



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

R145:1980

**Värmepumpsystem med
kemisk energilagring**

Förstudie

Arne Jönsson

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr 80-2345

Plac Ser

V
9/11

Byggeforskningsrådet

Ser

R145:1980

VÄRMEPUMPSYSTEM MED KEMISK ENERGILAGRING

Förstudie

Arne Jönsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 791073-0 från Statens råd för byggnadsforskning till Wahlings Installationsutveckling AB, Danderyd.

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

R145:1980

ISBN 91-540-3384-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1980 057877

INNEHÅLL

1	SYFTE OCH BAKGRUND	7
1.1	Inledning	7
1.2	Bygga försöksanläggningar	8
1.3	Teoretiska arbeten	10
2	SAMMANFATTNING	13
2.1	Utredningens syfte	13
2.2	Förutsättningar	13
2.3	Beräkningsmetodik	14
2.4	Resultat	15
3	DIMENSIONERINGSPRINCIPER	19
3.1	Dimensionering av kombinerade värmesystem	19
3.2	Utgångspunkter	20
3.3	Driftsstrategi	22
3.4	Dimensionerande år	22
3.5	Optimering av värmepump kombinerad med värmelager	32
3.6	Optimering av värmepump kombinerad med eltillsats	34
3.7	Optimering av värmepump kombinerad med värmelager och eltillsats	36
4	KOMPONENTBESKRIVNING	39
4.1	Allmänt	39
4.2	Värmebehov	39
4.3	Värmepumpar	41
4.4	Värmelager	45
4.4.1	Olika lagringsformer för värme	45
4.4.2	Lagerkostnader	53
4.5	Eltariffer	55
4.5.1	Effekttariffer	55
4.5.2	Hushållstariffer	56
5	SYSTEMLÖSNINGAR	59

6	UTVÄRDERING	63
6.1	Allmänna förutsättningar	63
6.2	Enbostadshus	63
6.2.1	Förutsättningar	63
6.2.2	Översiktlig jämförelse mellan värmepump med kemiskt värmelager och värmepump med direkteltillsats i enbostadshus	64
6.2.3	Beräkningsexempel med konstant effektkostnad för värmepumpen B (kr/kW) vid installation i enbostadshus	68
6.2.4	Beräkningsexempel med variabelt B(x) respektive B(y) vid installation i enbostadshus	71
6.2.5	Sammanfattning av beräkningsexempel för enbostadshus	73
6.3	Flerbostadshus	74
6.3.1	Förutsättningar	74
6.3.2	Metod för känslighetsanalys	75
6.3.3	Härledning av dimensionerande drifttider x, y	76
6.3.4	Inverkan av ökat energipris	81
6.3.5	Inverkan av ökade effektavgifter	83
6.3.6	Inverkan av sänkt lagerpris	85
6.3.7	Inverkan från klimatet	88
6.3.8	Sammanfattning av beräkningsexempel för flerbostadshus	92
6.4	Drift-, service- och miljöaspekter	96
BILAGA 1	Undersökning av villkor för $g(x)$ så att $K_{TL} > K_{TEL}$	99

BETECKNINGAR

A	Kostnadsfaktor för värmepumpen (kr)
Aa	Abonnemangsavgift (kr/kW)
a	Annuitetsfaktor (l/år)
B	Kostnadsfaktor för värmepumpen (kr/kW)
C	Kostnadsfaktor för elektriskt tillsatsvärme (kr)
D	Kostnadsfaktor för elektriskt tillsatsvärme (kr/kW)
DUT1	Dimensionerande utetemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
DUT5	
E	Kostnadsfaktor för värmelagret (kr)
E_I	Värmekostnad för värmepumpen (kr/kWh)
E_{II}	Värmekostnad för tillsatsvärmens (kr/kWh)
EUT1	Extrema utetemperaturer ($^{\circ}\text{C}$)
EUT5	
F	Kostnadsfaktor för värmelagret (kr/kWh)
FO	Fasomvandling
Fta	Fast avgift (kr/år)
G	Konstant
$g(x)$	Funktion
H	Konstant
Ha	Högbelastningsavgift (kr/kW)
K_L	Värmelagrets kostnad (kr)
K_{TEL}	Total årskostnad för värmepump med eltillsats (kr/år)
K_{TL}	Total årskostnad för värmepump med värmelager (kr/år)
K_{VP}	Värmepumpens kostnad (kr)
ΔK	Kostnadsskillnad (kr, kr/år)
KVP	Kemisk värmepump
k	Husets specifika effektbehov (kW/ $^{\circ}\text{C}$)
k_e	Konstant ($^{\circ}\text{C}$)
k_v	Konstant ($^{\circ}\text{C}$)
k_t	Konstant ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)
L	Kvantitet
P	Effekt (kW), Produkter
P_e	Tillförd eleffekt till värmepumpen (kW)
P_{e0}	Eleffekt till värmepumpen vid 0°C utetemp. (kW)
P_{vve}	Medeleffekt till tappvarmvattnet med el (kW)
P_{vvemax}	Maximal eleffekt till tappvarmvattnet (kW)
P_{vvp}	Värmeeffekt från värmepumpen till tappvarmvattnet (kW)

P_0	Värmeeffekt från värmepumpen vid 0°C utetemp. (kW)
$P(0)$	Maximalt värmeeffektbehov (kW)
$P(x)$	Värmeeffekt vid tiden x (kW)
p	Pris (kr)
Q	Värmebehov (kWh)
Q_L	Värmeinhåll i lagret (kWh)
Q_a	Avgivet värme
Q_l	Laddningsvärme
Q_T	Tillsatsenergi (kWh)
Q_t	Tillfört värme
Q_{ul}	Urladdningsvärme
Q_{vve}	Elvärme till tappvarmvattnet (kWh)
Q_{vvp}	Värme till tappvarmvattnet från värmepumpen (kWh)
R	Reaktanter
T	Temperaturer
t	Utetemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
t_{in}	Inomhustemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
t_0, t_x	Utetemperaturen vid tidpunkten 0 resp x ($^{\circ}\text{C}$)
t_f	Framledningstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
t_t	Konstant $^{\circ}\text{C}$
x	Dimensionerande urladdningstid för värmelagret (h)
y	Dimensionerande drifttid för tillsatsvärmens (h)
\emptyset	Värmefaktor
τ	Tid (h)

1 SYFTE OCH BAKGRUND

1.1 Inledning

Effektbehovet vid byggnadsuppvärmning bestäms bl a av utetemperaturen. Eftersom man inte vill att innetemperaturen skall sjunka vid något tillfälle måste uppvärmningssystemets effekt dimensioneras efter en utetemperatur som är så låg att den uppträder tämligen sällan. Det innebär att vid alla övriga tidpunkter så är uppvärmningssystemet överdimensionerat, och det kapital som investerats utnyttjas inte till fullo.

Ett sätt att sänka den installerade effekten hos vissa komponenter i uppvärmningssystemet och därmed kostnaden för dessa, är att använda ett värmelager som hjälper till att täcka det maximala effektbehovet. Värmelagret laddas under perioder med lågt effektbehov.

Värmelagring är särskilt betydelsefullt för sådana system där man har förhållandevis dyra komponenter dimensionerade efter det maximala effektbehovet och där man kan minska storleken hos dessa komponenter genom komplettering med ett värmelager. Ett sådant system är elnätet, som måste dimensioneras för det maximala effektbehovet, både beträffande produktionsanläggningar och överföringsnät. Vid värmelagring i ett elvärmesystem som försörjs via elnätet kan man dessutom åstadkomma en energibesparing, genom att man inte behöver producera så mycket el i spetslastkraftverk med lägre verkningsgrad än grund- och mellanlastkraftverk.

Vid byggnadsuppvärmning med värmepump kopplad till elnätet, väljer man ofta att täcka det maximala effektbehovet med elvärmestillsats. Orsaken är att om uteluft används som värmekälla så sjunker värmepumpens effekt vid sjunkande utetemperatur och den totala investeringen blir lägre om effekttoppen istället täcks med en värmekälla med liten investeringskostnad per effektenheter.

Detta innebär att en värmepumps belastning på elnätet kommer att få en högre maximal effekt i förhållande till det totala energibehovet än för t ex elvärme. Eftersom elvärmebelastningen ligger till grund för kraftbolagens taxekonstruktioner kommer en abonnent med värmepump inte att ge kraftbolaget full kostnadstäckning. För att erhålla full kostnadstäckning från en abonnent med värmepump skulle han betala en högre effektavgift än elvärmeabbonnenten.

Genom att installera ett värmelager tillsammans med värmepumpen för att täcka effekttopparna skulle dess belastning på elnätet bli gynnsammare.

Värmelagringen medför dock problem bl a till följd av stort utrymmesbehov och höga kostnader. Den hittills vanligaste formen för värmelagring utgörs av lagring i vattentankar eller i stenlager. Dessa s k kapacitiva värmelager har förhållandevis låg energitäthet och höga värmeförluster. I kombination med en värmepump eftersträvas en relativt konstant temperatur hos värmelagret vilket ej kan uppnås med kapacitiva värmelager.

Kemiska värmelager av fasomvandlingstyp eller i form av en kemisk värmepump har flera egenskaper som gör dem lämpliga att kombinera med elektriska värmepumpar. För fasomvandlingslagret är det den konstanta temperaturen vid värmeuttag som kan väljas inom vissa gränser beroende på salt och på kemiska tillsatser. För kemiska värmepumpar är det den relativt ringa volymen, som gör dem intressanta. De kemiska värmelagren kan således vara alternativ till mer konventionell teknik såsom att använda elenergi eller oljepanna som tillsatsvärmekälla.

Syftet med projektet är att utreda vilka möjligheter som idag finns att nyttja kemiska värmelager för reducering av effektbehovet hos konventionella värmepumpar vintertid. Bl a undersöks vilka krav som härvid skall ställas på en sådan konstruktion, som underlag för utformning och dimensionering av värmepumpen och det kemiska värmelagret.

De kemiska energilagren som ingår i undersökningen är fasomvandlingslager som utnyttjar fasomvandlingsvärmets vid smältning och stelning av ett salthydrat, d v s ett oorganiskt salt som innehåller kristallvatten respektive kemiska värmepumpar, eller sorptionsvärmepumpar som utnyttjar absorptionsvärmets för en gas i ett oorganiskt salt för värmelagring.

Utredningen omfattar bl a teoretiska analyser av kostnadsfunktionerna för de ingående komponenterna med beräkningsexempel för enbostadshus med elabonnemang enligt hushållstaxa och flerbostadshus med effekttaxa. Tre förläggningssorter studeras härvid nämligen Malmö, Stockholm och Jokkmokk.

1.2 Bygda försöksanläggningar

Värmelagring i elvärmesystem anslutna till elnätet har länge använts i form av nattel-ackumulering. Det är en lagringsform som gör det möjligt att utnyttja den oanvända kapaciteten nattetid hos kraftverk, kraftledning och transformatorer. Det innebär att priset för nattelenergin kan sättas praktiskt taget oberoende av de fasta kostnaderna, eller nästan lika med de rörliga produktionskostnaderna.

Man uppskattar att ungefär 6 % av alla hus i Tyskland är försedda med nattel-ackumulering, vilket sparar ca 2 miljoner ton olja per år. Oljesparingen erhålls genom att ett större elbehov kan tillgodoses med koleldade grundlastkraftverk med hög verkningsgrad. (Meysenburg, 1975)

Värmelagring tillsammans med värmepumpar har inte fått samma spridning som nattel-ackumuleringen. Det har dock byggts en del anläggningar där den kombinerade klimatkyla-värmepumpen vid The Tidd Plant i Brilliant, Ohio torde vara en av de första. Där installerades man 1947 en värmepump med en kompressor på 15 hp motoreffekt (12 kW) och en lagringstank för 10,5 m³ vatten i en envånings kontorsbyggnad. Den hade ett dimensionerande värmebehov på 58 kW och ett dimensionerande kylbehov på 50 kW. Uteluften användes som både värmekälla och värmesänka, varvid lagret

beroende på årstid används för lagring av värme eller kyla.

Lagringen gör det möjligt att använda mindre kompressor och att undvika drift när elnätet är hårdast belastat. Lagret medför också att värmefaktorn kan bli större genom att värmepumpen kan drivas när det är som varmast ute. Detta ger högre förångningstemperatur. Omvänt kan kylriften förläggas nattetid när utetemperaturer är låg, för att få en låg kondenseringsstemperatur. Inga driftserfarenheter redovisas i artikeln. (Sporn & Ambrose, 1947).

Ett system liknande det föregående byggdes i Milwaukee 1972. Det hade varit i drift i 5 år när referensartikeln skrevs. Systemet hade två skruvkompressorerna på vardera 440 kW och hade lägre driftskostnader än motsvarande system med gaseldning och konventionell kylning. (Ratai, 1977).

Det land där man har störst erfarenheter av värme- och kylagring i kontorshus är Japan. Man har stora vattentankar under husen, upp till 5.000 m³. De används inte bara för värme- och kylagring, utan ökar även den seismiska stabiliteten hos byggnaden vid jordbävningar.

Samtidigt med Milwaukee-anläggningen, dvs i början av 70-talet, byggdes i Sverige 18 kombinerade värmepumpar och klimatkyllanläggningar. De installerades i Domus stormarknader över hela landet. De är inte direkt jämförbara med tidigare beskrivna anläggningar, där man lagrar både värme och kyla, eftersom de lagrar enbart värme från direktel under natten i en särskild ackumulator med elpanna. (Hagstedt, 1974, Rosberg, 1974).

Från mitten av 70-talet har man byggt värmepumpar och klimatkyllaggregat med värmelagring i smältvärmes hos is. Genom att utforma värmepumpens förångare som en ismaskin får man en värmekälla med den konstanta temperaturen 0°C, oberoende av utetemperaturer. Man får också ett högt specifikt värmeinnehåll hos lagret. När anläggningen används för kylning har man kylenergin lagrad i isen. Det har byggts flera försöksvärmepumpar av denna typ i USA och Tyskland. (Michel, 1977).

I Sverige finns en värmepump av detta slag i Brämhultsprojektet. (Brämhultsprojektet etc). (Solfångare och värmepump etc).

Anledningen till att man provar ismaskinvärmepumpen i USA är att man kan få en relativt hög förångningstemperatur när utetemperaturer är låg och att man kan förlägga kylastens maximala elbehov under sommaren till natten då elnätet inte är så hårt belastat.

En av de amerikanska försöksanläggningarna byggdes 1976 vid Oak Ridge National Laboratory. Den har en värmeeffekt på 8,8 kW, vilket är tillräckligt för att klara ett normalt enbostadshus maximala effektbehov utan tillsatsvärme. När anläggningen går som värmepump sprutas vatten på förångaren. Smältvärmes leds via värmepumpen in till husets luftvärmesystem. När förångningstemperaturen sjunker under en viss nivå, avfrostat förångaren genom att varmt gasformigt köldmedium släpps ut i förångaren och varmgasavfrostsning. Därvid släpper isen från förångaren och faller ned i islagringskärlet. Vid värmedrift värms varmvatten med överhettings- och kondenseringsvärme från köldmediet.

Vid kylldrift pumpas kallt vatten från islagringskärlet in till ett flänselament i husets luftvärmesystem, där luften kyls med det kalla isvattnet. Vid kylningen behöver endast fläktar och vattenpumpar vara i drift, med mycket mindre eleffekt än kompressorn. Skulle isen ta slut under kylldrift kan ny is produceras nattetid då belastningen på elnätet inte är så hög. Då används smältvärmeför varmvattenvärmning eller leds bort i en uteluftkondensator. Skulle lagringskärlet bli fullt med is under värmedrift kan man i en kommande version hjälpa till att smälta isen med solfångare.

Ismaskinvärmepumpen uppges ha lägre driftskostnader än konkurrerande uppvärmningsalternativ, som gas, el eller olja. (Fischer, 1977).

Problemet med belastningen på elnätet i USA är den stora kyl-lasten under sommaren, medan det i Europa är lasten på vintern som ger den största effekttoppen. Här är det viktigare att försöka lagra värme än kyla, varvid islagrets främsta uppgift är att hålla förångningstemperaturen uppe under vintern.

I Tyskland vid Badenwerk AG i Karlsruhe byggde man 1976 en värmepump med islager för uppvärmning. Den har dubbla kompressorkretsar, en för grundlast ned till utetemperaturen -3°C och en som kopplas in parallellt med grundlastkompressorn för spetslast, med islagret som värmekälla.

Grundlastkompressorn har eleffekten 3,75 kW och spetslastkompressorn 3,0 kW. Islagret har volymen 16 m^3 och anläggningen är installerad i ett 1 1/2-plans enbostadshus med dimensionerande värmebehov 16 kW. De båda kompressorkretsarna är kopplade till en vattentank på 3 m^3 som används för mellanlagring av värme, innan den tillförs husets varmluftskonvektorer med maximalt 50°C framledningstemperatur eller används för varmvattenberedning. Islagret töas med underkylningsvärme från grundlastvärmepumpen, som har uteluften som värmekälla.

Systemet provades under perioden dec 76 - maj 77 och uppnådde endast en blygsam värmefaktor på 1,7, trots att medeltemperaturen den kallaste månaden inte var lägre än $0,7^{\circ}\text{C}$. Orsaken till detta uppges vara felaktig reglering, värmeförluster från mellanlagret och en alldeles för energikrävande vevhusvärmning av de båda kompressorerna. Man har inte redovisat något om systemets ekonomi. (Fluck & Kirn, 1977).

1.3 Teoretiska arbeten

Värmepump med värmelager för täckning av spetslasten har föreslagits i flera artiklar, men bedömts som oekonomiskt, utan att man redovisat någon analys av problemet. Det uppges således att, "det skall mycket till för att ett värmelager som endast utnyttjas ett fåtal gånger under sin livstid skall löna sig". Det saknas dessutom underlag för dimensioneringen d v s säkra statistiska data för en belastningstopps graddagsinnehåll. (Lorentzen, 1977).

Det har gjorts omfattande databeräkningar på ett slags dubbel värmepump med värmelagring i jorden. Den består av en värmepump som arbetar mellan uteluften och jordvärmelagret, som är en isolerad jordhög med slingor av polyetenslang. Den andra värmepumpen har slingorna i jordhögen som värmekälla och avger värme till byggnaden.

Beräkningarna tyder på att systemet skulle få en värmefaktor på 2,3, vilket även kan nås med en konventionell luft-vattenvärmepump. Investeringskostnaden beräknas till 4 gånger ett elvärmesystems och 2 gånger ett oljevärmesystems, varför en konventionell värmepump bedöms vara fördelaktigare i nuläge och förmodligen även på sikt. (Lundén, 1977).

I (Granryd, 1977) jämförs en värmepump dimensionerad för Stockholmsklimat med luften som värmekälla och med direkteltillsats vid temperaturer under -5°C , med en likadan värmepump som har tillgång till en värmekälla med konstant temperatur $+5^{\circ}\text{C}$ året runt. Vid ett årligt värmebehov i byggnaden av 25.000 kWh drar värmepumpen med konstanttemperaturkällan 7400 kWh el per år och den med uteluften som värmekälla 9000 kWh el per år. Konstanttemperaturkällan ger en elenergi besparing på 18 % och årsmedelvärmefaktorn höjs från 2,8 till 3,4.

2. SAMMANFATTNING

2.1 Utredningens syfte

Syftet med denna utredning har varit att undersöka de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att använda kemiska värmelager med avsikt att minska eleffektbehovet hos konventionella eldrivna värmepumpar för byggnadsuppvärmning med uteluften som värmekälla. Bl a har undersökts hur ekonomin påverkas av olika faktorer såsom eltaxor, lagerkostnader och klimat. Utredningen har inriktats på en- respektive flerbostadshus.

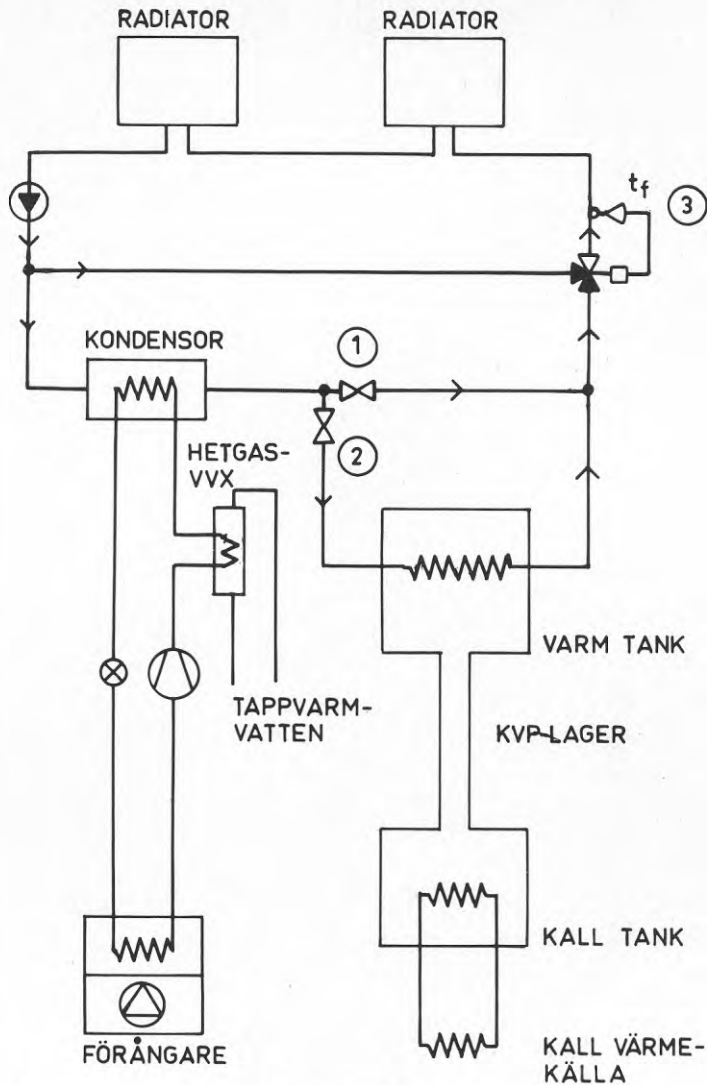
2.2 Förutsättningar

I utredningen har två typer av kemiska värmelager behandlats, nämligen fasomvandlingslager och kemisk värmepump. I fasomvandlingslager utnyttjas fasomvandlingsvärmets vid smältning och stelning av ett salthydrat, d v s ett oorganiskt salt som innehåller kristallvatten. Vid kemiska värmepumpar, eller sorptionsvärmepumpar utnyttjas man absorptionsvärmets för en gas i ett oorganiskt salt för värmelagring.

Fasomvandlingslager har den för värmepumpdriften gynnsamma egenskapen att värmeavgivningen sker vid konstant temperatur. Detta gäller under vissa förutsättningar även för kemisk värmepump som dessutom har avsevärt högre värmeförbehåll och därför är mindre utrymmeskrävande.

Figur 5.2 visar principen för ett värmepumpsystem med kemisk värmepump. Då värmepumpens avgivna värmeeffekt är otillräcklig för att hålla önskad temperatur i radiatorkretsen leds vattnet via ventilen 2 in till värmelagret där det värms till erforderlig temperatur. Värmelagret laddas när värmepumpens effekt är tillräcklig för att höja temperaturen på vattnet över lagrets laddningstemperatur.

Om värmepumpen levererar tillräcklig värmeenergi utan tillsats av lagrad energi, går vattnet i radiatorkretsen via ventil 1 varvid systemet fungerar som ett konventionellt uppvärmningssystem med värmepump.



Figur 5.2 Princip för värmepumpsystem med kemisk värmepump

2.3 Beräkningsmetodik

I utredningen har ett enbostadshus med elabonnemang enligt hushållstaxa och ett flerbostadshus med elabonnemang enligt effekt-taxa utgjort referensobjekt vid dimensionering av värmepump och värmelager. Först har översiktliga jämförelser gjorts mellan värmepumpalternativen med kemiskt värmelager och värmepump med direkteltillsats i stället för värmelager. Därefter har beräkningsexempel genomförts för att bestämma optimala storleken på värmepump och värmelager och deras kostnader i jämförelse med värmepumpalternativet med direkteltillsats. Genom denna jäm-

förande beräkningsmetod minskas inverkan av feluppskattningar i kostnaderna. Vid dimensionering av system med värmepump och värmelager måste hänsyn tas till att värmelagret kan urladdas helt, vilket ej får inträffa oacceptabelt ofta. I utredningen används en metod för att dimensionera lagret tillsammans med värmepumpen så att lagret endast blir uttömt med en sannolikhet understigande 1 gång vart 30:e år. På basis av tillgängliga klimatdata har en varaktighetskurva för utetemperaturen utarbetats som antas gälla för ett extremt kallt år. Denna utgör underlag för optimeringen.

Optimeringsmetoden bygger på att komponenterna representeras med kostnadsfunktioner i ett uttryck för totalkostnaden vars minimivärde beräknas vilket ger den dimensionerande drifttiden. Denna bestämmer tillsammans med temperaturvaraktighetskurvan för förläggningssorten komponenternas storlek och därmed deras kostnad.

2.4 Resultat

I enbostadshus med hushållstaxa är den anslutna eleffekten vid den minsta säkringsstorleken så stor att effektreduktionen genom att använda kemiskt värmelager i stället för direkteltillsats blir marginell och ej medför någon reduktion av anslutningsavgiften. Därför måste mycket stora ändringar i elenergipriserna eller lagerpriserna inträffa för att systemet med kemisk värmelagring skall bli konkurrenskraftigt jämfört med att använda direkteltillsats. Sålunda måste elpriset öka ca 10 gånger mer än övriga priser eller priserna på kemiska värmelager minska till under det teoretiskt möjliga, d v s under det rena saltpriset. Inverkan av klimatet har här mindre betydelse varför endast en förläggningssort, Stockholm, har studerats.

Även vid installation i flerbostadshus med effekttaxa är värmepumpsystem med kemiskt värmelager ej lönsamma i förhållande till värmepump med direkteltillsats. Kostnadsbilden är dock gynnsammare än för fallet med enbostadshus. Beräkningsresultatet framgår av figur 6.3.

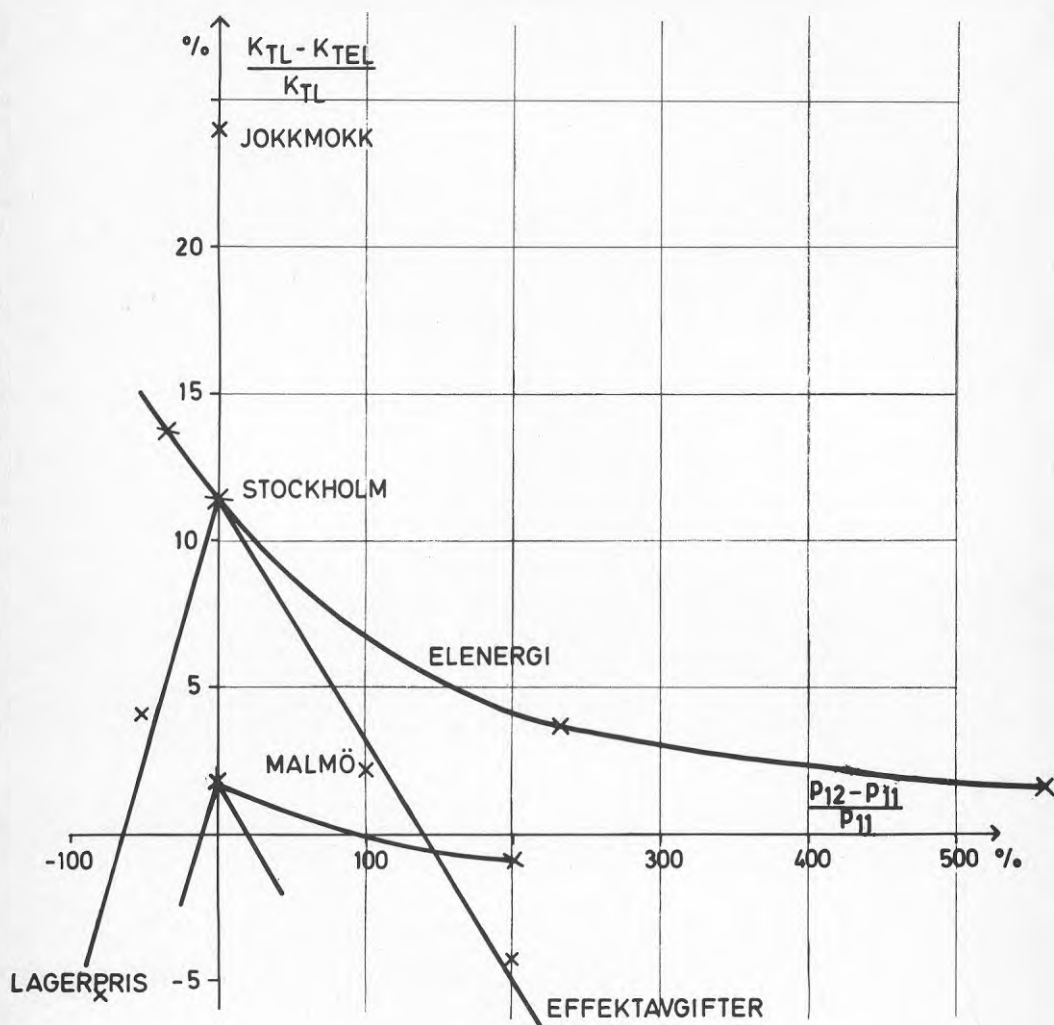
På y-axeln i figuren är den relativa skillnaden mellan den totala årskostnaden för alternativen med värmelager respektive direkteltillsats inlagd. Om den relativa skillnaden är positiv är det fördelaktigare att använda direkteltillsats.

