visar energiutbyte utan laddning. När laddning (negativt energiutbyte) förekommer gäller någon av de övriga delkurvorna. Eventuell laddning sker

när lufttemperaturen överstiger $+1,5^{\circ}\text{C}$. Belastningskaraktärstiken är beroende av lufttemperaturen.



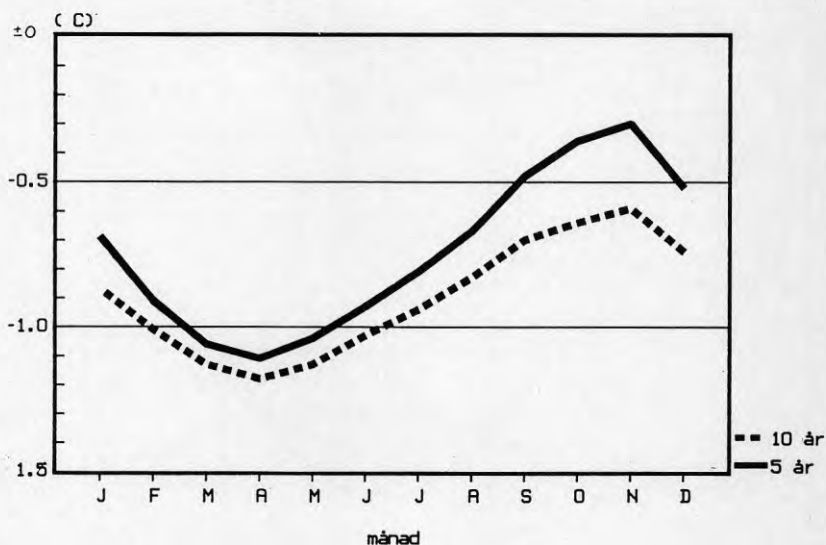
Figur 4.8 Snödjup i simuleringarna. Normalårsvärden för mellansverige.



Figur 4.9 Energiuttag och olika andel laddning under året "Andelen energiuttag" på y-axeln avser egentligen andelen bruttoenergiuttag varför summan av andelarna $\neq 1$ i fall med laddning. Om lagret laddas med t ex hälften av den energimängd som tas ut, gäller den — — — -streckade kurvan.

4.2.5 Simuleringstid

Olika simuleringstid, 5 respektive 10 år, testades inledningsvis för lera, uttag $75 \text{ kWh/m}^2\text{år}$. Skillnaden i köldbärartemperatur mellan 5:e och 10:e året, visade sig vara marginell, maximalt $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Figur 4.10 visar skillnaden mellan den lägsta marktemperaturen för varje månad för de två simuleringarna. Denna visar på en mindre temperaturskillnad. 5-årssimuleringar har därför utnyttjats i de fortsatta beräkningarna.



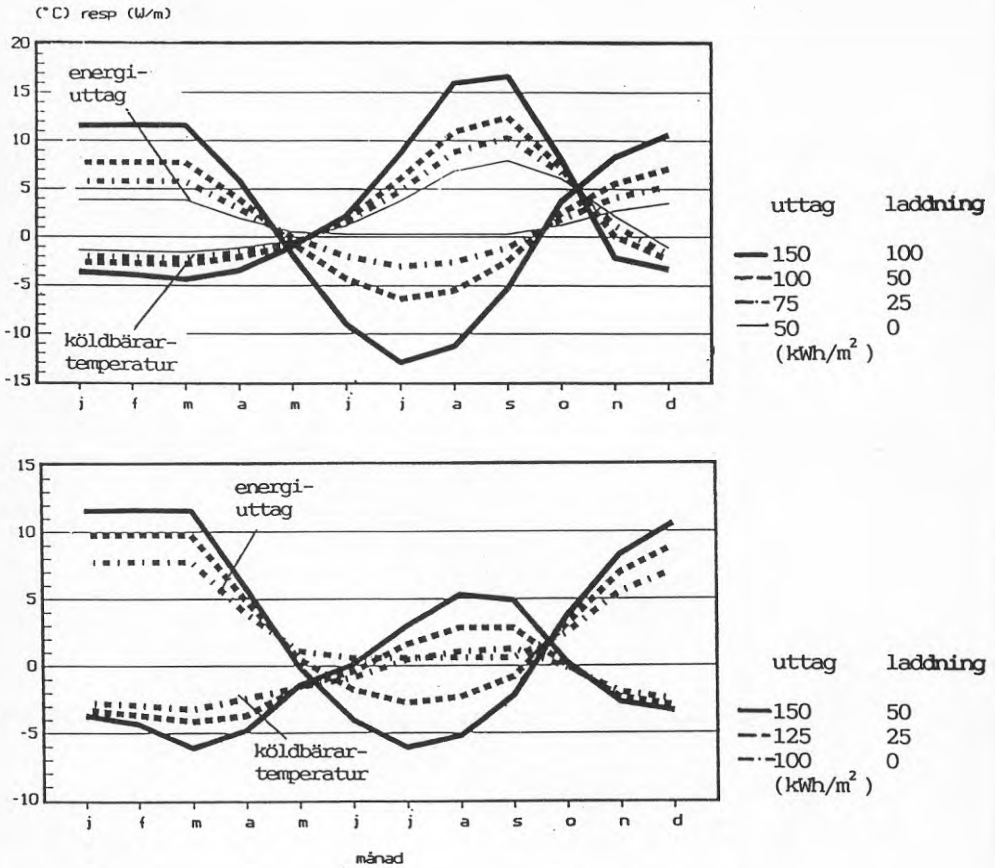
Figur 4.10 Lägsta marktemperatur i jorden för varje månad i någon punkt efter fem respektive tio års uttag.

4.3 RESULTAT

4.3.1 Energiutbyte

Ett antal simuleringar med olika värmeutbyte har utförts. I figur 4.11 åskådliggörs effektuttag per meter slang och köldbärartemperatur som funktion av tiden. Simuleringarna i respektive diagram har samma nettouttag, det vill säga skillnad mellan uttag och laddning är konstant. Nettouttaget är $50 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ (översta diagrammet) och $100 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ (nedersta diagrammet).

Av figur 4.11 framgår också att ju större energiutbytet och därmed laddningen är desto mer varierar köldbärartemperatur under året.



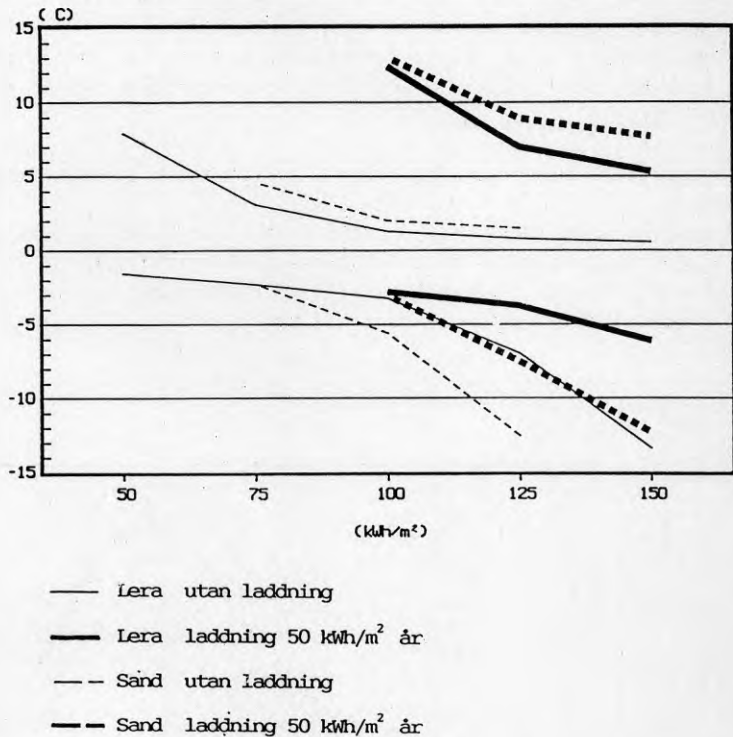
Figur 4.11 Effektuttag och köldbärartemperatur som funktion av tiden. Nettouttag 50 respektive 100 kWh/m²år i lera.

Begränsande för stort energiuttag är låg köldbärartemperatur. Permafrost kan undvikas med laddning. Eftersom ett oändligt slangfält utan randslangar har simulerats är den beräknade köldbärartemperaturen något låg vid uttag och något hög vid laddning. Vidare kan utläsas ur fig. 4.11 att återladdningens storlek ej påverkar den lägsta köldbärartemperaturen under året i någon högre grad. Den maximala köldbärartemperaturen och ev. permafrost i marken påverkas i hög grad av laddningens storlek.

