



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

R58:1983

**Värmeåtervinning ur avlopps-
vatten med värmepump för
fjärrvärmeanslutning
i Enköping**

Förstudie

**Torbjörn Svensson
Herje Wahlberg
Olof Wahlberg**

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

Ser

Byggforskningsrådet

R58:1983

VÄRMEATERVINNING UR AVLOPPSVATTEN MED
VÄRMEPUMP FÖR FJÄRRVÄRMEANSLUTNING I
ENKÖPING

Förstudie

Torbjörn Svensson
Herje Wahlberg
Olof Wahlberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 810775-2
från Statens råd för byggnadsforskning till VIAK AB,
Vällingby.

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

R58:1983

ISBN 91-540-3913-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLL

FÖRORD	5
1. INLEDNING	7
2. SAMMANFATTNING	8
3. TEKNISK BESKRIVNING AV AB ENKÖPINGS VÄRMEVERKS FJÄRRVÄRMEANLÄGGNING	9
3.1 Fjärrvärmenät	9
3.2 Energiproduktionsanläggning	11
4. TEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR ENERGIUT- VINNING UR BEHANDLAT AVLOPPSVATTEN VID ENKÖPINGS AVLOPPSRENINGSVERK	12
4.1 Allmänt	12
4.2 Enköpings avloppsreningsverk	12
4.3 Avloppsvattnets energiinnehåll	12
5. ENERGIPRISER	14
6. LÖNSAMHETSBEDÖMNING AV VÄRMEPUMP	15
6.1 Inledning	15
6.2 Kalkylräntefot	16
6.3 Optimering av värmepumpsanläggning	20
6.4 Optimering av värmepumpsanläggning för AB Enköpings värmeverk	35
6.5 Begränsningar med avseende på temperatur ...	50
7. ELKRAFTFÖRSÖRJNING	51
7.1 Befintlig elkraftförsörjning och utbyggnadsmöjligheter	51
7.2 Begränsningar med avseende på elkraftförsörjning	51
8. TILLKOMMANDE KOSTNADER	52
9. INVESTERINGSBEHOV	52
10. INVERKAN PÅ ISFÖRHÅLLANDEN	52
BILAGA	53

FÖRORD

Föreliggande rapports avsikt är att med en generell teknik-ekonomisk modell kunna optimalt dimensionera olika energiproduktionsenheter inom t ex ett fjärrvärmenät.

Modellén har sedan använts på AB Enköpings Värmeverks produktionsanläggning där lönsamheten för en värmepump med avloppsvatten studerats.

Inom studiens ram har även påverkan på isförhållanden nedströms avloppsreningsverket analyserats.

Herje Wahlberg har varit projektledare och utrett de tekniska sakfrågorna.

Olof Wahlberg vid Högskolan i Sundsvall-Härnösand har utarbetat den ekonomiska modellen.

Torbjörn Svensson, VIAK AB har utfört analysen över hur isförhållandena påverkas.

1 INLEDNING

Vid många värmeverk sker i snabb takt en uppbyggnad av alternativa energiproduktionscentraler. Efterhand som tekniken för utnyttjande av olika energislag utvecklas ställs värmeverkens beslutande organ inför att bestämma om nya energiproduktionsanläggningar skall införas i fjärrvärmesystemen.

1.1 Problemet

Det är svårt för beslutsfattare att överblicka de tekniska och ekonomiska konsekvenserna av införandet av alternativa energikällor i fjärrvärmesystemen. Detta gäller speciellt värmepumpar vars utnyttjande begränsas både av fjärrvärmevattnets temperatur samt värmekällans temperatur och tillgänglighet. För eldrivna värmepumpar kan dessutom språngvisa kostnadsökningar uppträda om och när elnätet måste byggas ut.

Från AB Enköpings Värmeverks sida föreligger vidare farhågor att risken för översvämning i samband med islossning ökar om avloppsvattnet används som energikälla och därvid kyls ner.

1.2 Projektet

I föreliggande arbete har olika parametrar med inverkan på ekonomi, tillgänglighet och andra begränsningar placerats i sitt sammanhang med hjälp av en ekonomisk modell.

Modellen kan användas för ekonomisk optimering av alternativa energiproduktionsanläggningar liksom för att bestämma längsta ekonomiskt motiverade ledningslängder både från värmekälla och värmebärare till värmesänka.

Slutligen har modellen använts för att utreda förutsättningarna för en värmepumpinstallation i Enköpings fjärrvärmenät med avloppsvatten som värmekälla.

I utredningen bedöms även hur nerkylning av avloppsvattnet påverkar issituationen nedströms avloppsreningsverket.

2 SAMMANFATTNING

Under senare år har alternativa energiproduktionsenheter blivit allt vanligare i fjärrvärmesystemen. Bedömningen av lönsamheten för olika energikällor har med den ökande komplexiteten blivit allt svårare att utföra. Föreliggande utredning visar en generell metod för att beräkna optimal produktionsmix för ett fjärrvärmenäts produktionsanläggningar.

Metoden har använts för att beräkna optimal värmepumpstorlek för AB Enköpings Värmeverk. Värmepumpen avses att drivas med elkraft och dess energikälla skall vara behandlat avloppsvatten.

Studien tar hänsyn till befintliga produktionsanläggningar för olja-, kol- och flisförbränning samt tillgången på avloppsvatten. För beräkning av elpriset har Statens Vattenfallsverks högspänningstariff N2 använts.