På x-axeln i figuren är den relativa prisändringen inlagd. Den relativa prisändringen 100 % medför en fördubbling av priset medan prisändringen -50 % innebär en halvering av priset.

I figuren är värden markerade för förläggningssorterna Jokkmokk, Stockholm och Malmö.

Som framgår av figuren är det i detta beräkningsfall klimatet som har den största betydelsen för lönsamheten. Malmö är den klart bästa av de tre förläggningssorterna. Måttliga variationer i priser och avgifter kan i detta fall förbättra lönsamhetsbilden. Sålunda medför en sänkning av det i utredningen antagna lagerpriset med ca 15 %, eller en höjning av effektavgifterna med ca 20 % eller en fördubbling av energipriset, att systemet med värmelager av typen kemisk värmepump ger samma årskostnad som värmepump med direkteltillsats. Vid dessa prisändringar förut-

sätts att övriga priser är oförändrade.



Figur 6.3 Relativa kostnadsskillnaden mellan totala årskostnaden för uppvärmning med värmepump kombinerad med kemiskt värmelager respektive värmepump kombinerad med direkteltillsats, som funktion av relativa prisändringen för elenergi, effektaavgifter och kemiska värmelager vid förläggning i Malmö, Stockholm och Jokkmokk.

System med fasomvandlingslager ger sämre förutsättningar för lönsamhet än kemisk värmepump.

Resultatet visar sålunda att det för byggnader med effekttaxa, belägna i orter med mildt kustklimat finns möjligheter för framtida lönsamhet vid användning av kemisk värmepump i kombination med eldriven värmepump. En förutsättning är dock en gynnsam prisutveckling framförallt för värmelagren.

En förutsättning för värmepumpinstallationen är att byggnadens uppvärmningssystem och tappvarmvattensystem är dimensionerade för maximala temperaturen ca $+50^{\circ}\text{C}$. Vidare krävs utrymme för värmepump med tillbehör. Om värmepumpen är kombinerad med kemiskt värmelager tillkommer utrymmesbehov för detta. Utredningen har visat att en kemisk värmepump för ett enbostadshus i Stockholm kräver en effektiv byggnadsvolym på ca $0,2 \text{ m}^3$. Motsvarande volym för ett flerbostadshus med 50 lägenheter är ca $5,0 \text{ m}^3$.

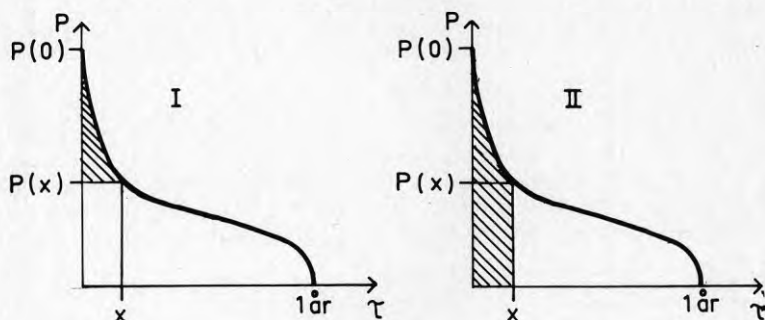
För kemiska värmepumpar som nyttjar marken som kall värmekälla krävs dessutom möjligheter att förlägga en ytjordvärmslang i mark utanför huset. Den erforderliga markytan för ett enbostadshus i Stockholm är ca 50 m^2 , medan ett flerbostadshus med 50 lägenheter kräver en yta av storleksordningen 1500 m^2 .

Eftersom de kemiska värmelagren är under utveckling, saknas ännu erfarenheter beträffande driftsäkerhet, service och miljöpåverkan. Det är ett krav att driftsäkerheten med hänsyn till läckage, förändringar av de kemiska ämnena mm står i rimlig proportion till övriga värmeinstallationer i en byggnad. Man skall sålunda kunna byta komponenter och utföra normalt underhåll utan onormala säkerhetsåtgärder. Beträffande miljöaspekterna är det viktigt att giftiga gaser ej kan spridas varken vid normal drift eller vid oavsiktlig upphettning under laddning eller vid brand. Innehållet i värmelagret skall dessutom vara enkelt att hantera och ej medföra avfallsproblem.

3 DIMENSIONERINGSPRINCIPER

3.1 Dimensionering av kombinerade värmesystem

Det finns två principiellt olika sätt att kombinera två värmekällor i ett uppvärmningssystem, vilket åskådliggörs i figur 3.1.



Figur 3.1 Varaktighetskurvor för värmebehov

- I. Värmekällorna samverkar för att täcka det maximala effektbehovet, s k bivalent värmesystem med parallell drift.
- II. Den ena värmekällan täcker ensam det maximala effektbehovet, s k bivalent värmesystem med alternativ drift.

Den streckade ytan i diagrammen avser värmebehov som täcks med tillsatsvärme.

I båda fallen krävs lika stor effekt på grundvärmekällan $P(x)$, vilket ger samma investeringskostnad för grundvärmen. Effekt och energibehov hos tillsatsvärmen är olika i de båda fallen. I fall I krävs endast tillsatseffekten $P(0) - P(x)$, medan fall II kräver $P(0)$. Energitillbehovet för tillsatsvärmen är störst i fall II.

I denna utredning görs antagandet att värmepumpens värmeeffekt är konstant lika med $P(x)$ även vid lägre utetemperaturer än vid tidpunkten x . Denna förenkling införs för att kunna härleda optimala drifttiden för tillsatsvärmen på ett enkelt sätt. Förenklingen medför att tillsatsvärmekällans effekt- och energibehov underskattas i beräkningarna.

Skillnaden mellan sätten att kombinera värmekällorna blir ändå att fall II kräver större mängd tillsatsvärme och högre effekt på tillsatsvärmekällan. Fall I får därmed lägre kostnader än fall II.

Det ovan förda resonemanget gäller givetvis under förutsättning att x för fall I är lika med x för fall II. Används olika x i de båda fallen finns det möjligheter att fall II, alternativ drift, kan ge lägre kostnader än fall I, parallell drift. Detta beror på att värmepumpar avsedda för drift under ca 0°C måste förses

med avfrostning och att värmepumpar som skall avge sin dimensionerande effekt vid lägre temperaturer kostar mer per effektenhet än sådana som avger sin dimensionerande effekt vid en högre temperatur. Merkostnaden för en värmepump som skall drivas vid temperaturer under ca 0°C kan överstiga kostnaden för den ökade mängden tillsatsenergi som krävs för drift enligt fall II, alternativ drift. (Kalischer, 1980).

Det som skulle kunna göra fall II intressant är ekonomiska styrmedel t ex differentierade eltaxor för att ej använda grundvärmen under vissa tider på dygnet eller året. Alternativdriften, fall II måste användas om inte grundvärmekällan fungerar under vissa tider. Ett sådant fall är luftvärmepumpar som saknar avfrostning. De stängs av vid utetemperaturer under ca 0°C . Då måste huset värmas helt med direkteltillsats.

Här behandlas i första hand uppvärmningssystem enligt fall I d v s bivalenta värmesystem med parallell drift varvid förutsätts att det inte finns några särskilda ekonomiska styrmedel för att stänga av värmepumpen under vintern och att de värmepumpar som behandlas antas vara försedda med avfrostningsanordningar.

3.2 Utgångspunkter

Ett konventionellt uppvärmningssystemets effekt dimensioneras efter den dimensionerande utetemperaturen på orten DUT som bestäms av klimatet, den extrema utetemperaturen EUT, och av den byggnadstekniska utformningen.

EUT är den lägsta medeltemperaturen som förekommer under en köldperiod med en viss längd och med en viss återkomsttid. Vid dimensionering av uppvärmningssystem använder man sig av köldperioder som inte uppträder mer än en gång vart 30:e år och med en varaktighet av 1 respektive 5 dygn.

Den byggnadsberoende delen av DUT bestäms bl a av husets värmeackumulerande förmåga. Man tillåter att inomhustemperaturen sjunker med maximalt tre grader under den dimensionerande köldperioden. Beroende på olika hustypers värmeackumuleringsförmåga får man olika längd på den dimensionerande köldperioden. Ett hus med lätt byggnadsstomme är känsligt för kortvariga variationer i utetemperatur varför man använder den dimensionerande köldperioden 1 dygn. För hus med tung byggnadsstomme som inte är känsliga för kortvariga variationer i utetemperaturer använder man den dimensionerande köldperioden 5 dygn. Med detta dimensioneringssätt inträffar en oacceptabel avvikelse i inomhustemperaturen mera sällan än vart 30:e år. (Peterson, 1979).

Vid dimensioneringen av en eldriven värmepump med värmelager, bör man ha samma målsättning, d v s att det får inte inträffa en oacceptabel avvikelse i inomhustemperaturen med högre sannolik återkomsttid än vart 30:e år.

Vid dimensioneringen av konventionella uppvärmningssystem behöver man inte ta hänsyn till köldperiodens längd, utöver vad som gjorts vid beräkningen av DUT, eftersom man har en i förhållande till energibehovet under köldperioden stor energireserv, oljetanken eller elnätet. Vid dimensioneringen av en värmepump med värmelager så är energiinnehållet i värmelagret begränsat, varför lagret

och värmepumpens effekt måste dimensioneras med hänsyn till energiåtgången under den kallaste delen av året.

Med kravet att det inte får bli oacceptabelt kallt inomhus med större sannolikhet än vart 30:e år, måste man dimensionera efter ett år som är så kallt att det inte uppträder mer än vart 30:e år. Ett kallare år än det dimensionerande kommer nämligen att få mycket större konsekvenser för uppvärmningssystem med värmelagring än för konventionella system. Underskrids den extrema uttemperaturen EUT för ett konventionellt uppvärmningssystem kommer på sin höjd inomhustemperaturen att sjunka motsvarande antal grader som EUT underskrids. För ett system med värmelager däremot där lagret hjälper till att täcka den dimensionerande uppvärmningseffekten så blir följden av att lagret tar slut ett bortfall av en stor del av uppvärmningseffekten. Det innebär att innetemperaturen kan komma att sjunka 10 - 15°C vilket gör huset obebodigt. För att gardera sig vid överskridande av lagrets kapacitet och vid fel på värmepumpen kan man installera en elreserveffekt som täcker hela värmebehovet vid dimensionerande utetemperatur. Då måste man emellertid abonnera på lika stor eleffekt som om man inte hade något värmelager alls. Härigenom försvinner möjligheten till lägre abonnemangsavgift för husägaren.

Om den enskilde abonnenten installerar full elreserveffekt får kraftföretaget under normala år fördelen av ett mindre effektuttag, men måste se till att det med en sannolikhet väsentligen underskridande vart 30:e år kan täcka husens maximala effektbehov. Uttaget av direkteltillsats kommer att få en med värmebehovet under uppvärmningssäsongen varierande sammanlagring. Alla husen kommer inte att göra slut på sina värmelager även under ett dimensionerande år. Det finns dock en teoretisk möjlighet att samtliga hus kan överskrida kapaciteten på sina värmelager under samma år, så att samtlig tillsatseffekt kopplas in på en gång. Detta kan inträffa samtidigt i hela landet eftersom värmelagret och värmepumpen dimensioneras efter värmebehovet på respektive ort och att ett extremt kallt år kan drabba hela Sverige samtidigt.

Det ligger ej inom ramen för detta projekt att studera sammanlagringen av direktelreserven i ett uppvärmningssystem med värmelagring hos den enskilda abonnenten. Detta torde bli en viktig fråga i framtiden, när flera abonnenter installerar uppvärmningssystem med värmelager, som kan ta slut och som kräver reservvärme i form av direktel, t ex solvärt tappvarmvatten eller årstidslagring av solvärme.

I den fortsatta utredningen behandlas värmepump med värmelager där abonnenten inte abonnerar på full elreserveffekt, utan endast eleffekt motsvarande värmepumpens maximala elbehov. I detta fall får husägaren gardera sig mot överskridande av lagrets kapacitet genom komplettering med annat uppvärmningssystem, t ex vedeldning, fotogenkamin eller liknande, eller ta risken för ett överskridande utan att gardera sig.

3.3 Driftsstrategi

Värmepumpen måste tillsammans med värmelagret regleras så att de täcker hela värmebehovet alla år inklusive det dimensionerande året. Värmelagret kopplas in när värmebehovet överstiger värmepumpens kapacitet, vilket inträffar när utetemperaturen sjunker under en viss nivå, som bestäms genom en optimering för det dimensionerande året. Denna utetemperatur som avgör när värmelagret skall kopplas in används sedan även för övriga år som är varmare än det dimensionerande. Det innebär att lagret inte kommer att bli fullt utnyttjat mer än det dimensionerande året.

3.4 Dimensionerande år

Vid dimensioneringen av uppvärmningssystem med värmelager bör man enligt det föregående använda ett år som är så kallt att det inträffar mera sällan än vart 30:e år, ett EÅR (Extremt kallt år).

Temperaturvaraktighetskurvan för ett sådant år kan man ta fram genom studium av meteorologiska data för uppvärmningssäsonger under en längre period tillbaka i tiden, t ex vid SMHI eller i Meteorologisk årsbok.

För denna utredning, som avser att undersöka möjligheten att använda värmelager, bör det vara tillräckligt med en metod som ger ett ungefärligt värde på energibehovet för uppvärmning under ett EÅR. En sådan metod är att gå tillbaka i VVS-tidskriftens graddagstabeller, för att se hur mycket graddagstalet under uppvärmningssäsongen varierar. Med en graddag menas produkten av temperaturskillnaden mellan inne- och utetemperatur och varaktighetstiden för denna temperaturskillnad.

Antas antalet graddagar vara normalfördelade kan man med hjälp av medelvärde och standardavvikelse statistiskt ta fram graddagstalet för ett EÅR.

För att få fram temperaturvaraktighetskurvans form ritas en varaktighetskurva för en ort med samma normala graddagstal som den första ortens extrema graddagstal. De båda orterna bör ha samma avstånd till havet för att få samma form på sina varaktighetskurvor, d v s de skall ha samma klimattyp, inlandsklimat eller kustklimat.

Varaktighetskurvan för ett normalår (NÅR) ritas med värden ur (Taesler, 1972) och vid låga utetemperaturer kan de extrema utetemperaturerna EUT1 och EUT5 vara till hjälp. Det är dock inte säkert att de extrema utetemperaturerna infaller ett år med extremt låg medeltemperatur under uppvärmningssäsongen.

Vid värmebehovsberäkningar används ofta begreppet graddagar, för att bestämma hur mycket uppvärmningsbehovet varierar mellan olika uppvärmningssäsonger. Multipliceras husets värmebehov per graddag med antalet graddagar under uppvärmningssäsongen fås uppvärmningsbehovet. Graddagarna beräknas utgående från utetemperaturen och 17°C innetemperatur. Den verkliga innetemperaturen blir några grader högre på grund av värme från sol, personer, el etc. Graddagarna anges för eldningsssäsongen under eldningsåret 1/7 - 30/6. Eldningssäsongen, anges med temperaturgränser för utetemperaturer som är olika

för varje månad. Eldningsgränsen är för april 12°C, maj - juli 10°C, augusti 11°C, september 12°C samt för oktober 13°C. Under dessa månader räknas graddagar endast under dygn med lägre medeltemperatur än den angivna eldningsgränsen.

I VVS-tidskriften anger man antalet graddagar under uppvärmningssäsongen för 24 orter i Svergie. Dessutom anges grad-dagsinnehållet i ett normalår 1931-1960. De orter där man har fört statistik längst och som ligger på lämpliga platser med skiftande klimat är: Malmö, Stockholm och Jokkmokk. Graddagstalet för ett normalår är i:

Malmö	3006 grd
Stockholm	3570 grd
Jokkmokk	5930 grd

För dessa tre orter redovisas graddagstalet i procent av normalårets graddagar för eldningsåren 64/65 - 78/79. Se tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1 Graddagstalet i procent av normalårets graddagstal i Malmö, Stockholm och Jokkmokk 1964-1979

År	Malmö	Stockholm	Jokkmokk
78/79	112	111	114
77/78	102	104	104
76/77	103	104	111
75/76	102	98	102
74/75	94	89	94
73/74	99	100	101
72/73	97	86	94
71/72	97	98	102
70/71	100	100	105
69/70	113	114	109
68/69	107	109	111
67/68	99	99	107
66/67	96	98	102
65/66	107	115	116
64/65	104	103	100

Medelvärden och standardavvikelser för de i tabell 3.1 angivna graddagstalen i procent av normalårets graddagstal beräknas till:

	Malmö	Stockholm	Jokkmokk
Medelvärde:	102,1	101,9	104,8
Standardavvikelse:	6,31	8,16	7,09

Medelvärdet visar att antalet graddagar har ökat från perioden 1931-60 till perioden 1964-78 för samtliga tre orter. Eftersom orten för EÅR:et väljs på basis av värden från 1931-60 så tas inte det ökade medelvärdet med vid beräkningen av EÅR:ets graddagstal. Standardavvikelsen för den senare tidsperioden antas däremot gälla även under den tidsperiod som gäller för beräkningen av normalårets graddagstal.

Ett år som förekommer mera sällan än vart 30:e år förekommer mera sällan än med en sannolikhet av 0,0333, vilket innebär att övriga år förekommer med en sannolikhet av 0,9666. Antas grad-
dagstalet normalfördelat motsvaras detta av en standardavvikelse för normalfördelningen på 1,84, vilket ger det extrema grad-
dagstalet:

	Malmö	Stockholm	Jokkmokk
	112 %	115 %	113 %
EÅR:	3360 grd	4110 grd	6700 grd

För att kunna rita upp varaktighetskurvan för utetemperaturen under ett EÅR används data ur (Taesler, 1972) för en ort med lika stort normalt graddagstal som dessa orters extrema graddagstal. Varaktighetskurvan för normalåret ritas upp för orten direkt med värden ur (Taesler, 1972) som gäller för tidsperioden 1949-1979.

(Taesler, 1972) innehåller inte varaktighetskurvor för samtliga de orter som det finns noterat graddagar för, utan man får göra vissa approximationer.

För Malmö motsvaras EÅR väl av Kalmars NÅR med 3357 grd och för denna ort finns också data för varaktighetskurvan tillgängliga. Figur 3.2 och 3.3.

Graddagstalet för Stockholms EÅR 4110 ligger mellan NÅR för Gävle 3980 och NÅR för Härnösand 4339 grd. Båda dessa orter ligger vid norrlandskusten. Söderhamn ligger mellan Gävle och Härnösand, varför ett EÅR i Stockholm sätts lika med ett NÅR i Söderhamn. För denna ort finns också data för varaktighetskurvan tillgängliga. Figur 3.4 och 3.5

Ett EÅR i Jokkmokk med 6700 grd är kallare än ett NÅR i den kallaste orten med graddagsnoteringar, Kiruna med 6532 grd och normaltemperatur $-1,2^{\circ}\text{C}$. Den kallaste orten i Sverige är Karesuando, med normaltemperatur $-1,5^{\circ}\text{C}$. För denna ort finns också data för varaktighetskurvan tillgängliga, varför EÅR i Jokkmokk sätts till NÅR i Karesuando. Data för varaktighetskurvan i Jokkmokk finns däremot inte i (Taesler, 1972), varför data för MalMBERGET måste användas för NÅR. Figur 3.6 och 3.7.

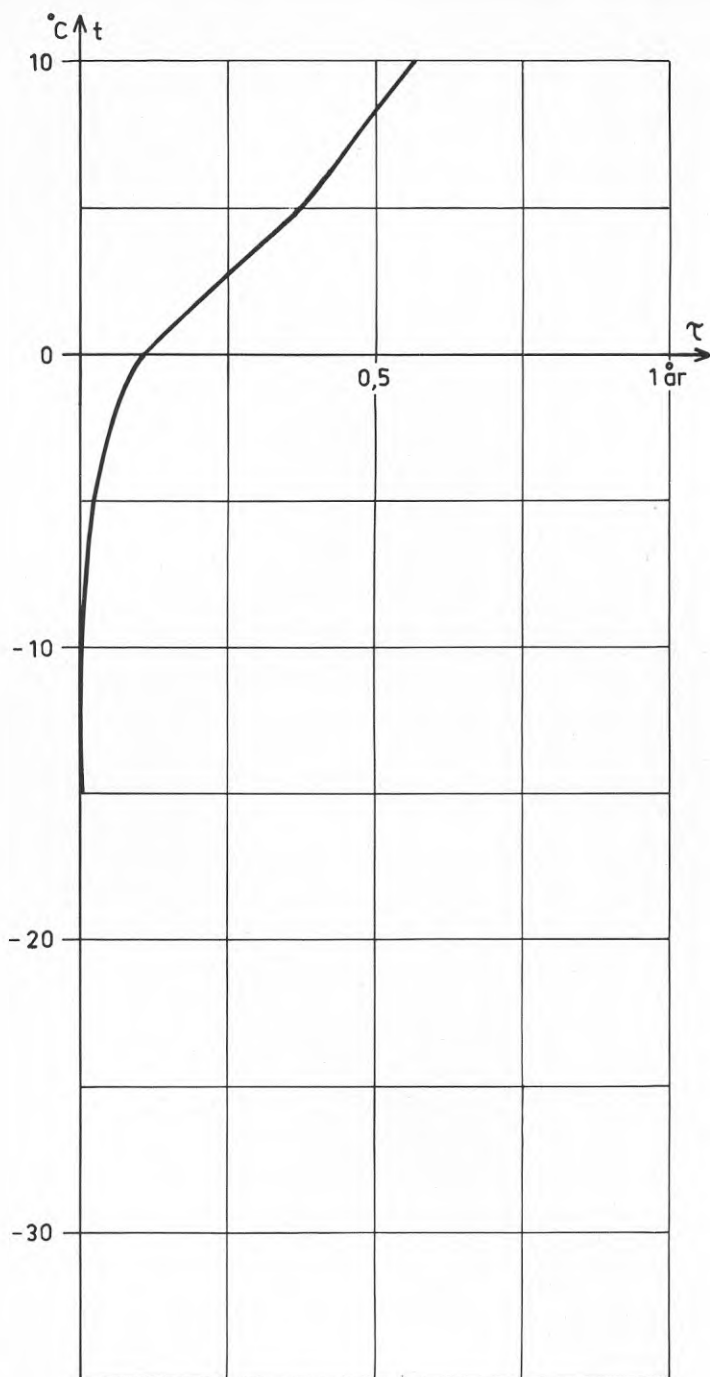
Följande antas sålunda gälla:

EÅR i:	motsvaras av NÅR i:
Malmö	Kalmar
Stockholm	Söderhamn
Jokkmokk (MalMBERGET)	Karesuando

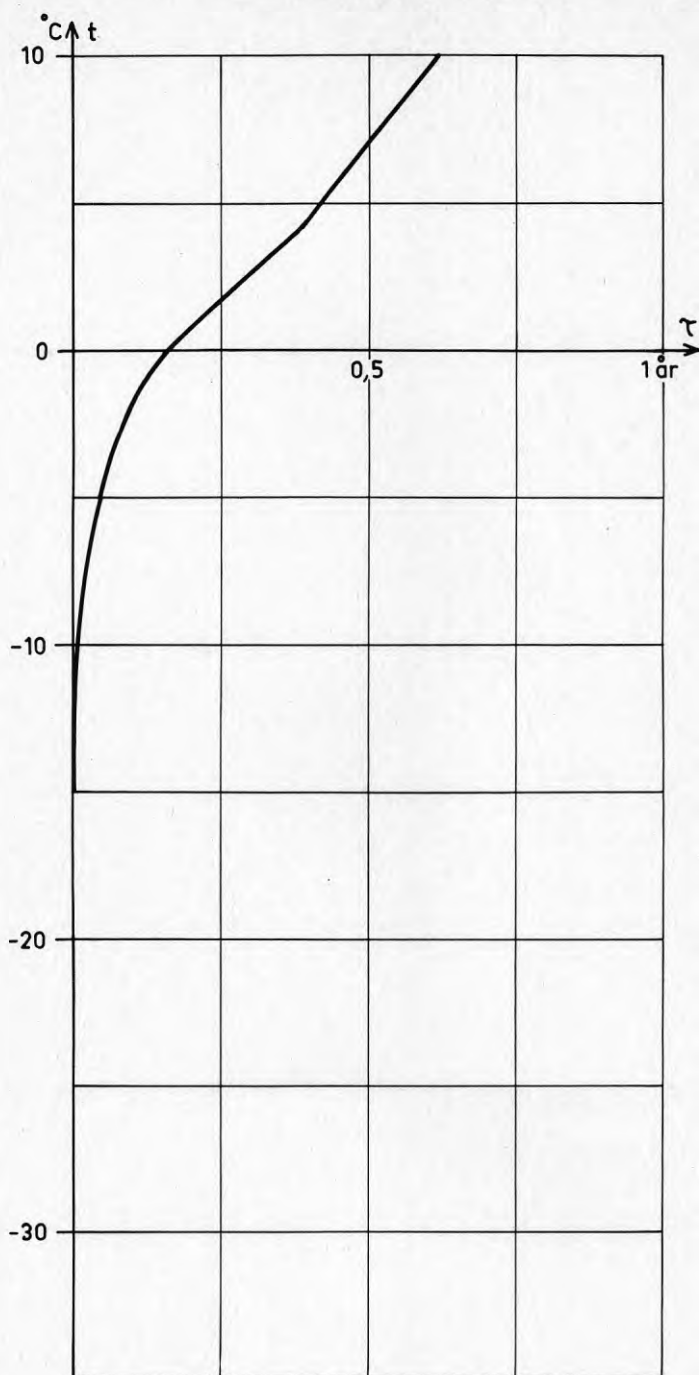
Tabell 3.2 innehåller en sammanställning av extrema och dimensionerande utetemperaturer för de berörda orterna enligt (VVS-Handboken).