I figur 4.12 redovisas månadsmedelvärdet av den under året maximala och minimala köldbärartemperaturen. Resultaten visar att rent fysika-

liskt är betydligt större energimängder möjliga att utvinna ur mark än vad som tidigare utnyttjats. Det finns dock andra faktorer som tjälproblem och minskad biologisk aktivitet i marken som kan medföra att uttagen begränsas. Det framgår också att den här använda sanden är värmekniskt sämre att utnyttja än leran.

Resultaten gäller för ovanstående jord och belastningsfall. För andra jordtyper och värmeuttag kan avvikande resultat erhållas.



Figur 4.12 Lägsta och högsta månadsmedelvärde av köldbärartemperatur som funktion av uttagen energi brutto i sand och lera under ett normalår. Med bruttouttag avses uttag frånsett laddning.

4.3.2 Slangläge, antal slangnivåer

Simuleringar som rör skillnader beträffande antal slangnivåer är utförda för lera utan laddning.

Olika antal slangnivåer och olika förläggningsdjup har simulerats. I figur 4.13 visas köldbärartemperatur som funktion av tiden för lera med uttag 50 kWh/m²år. Av diagrammet framgår att om antalet slangar är

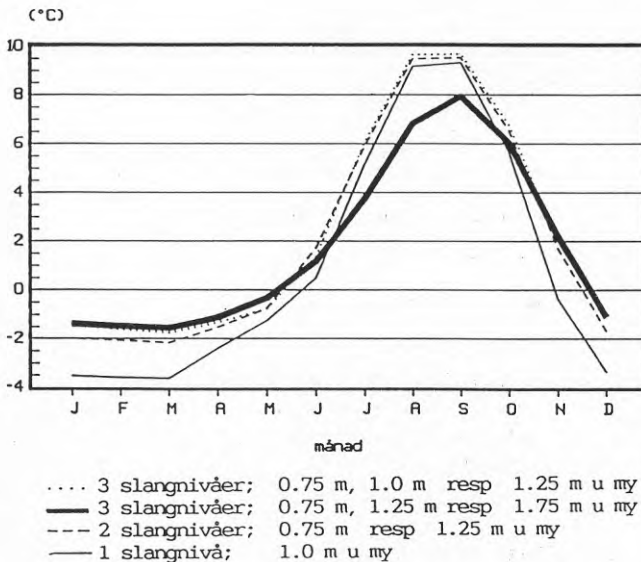
konstant (3 st) och avståndet mellan dem minskas till hälften (0.25 meter) erhålls en liten sänkning (max 0.5 °C) av köldbärartemperaturen under vintern. Sommartid blir köldbärartemperaturen högre, +10 °C istället för +8 °C.

Alternativet med 2 slangnivåer i stället för 3 ger inte heller någon nämnvärd skillnad vintertid för köldbärartemperaturen. Sommartid blir dock köldbärartemperaturen högre, +9 °C istället för +8 °C. Motsvarande jämförelse med uttag 100 kWh/m²år ger också liten skillnad.

Med endast 1 slangnivå påverkas både sommar- och vintertemperaturen. Det blir cirka 2° varmare på sommaren och cirka 2° kallare på vintern.

Skillnaden kommer troligen att bli större vid större energiuttag.

Antalet slangnivåer bör således vara minst 2 för de simulerade uttagen. Simuleringarna är utförda med månadsmedelvärden som indata. Inverkan av korta effektpulser vid frusen eller ofrusen jord är direkt proportionell mot antal meter slang.



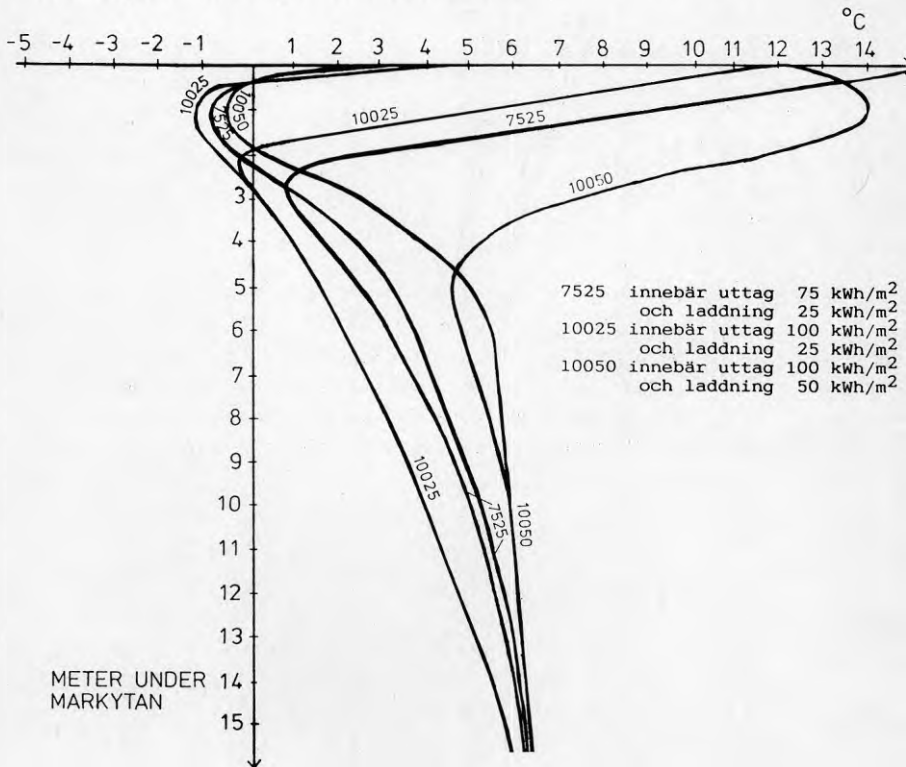
Figur 4.13 Köldbärartemperatur som funktion av tiden för lera med uttag 50 kWh/m²år, olika antal slangnivåer och avstånd i höjddled.

4.3.3 Marktemperatur

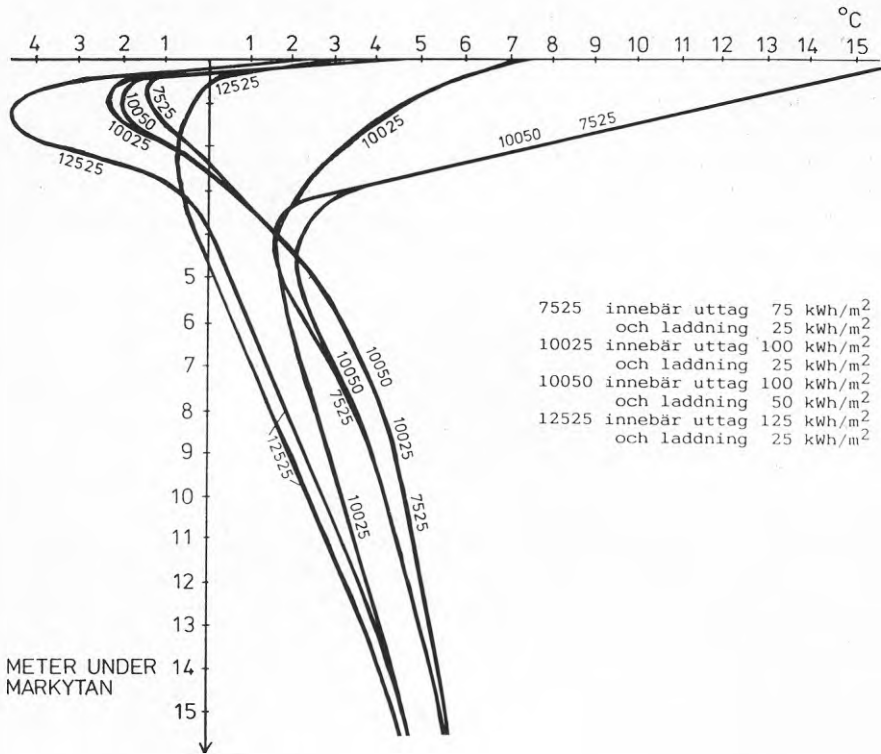
Marktemperaturen runt slangarna beror på energiutbyte och på naturliga säsongsvariationer. På grund av energiutbytet varierar marktemperaturen kraftigt med djupet.

Den i beräkningarna använda sanden har sämre värmeöverförande egenskaper än leran i de ytnära skikten. Köldbärartemperaturen i sand kommer därför att erhålla en större variation under året. Sanden kommer även att få en större benägenhet att bilda permafrost jämfört med lera eftersom den naturliga temperaturåterställningen är sämre pga lägre termiska egenskaper i de markytinära skikten.

I figur 4.14 åskådliggörs lerans temperatur som funktion av djupet under markyta för olika energiutbyten. Vid uttaget $100 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ måste lagret laddas med minst $50 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ för att undvika permafrost. Figur 4.15 visar motsvarande för sand. I det fallet räcker det med en laddning av 25 kWh/m^2 vid uttaget $100 \text{ kWh/m}^2\text{år}$. Uttaget 125 kWh/m^2 och laddning 25 kWh/m^2 ger dock permafrost.