Tabell 3.2 EUT och DUT i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

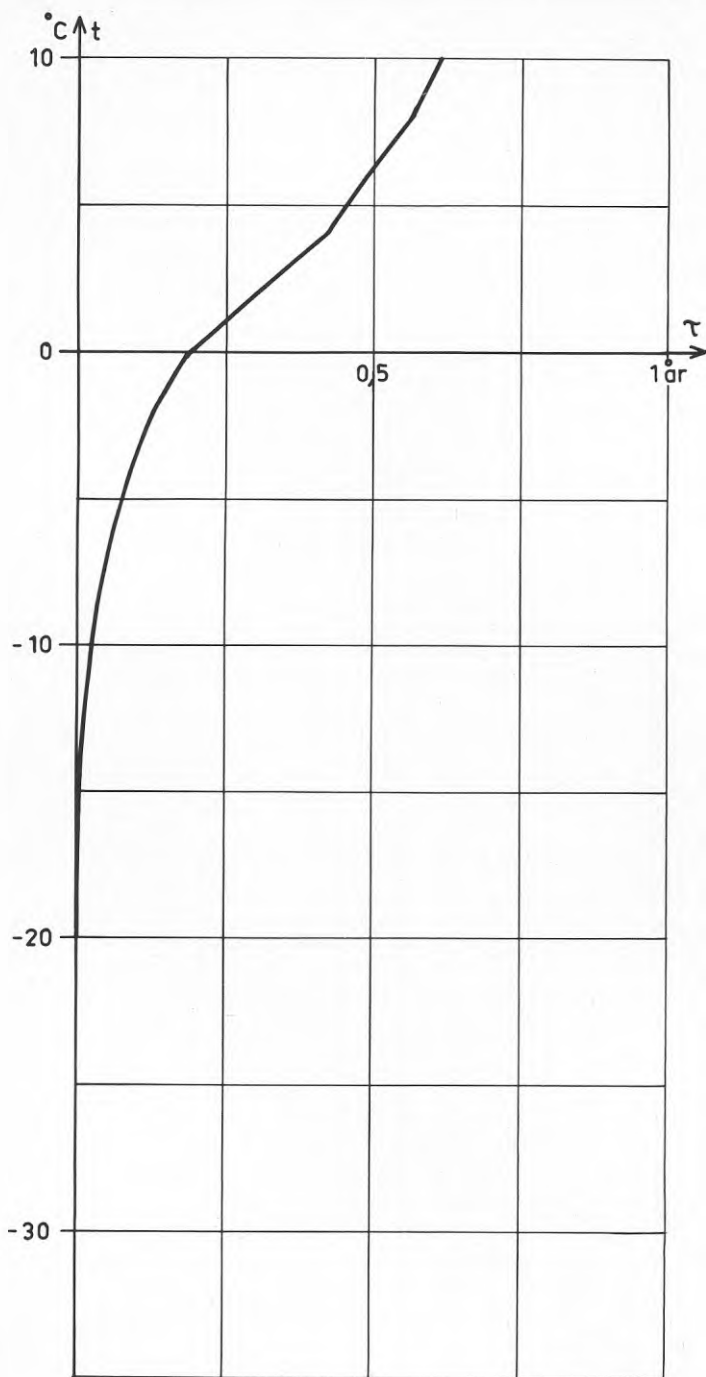
	Extrema utetemperaturer:		Dimensionerande utetemperaturer	
	EUT1 °C	EUT5 °C	DUT1 °C	DUT5 °C
Malmö	-22	-16	-18	-12
Stockholm	-22	-18	-18	-16
Jokkmokk	-40	-34	-36	-30



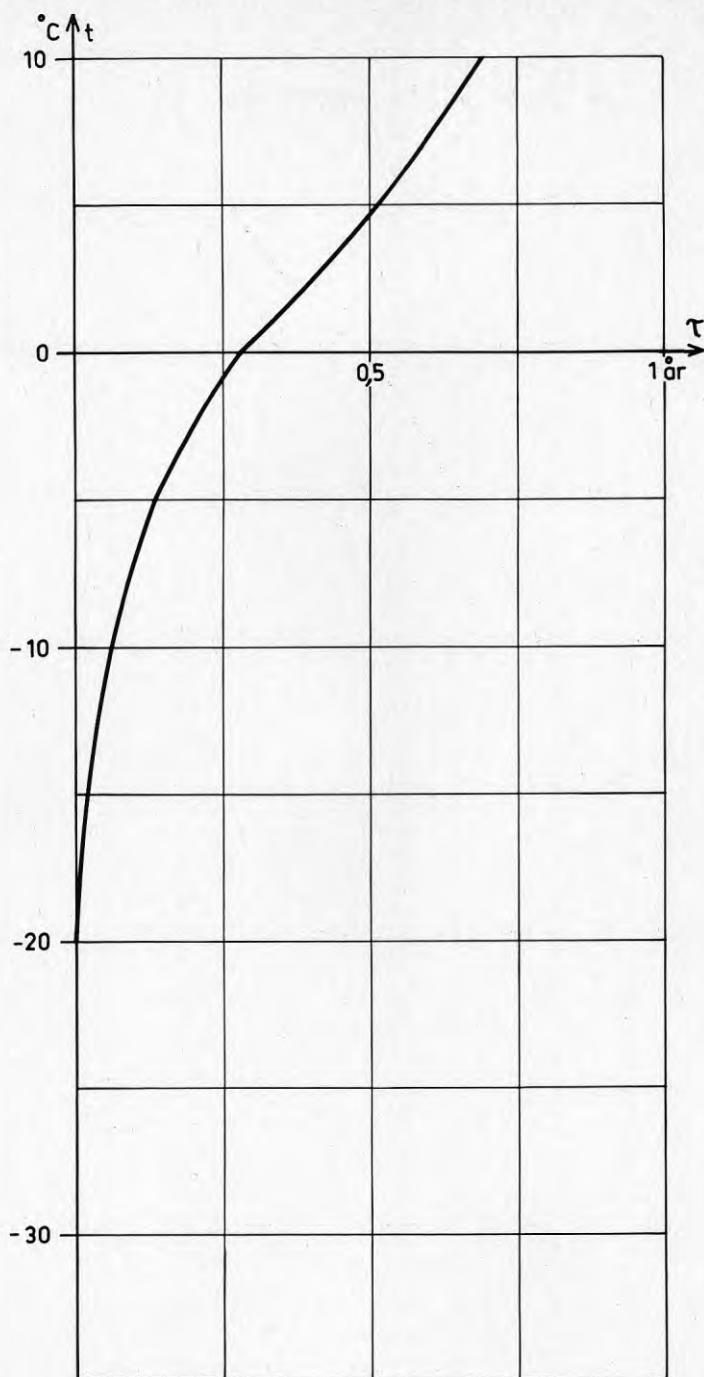
Figur 3.2 Temperaturvaraktighetskurva för NÅR i Malmö
(Malmö flygplats, tabell a5, (Taesler, 1972))



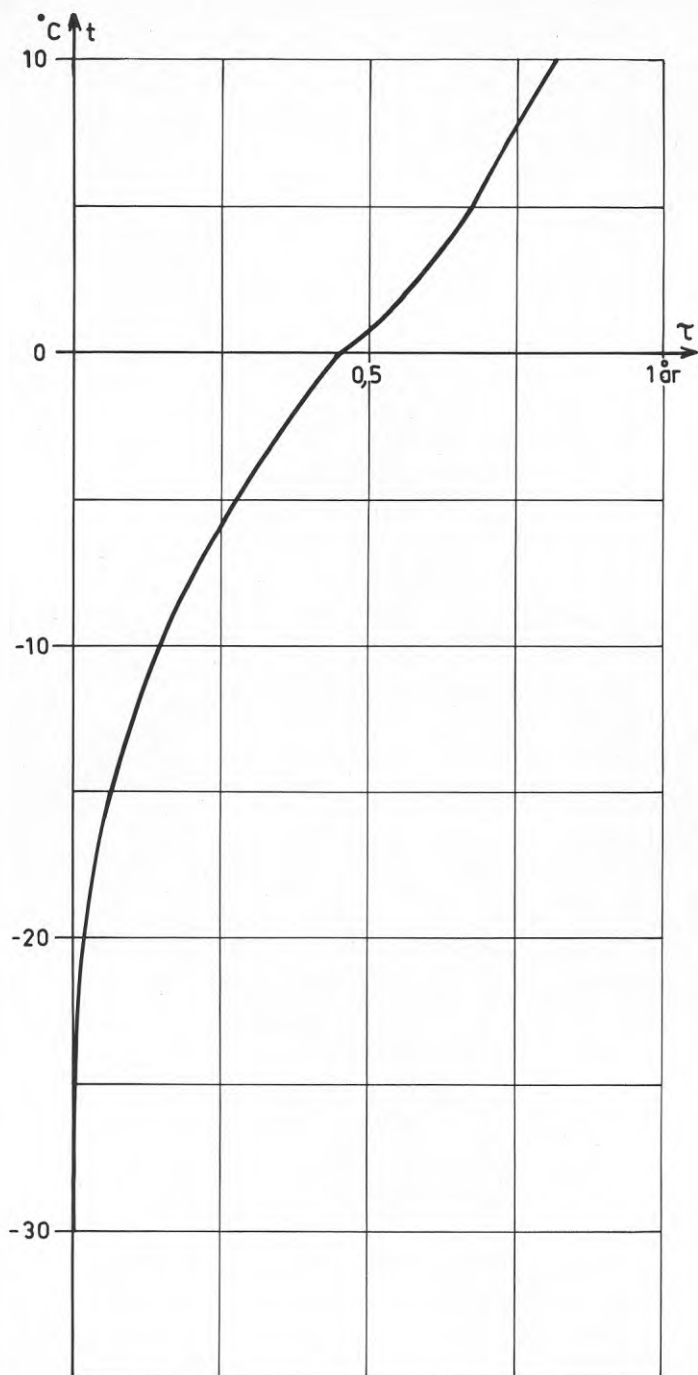
Figur 3.3 Temperaturvaraktighetskurva för EAR i Malmö
(Kalmar F12, tabell a5, (Taesler, 1972))



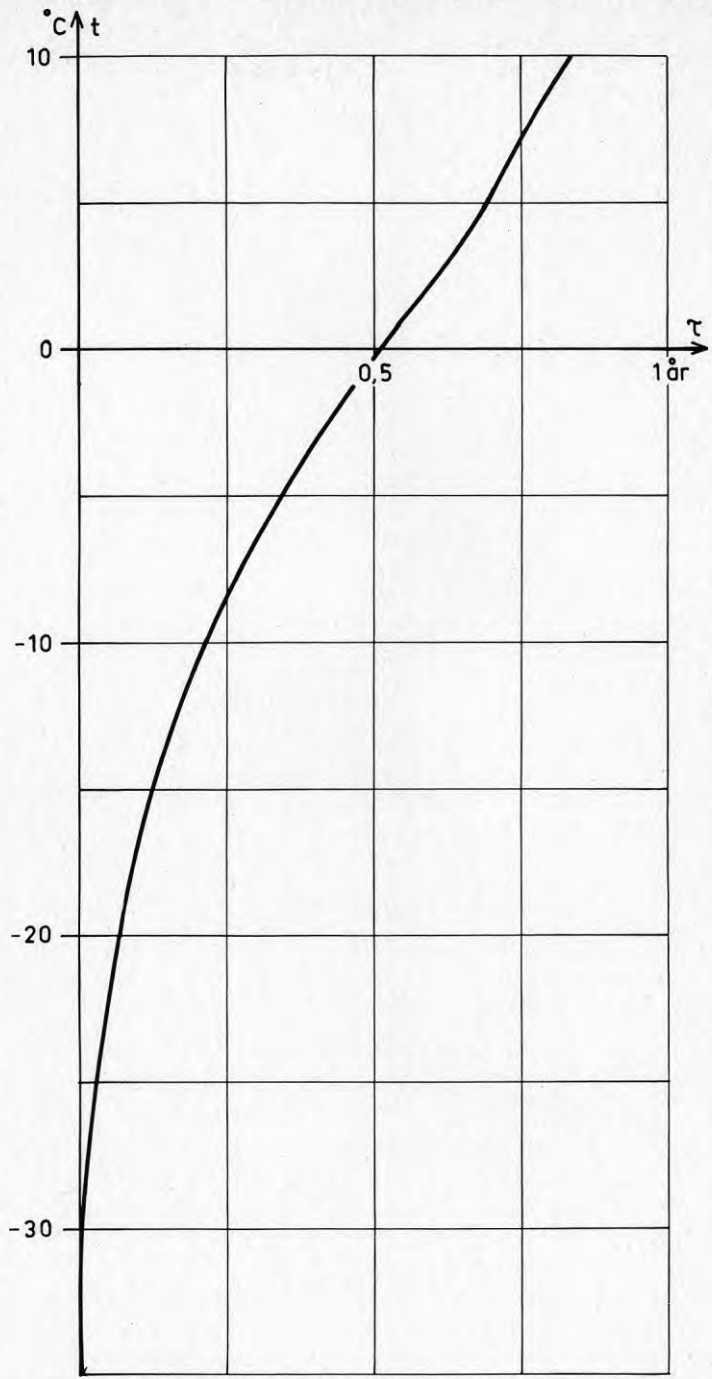
Figur 3.4 Temperaturvaraktighetskurva för NÅR i Stockholm
(Bromma flygplats, tabell a5, (Taesler,1972))



Figur 3.5 Temperaturvaraktighetskurva för EÄR i Stockholm (Söderhamn F15, tabell a5, (Tasler,1972))



Figur 3.6 Temperaturvaraktighetskurva för NÅR i Jokkmokk
(Malmberget, tabell a5, (Taesler,1972))

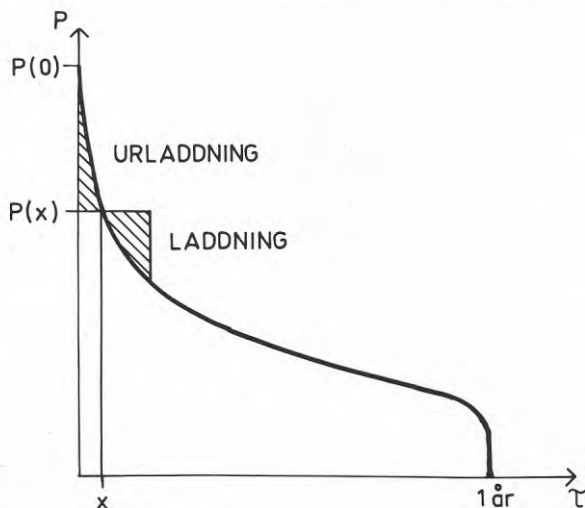


Figur 3.7 Temperaturvaraktighetskurva för EÄR i Jokkmokk
(Karesuando, tabell a5, (Taesler,1972))

3.5 Optimering av värmepump kombinerad med värmelager

Dimensioneringen av den eldrivna värmepumpen och värmelagret görs utgående från uppvärmningseffektens varaktighetskurva det dimensionerande året och ger som resultat tiden x vid vilken värmelagret skall kopplas in för att hjälpa värmepumpen att täcka uppvärmningseffekten.

Värmebehovet i en byggnad är sammansatt av uppvärmningsbehovet som beror av utetemperaturen och av tappvarmvattenbehovet som är mera konstant under året. Det kan sammanfattas i en varaktighetskurva för det dimensionerande året. Se figur 3.8.



Figur 3.8 Varaktighetskurva för värmebehovet och värmelagrets utnyttjning

Eftersom värmelagret laddas med värme från värmepumpen kommer den av värmepumpen under året avgivna värmen att vara lika med värmebehovet. Värmebehovet påverkas inte av storleken på x , eftersom värmebehovet enligt ovan endast beror på uppvärmnings- och tappvarmvattenbehovet.

Värmepumpens elenergiförbrukning under året bestäms av den av värmepumpen avgivna värmemängden under året och av värmepumpens årsvärmeffaktor. I denna beräkning försummas att årsvärmeffaktorn varierar något med den dimensionerande drifttiden. Därmed kommer energikostnaden för uppvärmning att vara oberoende av x .

Värmelagret laddas när den erforderliga effekten för uppvärmning underskrider värmepumpens maximala värmeeffekt.

Här betraktas ett uppvärmningssystem där det enbart gäller att optimera värmepumpen och värmelagret. Övriga komponenter påverkas inte av storleken på värmepump och värmelager varför deras kostnader är utelämnade i optimeringsberäkningen.

Värmepumpens kostnad K_{VP} installerad i byggnaden representeras av en linjär kostnadsfunktion mot värmepumpens maximala effekt $P(x)$.

$$K_{VP} = A + B P(x)$$

Beroende på elabonnemangets storlek kan man lägga in en ev. effektavgift i kostnadsfunktionen eller korrigera i efterhand.

Värmelagrets kostnad K_L antas på motsvarande sätt variera linjärt mot lagrets värmeinhåll Q_L .

$$K_L = E + F Q_L$$

Dessa kostnadsfunktioner gäller inte för $Q_L = 0$. (Inget lager $Q_L = 0$ kostar 0 kr och inte E kr). Den totala årskostnaden K_{TL} för värmepump med värmelager blir:

$$K_{TL} = a (A + B P(x) + E + F Q_L) + E_I Q$$

$$Q_L = \int_0^x P(\tau) - P(x) d\tau$$

där: $P(\tau)$ = Erforderlig effekt för att täcka värmebehovet vid tiden τ (kW)

a = Annuitetsfaktor (1/år)

A (kr), B (kr/kW) = Kostnadsfaktorer för värmepumpen

E (kr), F (kr/kWh) = Kostnadsfaktorer för värmelagret

E_I = Värmekostnad för värmepumpen (kr/kWh)

Minimieras K_{TL} genom att deriveras med avseende på x och derivatan sätts lika med 0, fås $x = \frac{B}{F}$ (h).

x är den sammanlagda urladdningstiden för värmelagret under det dimensionerande året.

I härledningen av x ovan har antagits att B är konstant. I verkligheten varierar B med den utetemperatur som den dimensionerande effekten anges vid. En värmepump som skall avge sin dimensionerande effekt vid en lägre utetemperatur kostar mer per effektivet avgiven värme, än en som avger den dimensionerande effekten vid en högre. Detta innebär att $B = B(t) = B(t(x))$ dvs B är en funktion av den dimensionerande urladdningstiden x som nu blir:

$$K_{TL} = a(A+B(x) \cdot P(x) + E + F Q_L) + E_I Q$$

$$Q_L = \int_0^x P(\tau) - P(x) d\tau, \quad \frac{dK_{TL}}{dx} = 0$$

$$x = \frac{B(t)}{F} \cdot \left(1 + \frac{\frac{dB}{dt} \cdot P}{B \frac{dP}{dt}}\right)$$

Eftersom kostnadsfunktionerna inte gäller i nollpunkten måste man göra en särskild beräkning för att se om ett system med ett optimalt dimensionerat värmelager är billigare än ett system med enbart värmepump.

Kostnad med värmelager:

$$K_{TL} = a (A + B P(x)) + E + F \cdot \int_0^x (P(\tau) - P(x)) d\tau + E_I Q$$

$$x = \frac{B}{F}$$

Kostnad utan värmelager:

$$K_T = a (A + B P(0)) + E_I Q$$

$K_T - K_{TL} > 0$ innebär att det är lönsamt att installera ett lager, vilket efter förenkling ger:

$$B P(0) - (E + F \int_0^x P(\tau) d\tau) > 0 \quad \text{då } x = \frac{B}{F}$$

Det som gynnar lönsamheten med lager är ett högt effektpris, stort B, för värmepumpen, billigt lager, små E och F och litet energibehov i effekttoppen, liten $\int_0^x P(\tau) d\tau$.

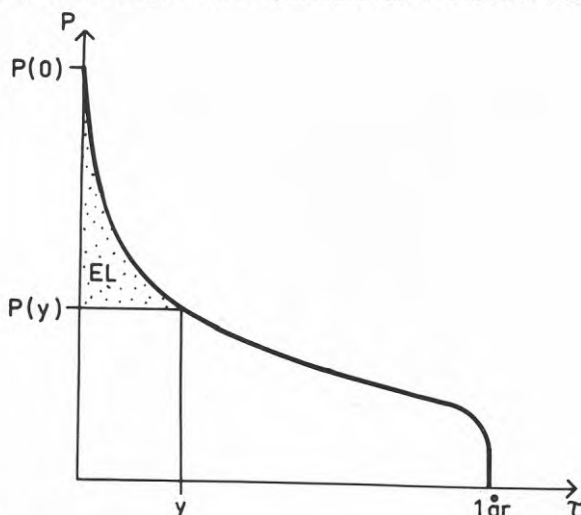
Sammanfattning

Den dimensionerande urladdningstiden härleds till $x = \frac{B}{F}$ vid konstant B. Detta innebär att en dyr värmepump (högt B) ger en lång urladdningstid x och därmed lägre dimensionerande effekt på värmepumpen, eftersom värmebehovet enligt varaktighetskurvan minskar med ökande x.

Att B sätts variabelt B(x) medför att x ökar ytterligare, i förhållande till att sätta B konstant i en omgivning till x. Detta p g a att B(x) och P(x) minskar med ökande x enligt kap 4.2.

3.6 Optimering av värmepump kombinerad med eltillsats

Här dimensioneras eltillsatsen efter det maximala effektbehovet P(0) och enligt varaktighetskurvan för normalåret, figur 3.9.



Figur 3.9 Varaktighetskurva för värmebehovet och eltillsatsens utnyttjning

Med beteckningar enligt tidigare blir den totala årskostnaden K_{TEL} :

$$K_{TEL} = a (A + B P(y) + C + D P(0)) + E_I (P(y) \cdot y + \int_y^1 P(\tau) d\tau) + E_{II} (0 \int^y P(\tau) d\tau - P(y) \cdot y)$$

Beteckningarna enligt tidigare där C (kr) och D (kr/kWh) är kostnadsfaktorer för tillsatsselementen

E_I = Värmekostnad för värmepumpen (kr/kWh)

E_{II} = Värmekostnad för tillsatsvärmen (kr/kWh)

y = Dimensionerande drifttid för tillsatsvärmen (h)

Värmekostnaden för värmepumpen är elpriset dividerat med värmefaktorn.

K_{TEL} deriveras med avseende på y : $\frac{dK_{TEL}}{dy} = 0$

$$\text{ger: } y = \frac{a B}{E_{II} - E_I}$$

Vid optimeringen kan man använda den normala temperaturvaraktighetskurvan eftersom eltillsatsen dimensioneras för att täcka det maximala effektbehovet och tillsatsenergikällans energiinnehåll inte är begränsat på samma sätt som för ett värmelager.

Vid härledningen av y ovan har vi på samma sätt som i 3.5 antagit att B är konstant, medan det i verkligheten är en funktion av y . Värmefaktorn har också antagits vara konstant medan den i verkligheten varierar med utetemperaturen och därmed med tiden τ .

$$K_{TEL} = a (A + B(y) \cdot P(y) + C + D P(0)) + E_I Q + (E_{II} - E_I) Q_T$$

$$Q = \int_0^1 P(\tau) d\tau, \quad Q_T = \int_0^y P(\tau) - P(y) d\tau, \quad E_I = \frac{E_{II}}{\phi(y)}$$

$$B = B(t) = B(t(y)), \quad \phi(\tau) = \phi(y) \quad 0 < \tau < y$$

$$0 = \frac{dK_{TEL}}{dy} = \frac{a B(t)}{E_{II} (1 - \frac{1}{\phi})} (1 + \frac{\frac{dB}{dt} P}{B \frac{d\phi}{dt}})$$

$$Q_T = \text{tillsatsenergiebehov (kWh)}$$

I de fall eltillsatsen medför en kostnad som är proportionell mot tillsatsens effekt kan den totala årskostnaden K_{TEL} skrivas:

$$K_{TEL} = a (A + B P(y) + C + D (P(0) - P(y))) + E_I (P(y) \cdot y + \int_y^1 P(\tau) d\tau) + E_{II} (0 \int^y P(\tau) d\tau - P(y) \cdot y)$$

K_{TEL} deriveras med avseende på y : $\frac{dK_{TEL}}{dy} = 0$

$$\text{ger: } y = \frac{a(B-D)}{E_{II} - E_I}$$

Vid optimeringen används den normala varaktighetskurvan enligt ovan. Här antas både B och D konstanta.

Sammanfattning

Den dimensionerande drifttiden för eltillsatsen härleds till $y = \frac{a \cdot B}{E_{II} - E_I}$ vid konstant B.

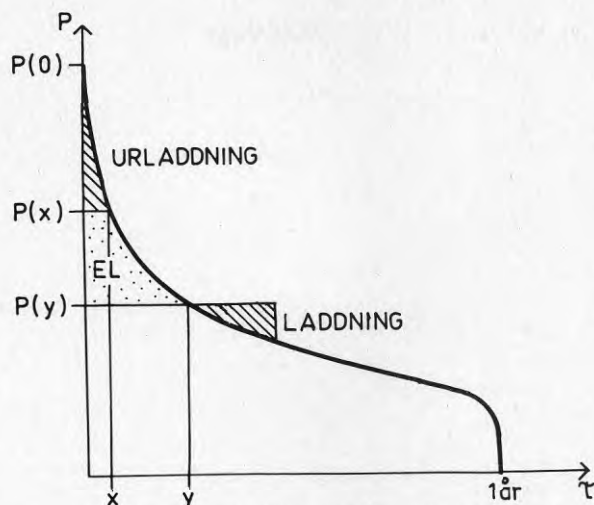
Detta innebär liksom för lageralternativet att en dyr värmepump (högt B) ger en värmepump med lägre dimensionerande effekt. Ett högt pris på tillsatsenergin E_{II} minskar y och därmed används mindre tillsatsenergi. Ett lågt pris på grundlastenergin genom hög värmefaktor ger mindre y och därmed används mer värme från värmepumpen. Att B sätts variabelt $B(y)$ medför att y ökar ytterligare i förhållande till att sätta B konstant i en omgivning till y . Detta p g a att $B(y)$ och $P(y)$ minskar med ökande y enligt kap 4.2.

Då man inför en effektkostnad för eltillsatsen, D blir $y = \frac{a(B-D)}{E_{II} - E_I}$. D minskar y vilket medför att lägre eltillsatseffekt används.

3.7 Optimering av värmepump kombinerad med värmelager och eltillsats

Eltillsatsen dimensioneras för att täcka det maximala effektbehovet $P(0)$. I detta fall kan man välja att inte använda elenergitillsatsen mer än när lagret har tagit slut, eller att använda elenergin som tillsatsvärme. I det första fallet optimeras systemet på samma sätt som utan tillsats $d v s x = \frac{B}{F}$ enligt tidigare.

Används elenergin som tillsats måste man göra en ny optimering med den nya förutsättningen för att få fram lagrets, respektive tillsatselens optimala driftstider under det dimensionerande året, som i detta fall kan vara normalåret, enligt figur 3.10. Detta eftersom det maximala effektbehovet täcks av eltillsatsen som inte kan ta slut på samma sätt som ett värmelager.



Figur 3.10 Varaktighetskurva för värmebehovet, värmelagrets och eltillsatsens utnyttjning

Den totala årskostnaden K_T blir:

$$K_T = a (A + B P(y) + C + D P(0) + F \int_0^x (P(\tau) - P(x)) d\tau) \\ + E_I (\int_0^x P(\tau) d\tau - (x(P(x) - P(y)) + \int_x^y (P(\tau) - P(y)) d\tau) + \\ + E_{II} (x(P(x) - P(y)) + \int_x^y (P(\tau) - P(y)) d\tau)$$

I parentesen efter E_I står den värmemängd som värmepumpen avger till byggnaden och värmelagret. I parentesen efter E_{II} står den värmemängd som täcks med eltillsatsen.

I denna beräkning används konstant B.

K_T deriveras med avseende på x och y och derivatorna sätts lika med noll.

$$\frac{dK_T}{dx} = 0 \quad \frac{dK_T}{dy} = 0$$

Vilket ger

$$\frac{dK_T}{dx} = (E_{II} - (E_I + aF)) x \frac{dP(x)}{dx} \quad \frac{dP(x)}{dx} < 0$$

$$y = \frac{a \cdot B}{E_{II} - E_I}$$

För att $\frac{dK_T}{dx} = 0$ krävs att $x = 0$.

Om $\frac{dK_T}{dx} > 0$ d v s att $(E_{II} - (E_I + aF)) < 0$ så har K_T minimum
i $x = 0$.

Om $\frac{dK_T}{dx} < 0$ d v s att $(E_{II} - (E_I + aF)) > 0$ så minskar K_T med
ökande x , eftersom dyrare värme från eltillsatsen (E_{II}) ersätts
med billigare värme från värmepumpen via värmelagret $(E_I + aF)$.
Detta gäller fram till $x = y$ då all eltillsatsvärme ersätts med
värme från värmelagret.

För $x > y$ dimensioneras lagret efter $x = \frac{B}{F}$, eftersom eltillsatsen
inte används.

Kostnadsfunktionerna gäller inte för $Q_I = 0$, varför man måste kon-
trollera lagrets lönsamhet, mot att inte använda något lager, ge-
nom en särskild beräkning.

$$(E_{II} - (E_I + aF)) \cdot \int_0^x (P(\tau) - P(x)) \quad d\tau > aE$$

Är detta vilkor uppfyllt kan lager användas för att ersätta den
dyrare tillsatsvärmen med billigare värme från värmepumpen. Den
övre gränsen på lagerstorleken sätts av att värmepumpen skall
kunna ladda lagret under den varma årstiden.

4 KOMPONENTBESKRIVNING

4.1 Allmänt

I denna utredning dimensioneras uppvärmningssystemet efter målet att minimera den totala uppvärmningskostnaden. För att kunna göra det måste konstanterna i kostnadsfunktionerna ges realistiska värden. Kostnadsfunktionerna skall gälla för uppvärmningssystemet installerat i byggnaden och de skall också gälla inom det storleksområde på värmepump och värmelager som är aktuellt för den tänkta byggnaden. I studien används som referensobjekt ett enbostadshus och ett större flerbostadshus som har så stort värmebehov att man kan abonnera på elenergi enligt effekttariffen.

4.2 Värmebehov

Enbostadshus

Det enbostadshus som värmepumpen med värmelager skall dimensioneras för har 1 1/2-plan med en bostadsyta på 130 m². Beläget i Stockholm antas det förbruka 14000 kWh/år i uppvärmningsenergi, varav 9000 kWh för transmission och ventilation och 5000 kWh för varmvattenförbrukningen under ett normalår. Enbostadshuset förutsätts vara byggt enligt SBN 75.

Enbostadshusets specifika effektbehov (k) för uppvärmning blir 110 W/°C beläget i Malmö och Stockholm som hör till klimatzon IV och III. Beläget i Jokkmokk som hör till klimatzon I krävs bättre isolering, vilket minskar specifika effektbehovet till 106 W/°C. Skillnaden mellan ute- och innetemperatur som måste upprätthållas av uppvärmningssystemet räknas från innetemperaturen 17 °C, eftersom värme från personer, varmvatten, hushållsel och sol täcker resten upp till 20 °C innetemperatur. De dimensionerande effekterna anges i tabell 4.1.

Tabell 4.1 Dimensionerande effektbehov för referensenbostadshuset

Ort	DUT1 (°C)	Dimensionerande effekt (kW)
Malmö	-18	3,9
Stockholm	-18	3,9
Jokkmokk	-36	5,7

Tappvarmvattnet förutsätts beredas med i huvudsak överhettningvärme från värmepumpen och med direktel. Av det totala energibehovet för tappvarmvattnet 5000 kWh/år antas 60 % beredas med värmepumpen och resterande 40 % med direktel från ett element med 3 kW installerad effekt.

I värmepumpens dimensioneringspunkt (x eller y) antas den avge 0,5 kW värme till tappvarmvattnet. Denna effekt läggs till den erforderliga uppvärmningseffekten för enbostadshuset enligt tabell 4.1. Medelvärmefaktorn för tappvarmvattenberedningen blir ca 1,6. Tillsatsenergin för tappvarmvattenberedning i form av

direktel antas tillföras i en tappvarmvattenberedare med för-rådsvolymen 300 l och eleffekten 3 kW. Kostnaden för en sådan beredare uppgår till ca 5000 kr varav installationskostnaderna utgör ca 2000 kr.

I de fall man behöver direkteltillsats för uppvärmningsbehovet installeras en elpanna. En sådan har oftast inbyggd tappvarmvattenberedare och kostar i inköp ca 6000 kr och installerad 8000 kr, vilket ger en merkostnad på 3000 kr gentemot att enbart ha tappvarmvattenberedare.

I enbostadshuset förbrukas även 3000 kWh/år hushållsel med en medeleffekt på 350 W och med ett effektbehov som avsäkras med 3 st 16 Ampère säkringar motsvarande 10,5 kW, vilket är den minsta säkringsstorleken.

Flerbostadshus

Det flerbostadshus som används som referenshus har 50 lägenheter på i medeltal 70 m² lägenhetsyta, och innehåller dessutom 500 m² övriga uppvärmda ytor, som trapphus garage etc. Flerbostadshuset förutsätts vara byggt enligt SBN 75.

I varje lägenhet förbrukas i medeltal 5000 kWh/år i form av tappvarmvatten, vilket enligt (Peterson & Ringblom, 1978) innebär att det bor ca 3 personer per lägenhet. I varje lägenhet förbrukas även i medeltal 2000 kWh/år i form av hushållsel. Hushållselen, personvärme, sol etc räcker till för att ge lägenheterna en temperatur på 3°C över utetemperatur.

För uppvärmning via radiatorerna krävs 100 kWh/m² uppvärmd yta och år, under ett normalår i Stockholm (3570 grd). Detta motsvarar 4,7 kW/°C uppvärmningseffekt per grad temperaturskillnad mellan inne- och utetemperatur. Vid dimensionerande utetemperatur DUT5 kräver flerbostadshuset en dimensionerande uppvärmningseffekt enligt tabell 4.2.

Tabell 4.2 Dimensionerande uppvärmningseffekt för referensflerbostadshuset i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

	DUT5 °C	P(DUT5) kW
Malmö	-12	136
Stockholm	-16	154
Jokkmokk	-30	210

Värdet för Jokkmokk är korrigerat för den ändrade klimatzonen.

Tappvarmvattnet bereds i huvudsak med värme från det överhettade köldmediet, men då värmepumpens kapacitet räcker till bereds tappvarmvatten även med kondenseringsvärmets. Resterande värme till tappvarmvattenberedningen tas från elnätet. Då värmepumpen avger full effekt till uppvärmningen av byggnaden antas den avge 15 kW till tappvarmvattnet. Resterande värme till tappvarmvattnet tas från en elpanna på 100 kW el kombinerad med en tappvarmvattenackumulator på 5 m³. Av värmen till tappvarmvattenberedningen kommer i medeltal 60 % eller 150 MWh/år från värmepumpen och 40 % eller 100 MWh/år från elenergi.

Tappvarmvatten bereds med i medeltal 30 kW värmeeffekt under året, från både värmepump och elenergi.

Elektrisk tillsatsvärme för att täcka byggnadens värmebehov utöver värmepumpens kapacitet beräknas ge en merkostnad på 30.000 kr gentemot att enbart ha elektrisk varmvattenberedning enligt ovan.

Om referenshuset är beläget i Stockholm förbrukar det följande energimängder, vilket motsvarar ca 20/l Eol per m² och år.

Uppvärmning	400	Hushållsel: 100 MWh
Tappvarmvatten	250	
Värme	650	MWh

4.3 Värmepumpar

Vid optimeringen av lagerstorleken krävs att värmepumpkostnaden anges med en linjär kostnadsfunktion:

$$K_{VP} = A + B \cdot P$$

A är den fasta kostnaden (kr) som inte beror av värmepumpens effekt, t ex installation, reglerutrustning, anslutningar, fundament o d.

B är kostnaden per installerad värmeeffektenhet (kr/kW)

P är erforderlig värmeeffekt (kW) i dimensioneringspunkten, x eller y

Eftersom effekten från en värmepump varierar med utetemperatur kommer B att vara beroende av vid vilken utetemperatur det anges. Det är dyrare per effektenhet att bygga en värmepump som avger samma effekt vid en låg temperatur än vid en hög. Värmeeffekten från en värmepump kan skrivas:

$$P = P_0 \left(\frac{t}{k_v} + 1 \right)$$

P = Avgiven värmeeffekt

P₀ = Avgiven värmeeffekt vid 0°C utetemperatur och vid valfri kondenserings- eller framledningstemperatur.

t = Utetemperatur (°C)

k_v = Konstant som anger vid vilken extrapolerad temperatur (ändrat tecken) som värmepumpen avger P = 0 (°C).

Den tillförda eleffekten till värmepumpen kan skrivas:

$$P_e = P_{e0} \left(\frac{t}{k_e} + 1 \right)$$

P_e = Tillförd eleffekt

P_{e0} = Tillförd eleffekt vid 0°C utetemperatur och vid valfri kondenserings- eller framledningstemperatur. För att eleffekten skall bli jämförbar med värmeeffekten vid beräkning av värme-

faktorn så skall man använda samma kondenserings- eller framledningstemperatur.

k_e = Konstant som anger vid vilken extrapolerad utetemperatur (ändrat tecken) som $P_e = 0$ ($^{\circ}\text{C}$). k_e är större än k_v .

Beroende på valet av konstanter får formlerna ett visst giltighetsområde som måste anpassas till dimensioneringsfallet.

Värmepump för enbostadshus

För en värmepump i enbostadshus blir $k_v = 40^{\circ}\text{C}$ och $k_e = 60^{\circ}\text{C}$ enligt uppskattningar ur diagram i (Kraft, 1979) och (Värmepump).

Med dessa värden är den avgivna värmeeffekten P resp. den till värmepumpen tillförda eleffekten P i förhållande till den vid 0°C tillförda eleffekten P_0 inritad i figur 4.1. De inritade linjerna anger också ungefärligt giltighetsområde.

De relativa effekterna i figur 4.1 ger en värmefaktor på 2.3 vid 0°C utetemperatur. Värmefaktorn vid varierande utetemperatur är inritad i figur 4.2. Vid drift i Stockholm antas en årsvärmefaktor på 2.2.

En värmepump som finns på svenska marknaden, avger $P = 6$ kW vid $t = 0^{\circ}\text{C}$, och 50°C framledningstemperatur. Priset är ca 40000 kr. I avgiven effekt räknas in avgiven värme till varmvattnet och till ventilationsluften. I (Glas, 1975) anges investeringskostnaden per effektenhet för en värmepump vid -5°C utetemperatur till 300 kr/kW. Denna kostnad som gäller 1975 räknas upp till nuvärde ca 1500 kr/kW. Räknas den sedan om till $t = 0^{\circ}\text{C}$ blir den 1300 kr/kW.

För ovan nämnda värmepump med priset ca 40000 kr antas att den fasta kostnaden A är 30000 kr. Det ger $B = 1700$ kr/kW vid 0°C .

Beräkningen visar att B vid 0°C kan ligga mellan 1300 och 1700 kr/kW. B vid 0°C sätts därför till 1500 kr/kW värme.

B vid valfri dimensionerande utetemperatur kan skrivas:

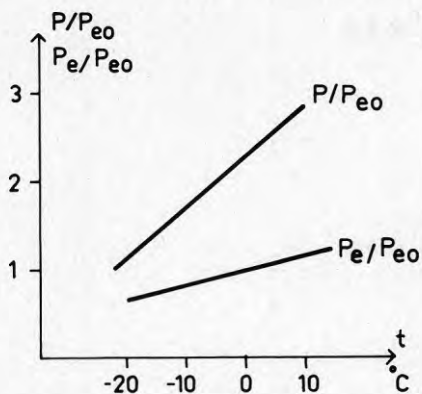
$$B = \frac{1500}{\left(\frac{t}{40} + 1\right)}$$

Detta uttryck ger ett högre pris per effektenhet åt en värmepump som avger sin dimensionerande effekt vid en lägre utetemperatur. B enligt ovanstående uttryck är uppritad i figur 4.3.

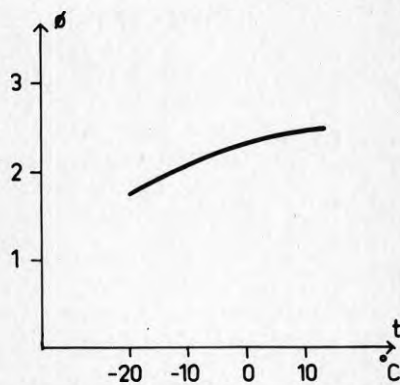
Enbostadshusvärmepumpens kostnadsfunktion blir därmed:

$$K_{VP} = 30000 + \frac{1500}{\left(\frac{t}{40} + 1\right)} P$$

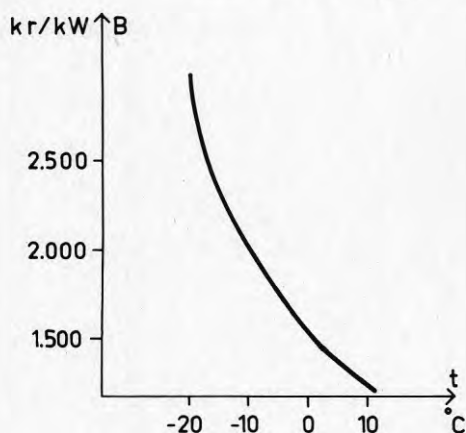
Värmepumpens investeringskostnad enligt ovanstående kostnadsfunktion för värmepumpen installerad i referensbostadshuset vid varierande dimensionerande utetemperatur visas i figur 4.4.



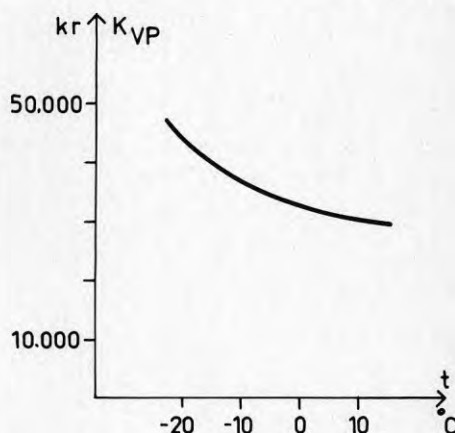
Figur 4.1 Avgiven värmeeffekt P resp. tillförd eleffekt P_e i förhållande till tillförd eleffekt vid 0°C P_{e0}



Figur 4.2 Värmefaktorns utetemperaturberoende



Figur 4.3 Kostnadsfaktor B , värmepumpens effektpolis vid varierande dimensionerande utetemperatur



Figur 4.4 Investeringskostnad för värmepumpen installerad i enbostadshuset, vid varierande dimensionerande utetemperatur

Värmepump för flerbostadshus

För en värmepump i ett flerbostadshus sätts $k_v = 40$ och $k_e = 55$ vilket innebär att värmefaktorn, inom giltighetsområdet, ävtar något långsammare än för värmepumpen i enbostadshuset. Detta motiveras av den högre effekten. Med dessa värden visas i figur 4.5 den avgivna värmeeffekten resp. den tillförda eleffekten i förhållande till den vid 0°C tillförda eleffekten.

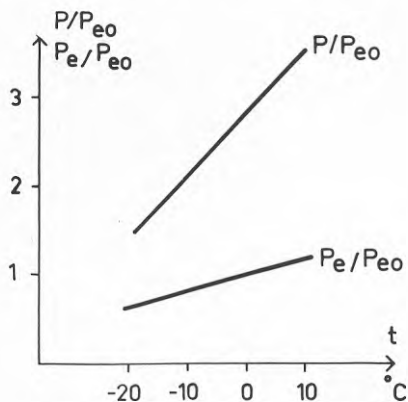
Den större effekten för värmepumpen i flerbostadshuset ger en högre värmefaktor än för värmepumpen i enbostadshuset. De relativa effekterna i figur 4.5 ger en värmefaktor på 2,8 vid 0°C utetemperatur. Värmefaktorn vid varierande utetemperatur är inritad i figur 4.6. Vid drift i Stockholm antas en årsvärmefaktor på 2,7. Vid drift i övriga undersökta klimat se tabell 6.18.

Värmepumpens pris per effektenhet B antas för flerbostadshuset vara samma som för enbostadshuset. B visas i figur 4.3.

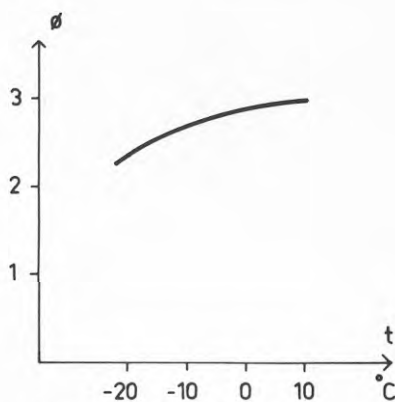
Kostnadsfunktionen för värmepumpen i flerbostadshuset sätts till samma som för enbostadshuset d v s

$$K_{vp} = 30000 + \frac{1500}{\left(\frac{t}{40} + 1\right)} \cdot P$$

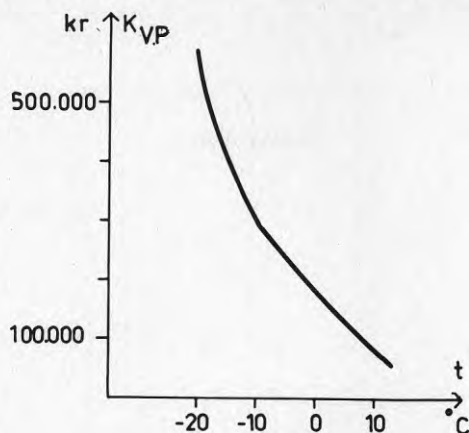
Värmepumpens investeringskostnad i flerbostadshuset enligt ovanstående kostnadsfunktion visas i figur 4.7.



Figur 4.5 Avgiven värmeeffekt P resp. tillförd eleffekt P_e i förhållande till tillförd eleffekt vid 0°C P_{e0}



Figur 4.6 Värmefaktorns utetemperaturberoende



Figur 4.7 Investeringsskostnad för värmepumpen installerad i flerbostadshuset, vid varierande dimensionerande utetemperatur

4.4 Värmelager

4.4.1 Olika lagringsformer för värme

(Detta avsnitt följer delvis Termokemisk energilagring, BFRs programgrupp EFUD 81, november 1979)

Värme kan lagras i tre former

- kapacitivt värme
 - latent värme (fasomvandling)
 - kemiskt reaktionsvärme (termokemisk reaktion)
- } termokemisk lagring

Kapacitiv lagring innebär att värme lagras genom en temperaturhöjning i det ämne som lagret består av. Den lagrade värmeenergin kan sedan tas ut vid en temperatursänkning.

Uppdelningen i olika metoder för termokemisk energilagring görs med utgångspunkt från hur lagringsämnen ifråga reagerar. Fasomvandling innebär sålunda att ämnets tillstånd ändras medan den totala kemiska sammansättningen ej förändras. Kemiska bindningar kan dock brytas, t ex i salhydrater bryts bindningarna till kristallvattnet. Vid en termokemisk reaktion däremot ändras systemets kemiska sammansättning varvid det även kan ändra fas.

Vid latent lagring utnyttjas fasomvandlingsvärmets för ett ämne. Lagringskapaciteten bestäms här av fasomvandlingsvärmets storlek. Ett exempel på fasomvandling är när vatten stelnar till is.

Kemisk reaktionsenergi kan användas för värmelagring i en reversibel kemisk reaktion. Lagringskapaciteten bestäms av reaktionsvärmets storlek.

De lagringstätheter som kan uppnås med termokemisk lagring är generellt högre än vad som kan uppnås med traditionella lagringsmedia, t ex vatten och sten. Vid utnyttjande av värmelager

i byggnader är volymen en begränsande faktor medan vikten har mindre betydelse. Lagringskapaciteten per volymenhet anges i tabell 4.3 och åskådliggörs i figur 4.8 för några olika typer av lager. Observera att värmeförlusterna har försumrats.

Tabell 4.3 Värmetäthet vid olika lagringsformer

Kapacitiv lagring,
temperaturintervall = 40°C

- vatten	0,046 MWh/m ³	160 MJ/m ³
- sten inklusive hålrum	0,013 MWh/m ³	40 MJ/m ³

Latent lagring (fasomvandling)

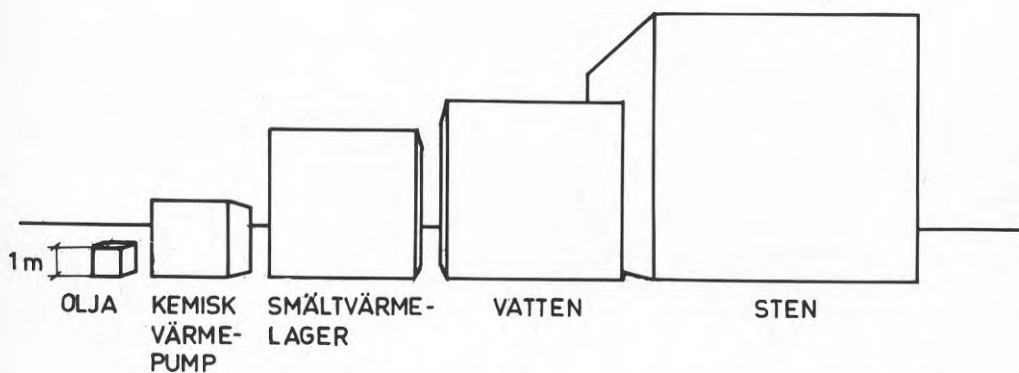
- salthydrat	0,07 MWh/m ³	240 MJ/m ³
--------------	-------------------------	-----------------------

Termokemisk reaktion
med värmepumpning

- $A \rightleftharpoons B + C$	0,5 MWh/m ³	1800 MJ/m ³
--------------------------------	------------------------	------------------------

Förbränning

- petroleum	10 MWh/m ³	36000 MJ/m ³
-------------	-----------------------	-------------------------



Figur 4.8 Ungefärliga volymer för lagring av förbränningsvärmets hos en m³ olja

4.4.1.1 Fasomvandlingslager (FO-lager)

Fasomvandlingar kan ske mellan Fast-Fast, Fast-Flytande, Fas-Gas och Flytande-Gas tillstånd.

Den omvandling som lämpar sig bäst för värmelagring är omvandlingen mellan Fast-Flytande tillstånd. Fördelen med denna omvandling är att den sker inom ett snävt temperaturintervall (idealt konstant temperatur) och att den har relativt liten volymändring mellan tillstånden.

Ämnen lämpade för smältvärmelagring bör uppfylla följande:

- ha en för ändamålet lämplig smältpunkt
- ha högt smältvärme per volymenhet
- vara stabilt, så att den lagrade värmemängden vid omvandlingstemperaturen ej minskar med tiden
- ha goda värmeöverföringsegenskaper
- vara billigt, ofarligt, och ej korrosivt

Lämpliga ämnen för smältvärmelagring, som helt eller delvis uppfyller ovanstående krav är t ex vatten, vissa organiska ämnen och salthydrater. Den typ av ämnen som förefaller mest lämpade är salthydraterna, beroende på att de har högt smältvärme i kombination med lågt pris. Ett salthydrat är en saltkristall som innehåller kristallvatten, d v s den positiva jonen är omgiven av vattenmolekyler i fast fas.

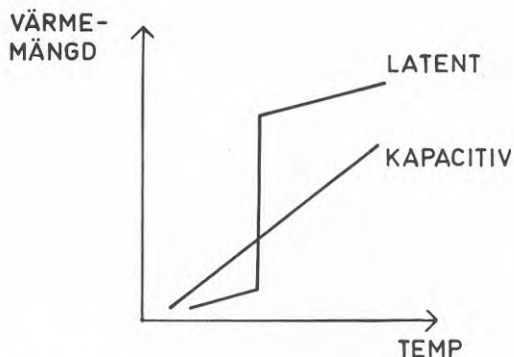
Glaubersalt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) har p g a sitt låga pris och höga smältvärme blivit det mest undersökta ämnet för smältvärmelagring. Man har här bl a problem med skiktning av smältan och det är först under de senaste åren som olika troligen fungerande lösningar på problemet har presenterats.

Kalciumkloridhexahydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) som kan framställas ur vägsalt genom tillsats av vatten, här också undersökts i stor omfattning. Det rena saltet har liknande problem med separation som glaubersalt men mindre uttalade. Man har i detta fall förbättrat egenskaperna genom tillsats av andra salter.

Tabell 4.4 Smältvärme och smältpunkt för salthydrater med densiteten ca 1500 kg/m^3

Salthydrat	Smältpunkt °C	Smältvärme kJ/kg
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Glaubersalt)	32	251
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	170
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Fixersalt)	50	203

För samtliga salthydrat kan man principiellt åskådliggöra värmeinnehållet som funktion av temperaturen enligt figur 4.9.



Figur 4.9 Lagrad värmemängd vid latent lagring i salthydrat jämfört med kapacitiv lagring i vatten

Gemensamma problem för salthydraterna är underkylning och separation av smältan.

Underkylningen innebär att man måste kyla smältan till en temperatur lägre än smältpunkten för att stelningen och därmed värmeavgivningen skall starta. Underkylningen har man i de flesta fall förhindrat genom tillsatser av andra salt som gör att kristallisationen startar snabbare.

Separation av smältan innebär att den delar upp sig i olika skikt, beroende på att olika faser i smältan har olika täthet. Vid stelningen kan sedan inte ursprungssämnet återbildas i full utsträckning. Vilket medför att det lagrade värmets inte avges vid smältpunkten, utan över ett utdraget temperaturområde. Separationen kan man förhindra eller minska genom att t ex dela in saltet i tunna vågräta skikt, tillsätta förtjockningsmedel, använda omröring eller stabilisera saltet med kemiska tillsatser som förhindrar fasuppdelningen vid smältningen.

Tunna skikt och förtjockningsmedel används för att förhindra separation hos glaubersalt i de värmelagringsplattor som finns på marknaden och är avsedda för montage i innertaket. Kemiska tillsatser används för att stabilisera kalciumkloridhexahydrat i de flesta svenska experiment med detta ämne t ex vid KTH och Studsvik energiteknik.

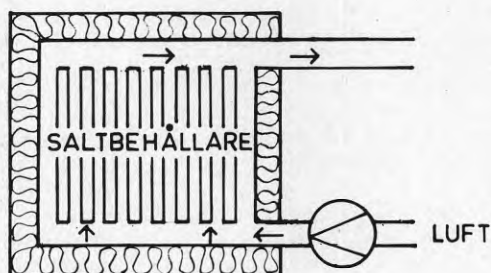
Andra problem som kan uppstå är reaktioner med och läckage genom kapslingen. Kapslingen bör utföras så att saltsmältan har små dimensioner i värmeledningens riktning vid stelningen. Annars får man för stort temperaturfall i det stelnade saltet. En lämplig form är tunna rör. Inuti rören finns saltet och utanför strömmar luft, som används för att föra värme mellan värmekälla och lager respektive från lager till värmeförbrukare.

Vid KTH har man byggt ett värmelager med kalciumkloridhexahydrat där saltet finns i stående plaströr omgivna av luft. Inuti plaströren går lodräta rör för vatten. Då lagret laddas med t ex solvärme leds det varma vattnet genom vattenrören och saltet

värms upp och smälter. Vid urladdningen strömmar luft på utsidan av plaströren och kyler ned saltsmältan så att den stelnar och avger sin värme.

Vid Studsvik energiteknik använder man också kalciumkloridhexahydrat men gör experiment med olika kapslingstyper, såsom plastpåsar laminerade med aluminiumfolie. Plastpåsar omströmmas av luft som används både för laddning och urladdning.

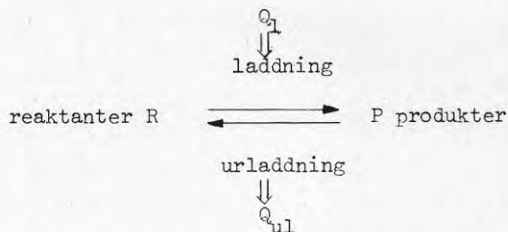
Figur 4.10 visar ett salthydratvärmelager med lodräta rör som kapsling. (Termokemisk Energilagring)



Figur 4.10 Salthydratvärmelager för varmluftsuppvärmning

4.4.1.2 Kemisk värmepump (KVP-lager)

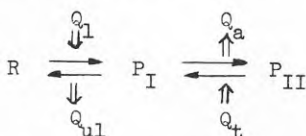
Vid en kemisk reaktion ändras ännenas kemiska sammansättning och därmed energin i de kemiska bindningarna. Denna energiändring kan vid reversibla reaktioner användas för värmelagring. Vid laddning av värmelagret omvandlas under värmetillförsel reaktanterna R till produkterna P. Under lagringen måste produkterna hindras från att reagera och återbilda reaktanterna. Detta kan uppnås genom att de olika produkterna separeras eller genom att man avlägsnar eventuella katalysatorer. Vid urladdning får produkterna P reagera med varandra och under värmeavgivning återbilda reaktanterna R.



Om en av reaktionsprodukterna kondenseras kan man med utnyttjande av en värmekälla vid låg temperatur t ex värme från uteluften eller marken, konstruera en kemisk värmepump.

Vid laddning tillförs värmnet Q_1 varvid reaktanterna R övergår i produkterna P_I . En eller flera av produkterna P_I kondenseras under värmeavgivning Q_a till produkterna P_{II} .

Om man låter den kondenserade produkten förångas före återreaktionen, under tillförsel av värme återfås hela Q_1 . Detta kan ske med hjälp av en värmekälla med låg temperatur. Processen kan då illustreras enligt följande:

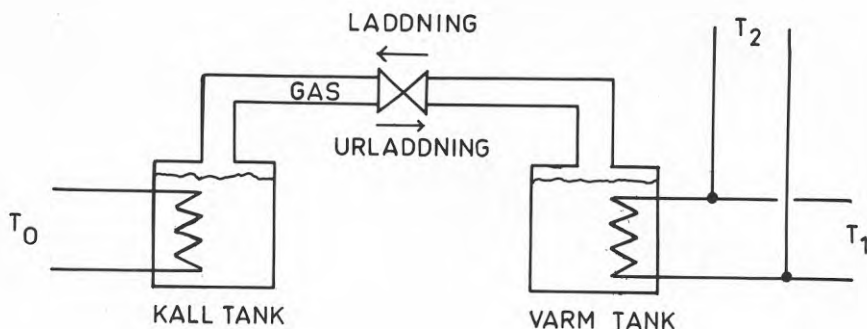


Urladdningsvärmnet Q_{ul} blir lika stort som laddningsvärmnet Q_1 , eftersom man tillfört förångningsvärmnet Q_t till den kondenserade produkten före återreaktion.

Utnyttjandet av en lågtemperaturkälla i systemet gör att värmelagret fungerar som en kemisk värmepump där värmemängden Q_t hämtas från lågtemperaturkällan och drivenergin för reaktionen lagras i själva värmelagret.

Fördelen med kemiska reaktioner för värmelagring är att lagringstätheten kan bli avsevärt större än för såväl kapacitiv som latent lagring samt att produkterna kan lagras vid rumstemperatur utan värmeförluster till omgivningen.

Den principiella uppbyggnaden för en kemisk värmepump visas i figur 4.11. Den består i exemplet av två behållare som är sammankopplade med en rörledning. Behållarna är i termisk kontakt med omgivningen T_0 , värmekällan T_2 och värmeförbrukaren T_1 via värmeväxlare. I den varma tanken finns ett ämne som absorberat arbetsmediet. Arbetsmediet transporteras vid laddning och urladdning mellan tankarna genom ledningen. I den kalla tanken kondenseras det till flytande form.



Figur 4.11 Kemisk värmepump

Vid laddning arbetar värmepumpen mellan temperaturerna T_2 och T_0 . Värme tillförs varma tanken från värmekällan. När reaktionsvärmets tillförts, lämnar arbetsmediet varma tanken och det ämne det varit absorberat i. Arbetsmediet transporteras genom rörledningen över till kalla tanken där det kondenseras under värmeavgivning till omgivningen vid temperaturen T_0 .

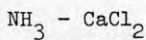
Vid urladdning arbetar värmepumpen mellan temperaturen T_1 som måste vara tillräckligt hög för uppvärmningssystemets behov och omgivningstemperaturen T_0 . Arbetsmediet förångas i kalla tanken under värmeförsel från omgivningen och leds över till varma tanken där det absorberas under värmeavgivning till uppvärmningssystemet. Värmet från omgivningen kan tas ut ur luften eller marken.

Under lagringstiden kan man förhindra att arbetsmediet går tillbaka till varma tanken genom att stänga ventilen i ledningen. Därigenom kan båda behållarna ha omgivningstemperatur och värmets lagras utan andra förluster än avkylningen av varma tanken till omgivningstemperatur.

På reaktioner lämpade för värmelagring bör man ställa följande krav:

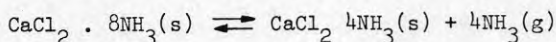
- Reaktionen skall ge lämplig temperatur på laddnings- och urladdningsvärmets.
- Reaktionen bör ha högt reaktionsvärme per vikt och volymenhet.
- Reaktionen skall vara reversibel, utan sidoreaktioner, för att tillåta upprepad användning av lagret.
- Reaktionen bör vara snabb för att medge hög laddnings- och urladdningseffekt
- De reagerande ämnena skall vara möjliga att handha med känd teknologi.
- De reagerande ämnena skall vara kommersiellt tillgängliga till låga priser.

Temperaturområdet för en kemisk värmepump, kan beroende på arbetsmedium och absorberande ämne, väljas inom ett stort intervall, ca 1000°C. Exempel på arbetsmedium som är användbara för uppvärmningsändamål är vatten, ammoniak, väte och alkoholer. Arbetsmedier för högre temperaturer är svaveloxider, koldioxid och syre. Nedanstående ämnespar har provats praktiskt och erfarenheter finns beträffande tillämpning i kemiska värmepumpar.



Ammoniak och kalciumklorid har använts i ett periodiskt arbetande sorptionskylskåp, den så kallade Normelliapparaten som tillverkades av Siemens med varunamnet Protos.