Figur 4.14 Jordtemperatur för lera som funktion av djupet under markytan. En max- och en min-kurva finns för varje energiuttag. Max-temperaturen inträffar under september-oktober medan min-temperaturen vanligen inträffar i mars.



Figur 4.15 Jordtemperatur för sand som funktion av djupet under markytan. En max- och en min-kurva finns för varje energiuttag, Max-temperaturen inträffar under september-oktober medan min-temperaturen vanligen inträffar i mars.

5 FÖRVÄRMNING AV UTELUFT

På uppdrag av SGI har geologiska institutionen vid CTH simulerat förvärmning av uteluft. Resultat från vissa av institutionens egna beräkningar redovisas också.

5.1 BERÄKNINGSMODELL

Datormodellen för förvärmning av uteluft är omarbetad av Johansson (i manuskript), efter en ursprunglig modell av Eftring, Johansson och Westman, LTH.

Modellen inkluderar följande:

- Rörformat värmeuttag. Programmet stegar sig fram längs intagsledningen och gör beräkningar i flera sektioner under samma tidssteg, det är alltså en förenklad tredimensionell modell.
- Horisontellt förlagt rör.
- Jorden indelas i rektangulära beräkningsceller som kan ges olika materialparametrar: värmeledningsförmåga, värmekapacitet och latent värme. Parametrarna kan varieras i tiden.
- I de celler där rör är förlagda, minskas jordens värmekapacitet proportionellt i förhållande till den del av ytan som upptas av röret.
- Eventuell fryspunktsnedsättning vid fasomvandling, frysning/upptining approximeras med linjär interpolation mellan 0°C och en vald temperatur.
- Randtemperaturerna kan varieras i tiden.
- Isolering mellan valfria celler.
- Övergångsmotstånd (snö) i markytan kan varieras i tiden.
- Valfritt flöde hos köldbäraren.

Angående frysmo­dell se kapitel 4.1.4.

5.2 INDATA

5.2.1 Rör

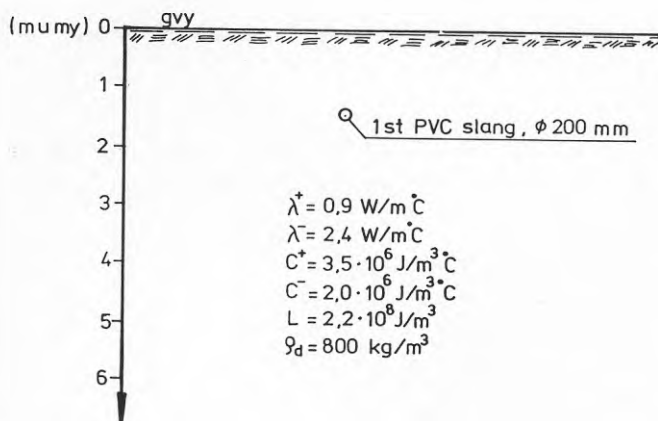
Det simulerade röret är av korrugerat PVC-material. Röret har därmed större mantelyta och ett lägre värmeövergångsmotstånd än vad ett slätt rör har. Beräkningar gjordes med ett singulärt rör med olika längd; 20, 40 och 60 meter. Diametern var 200 mm och den var förlagd 1.4 meter under markytan.

Värmeövergångsmotstånd från luften i röret till jorden var $0.08 \text{ m}^2\text{C/W}$, utom i ett fall när försämrade värmeöverföring testades. Värmeövergångsmotståndet var då $0.15 \text{ m}^2\text{C/W}$.

Luftflödet i röret var $0,139 \text{ m}^3/\text{s}$ ($500 \text{ m}^3/\text{timme}$).

5.2.2 Jord

I beräkningarna användes en lera med hög vattenhalt och låg densitet. Leran var vattenmättad och homogen ända upp till markytan. Vattnet i den simulerade jorden frös i temperaturintervallet 0.0 till $-1.0 \text{ }^\circ\text{C}$. De värmeöverförande egenskaperna framgår av figur 5.1.



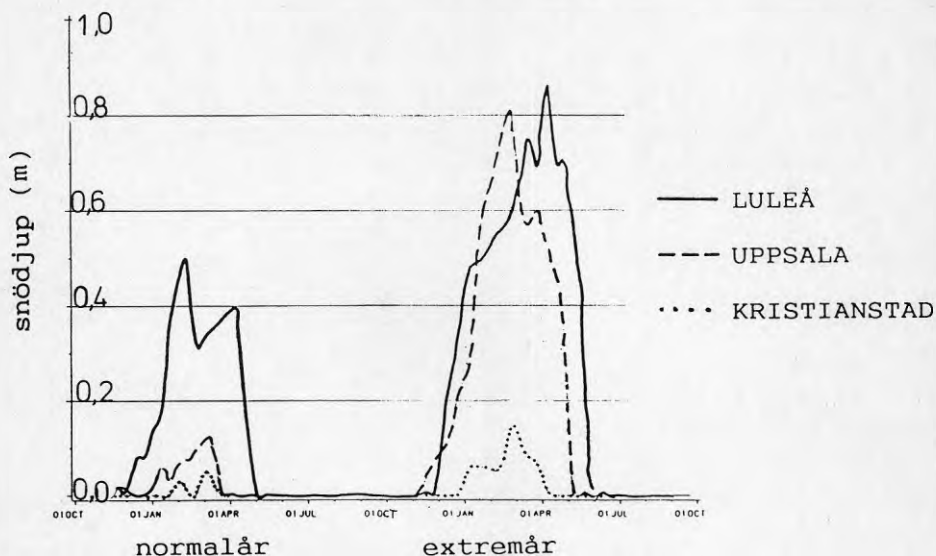
Figur 5.1 Profil genom lera. Jordens värmetekniska data och rorförläggning.

5.2.3 Klimat

Simulering med 10-dagarsmedelvärden av klimatdata (lufttemperatur och snödjup) från tre olika orter; Kristianstad, Uppsala och Luleå har ut-

förts. Ett normalår och ett extremår för respektive ort har bestämts (Rehn et al, 1986).

Utetemperaturerna framgår av figur 5.5. Snödjupet för normal- respektive extremåren varierade enligt diagram nedan.



Figur 5.2 Snödjup, normal- och extremår för Kristianstad, Uppsala och Luleå. (Rehn et al, 1986)

5.2.4 Belastningsförhållanden

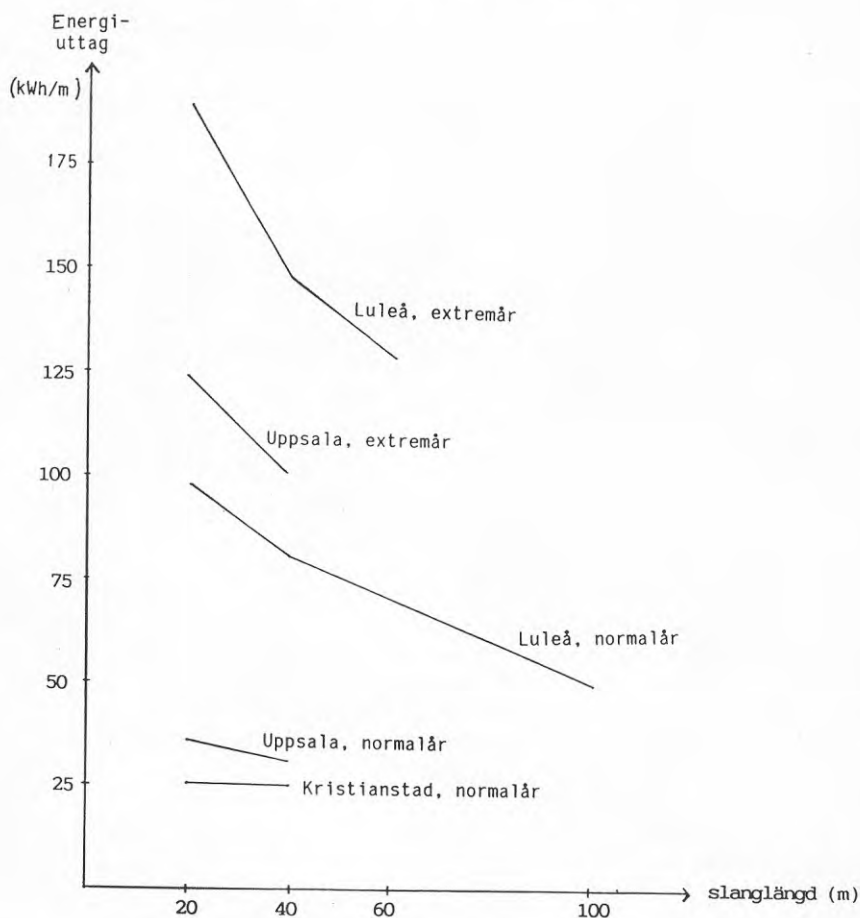
I simuleringarna har luften tagits genom markröret då temperaturen i luften underskridit ett viss värde. Starttemperatur var ± 0.0 °C, utom för Kristianstad, där den var $+4.0$ °C. Energiuttaget varierade mellan 36 och 100 kWh/m rör för normalår och mellan 78 och 188 kWh/m rör för extremår. Effektuttaget var $180 \text{ W/}^\circ\text{C}$. Luftflödet var $0.139 \text{ m}^3/\text{s}$ och värmekapaciteten $1310 \text{ J/m}^3, ^\circ\text{C}$.

5.2.5 Simuleringstid

Generellt har 1 års värmeuttag simulerats. I extremfallet (med avseende på klimat) har två år i följd simulerats, ett normalår och ett extremår.

5.3 RESULTAT

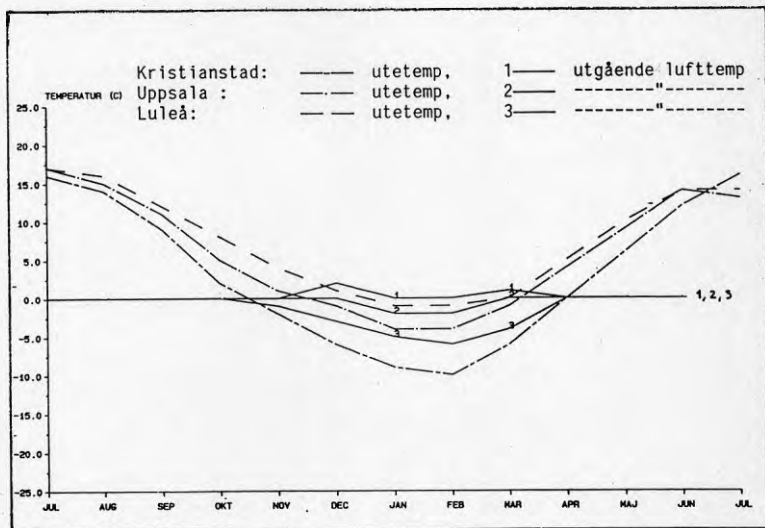
I norra Sverige, där lufttemperaturen är låg vintertid och snödjupet stort, är möjligt energiuttaget per meter rör betydligt större än i södra och mellersta Sverige, vilket framgår av fig. 5.3. En jämförelse mellan normalår och extremår för Luleå och Uppsala visar att energiuttaget ökar markant under ett extremår. Av diagrammet framgår också att vid kortare rörlängd erhålls ett större energiuttaget per meter rör. Energiuttaget är således som väntat störst i början av röret. I Uppsala under ett extremår och i Luleå är dock energiuttaget per meter rör fortfarande ansevärt vid de längre rörlängderna.



Figur 5.3 Genomsnittligt energiuttag per meter rör som funktion av rörlängd. Observera att energiuttaget avser ett medelvärde över hela slangen vid slanglängderna 20, 40 resp. 60m.

I figur 5.4 visas den normala utelufttemperaturen för de tre orterna. I samma figur visas lufttemperaturen vid slingans utlopp. Det simulerade röret var 20 meter långt och förlagdt på 1.4 meters djup. Temperaturdifferensen mellan ingående och utgående luft i systemet är störst för Luleå, ca 4° (februari). Minst är temperaturdifferensen i Kristianstad, ca 1°.

Systemet stängs av när utgående luft från systemet har lägre temperatur än inkommande luft, det vill säga uteluft. Tiden under vilken systemet är inkopplat varierade från plats till plats, ju kallare klimat desto längre är det inkopplat.



Figur 5.4 Utelufttemperatur och lufttemperatur vid slingans utlopp som funktion av tiden. Förutsättningarna är normalår, rörlängd 20 meter och förläggningsdjup 1.4 meter.

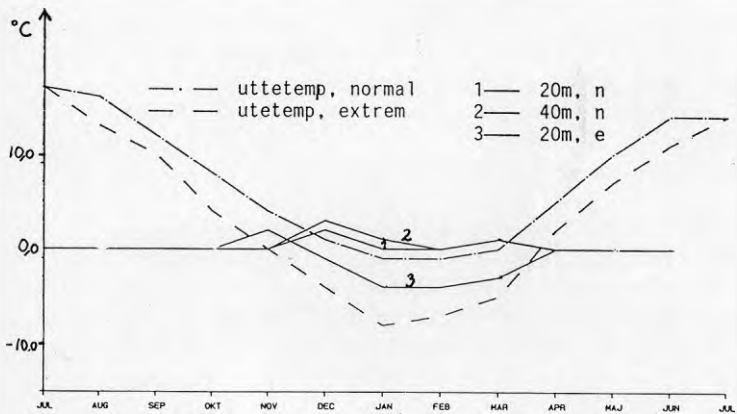
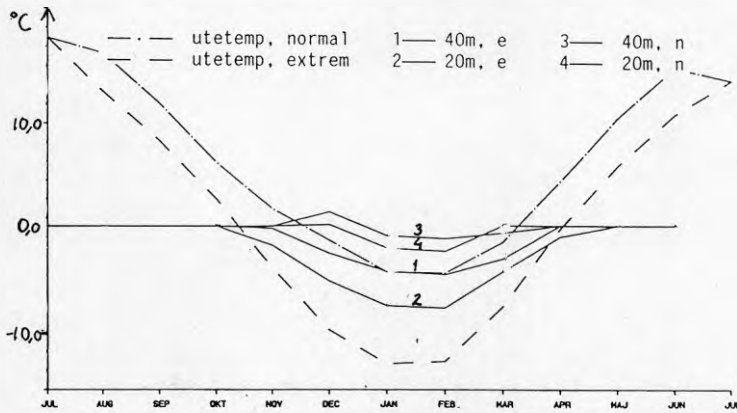
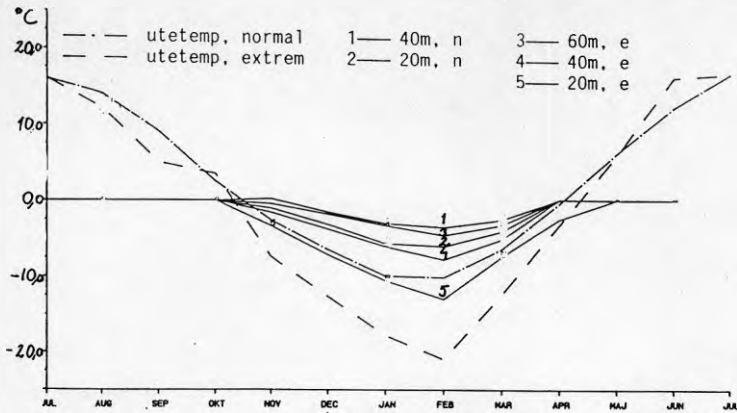
Av figur 5.5 framgår att i fallet normalår, med avseende på klimat, rörlängd 20 meter och förläggningsdjup 1.4 meter är tiden då utgående luft från systemet är varmare än uteluft;

Kristianstad	104 dagar
Uppsala	113 dagar
Luleå	163 dagar.

Med 40 meter rör istället för 20 meter blir skillnaden marginell. Vid extrema klimatförhållanden ökar antalet dagar som rörslingan var inkopplad. Skillnaden var störst för Kristianstad;

Kristianstad	148 dagar
Uppsala	163 dagar
Luleå	172 dagar.

Av diagrammen framgår också att under extremår värms uteluften mer än under ett normalår. Den utgående luften från systemet har dock lägre temperatur under extremår än under normalår.



Figur 5.5 Utelufttemperatur och temperatur på utgående luft från systemet som funktioner av tiden. n=normalår, e=extremår. Förläggingsdjup är 1.4 meter, rörlängd framgår av diagrammen.

6 JORDVÄRMEBRUNNAR

6.1 BERÄKNINGSMODELL

6.1.1 Beskrivning

Beräkningar har utförts av Per-Åke Franck, Chalmers Tekniska Högskola, med hjälp av en egenutvecklad datormodell (Franck, 1986). Modellen simulerar ett komplett energisystem med värmeavvärmare, värmeproduktions-system och värmelager med vertikala rörsystem. För beräkning av de termiska förloppen i lagret nyttjas finita differans-metoden.

En makrolösning används för beräkning av den globala lagerlösningen medan en mikrolösning nyttjas för beräkning av de lokala förhållandena kring varje vertikalt rör.