En för värmelagring lämplig reaktion är:

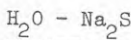


Under värmeförfärd överförs den gasformiga produkten till kalla tanken där den kondenseras under värmeavgivning.



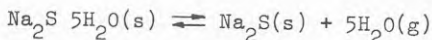
Vid urladdningen förångas först ammoniak i kalla tanken under värmeförfärd från en värmekälla med låg temperatur. Därefter absorberas ammoniak i kalciumkloriden under värmeavgivning. Reaktionen kräver en laddningstemperatur av ungefär 90°C och 920 kJ värme kan lagras per kg CaCl₂ · 4NH₃ eller 660 kJ värme per kg CaCl₂ · 8NH₃. Reaktionen maximala tryck ligger under 20 bar.

Arbetsmediet kan enkelt arbeta med uteluften som kall värmekälla eftersom ammoniak inte fryser förrän vid -78°C.

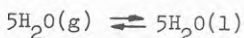


Vatten kan användas tillsammans med flera oorganiska salter och har fördelen av ett högt förångningsvärme, 2200 kJ/kg, Nackdelarna är ett lågt ångtryck 300 N/m² vid 25°C och en hög fryspunkt.

Vatten har använts tillsammans med natriumsulfid, där den sannolika värmekrävande reaktionen är:



Den gasformiga reaktionsprodukten kondenseras i kalla tanken under värmeavgivning:



Reaktionen uppges kunna lagra 3600 kJ värme per kg Na₂S vid laddningstemperaturen 70-85°C. Vid urladdning av den kemiska värmepumpen med yttjordvärmekälla beräknas den lämna ca 55°C urladdningstemperatur.

Kemiska värmepumpar av denna typ bedöms kunna få så hög lagringstäthet att det blir möjligt att transportera behållare med lagrat värme. Sådan värmeförfärd gör det möjligt att utnyttja spillvärmekällor i industrin för att ladda värmeförfärd. Det kan sedan transporteras på lastbil till förbrukaren, som kan vara ett enbostadshus eller ett flerbostadshus, där värmeförfärd ansluts till en värmekälla med låg temperatur och urladdas. Det urladdade värmeförfärd sänds sedan tillbaka till spillvärmekällan för omladdning.

System som arbetar med ammoniak har bl a provats på Inst.f.Fysikalisk Kemi på KTH.

System som arbetar med vatten och natriumsulfid undersöks av Tepidus AB. De har i laboratorium provat egenskaperna vid upprepad användning av värmeförfärd. En modell har genomgått ca 100 cykler utan försämrade egenskaper. För närvarande provar man ett värmeförfärd i full skala i ett enbostadshus. Värmeförfärd är 7 ton natriumsulfid, med en beräknad kapacitet av 700 kWh. Systemet laddas för närvarande med solenergi och skall klara uppvärmningen av enbostadshuset under vintern 80-81.

Ett annat värmelager enligt system Tepidus skall provas i en verkstadslokal. Kapaciteten är 40000 kWh och kommer också att tas i drift under vintern 80-81. (Termokemisk Energilagring 1979)

4.4.2 Lagerkostnader

För att kunna avgöra lagrets dimensionerande urladdningstid erfordras uppgifter om lagerkostnaden, enligt en kostnadsfunktion med beteckningar enligt kapitel 3.5.

$$K_L = E + F Q_L$$

Det är naturligtvis svårt att i nuläge avgöra kostnaden för värmelager som inte är kommersiella eller kanske inte ens har byggts i prototyp. Det är däremot möjligt att med hjälp av ungefärliga kostnader kunna få en uppfattning om lagrens användbarhet.

Till själva lagerkostnaden kommer en inte oväsentlig kostnad för utrymmet i själva byggnaden. Värmelagret kommer att reducera den tillgängliga ytan för boende och andra aktiviteter, och i nybyggnation måste man göra byggnaden större för att få samma bostadsyta som utan värmelager.

Följande har antagits:

1. I flerbostadshus och enbostadshus med källare finns sekundära utrymmen alltid tillgängliga, varför det extra utrymmesbehovet ej belastas från kostnadssynpunkt.
2. I enbostadshus utan källare saknas oftast sekundära utrymmen varför det extra utrymmesbehovet reducerar bostadsytan. Denna reduktion värderas till 1500 kr/m² golvyta.

4.4.2.1 Kostnader för fasomvandlingslager (FO-lager)

(Hedman, 1979) och (Hedman m fl, 1979) anger priser för tänkta fasomvandlingslager för solvärme i kombination med varmluftsuppvärmning. (Heat-Pack, 1979) anger försäljningspriser för värmelagringspåsar, avsedda att placeras i innertaket för att höja byggnadens värmekapacitet.

Enligt (Hedman m fl, 1979) kommer ett lager med värmeinnehållet 300 kWh mellan 24°C och 50°C kommer att kosta 5700 kr. Det lagrade saltet består av stabiliserad CaCl₂ · 6H₂O och har inklusive luftkanaler, isolering och konstruktionsmaterial volymen 4,8 m³. Används lagret tillsammans med en värmepump är det en fördel att endast utnyttja smältvärmnet vid konstant temperatur, vilket reducerar värmeinnehållet med 20 % till 240 kWh. Värmetätheten blir då 50 kWh/m³.

Detta lager har en specifik kostnad av 24 kr/kWh lagrad värme vid smältpunkten. Den specifika investeringskostnaden för en annan lagerkonstruktion anges i samma referens till 65 kr/kWh lagrad värme vid smältpunkten i ett lager med värmeinnehållet 100-150 kWh. Enligt Amerikanska undersökningar som citeras i (Hedman, 1979) ligger den specifika investeringskostnaden mellan 50-100 kr/kWh för Na₂S₂O₃ · 5H₂O - lager i storleken 73 kWh

medan ett $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ -lager kostar ca 33 kr/kWh i storleken 292 kWh.

På den svenska marknaden saluförs i dag påsar med Glaubersalt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) där smältpunkten sänkts från 32°C till 23°C genom tillsats av andra salt. Påsarna kostar ca 140 kr/m² exklusive mervärdesskatt och frakt. De är 20 mm tjocka i format 300 x 300 eller 300 x 600 mm och har ett ytterhölje av plastlaminat med aluminiumfolie. Saltmassan ligger i enkla eller dybbila skikt åtskilda med mellanmembran. De kan lagra 0,6 kWh/m², vilket ger en specifik investeringskostnad på 230 kr/kWh lagrad värme för enbart saltpåsen. Påsarna kan lagra 30 kWh/m³ vilket endast är en tredjedel av den teoretiska värmeförbehållningen på ca 95 kWh/m³.

Som synes uppvisar den specifika investeringskostnaden en stor spridning. För att få en uppfattning om den teoretiskt lägsta specifika investeringskostnaden studeras kostnaden för enbart saltet. Enligt (Hedman, 1979) är den specifika investeringskostnaden för enbart saltet 9 kr/kWh för $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ och 15 kr/kWh för $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Priserna gäller 1978 vid köp av minst 1 ton salt. För att saltet skall kunna användas till värmelagring tillkommer kostnader för stabilisering, modifiering, kapsling, konstruktionsmaterial och isolering. Dessutom tillkommer kostnader för installation, reglerutrustning och anslutning som kan anses vara oberoende av värmeförbehållningen.

För att få en utgångspunkt för det fortsatta arbetet sätts den specifika investeringskostnaden till 50 kr/kWh och värmeförbehållningen till 50 kWh/m³.

Med hänsyn till den stora osäkerheten i pris kan denna kostnad anses gälla för flera olika salttyper med olika smältpunkt. När man bestämt sig för smältpunkt och därmed för salt kan man göra en bättre kostnadsuppskattning.

Fasomvandlingslagrets kostnadsfunktion sätts till:

$$K_L = 2000 + 50 Q_L \quad E = 2000 \text{ kr} \quad F = 50 \text{ kr/kWh}$$

Installeras lagret i ett enbostadshus utan källare tillkommer kostnad för golvyta. Antas lagret vara 2 m högt blir utrymmesbehovet 1 m³/100 kWh plus en värmemängdsberoende del på 0,25 m² för anslutningar. Enligt ovan värderas golvkostnaden till 1500 kr/m².

Golvkostnaden blir: $400 + 15 Q_L$

Den totala lagerkostnaden i enbostadshuset blir därmed:

$$K_L = 2400 + 65 Q_L$$

4.4.2.2 Kostnader för kemiska värmepumpar (KVP-lager)

För kemiska värmepumpar finns det mycket lite underlag för kostnadsbedömning. Den enda prisuppgift som framkommit gäller för system Tepidus i storskalig användning. Man anger priset för saltbehållare inklusive salt och värmeväxlare till 5 kr/kg torrt salt. Ett kg torrt salt kan lagra 1 kWh värme och lagret uppges få en värmeförbehållning på 0,5 kWh/dm³. Detta ger en specifik investeringskostnad på 5 kr/kWh. Eftersom vi här kommer att använda mindre lager-

storlekar sätts den specifika investeringskostnaden till 10 kr/kWh. Den teoretiskt lägsta specifika investeringskostnaden för enbart saltet, är ca 2 kr/kWh. Eftersom kemiska värmepumpar endast finns i prototyp är prisuppskattningen behäftad med osäkerheter. Den framtida utvecklingen av systemet kommer att ge en bättre uppfattning om kostnaderna. Den del av lagerkostnaden som är oberoende av värmeinnehållet är större för en kemisk värmepump än för ett fasomvandlingslager. Den kemiska värmepumpen behöver förångare, vakuumpump och mer invecklad regler- och styrutrustning. Den fasta kostnaden sätts till 6000 kr.

Lagerkostnaden för en kemisk värmepump blir:

$$K_L = 6000 + 10 Q_L$$

Vid installation i ett enbostadshus utan källare tillkommer enligt ovan kostnaden för golvytan. Om lagret är 2 m högt blir utrymmebehovet $1 \text{ m}^2/1000 \text{ kWh}$. Den golvyta som inte beror av den lagrade värmemängden sätts till $0,5 \text{ m}^2$ p g a utrymmebehovet för förångare o d.

Golvkostnaden blir då: $800 + 1,5 Q_L$

Den totala lagerkostnaden i enbostadshus blir:

$$K_L = 6800 + 11 Q_L$$

Nackdelen med system, som använder vatten som arbetsmedium, är att man får reducerad effekt vid förångningstemperaturer under 0°C . Vid lägre förångningstemperaturer skulle man kunna använda en kemisk värmepump med NH_3 som arbetsmedium och Ca_2Cl som absorberande ämne. För en värmepump av denna typ finns ingen kostnadsuppskattning.

4.5 Eltariffer

Vid utformningen av tariffer har man som mål att varje abonnent eller abonnentgrupp skall betala det pris för elkraften som står i överensstämmelse med den kostnad som abonnenten åsamkar elleverantören.

Nedan beskrivs de två huvudtyperna av eltariffer nämligen effekttariffen respektive säkrings- eller hushållstariffen.

4.5.1 Effekttariffer

Den tariff som bäst återger kraftproducentens kostnader är effekttariffen, som används av större förbrukare. Den består av fyra olika avgiftselement.

Den fasta avgiften (Fta) skall täcka konsumentkostnaden som utgörs av kostnader för avläsning, debitering, mätning etc.

Abonnemangsvavgiften (Aa) skall täcka lokalnätskostnaden som är kapacitetsberoende och återger kostnaden för de nätdelar som abonnenten i stort sett utnyttjar ensam. Det som bestämmer abonnemangsvavgiften vid större leveranser är medelvärdet av de två högsta månadsvärdena av entimmeseffekten, dock lägst 90 % av abonnerad effekt.

Högbelastningsavgiften (Ha) skall täcka höglastkostnaden för de centrala nätdelarna samt kostnaden för energiproduktion under höglasttid. Avgiften baseras på medelvärdet av de fyra högsta månads effekterna uppmätta under 6-timmarsperioder, dock lägst 25 % av abonnerad effekt.

Energiavgiften skall täcka låglastkostnaden som återspeglar de rörliga produktionskostnaderna - inkl förluster - under låglasttid. De rörliga produktionskostnaderna är lägre sommartid än under låglasttid höst-vinter-vår varför lägre energipriser gäller för månaderna maj-augusti.

För beräkningsexemplet används effekttariff för lågspänning N4. Trollhätte kraftverk, Motala kraftverk, Älvkarleby kraftverk, vilken återges i tabell 4.5. (Eltariffer 1980)

Tabell 4.5 Effekttariff för lågspänning, N4

Fast avgift:	950 kr/år
Abonnemangsavgift:	45 kr/kW (1 h) år
Högbelastningsavgift:	270 kr/kW (6 h) år
Energiavgift, maj-augusti:	6,8 öre/kWh
övrig tid:	7,8 öre/kWh
Avgifterna exkl energiskatt:	(4 öre/kWh)

Till samtliga avgifter tillkommer ett indextillägg i %: 0,2 (K-415)-7. K är det till närmaste heltal avrundade medelvärdet för ifrågavarande år av konsumentprisindex med 1949 som basår.

Till energipriset läggs: 0,27 (C-3,5) öre/kWh. C är det med två decimaler angivna medelpriset i öre/kWh för de större elföretagens sammanlagda oljeinköp under kalenderåret enligt Statistiska Centralbyrån.

Det har föreslagits (Lundberg, 1979) att effektagiften (högbelastningsavgiften) skulle räknas på medelvärdet av de åtta vinter månaderna september-april istället för som nu de fyra högst belastade. Under sommaren skulle inga effektagifter utgå. Denna förändring skulle medföra att vintermånaderna som har högt effekttag får mindre inverkan på effektagiftens storlek. Denna taxeförändring gynnar uppvärmningssystem som använder eltillsats under vintern.

Detta tariffsystem har sin begränsning i den komplicerade mätutrustningen och används först när effektbehovet är större än 100 à 500 kW. För att få en enkel mätutrustning och enkel debitering för de mindre abonnenterna har man tillgripit stora förenklingar i de så kallade hushållstarifferna.

4.5.2 Hushållstariffer

Vid konstruktionen av hushållstariffen har man fört samman högbelastningsavgiften och energiavgiften till en energiavgift, medan abonnemangsavgiften kvarstår. Man har gjort två huvudtyper:

- I. Enkeltariff som används för normal förbrukning för hushållsändamål. Dessa förbrukare har mycket goda sammanlagringsegenskaper, varför eldistributörens kostnad för det lokala nätet blir förhållandevis låg.

Mellantariffen används för abonnenter med lång utnyttjningstid, t ex för elvärmade hus. Den har en dubbelt så hög abonnemangsavgift som enkeltariffen för samma abonnerade effekt, men en lägre energiavgift, vilken är satt så att elleverantören skall få full kostnadstäckning vid en belastning som motsvarar elvärme.

- II. Dubbeltariffen är en specialtariff för abonnenter med ackumulerande elvärme, där man har delat upp energiavgiften i en dagavgift mellan 06-22 och en nattavgift mellan 22-06. För denna tariff tillkommer en fast avgift för att täcka kostnaden för den mera komplicerade avläsningsutrustningen.

Till dessa avgifter kommer en i steg effektberoende engångsavgift vid nyanslutning eller vid utökning av abonnemanget.

I beräkningsexemplet används mellantariffen enligt tabell 4.6. Genom sin lägre energiavgift lönar sig denna vid elenergiököp över en viss kvantitet.

Tabell 4.6 Säkringstariff för lågspänning, M4

Energipris: 15 öre/kWh		Energiskatt: 4 öre/kWh		
Abonnemangs- klass	Mätar- säkring (Ampère)	Effekt (kW)	Fast avgift (kr)	Vid köp över (kWh/år)
1	16	10,5	800	10000
2	20	13,2	1040	13000
3	25	16,5	1340	16800
4	35	23,0	1940	24300
5	50	33,0	2800	35000

Vid anslutning tillkommer en engångsavgift som för abonnemangsklass 1-4 är 4000 kr och för 5-8 7000 kr. (Eltariffer, 1980)

Det har föreslagits bl a i (Cleverdal, 1979) att de elvärmeabonnenter som täcker en del av sitt värmebehov med värmepump skulle få betala en extra avgift på mellan 380-500 kr/år. Denna extra avgift verkar inte längre vara aktuell.

Ett annat förslag (Lundberg, 1979) är att införa en sommar-vintertaxa med lägre energiavgift på sommaren än på vintern. En sådan taxa skulle vara lätt att införa genom att ha avläsningar på vår och höst.

5 SYSTEMLÖSNINGAR

Figur 5.1 och 5.2 visar exempel på systemlösningar för värmepump kombinerad med fasomvandlingslager respektive kemisk värmepumplager.

Funktionen för systemet värmepump med fasomvandlingslager är följande:

Vid normal drift går vattnet i radiatorkretsen genom värmepumpens kondensator via ventil 1, ventil 2 är stängd, och genom reglerventilen 3 som styr framledningstemperaturen till önskat värde. Värmepumpens kondensator och uppvärmningskretsen har så stor värmekapacitet att man i enbostadshuset kan använda on-off-reglering vid dellastkörning.

Vid laddning av värmelagret stängs ventilen 1 och ventilen 2 öppnas, varvid temperaturen på vattnet efter kondensorn styrs till en temperatur överstigande värmelagrets laddningstemperatur. Genom reglerventilen 3 fås ändå önskad framledningstemperatur till radiatorerna. Värmelagrets laddnings-URLaddningstemperatur väljs så att den maximalt erforderliga framledningstemperaturen överskrids under dagen med dimensionerande värmebehov. Vid urladdning av lagret är ventilen 1 stängd och ventilen 2 öppen, som vid laddning, men nu förmår inte värmepumpen höja vattentemperaturen över lagrets laddningstemperatur utan vattnets temperatur höjs i stället till maximalt erforderlig framledningstemperatur i värmelagret.

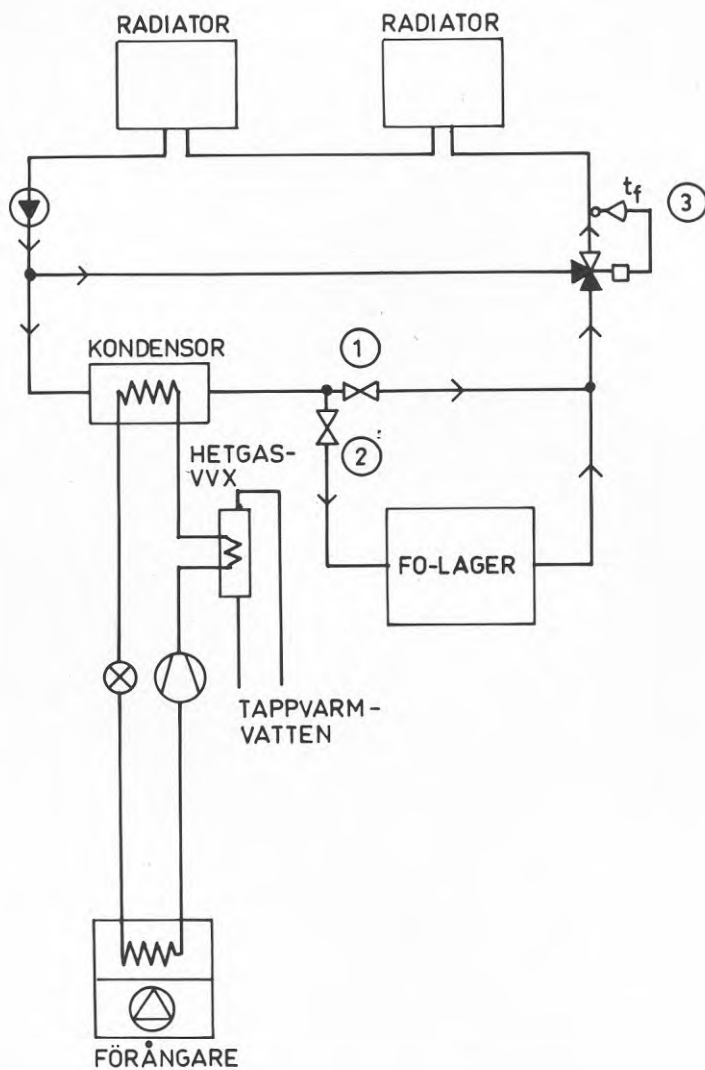
Varmvattnet värms med köldmediets överhettningvärme efter kondensorn.

Vid användning av en kemisk värmepump reglerar man på i princip samma sätt. Det kan dock uppstå avsevärda olägenheter om den kemiska värmepumpen använder uteluften som värmekälla. Den kemiska värmepumpen kräver vid laddning att temperaturskillnaden mellan kalla och varma tanken överstiger en viss nivå. Vid urladdning ger den kemiska värmepumpen tillbaka ungefär samma temperaturskillnad mellan varma och kalla tanken. Eftersom man laddar vid en högre utetemperatur än vid urladdning så kommer den erforderliga laddningstemperaturen att överskrida urladdningstemperaturen med ungefär samma temperatur som utetemperaturskillnaden mellan laddning och urladdning. Detta gör att man måste höja kondenseringstemperaturen till mer än vad värmepumpar i allmänhet klarar av.

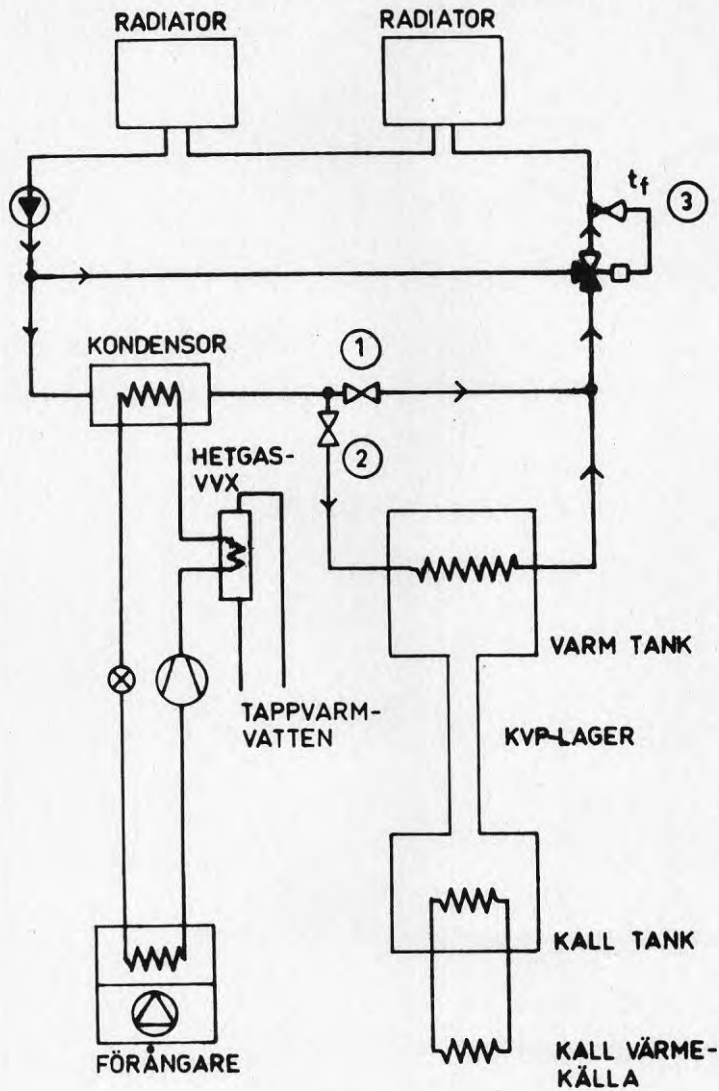
Använder man marken som värmekälla för den kemiska värmepumpen så kommer man ifrån denna olägenhet, och laddning och urladdning kan ske vid ungefär samma temperatur.

Värmelagret laddas första gången under uppvärmningssäsongen på hösten, när risken för sammanhängande köldperioder ökar. Denna tidpunkt bestäms av husägaren som startar laddningsautomatiken. Laddningsautomatiken ser sedan till att lagret hålls fulladdat genom en laddning varje dag som styrs av t ex tidur eller av avfrostningen. Att lagret är fulladdat kontrolleras genom att vattentemperaturen efter lagret överstiger lagrets laddningstemperatur. På våren urladdas lagret genom att värmen avges till

radiatorrktsen. Urladdningen startas av husägaren, när risken för köldperioder har minskat. Lagret är urladdat under sommaren för att minska värmeförlusterna.



Figur 5.1 Principiellt kopplingsschema för värmepump kombinerad med fasomvandlingslager (FO-lager)



Figur 5.2 Principiellt kopplingschema för värmepump kombinerad med kemisk värmepumplager (KVP-lager)

6 UTVÄRDERING

6.1 Allmänna förutsättningar

I det följande genomförs en teknisk-ekonomisk utvärdering, dels genom principiella resonemang utgående från kostnadsfunktionerna och dels genom numeriska exempel. Systemet med kemisk energilagring jämförs med alternativet att klara effektopparna med direkteltillsats. Beräkningsexemplen avser ett enbostadshus och ett flerbostadshus.

I beräkningsexemplet för enbostadshuset görs optimeringsberäkningen för två fall, dels att värmepumpens effektkostnad B (kr/kW) sätts konstant lika med $B(x)$ respektive $B(y)$ i en omgivning till de dimensionerande drifttiderna x respektive y , dels att värmepumpens effektkostnad B (kr/kW) sätts till en funktion av x respektive y . Beräkningen görs för dessa båda fall för att se hur förenklingen att B är konstant inverkar på resultatet.

För flerbostadshuset görs optimeringsberäkningen enbart för konstant B , eftersom uttrycken för x respektive y blir för komplicerade då man tar med termerna för abonnemangs- och högbelastningsavgiften. Avvikelsen, gentemot att låta B vara en funktion av x eller y , kan bedömmas med hjälp av jämförelsen mellan de båda beräkningsmetoderna för enbostadshuset.

6.2 Enbostadshus

6.2.1 Förutsättningar

De system som jämförs är dels en optimalt dimensionerad värmepump med kemiskt värmelager och dels en optimalt dimensionerad värmepump med elektrisk tillsatseffekt som dimensionerats för att täcka hela det maximala effektbehovet.

Vid användning av värmepump i enbostadshus medför en installation av värmelager endast i undantagsfall att anslutningsavgiften ändras. Detta eftersom enbostadshusets maximala effektbehov för uppvärming endast uppgår till hälften av den lägsta anslutningseffekten. Vid optimeringen av de två system som skall jämföras tas därför ingen hänsyn till effektkostnaden.

Enligt kap 3 är den totala årskostnaden med lager:

$$K_{TL} = a (A + BP(x) + E + FQ_L) + E_I Q$$

$$Q_L = \int_0^x P(\tau) - P(x) d\tau \quad x = \frac{B}{F}$$

Den totala årskostnaden med eltillsats:

$$K_{TEL} = a (A + B P(y) + C + D P(0)) + E_I Q + (E_{II} - E_I) Q_T$$

$$Q = \int_0^1 P(\tau) d\tau \quad Q_T = \int_0^y P(\tau) - P(y) d\tau$$

$$y = \frac{a B}{E_{II} - E_I}$$

Enligt kap 4 är:

$$A = 30000 \text{ kr} \quad B = \frac{1500}{\frac{t}{40} + 1} \text{ kr/kW}$$

$$C + D P(0) = 3000 \text{ kr}$$

För fasomvandlingslager är:

$$E = 2400 \text{ kr} \quad B = 65 \text{ kr/kWh}$$

För kemisk värmepump är:

$$E = 6800 \text{ kr} \quad F = 11 \text{ kr/kWh}$$

För båda alternativen gäller:

$$a = 0,1 \text{ l/år} \quad E_{II} = 0,19 \text{ kr/kWh inkl elskatt}$$

$$\emptyset = 2,2 \quad E_I = 0,075 \text{ kr/kWh inkl elskatt}$$

$$P(x) = k (t_{in} - t_x) + P_{vvp} \quad t_{in} = \text{innetemperatur}$$

$$P(y) = k (t_{in} - t_y) + P_{vvp} \quad t_x, t_y = \text{utetemperaturer}$$

$$k = \text{husets effektbehov per } ^\circ\text{C, kW}/^\circ\text{C}$$

P_{vvp} = den effekt som värmepumpen avger till varmvattnet i dimensioneringspunkten x eller y.

Vid optimeringen av eltillsatsalternativet väljs utetemperatur- en enligt NÅR och för lageralternativet enligt EÅR. Det totala energibehovet Q kan väljas enligt NÅR för båda alternativen. Här ingår i Q värmen som värmepumpen avger till varmvattnet. Den direkta elenergin till varmvattnet sätts lika stor för båda alternativen och kan läggas till i efterhand om man önskar jämföra totala kostnader och inte bara skillnader.

Lagerstorleken Q_L väljs för EÅR.

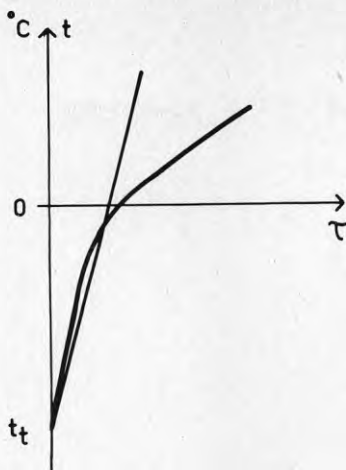
6.2.2 Översiktlig jämförelse mellan värmepump med kemiskt värme- lager och värmepump med direkteltillsats i enbostadshus

Som ett första steg i utvärderingen studeras de principiella skillnaderna för att ge en uppfattning om hur de olika klimat-, byggnads- och kostnadsfaktorer inverkar. Här används NÅR för både lager- och eltillsatsalternativen.