6.1.2 Frysmodell

Den modell som används för beräkning av energimängder under frysning är något mer utvecklad jämfört med den tidigare beskrivna modellen (kap. 4.1.4). Rätlinjig interpolation utförs mellan fyra temperaturnivåer under 0 °C för vilka ofrusen vattenhalt finns angiven.

6.2 INDATA

I beräkningarna har en typisk lera för den svenska västkusten studerats. Rören i lagret är placerade vertikalt på en linje i horisontalplanet för att möjliggöra maximal naturlig återladdning från den omgivande jorden. Rören är i simuleringarna 15 m långa och har sin övre ändpunkt 0.5 m under markytan. I simuleringsprogrammet kan endast koncentriska rör användas. U-formade slangar bedöms som mest kostnadseffektiva. För att i möjligaste mån efterlikna ett U-rör bättre värmeöverförande egenskaper har diametern av det koncentriska röret utökats jämfört med normalfallet. En sammanställning över använda indata framgår av tabell 6.1.

Värmebehovet och dess varaktighet för ett normalt enbostadshus har varit styrande för värmebelastningen av lagret. Olika grad av återladdning har studerats. Återladdningen har ändrats genom att variera värmeövergångstalet (ka) för luftkonvektorn. Återladdning av lagret har skett under perioden maj-september. Under denna period tar värmepumpen värme direkt från en luftkonvektor då lufttemperaturen överstiger +6°C. Förutom fallet med ingen återladdning har två fall av värmeövergångstal studerats; $ka=500$ W/K och $ka=1000$ W/K. Dessutom har tre olika rörlängder undersökts; 150 m, 210 m samt 300 m.

Tabell 6.1. Beräkningsförutsättningar.

Byggnadens effektbehov	11 kW
Byggnadens värmebehov	24030 kWh
Avstånd mellan rör	2.0 m
Rörens ytterdiameter	0.065 m
Rörens innerdiameter	0.055 m
Rörväggens värmeledningsförmåga	0.40 W/(m,K)
Rörens värmekapacitet	1.0 MJ/(m ³ ,K)
Lerans vattenkvot	75 %
Lerans torrdensitet	900 Kg/m ³
Temperatur då leran börjar frysa	0 ⁰ C
Temperatur då 28% vatten är ofruset	-0.2 ⁰ C
- " - 12% - " -	-1.0 ⁰ C
- " - 3.5% - " -	-10.0 ⁰ C
Lerans värmeledningsförmåga över 0 ⁰ C	1.0 W/(m,K)
- " - under -10 ⁰ C	2.2 W/(m,K)
Lerans värmekapacitet över 0 ⁰ C	3.3 MJ/(m ³ ,K)
- " - under -10 ⁰ C	2.1 MJ/(m ³ ,K)
Mellan dessa temperaturer sker rätlinjig interpolation mellan värdena.	
Köldbärarflöde	1.64 m ³ /h

6.3 RESULTAT

Beräkningsresultat i form av köldbärartemperatur och energimängder för fyra olika kombinationer av beräkningsförutsättningar är redovisade i figur 6.1.

Som framgår av figur 6.1 är både temperatur- och effektfördelningen relativt lika med undantag av fallet utan återladdning. För att det sistnämnda fallet är köldbärartemperaturen alltid under 0⁰C, även sommartid. Vintertid är skillnaden mellan köldbärartemperaturerna för de olika simuleringarna relativt liten. Uttagna energimängder framgår av tabell 6.2.

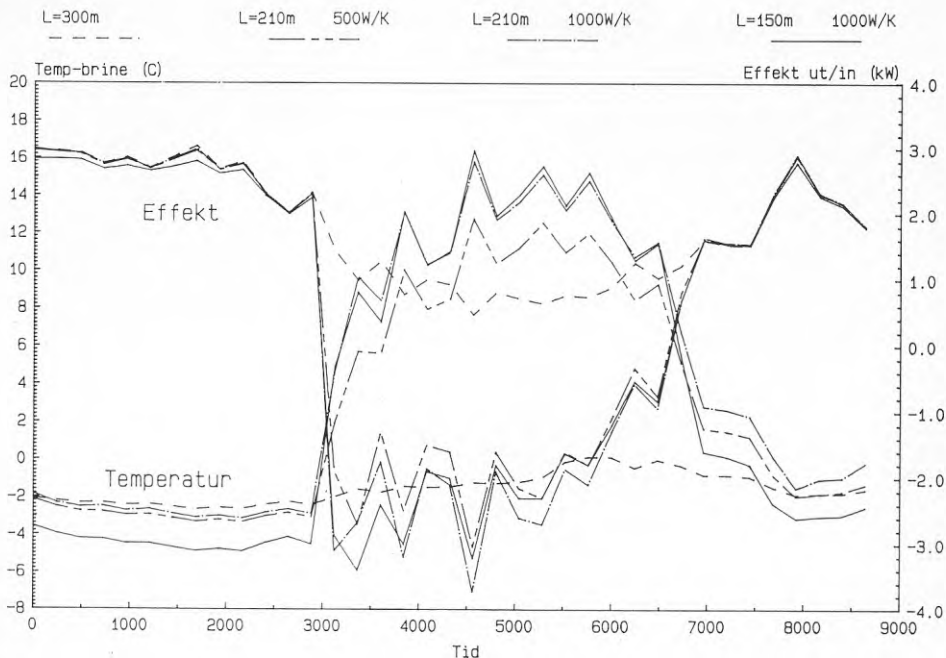


Fig 6.1 Köldbärartemperatur (brine) samt avgiven och tillförd lager-effekt som funktion av tid i timmar. Diagrammet är baserat på tidsmedelvärden av 10-dagarsperioder.

Tabell 6.2 Uttagna energimängder och frusen radie runt rör vid olika simuleringar.

Rörlängd (m):	300	210	210	150
Värmeövergångstal (W/K):	0	1000	500	1000
Frusen radie (m):	0.28	0.19	0.24	0.40
Värme till värmepump (MWh)	15.59	15.75	15.67	15.40
varav lager:	15.59	12.40	12.40	12.04
varav luftkonvektor:	0	3.35	3.27	3.36
Värme till lager (MWh):	15.59	12.40	12.41	12.23
varav luftkonvektor:	0	8.1	6.66	7.73
varav omgivning:	15.59	4.3	5.75	4.50

Av tabell 6.2 framgår att ungefär lika stora energimängder kan tas ut från lager och kollektor oavsett konfiguration av slanglängd och återladdningsnivå. Detta gäller emellertid endast för de givna exemplen. Frysvarmet är betydligt större än värmekapaciteten för leran. De små

skillnaderna mellan de olika lastfallen beror således på att leran är under frysning i ett område närmast slangen. Ökas belastningen på slangen i något av fallen kan drastiska förändringar ske när frysvärmet tar slut i slangens närhet, tex då två intilliggande slangars frysta zon når varandra.

Systemet är därför, precis som flernivåsystemet tidigare, ej speciellt känsligt för en ökad belastning inom ett viss intervall. Ökas belastningen till en nivå utanför detta intervall kan emellertid kraftiga förändringar av köldbärartemperatur och uttagna energimängder ske. Detta intervall är unikt för varje jordartsförhållande och slangkonfiguration.

7 EKONOMI

De ovan beskrivna systemen kan användas dels för uppvärmning av enbostadshus, dels i större skala, t.ex. för uppvärmning och kylning av kontorsfastigheter.

Ett sätt att studera kostnader för värmesystem är att undersöka hur stor investering som kan bäras av minskade driftkostnader vid olika alternativ. Detta har utförts för enbostadshus där el eller olja är tänkt att ersättas. Följande alternativ har studerats för enbostadshus:

- Eluppvärmning
- Kombination av eluppvärmning och värmepump med uteluft alternativt mark som värmekälla
- Kombination av eluppvärmning och förvärmad uteluft till uteluftvärmepump
- Eluppvärmning med förvärmad uteluft för ventilationsändamål
- Oljeuppvärmning
- Kombination av oljeuppvärmning och värmepump med uteluft alternativt mark som värmekälla

7.1 ALLMÄNNA FÖRUTSÄTTNINGAR

En viktig faktor för utfallet av en ekonomisk kalkyl för ett uppvärmningssystem är den förväntade energiprisutvecklingen. När det gäller olja har vanligtvis en mer eller mindre vetenskaplig trendframskridning varit den dominerande metoden. En sådan innebär att den prístrend som är dominerande vid den tidpunkt som kalkylen görs även antas gälla för framtiden. Ett sådant tänkande innebär i dagsläget prognoser om relativt konstanta oljepriser. Med utgångspunkt från erfarenhet av tidigare år har dock två oljeprisnivåer använts i denna rapport, dels en trendframskridning, dels en 25 % högre nivå enligt tabell 7.1.

Tabell 7.1 Antagna reala oljepriser i konsumentledet (Prisnivå 1988).

	Alternativ 1	Alternativ 2
Oljepris (kr/m ³) :	2000	2500
Oljepris (kr/kWh):	0.27	0.33
(Verkn.grad: 75%)		

Energiprisutvecklingen på elektricitet har staten betydligt större kontroll över jämfört med olja. Statens Energiverk har publicerat prognoser över förväntade elprishöjningar vid olika tidpunkter under kärnkraftavvecklingen. På basis av en sådan prognos har tabell 7.2 ställts upp. I tabellen är elpriset differentierat efter en förenklad bild av kostnaderna för att producera elektriciteten. Tidsdifferentierade taxor

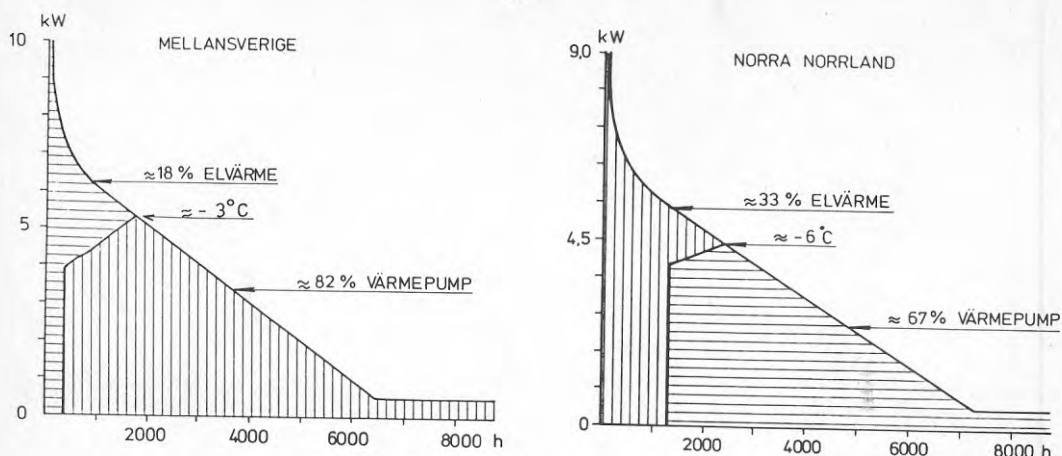
kommer med stor sannolikhet att bli dominerande i framtiden. Även effektavgifter har diskuterats för enbostadshus. Sådana innebär att den som på något sätt minskar effektbehovet under de kallaste dagarna premieras genom en lägre effektavgift. Något sådant alternativ finns ej med i den här refererade prognosen av Statens Energiverk utan effektavgiften antas vara inbakad i energiavgiften för höglastperioden.

Tabell 7.2 Nyttjad energiprisutveckling för el i kalkylerna i reala termer. Tabellen är uppförd på basis av Statens Energiverk (1988) och inkluderar 7.2 öre/kWh skatt. Värdena för 1997 avser ett alternativ med 10 kärnkraftreaktorer istället för nuvarande 12.

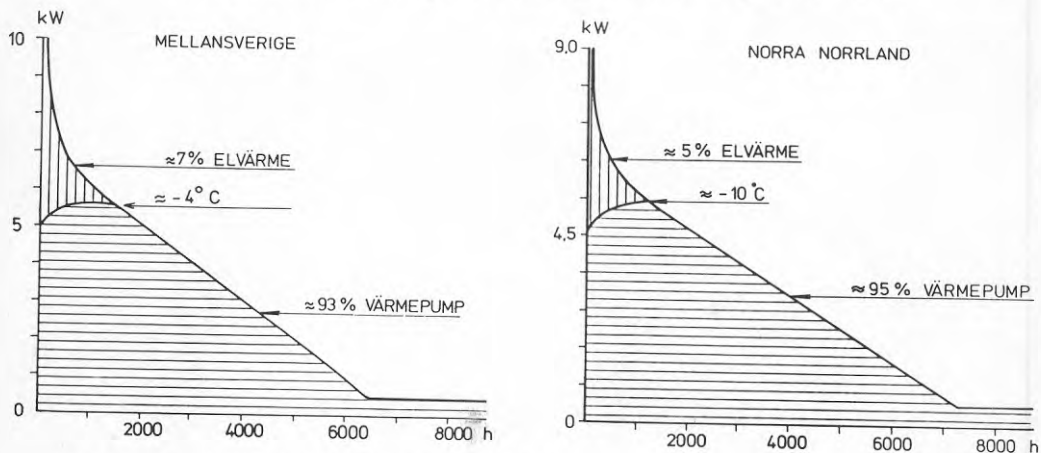
Tid	1988 kr/kWh	1997 kr/kWh	2010 kr/kWh
Nov-mars månd.-fre. 06.00-22.00	0.38	0.56	0.79
Nov-mars månd.-fre. 22.00-06.00 + helger	0.19	0.27	0.41
April-okt. månd.-fre. 06.00-22.00	0.17	0.21	0.31
April-okt. månd.-fre. 22.00-06.00 + helger	0.16	0.19	0.27

7.2 ELVÄRME I KOMBINATION MED VÄRMEPUMP

För att beräkna kostnaderna för olika elbaserade uppvärmningssystem är det nödvändigt att få en uppfattning om energibehovets fördelning under de olika taxeperioderna. En sådan kan med viss möda beräknas för alternativet med enbart eluppvärmning. För kombination med en deltäckande värmepump blir beräkningen mer komplicerad. I figur 7.1 och 7.2 redovisas de varaktighetskurvor som ligger till grund för beräkningarna. Värmepumpens kompressoreffekt är vald till ca 2.2 kW och årsvärmefaktorn till 2.5. För luftvärmepumpen har denna varierats något över året medan den för jordvärmepumpen har hållits konstant. Beräkningarna har utförts för 2 olika energibehov och 2 klimatzoner enligt tabell 7.3.



Figur 7.1 Varaktighetsdiagram för elvärme i komb. med luftvärmepump för enbostadshus vid två olika klimatzoner (25 MWh). Värmepumpens kompressoreffekt är satt till ca 2.2 kW. Uteluftvärmepumpen är avstängd vid utetemperaturer lägre än -10°C .

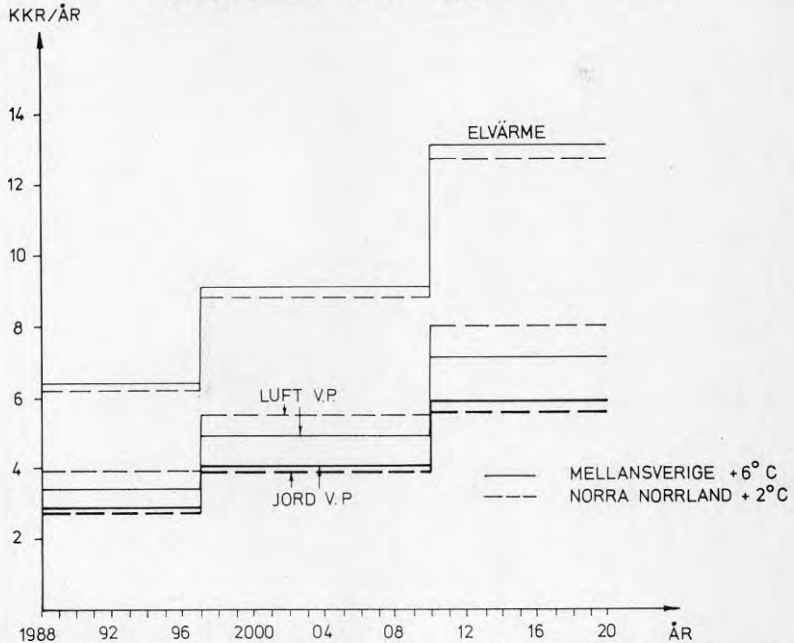


Figur 7.2 Varaktighetsdiagram för elvärme i kombination med jordvärmepump för enbostadshus vid två olika klimatzoner (25 MWh). Värmepumpens kompressoreffekt är satt till ca 2.2 kW.

Tabell 7.3. I beräkningarna använda klimatdata och årsbehov av energi.