Vid kortare varaktighetstider (τ) kan utetemperaturvaraktighetskurvan approximeras med en rät linje som funktion av tiden. Se figur 6.1 där den räta linjen ansluter väl till temperaturvaraktighetskurvan vid låga temperaturer.

$$t = t_t + k_t \tau$$

t_t ($^\circ\text{C}$) och k_t ($^\circ\text{C}/\text{h}$) är konstanter som avpassas efter den använda temperaturvaraktighetskurvan. Se figur 6.1.



Figur 6.1 Temperaturvaraktighetskurva för korta varaktighetstider

Med dessa funktioner kan totalkostnaden för lageralternativet skrivas:

$$K_{TL} = a \left(A + \frac{1500}{\frac{t_t + k_t x}{\left(\frac{-t_t}{40} + 1\right)}} \cdot (k (t_{in} - (t_t + k_t x)) + P_{vvp}) \right) + E + \frac{Fk k_t x^2}{2} + E_I Q$$

Motsvarande för eltillsatsalternativet blir:

$$K_{TEL} = a \left(A + \frac{1500}{\frac{t_t + k_t y}{\left(\frac{-t_t}{40} + 1\right)}} \cdot (k (t_{in} - (t_t + k_t y)) + P_{vvp}) \right) + C + DP(0) + E_I Q + \frac{(E_{II} - E_I) k k_t y^2}{2}$$

Totala årskostnaderna innehåller båda aA och $E_I Q$ varför dessa inte påverkar den inbördes storleken. Totalkostnaden för lager innehåller aE och eltillsats $a(C + DP(0))$ som inte påverkas vid optimeringen men vars värden ändå påverkar den inbördes storleken.

Vid optimeringen påverkas de termer som innehåller x resp y . Termen som anger värmepumpens kostnad är gemensam för båda totalkostnaderna. Det som skiljer totalkostnaderna är termerna för lagerkostnaden och kostnaden för tillsatsenergin. Båda dessa termer har samma uppbyggnad d v s de är proportionella mot kvadraten på tiden. Det är lagerkostnaden aF och kostnaden för tillsatsenergin $(E_{II} - E_I)$ som bestämmer x och y och därmed totalkostnaden och den inbördes ordningen mellan de båda alternativen.

Medtas endast de termer som påverkas vid optimeringen kan totalkostnaderna förenklat skrivas:

Lageralternativ

$$K_{TL} = g(x) + G x^2$$

Eltillsatsalternativ

$$K_{TEL} = g(x) + H x^2$$

där:

$$g(x) = \frac{a \cdot 1500}{\left(\frac{t_t + k_t x}{40} + 1 \right)} \left(k (t_{in} - (t_t + k_t x)) + P_{vvp} \right)$$

$$G = \frac{aF k k_t}{2} \quad H = \frac{(E_{II} - E_I) k k_t}{2}$$

I bilaga 1 visas att vid de optimala dimensioneringsförhållandena då K_{TL} respektive K_{TEL} har sina minimivärden gäller att om $G > H$ så är $K_{TL} > K_{TEL}$.

Detta medför att man genom att jämföra termen aE mot $a(C + DP(0))$ och G enligt ovan mot H kan avgöra vilket av alternativen som har lägst totalkostnad.

Med de tidigare antagna kostnaderna ser man att G är mellan 10 och 50 gånger högre än H beroende på om man använder kemisk värmepump eller fasomvandlingslager.

E_a ligger mellan 700 - 300 kr/år beroende på om man använder kemisk värmepump eller fasomvandlingslager.

Kostnaden $a(C + DP(Q))$ uppgår till ca 300 kr/år eftersom skillnaden mellan en elpanna med inbyggd varmvattenberedare och enbart en elektrisk varmvattenberedare är ca 3000. Båda alternativen kräver elektrisk varmvattenberedning som stöd till värmepumpens hetgasväxlar.

Denna översiktliga jämförelse visar att värmepump med kemiskt lager ger en högre total uppvärmningskostnad än en värmepump med eltillsats. I denna jämförelse har inte den lägre anslutningseffekten premierats ekonomiskt, utöver kostnaden för själva eltillsatsen, element eller elpanna, varför värme från värmelagret måste konkurrera med sitt energipris med värme från eltillsatsen.

Den översiktliga jämförelsen kan också användas för att undersöka hur kostnadsskillnaden mellan alternativen påverkas av olika faktorer.

- a En ökad annuitetsfaktor gynnar eltillsatsen, eftersom aF d v s värmelagrets årskostnad ökar. En minskning av annuitetsfaktorn med en faktor minst 10 kan ändra rangordningen mellan alternativen. Det är dock föga troligt att en sådan ändring av ränteläget kommer att inträffa.

- k En ökning av husets värmebehov har en mycket ringa inverkan till fördel för lageralternativet.
- P Den effekt som värmepumpen i verkligheten avger till varmvattnet är större för lager än för eltillsatsalternativet, beroende på att värmepumpen avger mer effekt i dimensioneringspunkten x. Detta innebär att varmvattnet kan beredas med mindre mängd direktel i lager- än i eltillsatsalternativet, vilket ger en lägre energiåtgång och därmed lägre kostnad, men denna skillnad torde vara försumbar.
- Ø $E_I = E_{II}/\phi$. En ökning av värmepumpens värmefaktor, genom förbättringar som inte ökar investeringskostnaden, gynnar lageralternativet. Eftersom elenergiförbrukningen minskar mest när ingen direkteltillsats används. Eftersom värmefaktorn endast kan bli föremål för mindre höjningar kan denna påverkan försummas.
- A,B En ökning av värmepumpkostnaden gynnar eltillsatsalternativet eftersom det har minst värmepump med nuvarande prisrelationer. En ändring av värmepumpkostnaden kan inte ändra rangordningen mellan alternativen.
- C,D En ökning av kostnaden för eltillsats, element, eller elpanna gynnar lageralternativet. En ändring kan ändra rangordningen mellan alternativen. Det är dock inte troligt att dessa priser skulle öka drastiskt utan att övriga priser följer med.
- E,F En ökning av priserna för kemiska lager gynnar eltillsatsalternativet. En sänkning av lagerpriserna skulle kunna ändra rangordningen mellan alternativen. Sänkningen i nuläge måste dock vara så stor att lagren skulle få kosta ca 1,20 kr/kWh d v s mindre än det teoretiskt möjliga lagerpriset, d v s mindre än saltpriset (2 kr/kWh för system Tepidus).
- E_{II} En ökning av elenergipriset gynnar lageralternativet, eftersom det inte använder den dyrare direkteltillsatsen. En ökning av elpriset kan ändra rangordningen mellan alternativen. I nuläge behövs det minst en 10-dubbling av elpriset för att rangordningen skall ändras.
- t_t En minskning av t_t d v s placering på en ort med lägre minimitemperatur och kallare vinter gynnar med nuvarande prisrelationer eltillsatsalternativet. Värmepumpen dimensioneras för en högre temperatur vid punkten y och är därför prismässigt mindre känslig för en sänkning av t_t .
- k_t En minskning av k_t , d v s en ökning av graddagstalet under den kalla perioden gynnar med nuvarande priser eltillsatsalternativet, eftersom det är billigare att täcka tillsatsbehovet med el än med värmelager.

Approximationen av temperaturvaraktighetskurvan med en rät linje gynnar eltillsatsalternativet eftersom det approximativa värmeinnehållet i lagret i förhållande till det verkliga värmeinnehållet blir större än det approximativa elbehovet i förhållande till det verkliga elbehovet. Lagret skall dock dimensioneras efter ett EAR, varför approximationen förbättras avsevärt. Appro-

ximationen torde sålunda inte kunna ändra rangordningen mellan alternativen.

Den översiktliga jämförelsen för enbostadshuset kan sammanfattas enligt följande:

I nuläget ger värmepump med direkteltillsats lägre total årskostnad än värmepump med kemiskt värmelager.

De faktorer som kan ändra rangordningen är priset på direkt-element eller elpannor, priset på värmelager och elenergi priset. Det behövs dock en ändring av någon av dessa parametrar i förhållande till de övriga på ca 10 ggr för att värmepump med kemiskt lager skall bli konkurrenskraftig gentemot värmepump med direkteltillsats utan någon premiering av den lägre anslutna eleffekten.

6.2.3 Beräkningsexempel med konstant effektkostnad för värmepumpen B (kr/kW) vid installation i enbostadshus

Ovanstående översiktliga jämförelse av alternativen kompletteras nedan med ett beräkningsexempel för enbostadshuset beläget i Stockholm. Avsikten med beräkningsexemplen är att få en uppfattning om hur kostnaderna förhåller sig till varandra och för att kunna se vilken besparing som kan göras om man använder kemiskt värmelager för att inte överskrida en taxegräns.

Med hjälp av varaktighetskurvorna i kapitel 3 och sambanden i kapitel 3 och 4 kan den dimensionerande drifttiden bestämmas genom passningsräkning. För fasomvandlingslagret gäller:

$$\begin{aligned}
 x = 62 \text{ h} &\Rightarrow t_x = -19^\circ\text{C} && (\text{EÅR}) \\
 B = 2850 \text{ kr/kW} & \quad x = \frac{2850}{65} = 44 \text{ h} && \quad t_x = -19,5^\circ\text{C} (<\text{DUT1}) \\
 B = 3000 \text{ kr/kW} & \quad x = \frac{3000}{65} = 46 \text{ h} &&
 \end{aligned}$$

För kemiska värmepumplagret gäller:

$$\begin{aligned}
 x = 270 \text{ h} &\Rightarrow t_x = -13,5^\circ\text{C} && (\text{EÅR}) \\
 B = 2250 \text{ kr/kW} & \quad x = \frac{2250}{11} = 205 \text{ h} && \quad t_x = -14^\circ\text{C} \\
 B = 2300 \text{ kr/kW} & \quad x = \frac{2300}{11} = 210 \text{ h} &&
 \end{aligned}$$

Således är den dimensionerande drifttiden för fasomvandlingslagret 46 h och för den kemiska värmepumpen 210 h.

För direkteltillsatsen gäller:

$$\begin{aligned}
 y = 1300 \text{ h} &\Rightarrow t_y = -1,3^\circ\text{C} && (\text{NÅR}) \\
 B = 1560 \text{ kr/kW} & \quad y = \frac{1560}{0,115} = 1360 \text{ h} &\Rightarrow & \quad t_y = -1,3^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Den dimensionerande drifttiden för tillsatsen är 1360 h.

I tabell 6.1 redovisas drifttider, värmeeffekter och värmepumpkostnader enligt beräkningarna ovan.

I de fall utetemperaturen vid den optimala drifttiden är mindre än eller lika med DUTL, behöver värmesystemet endast kunna ge en effekt som motsvarar DUTL. Således erfordras ej något lager eftersom värmepumpens dimensionerande effekt och byggnadens egen värmelagrande förmåga är tillräckligt för att klara rumstemperaturen. Det förhållande att värmepumpeffekten sjunker vid utetemperaturer lägre än i den dimensionerande punkten försummas i denna beräkning.

Eftersom utetemperaturen vid dimensionerande drifttiden är mindre än DUTL är det således ej motiverat med något fasomvandlingslager i kombination med värmepumpen då $Q_{L} = 0$ kWh. För alternativet med kemisk värmepumplager erfordras för EÅR i Stockholm ett lager på 71 kWh.

För direkteltillsatsalternativet blir direktelenergibehovet för NÅR i Stockholm 680 kWh.

Totala värmeavgivningen från värmepumpen med kemiskt värmelager blir 9000 kWh (uppvärmning) + 3000 kWh (tappvarmvatten) = 12000 kWh. Den totala värmeavgivningen från värmepumpen med direkteltillsats blir 9000 - 680 kWh (uppvärmning) + 3000 kWh (tappvarmvatten) = 11320 kWh.

Tabell 6.1 Dimensionerande drifttid, erforderlig värmepumpeffekt (värme) inklusive tappvarmvattenvärme, maximal värmeeffekt från värmelager eller direkteltillsats samt värmepumpkostnad för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL). (Konstant B)

Dimensionerande drifttid	Erforderlig värmepumpeffekt inkl P_{vvp}	Värmepumpkostnad	Max värmeeffekt från lagret eller eltillsatsen
(h)	(kW)	(kr)	(kW)
FO 46	4,5	43500	0
KVP 210	3,9	39000	0,55
EL 1360	2,5	33900	1,95

För systemen med lager är värmepumpens eleffektbehov störst i dimensioneringspunkten. Vid högre utetemperaturer kan värmepumpen visserligen momentant dra högre effekt, men genom sammanlagringen av on-off-regleringen kommer medeleffekten att göra sig gällande som belastning på elnätet.

Den momentana eleffekten till värmepumpen ligger väsentligt under den lägsta effektgränsen för säkringarna (10,5 kW), varför installation av värmepump inte medför att man behöver byta säkringar och därmed få högre abonnemangsgift.

Eleffekten för tappvarmvattenberedningen kommer också att sammanlagras på elnätet.

Denna belastning kommer att vara lika för både lager- och direkteltillsatsalternativet, varför den inte påverkar skillnaden i effektbehov mellan alternativen.

Approximationen att värmepumpeffekten är konstant mellan dimensionerande punkten och tiden $\tau = 0$ (se kapitel 3) medför att den verkliga eleffektbehovet för värmepumpen vid kortare varaktighetstider än den dimensionerande är lägre än det beräknade för värmelageralternativen. För direkteltillsatsalternativet blir det verkliga eleffektbehovet i stället större än det beräknade, beroende på att värmepumpens värmeeffekt sjunker vid lägre utetemperatur än i dimensioneringspunkten varför det behövs ökad direkteltillsats. Den högsta varaktiga belastningen på elnätet sätts för de båda värmelageralternativen lika med eleffekten till värmepumpen i dimensioneringspunkten. För alternativet med direkteltillsats sätts den högsta varaktiga belastningen på elnätet lika med eleffekten till värmepumpen i dimensioneringspunkten plus den maximala direkteltillsatseffekten. Till dessa båda effekter kommer belastningen från tappvarmvattenberedningen och hushållselen, men de antas vara lika stora för båda alternativen varför de ej tas med i jämförelsen.

I tabell 6.2 anges värmepumpens eleffektbehov i dimensioneringspunkten för enbostadshuset beläget i Stockholm. Eleffekten är värmeeffekten dividerad med värmefaktorn i dimensioneringspunkten.

Tabell 6.2 Dimensionerande utetemperatur, värmefaktor och eleffekt för värmepumpen i dimensioneringspunkten för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL), (Konstant B)

	Dimensionerande utetemperatur (°C)	Värmefaktor	Värmepumpens eleffekt (kW)
FO:	-19	1,77	2,6
KVP:	-14	1,95	2,0
EL:	-1,3	2,25	1,1

Med en årsvärmefaktor på 2,2 blir det årliga elenergibehovet inklusive tappvarmvatten:

$$\text{FO och KVP: } \frac{12000}{2,2} + 2000 = 7500 \text{ kWh}$$

$$\text{EL: } \frac{11320}{2,2} + 680 + 2000 = 7800 \text{ kWh}$$

Kostnaderna för direkteltillsatsen ger enligt kapitel 3 en merkostnad på 3000 kr utöver vad den elektriska tappvarmvattenberedaren kostar. Direkteltillsatsen och tappvarmvattenberedaren kommer således att kosta 5000 + 3000 = 8000 kr.

Samtliga behandlade uppvärmningssystem kan ha abonnemangsklassen med maxeffekten 10,5 kW eller 16 Ampere säkringar. Vilket ger abonnemangsavgiften 2S = 800 kr/år. Engångsavgiften vid anslutning är 4000 kr upp till anslutningseffekten 23 kW. (Eltariffer, 1980).

I tabell 6.3 är kostnaderna för komponenter och avgifter sammanställda. De är beräknade enligt ovan med lagerkostnaden enligt kapitel 6.2.1 Annuitetsfaktor $a = 0,1$.

Tabell 6.3 Sammanställning av totala årskostnader för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL) vid installation i enbostadshus. (B konstant)

	FO	KVP	EL
Värmepump	4350	3900	3390
Lager	0	760	
Tappvarmv. Tills.el	500	500	800
Elenergi kostnad	1430	1430	1470
Abonnemangsavgift	800	800	800
Summa (kr/år)	7080	7390	6460

Den högre kostnaden för alternativen som innehåller lagring skall vägas mot reduktionen i eleffekt. Den högsta varaktiga belastningen på elnätet blir för alternativet med fasomvandlingslager 2,6 kW, för alternativet med kemisk värmepumplager 2,0 kW och för alternativet med direkteltillsats 3,0 kW.

6.2.4 Beräkningsexempel med variabelt $B(x)$ respektive $B(y)$ vid installation i enbostadshus.

Då $B(x)$ respektive $B(y)$ är variabla blir x respektive y enligt kapitel 3.

$$x = \frac{B}{F} \left(1 + \frac{\frac{dB}{dt} P}{B \frac{dp}{dt}} \right)$$

$$y = \frac{aB}{E_{II} \left(1 - \frac{1}{\phi_y} \right)} \left(1 + \frac{\frac{dB}{dt} P}{B \frac{dp}{dt}} \right)$$

$$P = k (t_{in} - t) + P_{vvp} \quad B = \frac{1500}{\left(\frac{t}{k_v} + 1 \right)}$$

Deriveras P och B och sätts in i uttrycken enligt ovan fås x och y :

$$x = \frac{B}{F} \left(1 + \frac{t_{in} - t}{t + k_v} \right)$$

$$y = \frac{aB}{E_{II} \left(1 - \frac{1}{\phi_y} \right)} \left(1 + \frac{t_{in} - t}{t + k_v} \right)$$

Med dessa uttryck beräknas x och y på samma sätt som i beräkningsexemplet i kapitel 6.2.3.

För FO-lager: $x = 93 \text{ h}$ $t_x = -16^\circ\text{C}$ (EÅR)

För KVP-lager: $x = 370 \text{ h}$ $t_x = -11^\circ\text{C}$ (EÅR)

För EL-tillsats: $y = 1990 \text{ h}$ $t_y = 0^\circ\text{C}$ (NÅR)

Beräkning av erforderlig lagerstorlek och tillsatsenergibehov genom areaberäkning av temperaturvaraktighetskurvan, ger ett fasomvandlingslager på 19 kWh, ett kemiskt värmepumplager på 178 kWh och ett elenergibehov för direkteltillsatsen på 910 kWh.

Den totalt av värmepumpen avgivna värmen blir enligt beräknings-exemplet i kapitel 6.2.3 för fasomvandlingslager och kemiska värmepumpalternativet 12000 kWh. Den totala värmeavgivningen för värmepumpen med direkteltillsats blir: $(9000 - 910) + 3000 = 11090 \text{ kWh}$.

I tabellerna 6.4 - 6.6 redovisas motsvarande värden för variabelt $B(x)$ respektive $B(y)$ som angivits i beräkningsexemplet med konstant B i tabellerna 6.1 - 6.3.

Tabell 6.4 Dimensionerande drifttid, erforderlig värmepump-effekt (värme) inklusive tappvarmvattenvärme, maximal värmeeffekt från värmelager eller direkteltillsats och värmepumpkostnad för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL). (Variabelt B)

	Dimensionerande drifttid	Erforderlig värmepumpeffekt inkl P_{vvp}	Värmepump kostnad	Max värmeeffekt från lager eller tillsats
	(h)	(kW)	(kr)	(kW)
FO:	93	4,1	40300	0,2
KVP:	370	3,6	37500	0,8
EL:	1990	2,4	33500	2,0

Tabell 6.5 Dimensionerande utetemperatur, värmefaktor och eleffekt för värmepumpen i dimensioneringspunkten för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL) (Variabelt B)

	Dimensionerande utetemperatur ($^\circ\text{C}$)	Värmefaktor	Värmepumpens eleffekt (kW)
FO:	-16	1,9	2,2
KVP:	-11	2,0	1,8
EL:	0	2,3	1,0

Med en genomsnittlig värmefaktor på 2,2 blir det årliga elenergi-behovet för uppvärmning inklusive tappvarmvatten:

FO och KVP: Enligt kapitel 6.2.3 7500 kWh

EL: $\frac{11090}{2,2} + 910 + 2000 = 7970$ kWh

Med samma kostnader för tillsatsvärmen och i övrigt enligt tidigare (6.2.3) blir kostnadssammanställningen:

Tabell 6.6 Sammanställning av totala årskostnader för systemen med fasomvandlingslager (FO), kemisk värmepumplager (KVP) och direkteltillsats (EL) vid installation i enbostadshus (Variabelt B)

	FO	KVP	EL
Värmepump	4030	3750	3350
Lager	360	880	
Tappvarmv. tills.el	500	500	800
Energikostnad	1430	1430	1500
Abonnemangsavgift	800	800	800
Summa (kr/år)	7020	7360	6450

På samma sätt som vid beräkningsexemplet med konstant B blir den högsta varaktiga belastningen på elnätet från uppvärmningssystemet med fasomvandlingslager 2,2 kW, kemisk värmepumplager 1,8 kW och med direkteltillsats 3,0 kW.

6.2.5 Sammanfattning av beräkningsexempel för enbostadshus

Belastningen på elnätet kan minskas med ca 1 kW till en merkostnad av ca 700 (600-900) kr/år för enbostadshusägaren.

För referensenbostadshuset medför eleffektreduktionen ingen lägre abonnemangsavgift. Vid större enbostadshus kan det däremot bli aktuellt med en lägre avgift vid övergång från abonnemangsklass 2 till abonnemangsklass 1. För 2S-taxan minskar då abonnemangsavgiften med 240 kr/år. Övergången motsvarar en minskning av abonnerad eleffekt från 13,2 till 10,5 kW. Vid övergång från abonnemangsklass 3 till 2 minskar abonnemangsavgiften vid 2S-taxan med 300 kr/år. Denna övergång motsvarar en minskning av abonnerad eleffekt från 16,5 till 13,2 kW. Merkostnaden för lagret är således större än kostnadsreduktionen vid övergång till lägre abonnemangsklass.

En föreslagen extraavgift för abonnenter med värmepump på 380-500 kr/år (Cleverdal, 1979) skulle om den infördes uppgå till ca hälften av årskostnaden för det system med värmelager som krävs för att elbelastningsfördelningen skall bli så gynnsam att extraavgiften utgår.

Den föreslagna sommar-vintertaxan (Lundberg, 1979) skulle genom sitt högre elpris på vintern, något gynna lagringsalternativet, men för att rangordningen skall ändras krävs en prisändring av den i 6.2.2 nämnda storleksordningen 10 gånger, vilket inte är

aktuellt.

För att det skall bli lönsamt att installera kemiskt värmelager måste priserna på värmelager minska till ca 1,20 kr/kWh. Vilket är en 40-del av nuvarande pris för fasomvandlingslager och ca en 8-del av priset för de kemiska värmepumplagren. Det krävs m a o en sänkning under saltpriset som för fasomvandlingslager är ca 10 kr/kWh och för kemiska värmepumplager 2 kr/kWh.

Man kan tänka sig att de hus som installerar värmelager tillsammans med värmepump får ett lägre elenergipris än hus som har direkteltillsats tillsammans med värmepump. I ett sådant fall skulle elpriset för en abonnent med värmelager behöva vara ca $700/12000 = 6$ öre/kWh lägre. Här tas igen hänsyn till ändringen i elförbrukning vid ändrat optimum, utan subventionen till hus med värmelager betalas ut i form av sänkt elpris.

Lagringsalternativet blir fördelaktigare i orter med mildare klimat, vilket påpekats i kapitel 6.2.2. Rangordningen mellan alternativen kan dock ej ändras av detta skäl, vilket framgår vid studium av uttrycken för G och H (kapitel 6.2.2) där den klimatberoende faktorn k_t ingår i båda. Det har därför ej bedömts intressant att närmare undersöka förläggningsorterna Malmö och Jokkmokk.

De båda använda beräkningsmetoderna leder till ungefär samma totala årskostnader men vid en längre dimensionerande tid x eller y för den korrekta metoden med variabelt $B(x)$. Den totala årskostnaden blir dock endast något lägre med variabelt $B(x)$. För alternativet med FO-lager blir visserligen den totala årskostnaden högre med variabelt $B(x)$ är med konstant B beroende på att temperaturen i den dimensionerande punkten blir högre än DUTL och att det därmed behövs ett värmelager. Detta visar behovet av en särskild beräkning för $x = 0$ eftersom kostnadsfunktionen för lagret inte gäller här, enligt kap 3.5. Beräkningsexemplet visar att man i fortsättningen kan använda metoden med konstant B om man tar hänsyn till att den dimensionerande tiden blir något längre än de beräknade värdena.

6.3 Flerbostadshus

6.3.1 Förutsättningar

Vid utvärderingen för enbostadshuset kunde konstateras att man med god noggrannhet kan använda beräkningsmetoden med konstant B . B sätts i de följande beräkningarna konstant lika med $B(x)$ respektive $B(y)$.

Vid utvärderingen av värmepumpalternativen i enbostadshuset förekom ingen avgift som är proportionell mot den abonnerade effekten, vilket gjorde kostnadsfunktionerna överskådliga. Vid elabonnemang enligt effekttaxan blir kostnadsberäkningarna mer invecklade särskilt till följd av högbelastningsavgiften, som baseras på ett medelvärde bestående av 4 värden. Beräkningsgången för dessa värden varierar, beroende på alternativ och på dimensioneringspunktens läge. Detta gör det svårt att göra en analytisk jämförelse mellan alternativen, enligt kapitel 6.2.2. Därför har jämförelsen gjorts genom att en total årskostnad beräknats för varje alternativ, med värden på de priser och avgifter som skall

varieras.

De priser som skall undersökas är elenergipriset, eleffektpriset och priset på kemiska värmelager. För att se hur olika klimat inverkar på lönsamheten kommer en beräkning med nuvarande priser att göras för flerbostadshuset beläget i Malmö, Stockholm och Jokkmokk.

Denna typ av kostnadsberäkning, med en effekttariff, kan sägas ge en samhällsekonomisk värdering av lönsamheten med kemisk värmelagring jämfört med att använda direkteltillsats till värmepumpar. Effekttariffen är konstruerad så att den inte skall ge någon vinst för kraftbolaget. Den skall med andra ord vara kostnads-trogen. Den vinst som en värmepump med kemisk energilagring eventuellt ger kommer därför att uppstå hos konsumenten. Den vinsten är, under förutsättning att eltaxan är kostnadstrogen, även lika med den samhällsekonomiska vinsten.

I de följande beräkningarna av den totala årskostnaden har utelämnats sådana gemensamma kostnader för alternativen som hör till byggnaden t ex kostnaden för värmedistributionsystemet och för tappvarmvattenberedaren. Även underhållskostnaden har utelämnats, eftersom den antas vara ungefär lika för båda alternativen.

Kostnaderna för värmepumpar, kemiska värmelager och eltaxan har tagits från kapitel 4. Systemlösningen följer kapitel 5.

6.3.2 Metod för känslighetsanalys

Känslighetsanalysen görs så att det pris vars inverkan skall studeras ges ett nytt värde och totalkostnaden beräknas. Den nya totalkostnaden jämförs sedan med den tidigare. Denna metod används dels för att undersöka hur stora relativa prisändringar som krävs för att rangordningen mellan alternativen skall ändras och dels för att se hur känslig beräkningsmetoden är för eventuella fel i ingångsdata. De valda priserna på kemiska värmelager kan variera utan att rangordningen mellan alternativen ändras.

Man kan även räkna ut hur mycket elenergipriset måste öka för att rangordningen skall ändras. Genom att med en antagen öknings-takt beräkna när elenergipriset ökat så mycket att det är lönsamt att installera värmepumpar med kemisk värmelagring, eller göra nästa studie. Denna metod tar inte hänsyn till prisändringar under själva kalkyltiden (avskrivningstiden) utan anger endast när en kalkylperiod med ändrad rangordning infaller.

Nedan visas hur en allmän och en speciell prisökning inverkar på totalkostnaden och hur man beräknar den relativa skillnaden mellan alternativen. Den relativa skillnaden är ett lämpligt jämförelsetal vid känslighetsanalysen.

$$K_{T1} = P_{11} L_1 + P_{21} L_2 + P_{31} L_3 + \dots$$

K_{T1} = totalkostnaden vid tidpunkten 1.

P_{11} = priset för nyttigheten L_1 vid tidpunkten 1.

$$K_{T2} = P_{12} L_1 + P_{22} L_2 + P_{32} L_3 + \dots$$

K_{T2} = totalkostnaden vid tidpunkten 2.

P_{12} = priset för nyttigheten L_1 vid tidpunkten 2.

En allmän prisökning yttrar sig så att

$$P_{12} = q P_{11}, \quad P_{22} = q P_{21}, \quad \dots$$

där q är konstant.

En prisökning för nyttigheten L_1 yttrar sig så att

$$P_{12} = q_1 \cdot q \cdot P_{11}$$

där q_1 uttrycker hur mycket priset för L_1 ökar ytterligare över den allmänna prisökningen.

När man jämför skillnaden mellan två olika totalkostnader som är föremål för samma allmänna prisökning kommer skillnaden också att öka med den allmänna prisökningen.

$$\Delta K_{T1} = K_{T11} - K_{T21}$$

$$\Delta K_{T2} = (K_{T12} - K_{T22}) = q (K_{T11} - K_{T21}) = q \Delta K_{T1}$$

Skulle man använt både en allmän och en speciell prisökning vid beräkningen av den nya totalkostnaden, så hade verkan av den speciella prisökningen blivit svårare att se.