Klimatzon:	Mellansverige	Norra norrland
Årsmedeltemperatur:	6°C	2°C
LUT5:	-19°C	-28°C
Energi för uppvärmn.:	21 resp 31 MWh	21 resp 31 MWh
Energi för tappv.v.:	4 "- 4 MWh	4 "- 4 MWh
Summa energi:	25 "- 35 MWh	25 "- 35 MWh

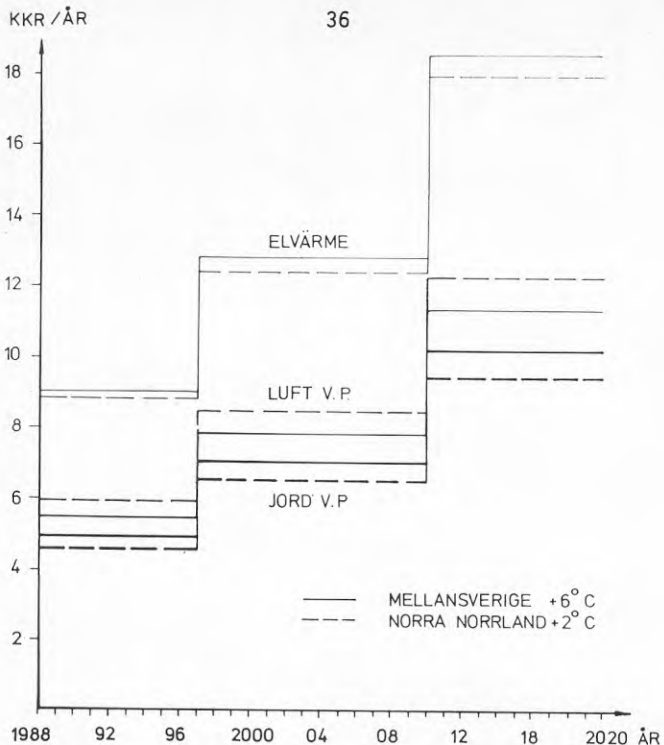
Energikostnaderna för de olika alternativen redovisas i figur 7.3 och 7.4. Från denna grafiska framställning är det möjligt att beräkna tillåten kapitalkostnad. En real ränta om 6% och 15 års avskrivning har använts. I den reala räntan antas att även underhållskostnader inryms. Resultaten av dessa beräkningar finns redovisade i tabell 7.4.



Figur 7.3 Grafisk framställning av totala energikostnader för elvärmdda hus i kombination med värmepump (25 MWh/år).

Tabell 7.4 Investeringsmarginal i tusental kronor för olika typer av värmepumpsystem för ersättande av elvärme. Värdena är beräknade utifrån 6 % real ränta och 15 års avskrivningstid: annuitet 0.103.

Zon	Elvärme i komb. med	Investeringstidpunkt					
		1990		2000		2010	
		MWh 25	MWh 35	MWh 25	MWh 35	MWh 25	MWh 35
Mellan-sverige	Värmekälla mark	42	49	56	65	70	81
	Värmekälla luft	35	42	46	56	58	70
Norra norrland	Värmekälla mark	42	49	55	66	70	83
	Värmekälla luft	27	33	36	44	46	55



Figur 7.4 Grafisk framställning av totala energikostnader för elvärmda hus i kombination med värmepump (35 MWh).

På grund av de differentierade eltaxorna blir tillgängligt investeringsutrymme kanske inte alltid det förväntade för de olika alternativen. Således blir skillnaden mellan alternativen med värmekällorna luft och jord relativt stor trots att skillnaden i energitäckningsgrad inte är så stor. Detta beror på att luftvärmepumpens avgivna effekt är nedsatt eller obefintlig under den kallaste perioden då energin betingrar det högsta priset. Skillnaden blir större i norra norrland eftersom temperaturen där är lägre under en längre period.

För värmepump med luft som värmekälla lokaliserad till mellansverige finns mellan 35,000 och 70,000 kronor i investeringsmedel tillgängliga beroende på investeringstidpunkt och energiförbrukning. Om anläggningen lokaliseras till norra norrland minskar investeringsmarginalen till mellan 27,000 och 55,000 kronor, dvs en minskning med drygt 20 %.

Om istället mark används som värmekälla ökar investeringsmedlen ytterligare med 7,000 resp. 11,000 kronor för mellansverige och 15,000 resp 28,000 kronor i norra norrland.

Om uteluftvärmepumpen kompletteras med förvärmning av dess tilluft fås en kombination av uteluftvärmepumpens bättre värmefaktor under vårsommar-höst och jordvärmepumpens bättre effektäckning vintertid. En sådan anläggning bör därför få ett något bättre resultat än jordvärmepumpen ovan.

7.3 OLJEUPPVÄRMNING I KOMBINATION MED VÄRMEPUMP

För att en värmepump som installeras i en oljeuppvärmd fastighet skall vara privatekonomiskt lönsam krävs att den årliga annuiteten av investeringskostnaden understiger skillnaden i driftkostnad. Oljepriser enligt tabell 7.1 har använts tillsammans med varaktighetsdiagram från figur 7.1 och 7.2 för oljeuppvärmning i kombination med luftvärmepump alternativt jordvärmepump. Resultaten redovisas i tabell 7.5.

Tabell 7.5 Investeringsmarginal i tusental kronor för olika typer av värmepumpsystem för ersättande av olja. Värdena är beräknade utifrån 6 % real ränta och 15 års avskrivningstid: annuitet 0.103. Investeringen utförs 1990. Underhållskostnaderna antas inrymmas i den reala räntan.

		Oljepris			
		0.27 kr/kWh		0.33 kr/kWh	
Zon	Olja i komb. med	MWh		MWh	
		25	35	25	35
Mellansverige	Värmekälla mark	33	41	47	57
	Värmekälla luft	29	35	41	49
Norra norrland	Värmekälla mark	35	44	48	61
	Värmekälla luft	26	32	36	44

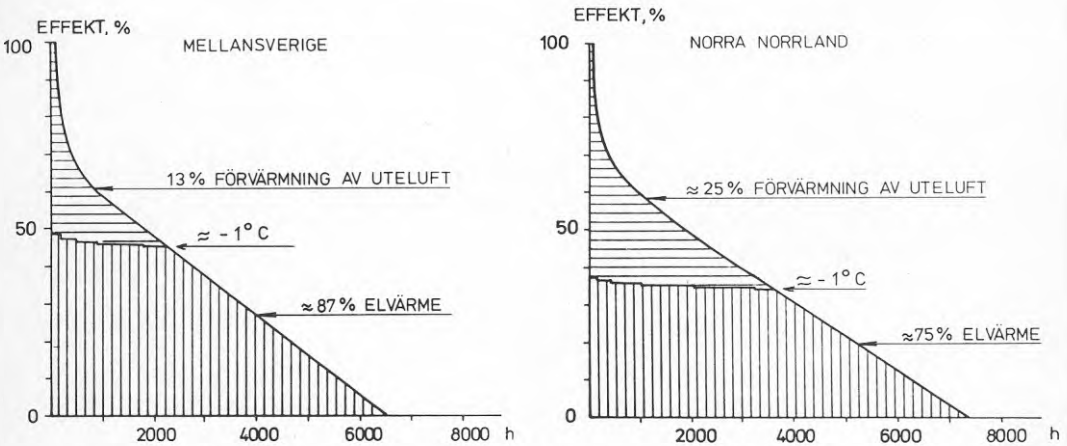
För fallet med det lägre oljepriset är investeringsutrymmet mindre än för motsvarande investeringstidpunkt för ersättande av elvärme. Skillnaden mellan luftvärmepump och jordvärmepump är också mindre. För värmepump med luft som värmekälla lokaliserad till mellansverige finns mellan 29,000 och 49,000 kronor i investeringsmedel tillgängliga beroende på oljepris och energiförbrukning. Om anläggningen lokaliseras till norra norrland minskar investeringsmarginalen till mellan 26,000 och 44,000 kronor, dvs en minskning med ca 10 %.

Om istället mark används som värmekälla ökar investeringsmedlen med ytterligare 4,000 till 8,000 kronor för mellansverige och 9,000 till 17,000 kronor i norra norrland. Detta innebär att mark som värmekälla är mindre gynnsam vid ersättande av olja jämfört med ersättande av el.

7.4 FÖRVÄRMNING AV VENTILATIONS LUFT

Förvärmning av ventilationsluft innebär att effektbehovet för ventila-

tion minst halveras. Energivinsten blir emellertid inte så stor eftersom förvärmningen endast ger resultat för utetemperaturer under ca 0°C . I figur 7.5 finns redovisat varaktighetskurvorna för ventilationsluft och inverkan av förvärmning i olika klimatzoner.



Figur 7.5 Varaktighetsdiagram för ventilationsluftens temperatur med och utan förvärmning i mellansverige resp. norra norrland.

Som framgår av figur 7.5 minskar effektbehovet med mellan 50 och 60 % beroende på om klimatzonen är lokaliserad till mellansverige eller norra norrland. Energivinsten blir dock endast 13 resp. 25 % och inträffar under perioden november till mars. I tabell 7.6 är den ekonomiska vinsten beräknad för ett 120 m^2 stort hus med en luftomsättning varannan timme i mellersta och norra sverige.

Tabell 7.6 Data och ekonomiskt resultat för installation med förvärmning av uteluft för ventilationsändamål. 0.5 oms./h i ett 120 m^2 stort enbostadshus. Annuitet för beräkning av investeringsutrymme är 0.103 .

	Mellan- sverige	Norra norrland
Effekt täckningsgrad	50 %	60 %
Energitäckningsgrad	13 %	25 %
Urspr. behov för vent.	6.6 MWh	8.1 MWh
Ekonomisk vinst/år	300 kr	720 kr
Investeringsutrymme	2900 kr	7000 kr

Som framgår av tabellen är den ekonomiska vinsten inte så stor men å andra sidan behöver inte heller investeringen uppgå till så stora belopp. Som rör kan korrugerat kabelrör användas och arbetet kan med fördel göras av den händige boende. Dessutom erhålls en komfortkyl-anläggning utan merkostnad. Effektreduceringen kan uppgå till ca 1.5 till 2 kW per hus i medeltal vilket medför ca 150 - 200 MW el om 100,000 hus installerar systemet.

7.4 KOMBINATION AV VÄRME OCH KYLA

Ett modernt kontorshus har ofta en hög andel internvärme varför värmebehov först uppstår vid temperaturer runt 0°C. Kylbehovet är därför ofta lika stort eller större än värmebehovet. Ett marklager för både värme och kyla innebär att den överskottsvärme som genereras i fastigheten under kylperioden lagras för att senare användas till uppvärmning. Om ett kylaggregat är involverat kan detta även användas i reverserad mod som värmepump för uppvärmning. Drifftiderna för aggregatet ökar därmed. Marklagret är också ofta temperaturmässigt gynnsammare att kyla mot än uteluft under sommartid.

Kylbehovet för enbostadshus är vanligtvis så litet att det sällan är motiverat att installera speciella system för detta ändamål. Undantaget är system med förvärmning av ventilationsluft i mark där även komfortkyla kan erhållas sommartid utan tillkommande kostnader.

Några speciella beräkningar över det ekonomiska utfallet av kombination av värme- och kyltillämpningar inkluderande marklager. är ej utförda. Förutsättningarna är relativt olika för varje enskilt objekt. Det finns emellertid flera exempel på när grundvatten har använts för kombination med kyla och värme på komersiell basis (t.ex. SAS huvudkontor i Stockholm, Affärscentrum i kv. Smeden, Malmö). Med denna bakgrund torde även andra typer av marklager, t.ex. lager med vertikala rörsystem i jord, vara kommersiellt intressanta.

8 SLUTSATSER

Resultaten visar att betydligt högre energimängder är möjliga att ta ut per markyteenhet än vad som tidigare uttagits. Om stora energiuttag görs från kollektorn blir det nödvändigt med en artificiell temperaturåterställning av marken för att funktionen skall bibehållas.

För flernivåsystem är det möjligt att utan artificiell temperaturregenerering ta ut ca 90-110 kWh/m²,år vid en lägsta brinetemperatur av ca -5 °C (120-140 kWh/m²,år om -10 °C kan accepteras, t.ex. direktexpansions system). Med återladdning om ca 50 kWh/m²,år kan ca 20% högre energimängder tas ut. Om en värmepumpinstallation täcker ca 50 % av toppeffektbehovet innebär ovanstående energiuttag att det krävs ca 10-15 m² markyta per kW (toppeffekt). Ett bostadshus varaktighet av energiuttaget har förutsatts.

För jordvärmebrunnar är uttag om ca 10 W/m vertikalt nedstick möjliga utan återladdning. Med återladdning kan energiuttaget ökas till 15-20 W/m beroende på återladdningens storlek. Vid ett jorddjup av 20 m innebär detta att 7-15 nedstick på en linje med cc 2 m är nödvändigt för att klara ett enbostadshus med toppeffektbehovet 10 kW. Effekttäckningen för värmepumpen antas även i detta fall vara ca 50 %.

Resultaten från förvärmning av uteluft visar att 20-40 meters rörlängd är i mark ofta är tillräckligt för att höja temperaturen till ca 0°C. Under extrema klimatförhållanden kan 60 m vara nödvändigt. Beroende på luftflödets storlek kan flera rör parallellkopplas. Effektbehovet för ventilation för enbostadshus kan reduceras med 50-60 % genom förvärmning av tilluften genom mark.

För en deltäckande värmepump med luft som värmekälla lokaliserad till mellansverige kan mellan 35,000 och 70,000 kronor investeras för att ersätta elvärme beroende på investeringstidpunkt och energiförbrukning. Om anläggningen lokaliseras till norra norrland minskar investeringsmarginalen till mellan 27,000 och 55,000 kronor, dvs en minskning med drygt 20 %.

Om istället mark används som värmekälla ökar investeringsmedlen ytterligare med 7,000 resp. 11,000 kronor för mellansverige och 15,000 resp. 28,000 kronor i norra norrland. Investeringsutrymmet är vanligen mindre vid ersättning av olja.

Ovanstående resultat är beräknade under förutsättning av en årsförbrukning av energi för värme och tappvarmvatten med 25 resp. 35 MWh. Den genomsnittliga förbrukningen i elvärmda småhus är emellertid lägre. Det tillgängliga investeringsutrymmet kommer därför att bli lägre för dessa hus. Skillnaden i ekonomiskt resultat mellan 25 och 35 MWh förbrukning är emellertid inte så stort. Mot denna bakgrund bör resultatet

av tillgängligt investeringsutrymme för en något lägre förbrukning ej påverkas i så hög grad.

Resultaten innebär att värmepump med framförallt mark som värmekälla i många fall är konkurrenskraftigt vid ersättande av elvärme om ett värmedistributionssystem redan finns installerat. Skall direktelvärme ersättas beror systemens konkurrenskraft på utfallet av de utvecklingsinsatser som görs inom området värmedistributionssystem.

Om uteluftvärmepumpen kompletteras med förvärmning av dess tilluft fås en kombination av uteluftvärmepumpens bättre värmefaktor under vårsommar-höst och jordvärmepumpens bättre effektäckning vintertid. En sådan anläggning bör därför få ett något bättre resultat än jordvärmepumpen ovan.

Systemen bedöms vara gynnsamma att använda vid kombinerad uppvärmning och kylning i lokaler då överskottsvärme från kylperioden lagras till vintern.

För att undersöka ev. negativa effekter med systemen, t.ex. sättningar vid frysning, och för att verifiera den termiska funktionen är fullskaleförsök nödvändiga. Detta gäller framförallt jordvärmebrunnar.

REFERENSER

- Franck, P-A, 1986. A study of heat pump systems with low temperature seasonal heat storage in clay. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för värmeteknik och maskinlära, Thesis, Göteborg.
- Gohm, H, 1983. Heating or cooling device with heat pump. Deutsches Patentamt, Muenchen, Federal Republic of Germany.
- Hagentoft, C-E, 1983. Tjälnedträngning i mark runt fjärrvärmekulvert. Husbyggnadsteknik, LTH-V, LUTVDG/(TVBH-7076)/1-18/(1983)
- Hagentoft, C-E, 1986. Simulering av värmelager i mark uttagssystem med slangar. Manual till simuleringsprogram, opublicerad rapport.
- Jansson, P-E & Lundin, L-C, 1984. Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag. Simulerade uttag för olika marker och klimat. Byggforskningsrådet, rapport R50:1984, Stockholm.
- Johansson, A, (I manuskript). Markkollectorer med förvärmning av luft till luftvärmepump. Simulering och kostnadsberäkning.
- Johansson, I, 1984. Luftvärmepump med ytjordvärme för köldperioder. Utvärdering av småhus, Arvika. Byggforskningsrådet, rapport R59:1984, Stockholm.
- Persson, A, 1987. Förvärmning av tilluft med solfångare och marklager för småhus i Västerås. Mätning och utvärdering av fyra hus. Byggforskningsrådet, rapport R62:1987, Stockholm.
- Rehn, I, Sundberg, J & Modin, B O, 1986. Dimensionering av ytjordvärmekollektor. Beräkning med simuleringsmodell. Byggforskningsrådet rapport R13:1986, Stockholm.
- Rhen, I, Sundberg, J & Wilen, P, 1984. Horizontal pipe systems in soil for heating and cooling of single family houses. Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport nr 13, Göteborg.
- Statens energiverk, 1988. Elvärme och kärnkraftsavveckling. Statens energiverk, 1988:5, Stockholm.
- Strop, H & Kohler, W, 1983. Collector of heat from the earth for heat pumps. Deutsches Patentamt, Muenchen, Federal Republic of Germany.
- Sundberg, J, 1986. Värmeöverförande egenskaper i svenska jordarter. Värmeledning, specifik värmekapacitet och latent värme. Byggforskningsrådet, rapport R104:1986, Stockholm.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 871217-0
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens
Geotekniska institut, Linköping.**

R33: 1989

ISBN 91-540-5028-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709033

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst,
171 88 Solna**

Cirkapris: 40 kr exkl moms