Den relativa skillnaden mellan alternativen

$$\frac{\Delta K_{T1}}{K_{T11}} \quad \text{respektive} \quad \frac{\Delta K_{T2}}{K_{T12}}$$

skulle dock ändras eftersom den allmänna prisökningen q förkortas bort.

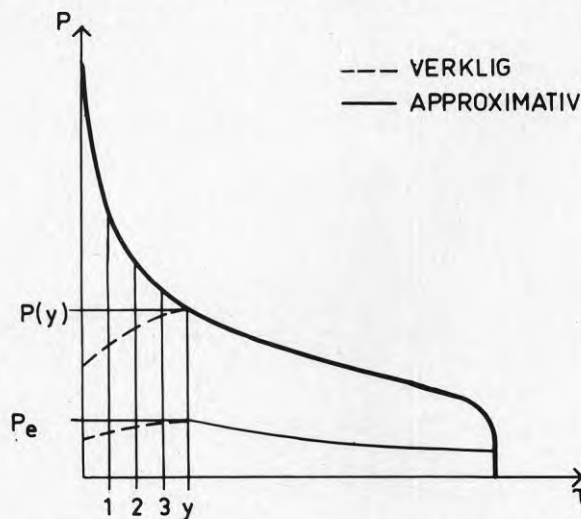
Det gäller alltså att kunna förutsäga hur mycket priset på nyttigheterna kommer att ändras i förhållande till varandra.

6.3.3 Härledning av dimensionerande drifttider x , y

6.3.3.1 Allmänt

Vid abonnemang på el enligt effekttariffen måste man ta hänsyn till elbelastningens fördelning i tiden för att kunna bestämma högbelastnings- och abonnemangsavgiftens storlek. Hur elbelastningen fördelar sig beror på utetemperatur, varmvattenvärmaningen och på hur dimensioneringspunkten väljs. De båda tillkommande avgifterna ändrar också dimensioneringspunkten, jämfört med enbostadshuset. Avgifterna ökar effektpri-set för värmepumpen, vilket man måste ta hänsyn till vid dimensioneringen genom ökning av B .

Vid härledningen av dimensioneringspunkten antas att värmepumpen avger samma värmeeffekt som vid dimensioneringspunkten även vid lägre utetemperaturer. Genom att sätta värmefaktorn konstant lika med den i dimensioneringspunkten kommer också eleffekten att vara konstant mellan dimensioneringspunkten och tiden 0 på varaktighetskurvan. I verkligheten minskar både värme och eleffekt samt värmefaktor med sjunkande utetemperatur, enligt figur 6.2.



Figur 6.2 Varaktighetskurva för värme och eleffekter

Vid dimensioneringen av systemet med lager används EÅR, medan vid beräkningen av driftkostnaden används NÅR. För systemet med direkteltillsats används NÅR både för optimering och driftkostnadsberäkning. EÅR och NÅR enligt figurerna 3.2 - 3.7 och tabell 6.7.

Tabell 6.7 Utetemperaturer vid tiden 0, 1, 2, 3 månader på varaktighetskurvan för EÅR och NÅR i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

	Malmö		Stockholm		Jokkmokk		
	NÅR °C	EÅR °C	NÅR °C	EÅR °C	NÅR °C	EÅR °C	
t_0	-12	-12	-16	-16	-30	-30	(DUT5)
t_1	-1	-3	-4	-8	-14	-19	
t_2	1	0	-1	-4	-9	-12	
t_3	3	2	1	-1	-6	-9	

6.3.3.2 Värmepump med värmelager

Högbelastningsavgiften kan skrivas:

$$Ha \left(\frac{k}{4} \sum_{i=x}^3 \frac{t_{in} - t_i}{\phi_i} + \frac{P_{vvp}}{4} \sum_{i=x}^3 \frac{1}{\phi_i} + P_{vve} \right)$$

x anger optimala punktens läge, är den kortare än en månad börjar summeringen vid x , därefter med temperaturen efter en månad, är x längre än en månad sätts termen för en månad lika med den för tidpunkten x , därefter termen vid x och termen för 2 månaders tid på varaktighetskurvan.

t_{in} innetemperaturen som måste uppehållas med uppvärmningssystemet

t_i utetemperaturen vid tidpunkten i

P_{vvp} värmeeffekt som värmepumpen avger till tappvarmvattnet i dimensioneringspunkten

P_{vve} medeleffekt som avges till tappvarmvattnet med direktel. Eftersom mätningen för högbelastningsavgiften pågår under en 6-timmarsperiod kommer direkteffekten för tappvarmvattenberedning att ligga nära medeleffekten.

Abonnemangsavgiften kan skrivas:

$$Aa \ 0,9 \left(k \frac{t_{in} - t_x}{\phi_x} + \frac{P_{vvp}}{\phi_x} + P_{vvemax} \right)$$

P_{vvemax} maximal direkteffekt som kan användas för tappvarmvattenberedning. Enligt taxan grundar sig abonnemangsavgiften på minst 0,9 gånger ansluten effekt.

Den årliga totalkostnaden för en värmepump med värmelager kan skrivas:

$$\begin{aligned} K_{TL} = & a \left(A + \frac{1500}{\left(\frac{t_x}{40} + 1 \right)} \right) (k (t_{in} - t_x) + P_{vvp}) + E + F Q_L + \\ & + Ha \left(\frac{k}{4} \sum_{i=x}^3 \frac{t_{in} - t_i}{\phi_i} + \frac{P_{vvp}}{4} \sum_{i=x}^3 \frac{1}{\phi_i} + P_{vve} \right) + \\ & + Aa \ 0,9 \left(k \frac{t_{in} - t_x}{\phi_x} + \frac{P_{vvp}}{\phi_x} + P_{vvemax} \right) + E_I (Q + Q_{vvp}) + \\ & + E_{II} Q_{vve} + Fta \end{aligned}$$

Fta fast avgift för elabonnemanget

Q_{vvp} värme från värmepumpen till tappvarmvattnet

Q_{vve} värme från elenergi till tappvarmvattnet

Den optimala drifttiden $x = \frac{B}{F} = \frac{a B}{a F}$, enligt kapitel 3.5, där $a B$ är den årliga effektberoende kostnaden i optimala punkten. Effekten bestäms av $k(t_{in} - t_x)$ varför de termer som beror av denna faktor bryts ut för sig. De anger tillsammans B .

$$\begin{aligned}
 K_{TL} = & k (t_{in} - t_x) \left(\frac{a 1500}{t_x} + \frac{Ha}{4 \phi_x} + \frac{Aa 0,9}{\phi_x} \right) + \\
 & + a \left(P_{vvp} \frac{1500}{t_x} + A + E + F Q_L \right) + Ha \left(\frac{k}{4} \sum_{i=1}^3 \frac{t_{in} - t_i}{\phi_i} \right) + \\
 & + \frac{P_{vvp}}{4} \sum_{i=x}^3 \frac{1}{\phi_i} + P_{vve} \left) + Aa 0,9 \left(\frac{P_{vvp}}{\phi_x} + P_{vve} \right) + \\
 & + E_I (Q + Q_{vvp}) + E_{II} Q_{vve} + Fta
 \end{aligned}$$

K_{TL} gäller om x är kortare än en månad. Är x längre förs ytterligare en term $\frac{Ha}{4\phi_x}$ upp innanför parentesen $k(t_{in} - t_x)$ och summeringen vid summatecknet börjar vid 2 månader.

Den optimala drifttiden x blir :

$$x = \frac{\frac{a 1500}{t_x} + \frac{Ha}{4\phi_x} + \frac{Aa 0,9}{\phi_x}}{a F}$$

Vid x längre än en månad införs ändringar enligt ovan. Blir x kortare än den dimensionerande köldperioden för huset, 5 dygn, behövs med dessa antaganden inget lager, eftersom då utnyttjas husets egen värmelagringsförmåga. Se kapitel 6.2.3.

Värmepump med direkteltillsats

För en värmepump med direkteltillsats där den optimala drifttiden är längre än 3 månader kan högbelastningsavgiften skrivas:

$$Ha \left(\frac{k}{4} \sum_{i=0}^3 t_y - t_i + \frac{k (t_{in} - t_y)}{\phi_y} + \frac{P_{vvp}}{\phi_y} + P_{vve} \right)$$

Den första termen representerar direkteltillsatsen och den andra elenergin till värmepumpen. Skulle den optimala drifttiden vara mellan 2 och 3 månader blir högbelastningsavgiften:

$$\begin{aligned}
 Ha \left(\frac{k}{4} \left(\sum_{i=0}^2 t_y - t_i + \frac{3 (t_{in} - t_y)}{\phi_y} + \frac{t_{in} - t_3}{\phi_3} \right) + \frac{3 P_{vvp}}{4 \phi_y} + \right. \\
 \left. + \frac{P_{vvp}}{4 \phi_3} + P_{vve} \right)
 \end{aligned}$$

Abonnemangsavgiften blir, baserat på att man abonnerar på en eleffekt som motsvarar det maximala effektbehovet inklusive tappvarmvattenberedning:

$$Aa 0,9 (k (t_{in} - t_0) + P_{vvmax})$$

t_0 utetemperaturen vid tiden $\tau = 0$, här DUT5.

Den totala årskostnaden för en värmepump med direkteltillsats kan om y är större än 3 månader skrivas:

$$\begin{aligned} K_{TEL} = & a \left(A + \frac{a 1500}{\frac{t_y}{40} + 1} (k (t_{in} - t_y) + P_{vvp}) + C + D P(0) \right) + \\ & + Ha \left(\frac{k}{4} \sum_{i=0}^3 t_y - t_i + \frac{k (t_{in} - t_y)}{\phi_y} + \frac{P_{vvp}}{\phi_y} + P_{vve} \right) + \\ & + Aa 0,9 (k (t_{in} - t_0) + P_{vvmax}) + E_I Q + (E_{II} - E_I) Q_T + \\ & + E_I Q_{vvp} + E_{II} Q_{vve} + Fta \end{aligned}$$

Den optimala drifttiden enligt kapitel 3.6 är:

$$y = \frac{a B - a D}{E_{II} - E_I}$$

För att få fram den årliga effektberoende kostnaden $a B$, bryts de termer som varierar med y ut och sätts proportionella mot $k (t_{in} - t_y)$. De termer som beror av direkteltillsatsens effekt bryts ut och sätts proportionella mot $k (t_y - t_0)$.

$$\begin{aligned} K_{TEL} = & k (t_{in} - t_y) \left(\frac{a 1500}{\frac{t_y}{40} + 1} + \frac{Ha}{\phi_y} \right) + k (t_y - t_0) \\ & \left(\frac{Ha}{4} \sum_{i=0}^3 \frac{t_y - t_i}{t_y - t_0} \right) + a \left(A + \frac{P_{vvp} 1500}{\frac{t_y}{40} + 1} + C + D P(0) \right) + \\ & + Ha \left(\frac{P_{vvp}}{\phi_y} + P_{vve} \right) + Aa 0,9 (k (t_{in} - t_0) + P_{vvmax}) + \\ & + E_I Q + (E_{II} - E_I) Q_T + E_I Q_{vvp} + E_{II} Q_{vve} + Fta \end{aligned}$$

Den optimala drifttiden y blir:

$$y = \frac{\frac{a 1500}{\frac{t_y}{40} + 1} + \frac{Ha}{\phi_y} - \frac{Ha}{4} \sum_{i=0}^3 \frac{t_y - t_i}{t_y - t_0}}{E_{II} - E_I}$$

Vid y mellan 2 och 3 månader, utförs ändringar enligt ovan.

6.3.4 Inverkan av ökat elenergipris

Vid utvärderingen för enbostadshuset visade det sig att ett ökat elenergipris gynnar alternativen med värmelager. Elenergipriset antas öka i förhållande till övriga priser med 1-2 % per år.

Det elpris som konsumenten betalar inkluderar en energiskatt på 4 öre/kWh. Skattens syfte är att hålla nere elförbrukningen. Det är svårt att bedömma hur energiskatten skulle utvecklas vid en så kraftig energiprisökning som i exemplet, så därför görs beräkningen utan hänsyn till skatt. Energi priset är 7,8 öre/kWh i utgångsläget. Det ökas därefter 5 gånger till 39 öre/kWh och 10 gånger till 78 öre/kWh. Flerfamiljshuset är beläget i Stockholm.

De i den totala årskostnaden ingående delkostnaderna redovisas i tabell 6.8 - tabell 6.10.

Tabell 6.8 Kostnadsammansättning och total årskostnad (kr/år) vid elenergi priset 7,8 öre/kWh

	FO-lager $x=68 \text{ h}$ $t=-19^{\circ}\text{C}$ x	KVP-lager $x=265 \text{ h}$ $t=-13^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=2700 \text{ h}$ $t=2^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	51 600	38 800	15 250
Lager		3 100	
Eltillsatsselement			3 000
Högbel. 270 kr/kW	16 400	15 800	21 100
Ab.avg. 45 kr/kW	7 050	6 600	10 200
Energi 7,8 öre/kWh	23 600	23 600	26 300
Fast avg.	950	950	950
Total årskostnad	99 600	88 850	76 800

Enligt tabell 6.8 blir den totala årskostnaden 99 600 kr/år för värmepump med fasomvandlingslager och 88 850 kr/år med ett lager bestående av en kemisk värmepump. För värmepump med direkteltillsats blir den totala årskostnaden 76 800 kr/år. Alternativet med fasomvandlingslager får så kort optimal driftstid att den under skrider husets tidskonstant 5 dygn (120 h) varför man enligt de gjorda approximationerna inte behöver använda något ytterligare värmelager utöver husets egen värmelagrings förmåga. Det alternativ som har lägre total årskostnad och som innehåller ett lager är alternativet med kemisk värmepump. I de följande beräkningarna kommer detta alternativ att jämföras med direkteltillsatsalternativet.

Med nuvarande priser uppgår skillnaden mellan alternativen till 12 050 kr/år, till fördel för direkteltillsats. Den relativa prisskillnaden blir $12\ 050/88\ 850 = 13,6\ \%$.

Tabell 6.9 Kostnadssammansättning och total årskostnad (kr/år) vid elenergi priset 39 öre/kWh

	KVP-lager x=265 h t =-13°C x	EL-tillsats y=550 h t =-6°C y
Värmepump	38 800	24 000
Lager	3 100	
El-tillsatsselement		3 000
Högbel. 270 kr/kWh	15 800	18 000
Ab. avg. 45 kr/kWh	6 600	10 200
Energi 39 öre/kWh	118 100	120 100
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	183 350	177 250

Energi priset ökas därefter 5 ggr till 39 öre/kWh och en ny optimeringsberäkning och beräkning av den totala årskostnaden görs. Se tabell 6.9. För KVP-alternativet ökar kostnaden till 183 350 kr/år och för direktelalternativet till 177 250 kr/år. Energi prisökningen resulterar i att den optimala drifttiden för tillsatselen minskar från 2 700 h till 550 h och därmed minskar mängden direktel för tillsatsen. Värmepumpkostnaden ökar och kostnaden för högbelastningsavgiften minskar för direktelalternativet. Den absoluta skillnaden blir 6 100 kr/år och den relativa skillnaden $6\,100/183\,350 = 3,3\%$. En ökning av energi priset med 5 ggr räcker inte till för att ändra rangordningen mellan alternativen, men däremot minskar både den absoluta och relativa skillnaden.

Tabell 6.10 Kostnadssammansättning och total årskostnad (kr/år) vid elenergi priset 78 öre/kWh

	KVP-lager x=265 h, t =-13°C x	EL-tillsats y=280 h, t =-3°C y
Värmepump	38 800	27 500
Lager	3 100	
El-tillsatsselement		3 000
Högbel. 270 kr/kWh	15 800	17 300
Ab. avg. 45 kr/kWh	6 600	10 200
Energi 78 öre/kWh	236 200	238 000
Fast avg.	950	950

forts Tabell 6.10

Total årskostnad	301 450	297 150
------------------	---------	---------

Vid nästa optimering och totalkostnadsberäkning ökas energipriset 10 ggr till 78 öre/kWh. Se tabell 6.10. Då ökar den totala årskostnaden för KVP-alternativet till 301 450 kr/år och för direktelalternativet till 297 150 kr/år. Energiprisökningen resulterar i att den optimala drifttiden för direkteltillsatsen minskar ytterligare, till 280 h. Den absoluta skillnaden blir 4 300 kr/år och den relativa $4\,300/301\,450 = 1,4\%$. En energiprisökning med 10 ggr är inte tillräcklig för att rangordningen mellan alternativen skall ändras, men de ligger nära varandra, relativt sett.

En ändring i elpriset inverkar sålunda mycket lite på den relativa skillnaden mellan alternativen. Detta beror på att optimeringen kompenserar för det ökade elpriset genom att använda mindre mängd direktenergi för tillsatsvärmning. Det som avgör alternativens rangordning är på samma sätt som för enbostadshuset, tillsatsenergens pris med lager ($E_I + aF$), i förhållande till elpriset E_{II} .

För att elpriset skall öka 10 ggr i förhållande till övriga priser krävs en tid enligt tabell 6.11 om elpriset ökar det angivna %-talet mer än övriga priser.

Tabell 6.11 Tid för att elenergi-priset skall öka angivet antal gånger

Elenergi-prisökning %	Tid för att energipriset skall öka		
	2 ggr (år)	5 ggr (år)	10 ggr (år)
1	69	161	230
2	35	81	110
3	24	55	80
4	18	41	60

6.3.5 Inverkan av ökade effektavgifter

Vid utvärderingen av installationen i enbostadshuset togs ingen hänsyn till effektavgifter, systemet med värmelager fick därför ingen ekonomisk fördel av sin lägre använda eleffekt. I flerbostadshuset köps elenergin enligt effekttaxan, vilket innebär att system med låg använd effekt också får lägre effektkostnader. Taxan innehåller två typer av effektavgifter, abonnemangs- (Ab.avg.) och högbelastningsavgift (Högbel.). De väntas inte öka mer än övriga priser, utan kommer troligen att minska, enligt (Lundberg, 1979). Enligt (Eltariffer, 1980) räknas de upp enbart med hänsyn till konsumentprisindex, och inte med hänsyn till oljepriset.

Vid beräkningen av den totala årskostnaden används ett elenergi-pris inklusive den nuvarande energiskatten på 4 öre/kWh, vilket ger ett elenergi-pris 11,8 öre/kWh. Flerbostadshuset är beläget i Stockholm.

Tabell 6.12 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år) med nuvarande avgifter, energipriset inklusive skatt

	FO-lager $x=68 \text{ h}$, $t=-19^{\circ}\text{C}$ x	KVP-lager $x=265 \text{ h}$, $t=-13^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=1700 \text{ h}$, $t=0,5^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	51 600	38 800	16 700
Lager		3 100	
Eltillsatselement			3 000
Högbel. 270 kr/kW	16 400	15 800	20 100
Ab.avg. 45 kr/kW	7 050	6 600	10 200
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	35 600	38 800
Fast avg.	950	950	950
Total årskostnad	111 600	100 850	89 750

Enligt tabell 6.12 får alternativet med FO-lager en total årskostnad 111 600 kr/år och med KVP-lager 100 850 kr/år. För direkteltillsats blir den totala årskostnaden 89 750 kr/år. Av lageralternativen är KVP-lager billigast, trots att den optimala drifttiden för FO-lagret är kortare än husets tidskonstant. Vilket enligt gjorda approximationer innebär att det inte behövs något FO-lager.

Skillnaden mellan KVP- och EL-alternativen är 11 100 kr/år och den relativa skillnaden $11\ 100/100\ 850 = 11,1\ \%$.

Tabell 6.13 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år) med fördubblade effektavgifter, energipriset inkl skatt

	KVP-lager $x=300 \text{ h}$, $t=-13^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=1600 \text{ h}$, $t=0^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	37 500	16 900
Lager	3 450	
Eltillsatselement		3 000
Högbel. 540 kr/kW	31 600	39 800
Ab.avg. 90 kr/kW	13 200	20 400
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	38 600
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	122 300	119 650

Abonnemangs- och högbelastningsavgifterna fördubblas till 90 resp 540 kr/kW, och en ny optimering och totalkostnadsberäkning görs. Se tabell 6.13. Denna prisökning ger ingen större ändring av de optimala driftstiderna. Den totala årskostnaden med KVP-lager blir 122 300 kr/år och för direkteltillsatsen 119 650 kr/år. Den absoluta skillnaden blir 2 650 kr och den relativa skillnaden $2\ 650/122\ 300 = 2,2\ \%$.

Tabell 6.14 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år) med tredubblade effektavgifter, energipriset inkl skatt

	KVP-lager $x=340\ h$ $t_x=-12\ ^\circ C$	EL-tillsats $y=1550\ h$ $t_y=0\ ^\circ C$
Värmepump	35 500	16 900
Lager	4 600	
Eltillsatselement		3 000
Högbel. 810 kr/kW	47 400	59 800
Ab.avg. 135 kr/kW	19 800	30 600
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	38 600
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	143 850	149 850

Abonnemangs- och högbelastningsavgiften tredubblas till 135 respektive 810 kr/kW, och en ny optimering och totalkostnadsberäkning görs. Se tabell 6.14. Inte heller denna prisökning ger någon större ändring i de optimala driftstiderna. Den totala årliga kostnaden för KVP-lagret blir 143 850 kr/år och för direkteltillsatsen 149 850 kr/år. Den absoluta skillnaden blir $-6\ 000\ kr/år$ och den relativa skillnaden $-6\ 000/143\ 850 = -4,2\ \%$.

En ökning av abonnemangs- och högbelastningsavgifterna med 3 gånger ger en ändrad rangordning mellan alternativen. Det skulle räcka med en prisökning på 2,4 gånger för att alternativen skulle få samma totala årskostnad.

Rangordningen är känslig för variationer i effektavgifterna, eftersom inte den abonnerade effekten och högbelastningseffekten kan ändras på samma sätt som behovet av tillsatsel, utan en prisändring slår igenom med nästan direkt proportionalitet.

6.3.6 Inverkan av sänkt lagerpris

För att systemet med värmelager skulle bli lönsamt i enbostads-huset, utan hänsyn till effektavgifter, krävdes en prissänkning till under vad enbart det lagrande saltet kostar.

Vid utvärderingen av installationen i flerbostadshuset kommer

effektavgifterna att förbättra lageralternativens lönsamhet, varför det troligen inte behövs så stora sänkningar av lagerkostnaden.

I beräkningen används det kemiska värmepumplagret som utgångspunkt för prisvariationen, eftersom det redan har lägst pris. Det nuvarande priset $F = 10$ kr/kWh används som utgångspunkt. Därefter halveras lagerpriset till $F = 5$ kr/kWh och en ny optimerings- och totalkostnadsberäkning görs. Slutligen används lagerpriset $F = 2$ kr/kWh. Lagerkostnaden blir då $K_L = 6000 + 5 Q_L$ respektive $K_L = 6000 + 2 Q_L$.

Vid beräkningen används elenergi priset inklusive skatt och nuvarande effektavgifter. Flerbostadshuset är beläget i Stockholm. Med nuvarande priser fördelar sig kostnaderna enligt tabell 6.15.

Tabell 6.15 Kostnadssammansättning och total årskostnad (kr/år) med nuvarande avgifter, energipriset inklusive skatt

	KVP-lager $x=265$ h, $t_x=-13^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=1700$ h, $t_y=0,5^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	38 800	16 700
Lager	3 100	
ELtillsatselement		3 000
Högbel. 270 kr/kW	15 800	20 100
Ab.avg. 45 kr/kW	6 600	10 200
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	38 800
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	100 850	89 750

Den absoluta skillnaden i total årskostnad mellan alternativen kemisk värmepumplager och direkteltillsats är i utgångsläget 11 100 kr/år. Den relativa skillnaden är 11,1 %.

Med lagerpriset $F = 5$ kr/kWh fördelar sig kostnaderna enligt tabell 6.16.

Tabell 6.16 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år)
med lagerpriset $F = 5$ kr/kWh

	KVP-lager $x=480$ h, $t=-10^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=1700$ h, $t=0,5^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	31 400	16 700
Lager 5 kr/kWh	4 850	
Eltillsatselement		3 000
Högbel. 270 kr/kW	15 500	20 100
Ab.avg. 45 kr/kW	6 200	10 200
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	38 800
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	94 500	89 750

Det nya lagerpriset förändrar inte rangordningen mellan alternativen. Den absoluta skillnaden i total årskostnad blir 3 750 och den relativa skillnaden blir $3750/94\ 500 = 4,0\ \%$.

Med lagerpriset $F = 2$ kr/kWh fördelar sig kostnaderna enligt tabell 6.17.

Tabell 6.17 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år)
med lagerpriset $F = 2$ kr/kWh

	KVP-lager $x=265$ h, $t=-5^{\circ}\text{C}$ x	EL-tillsats $y=1700$ h, $t=0,5^{\circ}\text{C}$ y
Värmepump	23 100	16 700
Lager 2 kr/kWh	5 900	
Eltillsatselement		3 000
Högbel. 270 kr/kW	14 000	20 100
Ab.avg. 45 kr/kW	5 800	10 200
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	38 800
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	85 350	39 750

Denna sänkning av lagerpriset ändrar rangordningen mellan alternativen, så att med detta lagerpris skulle det bli billigare att använda värmepump med kemisk värmepumplager än värmepump med direkteltillsats.

Den absoluta skillnaden blir - 4 400 kr/år och den relativa skillnaden $- 4\,400/85\,350 = - 5,2\%$.

Denna beräkning visar att när man tar hänsyn till effektavgifterna så behövs det inte så stor sänkning av lagerpriset för att lageralternativet skall bli lönsamt, som om effektavgifterna försummas. Gränsen för lönsamhet bör enligt denna beräkning ligga vid ett lagerpris på ca 3,50 kr/kWh. Detta är visserligen över saltkostnaden 2 kr/kWh, men under vad man räknar med att ett kemiskt värmeupplager i stor skala skall komma att kosta ca 5 kr/kWh.

Det framräknade lagerpriset för lönsamhet ligger långt under nuvarande saltpriset för fasomvandlingslager som uppgår till ca 10 kr/kWh.

6.3.7 Inverkan från klimatet

För att studera klimatets inverkan på lönsamheten för värmepump med kemiskt energilager så görs jämförande beräkningar för flerbostadshuset placerat i Malmö, Stockholm och Jokkmokk. Beräkningarna avser 1980 års prisnivå och elenergi priset inkluderar energiskatt.

Enligt kapitel 4.2 förbrukar flerbostadshuset beläget i Stockholm 400 MWh värme för uppvärmningen. Beläget i Malmö och Jokkmokk får huset en värmeförbrukning under ett normalår enligt tabell 6.18. Varmvattenförbrukningen antas vara den samma i de tre fallen.

Beroende på olika medeltemperatur under året på de olika orterna kommer även årsvärmefaktorn att ändras. Den anges i tabell 6.18.

Tabell 6.18 Graddagstal, värmeförbrukning och årsvärmefaktor i flerbostadshuset beläget i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

Ort	Graddagstal (grd)	Värmeförbrukning (MWh) exkl vvatten	Årsvärmefaktor
Malmö	3006	335	2,7
Stockholm	3570	400	2,7
Jokkmokk	5930	665	2,4

För att variationerna enbart skall bero av klimatet används samma eltaxa för de tre orterna. I verkligheten förekommer det mindre variationer i taxorna beroende på ortens läge och från vilket elverk man köper elenergin.

I tabell 6.19 anges totala årskostnaden för värmepump kombinerad med fasomvandlingslager respektive kemisk värmeupplager och för värmepump med direkteltillsats för flerbostadshus, beläget i Malmö.

Tabell 6.19 Kostnadssammanställning och total årskostnad för flerbostadshuset beläget i Malmö, med nuvarande avgifter och energipriset inklusive skatt

	FO-lager $x=52 \text{ h}$, $t_x=-13^\circ\text{C}$	KVP-lager $x=220 \text{ h}$, $t_x=-7^\circ\text{C}$	EL-tillsats $y=1740 \text{ h}$, $t_y=2^\circ\text{C}$
Värmepump	35 400	26 200	15 100
Lager		3 300	
Eltillsatsselement			3 000
Högbel. 270 kr/kW	14 400	13 700	17 900
Ab.avg. 45 kr/kW	6 400	5 900	9 500
Energi 11,8 öre/kWh	33 000	33 000	35 100
Fast avg.	950	950	950
Total årskostnad	90 150	83 050	81 550

För installationen i flerbostadshuset beläget i Malmö ger värmepump med direkteltillsats den lägsta totala årskostnaden. Därefter kommer värmepump med kemisk värmepumplager. Dyrast är alternativet värmepump med fasomvandlingslager. Den absoluta skillnaden mellan KVP- och EL-alternativet är 1500 kr/år och den relativa skillnaden 1,8 %.

För installationen i flerbostadshuset beläget i Stockholm blir den totala årskostnaden enligt tabell 6.20, vilken är identisk med tabell 6.12.

Tabell 6.20 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år) för flerbostadshuset beläget i Stockholm, med nuvarande avgifter, energipriset inklusive energiskatt

	FO-lager $x=68 \text{ h}$, $t_x=-19^\circ\text{C}$	KVP-lager $x=265 \text{ h}$, $t_x=-13^\circ\text{C}$	EL-tillsats $y=1700 \text{ h}$, $t_y=0,5^\circ\text{C}$
Värmepump	51 600	38 800	16 700
Lager		3 100	
Eltillsatsselement			3 000
Högbel. 270 kr/kW	16 400	15 800	20 100
Ab.avg. 45 kr/kW	7 050	6 600	10 200
Energi 11,8 öre/kWh	35 600	35 600	38 800
Fast avg.	950	950	950
Total årskostnad	111 600	100 850	89 750

För installationen i flerbostadshuset beläget i Stockholm ökar skillnaden mellan alternativen, till förmån för värmepump med direkteltillsats. Alternativet med fasomvandlingslager är fortfarande dyrast.

Den absoluta skillnaden mellan KVP- och EL-alternativen är 11 100 kr/år och den relativa skillnaden 11,1 %.

För installationen i flerbostadshuset beläget i Jokkmokk, blir den totala årskostnaden enligt tabell 6.21.

Tabell 6.21 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/år) för flerbostadshuset beläget i Jokkmokk, med nuvarande avgifter och energipriset inklusive energiskatt

	FO-lager x=120 h, t _x = -29 °C	KVP-lager x=405 h, t _x = -23 °C	EL-tillsats y=2300 h, t _y = -6 °C
Värmepump	124 000	72 000	23 800
Lager	2 900	7 400	
ELtillsatselement			3 000
Högbel. 270 kr/kW	23 300	20 500	26 300
Ab. avg. 45 kr/kW	9 600	7 800	12 600
Energi 11,8 öre/kWh	51 900	51 900	56 500
Fast avg.	950	950	950
Total årskostnad	212 650	160 500	123 150

För installationen i flerbostadshuset beläget i Jokkmokk ökar skillnaden mellan alternativen ytterligare till förmån för alternativet värmepump med direkteltillsats. Alternativet med fasomvandlingslager är här klart dyrast.

Den absoluta skillnaden mellan KVP- och EL-alternativen är 37 400 kr/år och den relativa skillnaden 24 %.

Det är även av intresse att jämföra den totala värmekostnaden i öre/kWh från installationer enligt de olika alternativen belägna i Malmö, Stockholm och Jokkmokk. Den totala värmekostnaden är installationens totala årskostnad dividerad med den totalt avgivna värmemängden, inklusive värmets till tappvarmvatten. I den totala årskostnaden ingår inte underhållskostnaden och kostnader för tappvarmvattenberedaren.

Tabell 6.22 Den totala värmekostnaden per kWh för installationen i flerbostadshuset beläget i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

	Värmebehov inkl vatten	FO-lager värme- kostnad	KVP-lager värme- kostnad	EL-tillsats värme- kostnad
	MWh/år	öre/kWh	öre/kWh	öre/kWh
Malmö	585	15,6	14,2	14,0
Stockholm	650	17,2	15,6	13,8
Jokkmokk	915	23,2	17,5	13,4

Tabell 6.22 visar att den totala värmekostnaden i flerbostadshuset med värmepump med direkteltillsats är ungefär konstant i hela landet, oberoende av klimat. Vilket är i överensstämmelse med tidigare beräkningar för värmepump med direkteltillsats.

Den totala värmekostnaden för värme från en värmepump med kemiskt energilager varierar däremot med klimatet. Den totala värmekostnaden från en värmepump med kemisk värmepumplager är ca 20 % lägre i Malmö än i Jokkmokk. Variationen är ännu kraftigare för värmepump med fasomvandlingslager där värmen får ca 35 % lägre kostnad i Malmö än i Jokkmokk.

Klimatet d v s temperaturvaraktighetskurvan har således stor inverkan på lönsamheten för värmepump med kemisk energilagring. Den kemiska energilagringen gynnas av temperaturvaraktighetskurvor med hög medeltemperatur över året och med liten eller smal effektopp. EÅR:ets graddagstal skall inte vara för stort i förhållande till NÅR:ets. Dessa två klimatkraV gör att t och t ligger nära varandra, vilket i sin tur innebär att värmepump^v kostnaden i lageralternativet närmar sig värmepumpkostnaden i direkteltillsatsalternativet. Det är först när värmepumpkostnaderna kommer i närheten av varandra som den lägre abonnemangs- och högbelastningsavgiften för alternativet med värmelager kan göra sig gällande.

Värmepump med kemiskt energilagringssystem är inte lönsam jämfört med värmepump med direkteltillsats på någon av de undersökta förlägningsorterna. Vid installation i Malmö är den relativa skillnaden endast 1,8 %. Detta gör lönsamheten känslig för variationer i effektavgifter och lagerpris.

För att undersöka hur en elenergi prisökning inverkar på den relativa skillnaden för installationen i ett flerbostadshus beläget i den gynnsammaste förlägningsorten Malmö, har en särskild beräkning med elenergi priset 35,4 öre/kWh gjorts. Denna ökning motsvarar en elenergi prisökning 3 gånger från elenergi priset 11,8 öre/kWh inklusive skatt eller 4,5 gånger från elenergi priset 7,8 öre/kWh exklusive skatt.

För installationen i flerbostadshuset beläget i Malmö och med elenergi priset 35,4 öre/kWh blir den totala årskostnaden enligt tabell 6.23.

Tabell 6.23 Kostnadssammanställning och total årskostnad (kr/kWh) för flerbostadshuset beläget i Malmö, med elenergi-priset 35,4 öre/kWh

	KVP-lager x=220 h, t = -7°C x	EL-tillsats y=500 h, t = -2°C y
Värmepump	26 200	19 500
Lager	3 300	
El-tillsatselement		3 000
Högbel. 270 kr/kW	13 700	16 400
Ab. avg. 45 kr/kW	5 900	9 500
Energi 35,4 öre/kWh	99 000	100 800
Fast avg.	950	950
Total årskostnad	149 050	150 150

Den absoluta skillnaden mellan alternativen blir - 1100 kr/år, vilket innebär att rangordningen mellan alternativen ändras. Den relativa skillnaden blir - 0,7 %. För att den relativa skillnaden skall bli 0 % d v s för att båda alternativen skall få samma totala årskostnad krävs en fördubbling av elpriset.

Sammanfattningsvis kan konstateras att klimatet har stor inverkan på lönsamheten för värmepump med kemisk energilagring. Den gynnas av milt kustklimat med små temperaturvariationer mellan olika år. Systemet är dock inte med nuvarande priser lönsamt på någon av de undersökta förläggningssorterna.

6.3.8 Sammanfattning

Vid utvärderingen av värmepump med kemisk energilagring installerad i enbostadshus togs ingen hänsyn till effektavgifter, vilket medförde att det krävdes mycket stora prisändringar för att lagringsalternativet skulle bli lönsamt.

Vid utvärderingen av värmepump med kemisk energilagring i flerbostadshus tas hänsyn till effektavgifterna eftersom den abonnerade eleffekten är tillräckligt stor för att man skall kunna köpa elenergi enligt effekttariff. (Se kap 4.4). Detta förändrar delvis kostnadsbilden.

Resultatet av utvärderingen har sammanfattats i figur 6.3. På y-axeln är inlagt den relativa skillnaden mellan alternativet med kemisk värmepumplager och alternativet med direkteltillsats, enligt kapitel 6.3

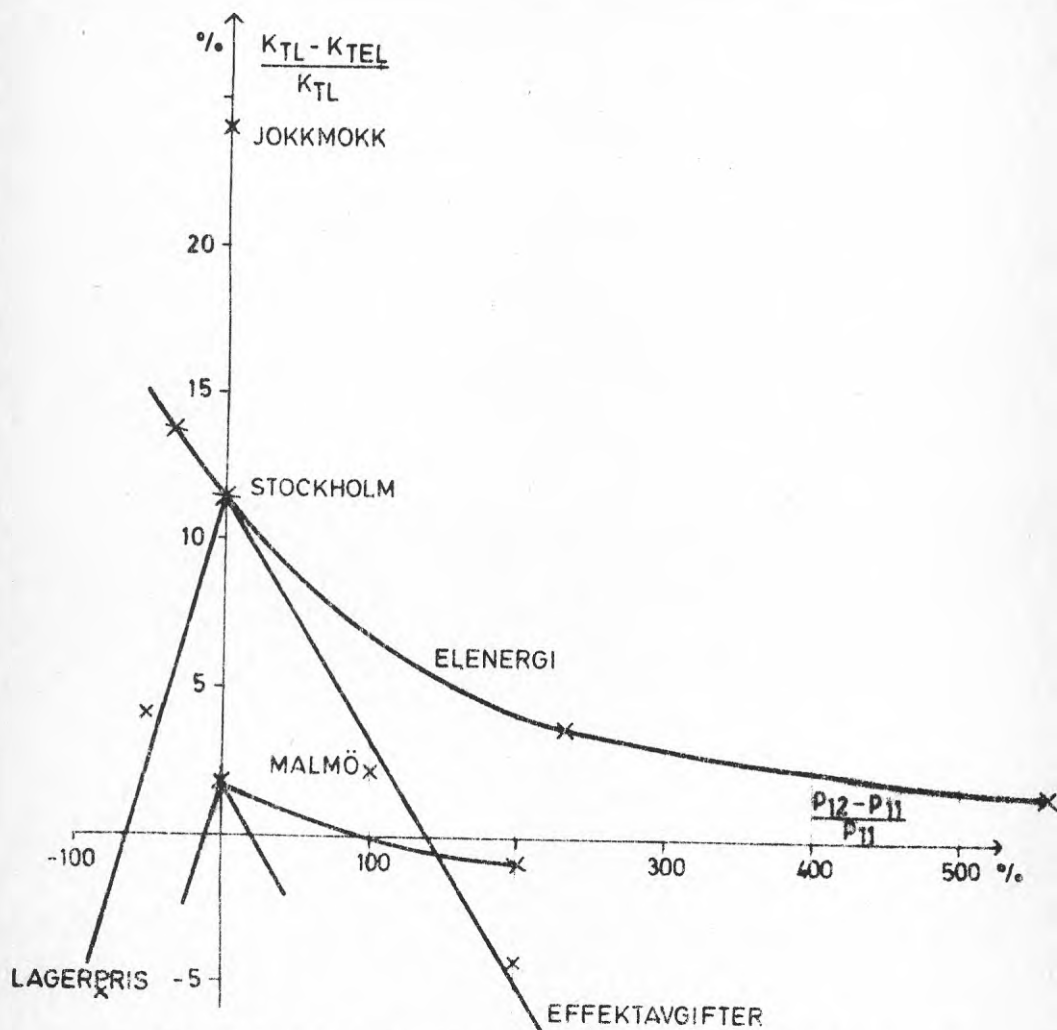
$$\frac{K_{TL} - K_{TEL}}{K_{TL}}$$

Vid jämförelsen används alternativet med kemisk värmepumplager, eftersom detta genomgående är billigare än alternativet med fasomvandlingslager.

Är den relativa skillnaden positiv innebär det att det är billigare att använda värmepump med direkteltillsats än värmepump med kemiskt värmelager. Blir den relativa skillnaden negativ så är det däremot lönsammare att använda värmepump med kemiskt energilager. På x-axeln är inlagt den relativa prisändringen:

$$\frac{P_{12} - P_{11}}{P_{11}}$$

Beteckningar enligt kapitel 6.3.2. En fördubbling av priset ger den relativa prisändringen 100 %. En halvering av priset ger den relativa prisändringen - 50 %.



Figur 6.3 Relativa kostnadsskillnaden mellan totala årskostnaden för uppvärmning med värmepump kombinerad med kemiskt värmelager respektive värmepump kombinerad med direkt-eltilsats, som funktion av relativa prisändringen för elenergi, effektagifter och kemiska värmelager vid förläggning i Malmö, Stockholm och Jokkmokk.

Flerbostadshuset förlagt i Stockholm används som utgångspunkt för prisvariationsberäkningen. Man utgår från nuvarande priser och avgifter med elpriset inklusive energiskatt. Den relativa skillnaden blir då 11,1 %.

Ett ökat elenergipris minskar den relativa skillnaden. Den minskar till en början kraftigt med elenergi-priset, men minskningen avtar ju närmare lagringsalternativets lönsamhetsgräns man kommer. Vid ungefär 6 gångers ökning av elpriset är den relativa skillnaden 1,4 %. För att lageralternativet skall nå lönsamhetsgränsen krävs en ökning av elpriset med 8-9 gånger. Att en elenergi-pris-ökning skulle göra lagringsalternativet lönsamt ligger således långt fram i tiden.

Effektavgifterna har nästan linjär inverkan på den relativa skillnaden. Det behövs en ökning med ca 140 % för att lagringsalternativet skall bli lönsamt i Stockholm. Det är inte troligt att effektavgifterna skulle öka, utan det är snarare troligt att de kommer att minska.

Lagerpriset, eller lagrets energi-pris F , har också nästan linjär inverkan på den relativa skillnaden. Det behövs en ändring med - 65 % till $F = 3.50$ kr/kWh i Stockholm för att värmepump med kemisk energilagring skall bli lönsam. Den teoretiskt minsta lagerkostnaden (saltpri-set) är 2 kr/kWh.

Därefter undersöks klimatets inverkan genom att förlägga flerbo-stadshuset med värmepumpinstallationen till i tur och ordning Malmö, Stockholm och Jokkmokk. Vid beräkningen av den relativa skillnaden används nuvarande priser och avgifter och elenergi-priset inklusive skatt på samtliga tre orter. Den relativa skillnaden blir i Malmö 1,8 %, i Stockholm enligt tidigare 11,1 % och i Jokkmokk 24 %.

Det är tydligt att klimatet har stor inverkan på den relativa skillnaden och därmed lönsamheten för värmepump med kemisk energilagring. Den gynnas av en flack temperaturvaraktighetskurva med en smal topp. Värmepump med kemisk energilagring bör alltså förläggas till orter med mildt kustklimat och liten variation mellan varma och kalla år.

På gynnsammaste förläggningsorten Malmö krävs det mindre ändringar av priser och avgifter än i Stockholm för att värmepump med kemisk lagring skall bli lönsam. För att uppskatta vilken effektavgift och vilket lagerpris som utgör lönsamhetsgräns kan man parallellförskjuta linjerna som utgår från Stockholmpunkten till punkten för Malmö. Detta förfarande ger att det erfordras en lagerprisändring på - 15 % från 10 kr/kWh till 8.50 kr/kWh.

Effektavgifterna måste höjas 20 % från högbelastningsavgiften 270 kr/kWh till 325 kr/kWh och abonnemangavgiften från 45 kr/kWh till 54 kr/kWh för att värmepump med kemisk energilagring skall bli lönsam. För att undersöka den erforderliga elenergi-prishöjningen för att värmepump med kemisk energilagring skall bli lönsam i Malmö, har en särskild beräkning gjorts för elenergi-priset 35,4 öre/kWh vilket motsvarar en höjning med 3 gånger från elenergi-priset 11,8 öre/kWh inklusive skatt. Denna elenergi-pris-höjning sänker den relativa skillnaden från 1,8 % till - 0,7 %, vilket innebär att rangordningen mellan alternativen ändras. I Malmö skulle det räcka med en fördubbling av elpriset i förhållande till övriga priser för att värmepump med kemisk energilagring skall vara lönsam. Med den förväntade ökningstakten för elpriset är tidpunkten för en fördubbling tämligen avlägsen. Se tabell 6.11.

Lagerstorlekar och effekt från lagret för installationen förlagd i de tre orterna är införd i tabell 6.24. Den specifika lager-effekten (effekt i W/lagerstorlek i kWh) är en intressant parameter vid konstruktionen av lagret. Det är den som avgör hur stora värmeväxlarytorna måste vara och hur grova dimensioner det värmelagrande materialet kan ha i värmeledningens riktning. För ett saltvärmelager med plaströrskapsling bestämmer den rörens diameter. Den specifika lageffekten blir mellan 5 - 10 W/kWh. Vid konstruktionen av ett system, värmepump med kemisk energilagring, så måste den specifika lagereffekten anges vid en viss temperatur på det uttagna värmnet, eftersom en större temperaturskillnad mellan det värmelagrande materialet och mediet som värmen transporteras med ger en större specifik lagereffekt.

De båda beräkningsmetoderna, den ungefärliga med konstant effekt-kostnad för värmepumpen B, och den korrekta med variabelt B(x) respektive B(y), jämfördes i beräkningsexemplet för enbostads-huset. Den med variabelt B(x) ger en längre dimensionerande utnyttningstid och en några promille lägre total årskostnad. Eftersom skillnaden i total årskostnad mellan beräkningsmetoderna är så liten ger metoden med konstant B tillräcklig noggrannhet. Skillnaden mellan de båda metoderna är ännu mindre när man ser till den relativa skillnaden.

Tabell 6.24 Effekt, energiinnehåll, specifik effekt, abonnerad eleffekt och 6h-effekt för KVP-lager och EL-tillsats alternativen förlagda i Malmö, Stockholm och Jokkmokk

	Effekt kW	Storlek kWh m ³	KVP-lager Specifik effekt W/kWh	Abonnerad eleffekt kW	Medel 6-h eleffekt kW
Malmö	24	2700 5,5	9	130	51
Stockholm	12	2500 5,0	5	146	59
Jokkmokk	32	6800 13,4	5	174	76
EL-tillsats					
	Abonnerad eleffekt kW	Medel 6-h eleffekt kW			
Malmö	235	66			
Stockholm	250	75			
Jokkmokk	310	97			

6.4 Drift, service- och miljöaspekter

De kemiska värmelagren är ännu under utveckling, varför erfarenheterna är mycket begränsade beträffande drift, service och miljöfrågor.

Den typ av värmelager man har störst erfarenhet av är fasomvandlingslager. Sådana byggdes nämligen redan i slutet av 1940-talet i USA, varvid problem uppstod till följd av separation i smältan. Detta problem har sedan dess uppgivits vara löst flera gånger för glaubersaltlager, men separationen har dock åter inträffat efter en tid. Nu lämnas emellertid en funktionsgaranti på 5 år

för de energilagringsskivor som säljs på den svenska marknaden innehållande glaubersalt. I laboratorium har man för dessa enligt uppgift uppmätt en livslängd på 25 år.

Ett salt som har en för uppvärmningsändamål lämplig smältpunkt är fixersalt ca 50°C . Detta salt är ännu ej tillräckligt utprovat och man har fortfarande problem med vissa kemiska instabiliteter. (Hedman, 1979). Försök med fixersalt pågår på Institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik vid KTH.

Beträffande kemiska värmepumpar har man knappast några erfarenheter. Försök pågår dock med systemet $\text{Na}_2\text{S}-\text{H}_2\text{O}$ i fullskala. Försöksanläggningen skall provas för uppvärmningsändamål under vintern 80 - 81.

Det föreligger således endast mycket begränsade uppgifter om de kemiska värmelagrens driftsäkerhet. Det bör dock vara ett krav att driftsäkerheten hos dessa installationer och övriga värmekemiska installationer i byggnaden skall vara ungefär densamma.

Service och underhåll av de kemiska värmelagren bör dessutom kunna utföras på konventionellt sätt utan att några onormala säkerhetsåtgärder måste vidtas såsom användning av särskild skyddsutrustning.

Miljöaspekterna är främst beroende av mediernas giftighet och uppträdande vid onormala driftsfall eller t ex vid brand. För fasomvandlingslager är det främst läckage genom kapslingen som härvid kan ge problem. Saltet får därvid inte ge upphov till några giftiga eller illaluktande gaser. Det skall även vara enkelt att hantera och inte ge upphov till några avfallsproblem.

Kemiska värmepumpar som innehåller $\text{Na}_2\text{S}-\text{H}_2\text{O}$ har vid normal drift undertryck, varför eventuellt läckage skef utifrån och in. Vid olycksfall, brand eller vid laddning vid för hög temperatur får ej skadliga gaser uppkomma som kan spridas i byggnaden. Det finns risk att det i dessa fall bildas svavelväte H_2S som är en mycket giftig och illaluktande gas. Na_2S är för närvarande klassat som ett vådligt ämne och får därför inte förvaras i bostäder i obegränsade mängder.

Kemiska värmepumpar som innehåller ammoniak NH_3 har övertryck och kan således ge upphov till läckage utåt. Ammoniak är i Kylnormerna klassat i grupp 2 bland speciellt giftiga köldmedier. Ammoniakfyllningens vikt i hermetiska kylanläggningar får enligt kylnormen högst uppgå till 3 kg vid användning i bostadslägenhet eller publik lokal.

BILAGA 1

Undersökning av villkor för $g(x)$ så att $K_{TL} > K_{TEL}$.

$$K_{TL} = K_L = g(x) + G x^2$$

Vad krävs av $g(x)$ för att

$$K_{TEL} = K = g(x) + H x^2$$

$$K_{Lmin} > K_{min} \quad ?$$

$$G > H$$

Lösning:

För att K skall ha ett minimum krävs att:

$$\frac{dK}{dx} = 0 \quad \text{och} \quad \frac{d^2K}{dx^2} > 0$$

$$\text{Att } G > H \Rightarrow K_L(x) > K(x)$$

K_L har minimum i x_1 och K har minimum i x_2 .

$$\Rightarrow K_L(x_1) > K(x_1), \quad K_L(x_2) > K(x_2) \quad \text{och att}$$

$$K_L(x_1) < K_L(x_2), \quad K(x_2) < K(x_1)$$

Dessa olikheter ger: $K_L(x_1) > K(x_1) > K(x_2)$

\Leftrightarrow

$$K_L(x_1) > K(x_2)$$

$$\text{Under förutsättning att: } \frac{dK}{dx} = \frac{dg}{dx} + 2 H x = 0 \quad (1)$$

$$\text{och att } \frac{d^2K}{dx^2} = \frac{d^2g}{dx^2} + 2 H > 0 \quad (2)$$

För att (1) skall vara uppfyllt måste $\frac{dg}{dx} < 0$ eftersom $x > 0$.

För att (2) skall vara uppfyllt räcker det att $\frac{d^2g}{dx^2} > 0$.

$$g(x) = \frac{a \cdot 1500 \cdot (k \cdot (t_{in} - (t_t + k_t x)) + P_{vvp})}{\left(\frac{t_t + k_t x}{40} + 1\right)}$$

$$\frac{dg}{dx} = \frac{-a \cdot 1500 \cdot k \cdot k_t \cdot \left(1 + \frac{t_{in} + \frac{P_{vvp}}{k}}{40}\right)}{\left(\frac{t_t + k_t x}{40} + 1\right)^2} < 0$$

$$\frac{d^2 g}{dx^2} = \frac{a \cdot 75 \cdot k \cdot k_t^2 \left(\frac{t_t + k_t x}{40} + 1 \right) \left(1 + \frac{t_t + \frac{P_{vvp}}{k}}{40} \right)}{\left(\frac{t_t + k_t x}{40} + 1 \right)^4} > 0$$

om $\frac{t_t + k_t x}{40} > -1$ vilket är uppfyllt.

LITTERATURFÖRTECKNING

Brämhultsprojektet på väg att lyckas. En intervju med projektledaren Erik Rylander. (Förlags AB VVS) VVS nr 12, 1979, s. 39-42, Stockholm.

Bubenko, J A & Sundell J, 1979, Datormodell för beräkning av värmepumpbelastningar. (Förlags AB VVS) VVS-Special, 1:1979, Värmepumpar, s. 55-58, Stockholm.

Cleverdal, P, 1979, Tariffer för elvärme i kombination med värmepump. (Förlags AB VVS) VVS-Special, 1:1979, Värmepumpar, s. 51-54, Stockholm.

Eltariffer, 1980, (Statens Vattenfallsverk), Vällingby.

Energistatistik för flerbostadshus, 1978. (Statistiska Centralbyrån), Statistiska meddelanden, Bo 1979:15, 33 s., Stockholm.

Fischer, H C, 1977, Thermal Storage Applications of the Ice Maker Heat Pump, ASHRAF Trans. 1977, vol. 83, nr 1, s. 698-708, New York.

Fluck, D & Kirn, H, 1977, Untersuchung einer monovalenten Aussenluft-Wasser-Wärmepumpe mit Latent-Speicher. (Verwertungs G Wissenschaft GmbH) Ki Klima + Kälte-Ingenieur 12/1977, s. 439-444, **Frankfurt/Main.**

Frommer, T, 1976, Värmepumpar - en litteraturförteckning. (Chalmers tekniska högskola, Avd. f. Installationsteknik) Rapport 1976:11, 42 s., Göteborg.

Glas, L O, 1975, Värmepumpens ekonomi. (Förlags AB VVS) VVS nr 3, 1975, s. 70-79, Stockholm.

Granryd, E, 1977, Analys av värmepumpsystem för lokaluppvärmning. (The Associations of Refrigeration i Denmark, Finland, Norway, Sweden) Scandinavian Refrigeration 6/77, s. 316-326, Oslo.

Hagstedt, B, 1974, Automatisk reglering av värmepumpar och elektriska varmvattenpannor. (Statens råd för byggnadsforskning) Skrift T2:1975, Värmepumpar, Symposium i Stockholm 26-27 nov 1974, s. 167-182, Stockholm.

Heat Pack, 1979 (Climator) Broschyrer, Töreboda.

Hedman, H, Zinko, H, Nowacki, J E, 1979, Prestandajämförelse mellan tre olika metoder för lagring av lågtemperaturvärme (solvärme) för husuppvärmningsändamål. (Studsvik Report) Studsvik/E3-79/6, 59 s., Nyköping.

Hedman, H, 1979, Energilagring genom modifierat utnyttjande av salhydrater. (Studsvik Report) Studsvik/E3-79/12, 58 s., Nyköping.

Holmin, N, 1974, Elproduktion för värmepumpar. (Statens råd för Byggnadsforskning) Skrift T2:1975, Värmepumpar, Symposium i Stockholm 26-27 nov 1974, s. 125-123, Stockholm.

- Kalischer, P, 1979, Värmepumpen i Västtyskland. (Förlags AB VVS) VVS nr 11, 1979, s. 76-83, Stockholm.
- Kalischer, P, 1980, Värmepumpen i elförsörjningen. (Förlags AB VVS) VVS nr 1, 1980, s. 66-73, Stockholm.
- Kraft, H, Fehrm, M, Hill, A, 1979, Värmepumpar för bostadsuppvärmning. Komponent och systemstudier. (Statens råd för byggnadsforskning) Rapport R14:1979, 107 s., Stockholm.
- Lorentzen, G, 1977, Värmepumpens rolle i fremtidens energisystem, (The Associations of Refrigeration i Denmark, Finland, Norway, Sweden) Scandinavian Refrigeration 6/77, s. 294-315, Oslo.
- Lundberg, L, 1974, Tariffer för värmepumpar. (Statens råd för byggnadsforskning) Skrift T2:1975, Värmepumpar, Symposium i Stockholm 26-27 nov 1974, s. 125-132, Stockholm.
- Lundberg, L, 1979, Dagens och morgondagens eltaxor. (Förlags AB VVS) VVS nr 12, 1979, s. 59-63, 70, Stockholm.
- Lundén, R, 1977, Värmepump med effektutjämningsystem - En studie av ett system där värmepump kombineras med värmeackumulering i jord. (Statens råd för byggnadsforskning) Rapport R85:1977, 52 s., Stockholm.
- Michel, H, 1977, Praktischer Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Latent-Speicherung. Deutsche Sonnenforum, 1977, vol. 1, s. 381-388.
- Meysenburg, H, 1975, The Storage Problem and the Energy Crisis. L'Economie électrique, 1975, vol. 48, nr 74, s. 6-18.
- Peterson, F, 1979, DUT i energisnåla hus, FoU Bygg 1, 1979, s. 21-26.
- Peterson, F, & Ringblom, L, 1978, Varmvattenberedning med hjälp av solenergi - förutsättningar och kostnader. (Statens råd för byggnadsforskning). Rapport R85:1978, 150 s., Stockholm.
- Ratai, WR, 1977, Saving Energy with Heat Pumps. The Heating & Air Conditioning Journal, April 1977, s. 22-24.
- Rosberg, K, 1974, Vätsketyllaggregat för värmepumpdrift. (Statens råd för byggnadsforskning) Skrift T2:1975, Värmepumpar, Symposium i Stockholm 26-27 nov 1974, s. 182-193, Stockholm.
- Solfångare och värmepump i nytt lågenergisystem. (Förlags AB VVS) VVS nr 5, 1978, s. 122-128, Stockholm.
- Smalhus Energisparande och fasadisolering. (Stockholms byggnadsnämnd) Råd och riktlinjer, 63 s. Stockholm 1979.
- Sporn, P & Ambrose, E R, 1947, Heat-Pump System Using Water Storage, Description and Performance of a Heat-Pump Air-Conditioning System for an Industrial-Control Building. (The American Society of Mechanical Engineers) Mechanical Engineering, Nov 1947, s. 899-903, New York.

Sundell, J, 1979, Inverkan av värmepumptillämpningar på kraftsystemplanering och drift. (Kungliga tekniska högskolan, Inst. f. Elektrisk anläggningsteknik) Delrapport 3, mars 1979, ca 100 s. Stockholm.

Taesler, R, 1972, Klimatdata för Sverige, (SMHI-BFR), 672 s. Stockholm.

Termokemisk energilagring. (Statens råd för byggnadsforskning) Programgrupp EFUD 81, ca 100 s. Stockholm 1979.

VVS Handboken Tabeller och Diagram (Förlags AB VVS), Södertälje 1974.

Värmepump, (Tour & Andersson AB), Broschyr K-10-5, Nov 1979, 11 s., Stockholm.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 791073-0 från
Statens råd för byggnadsforskning till Wahlings Installations-
utveckling AB, Danderyd.**

R145: 1980

ISBN 91-540-3384-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700245

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 35 kr exkl moms