Beräkningarna ger en ekonomisk optimal värmepumpstorlek på 5 MW. Grundinvesteringen är kalkylerad till 9 000 000 kr och den årliga besparingen 2 100 000 kr/år.

Projektets internränta blir ca 24%. Lönsamheten är alltså mycket god.

Issituationen nedströms avloppsreningsverket kommer, enligt den analys som utförts, endast att påverkas marginellt.

3 TEKNISK BESKRIVNING AV AB ENKÖPINGS VÄRMEVERKS FJÄRRVÄRMEANLÄGGNING

3.1 Fjärrvärmenät

Fjärrvärmenätet omfattar största delen av centrala Enköping och anslutningsgraden är hög. Ledningsnätet är konventionellt uppbyggt och abonnenterna är anslutna via värmeväxlare.

3.1.1 Temperaturkrav

Fjärrvärmenätet är dimensionerat för 120/70°C. Framledningstemperaturens utetemperaturkompenseras och hade under 1980 varaktighet enligt kurva i Figur 3.1 där även returtemperaturen visas.

Ansluten till nätet är en spannmålstork som troligtvis orsakar puckeln både på temperatur- och effektkurvor.

Det bör observeras att framledningstemperaturen aldrig översteg 115°C och att returtemperaturen ligger förvånansvärt konstant runt 55°C.

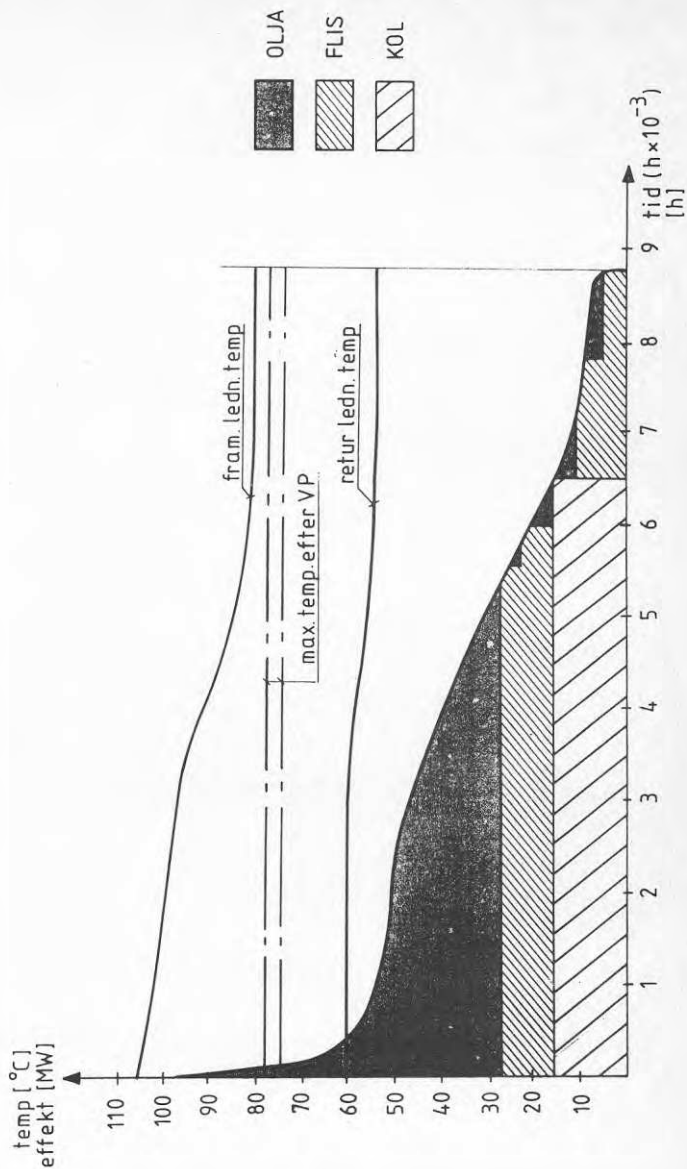
3.1.2 Effekt- och energibehov

Till värmeverket är anslutet 141 MW. Genom sammanlagringseffekten d v s genom att ej alla har bruk för maximal effekt samtidigt, kommer ej denna effekten att behöva avges vid produktionsanläggningen. Maximalt effektbehov vid energiproduktionsanläggningen uppskattas till ca 92 MW.

Lägsta uppmätta effektbehovet sommartid är 6 MW.

Effektbehovet finns redovisat i form av varaktighetsdiagram och är redovisat i Figur 3.1.

Energiförbrukningen är under 1980-1981 uppmätt till 288 GWh/år tillfört bränsle.



Figur 3.1 Varaktighetsdiagram för AB Enköpings Värmeverks effektbehov. Verkliga fram- och returtemperaturer redovisade. Maximal temperatur efter värmepump. Energiproduktion fördelad på energislag vid befintlig anläggning.

Producerad energi = 263 GWh/år.

Under 1982-1983 planeras följande förbrukning:

Flis	125 000 m ³ s
Kol	12 000 ton
Olja	10 000 m ³

3.2 Energiproduktionsanläggningen

För närvarande produceras värmebehovet vid tre fjärrvärmecentraler, benämnda Simpan, Stenvreten och Tjädern.

Simpan ligger i direkt anslutning till avloppsreningsverket.

3.2.1 Energiproduktionsanläggning vid Simpan

I Simpans produktionsanläggning sker förbränning av kol i en fluidiserande bädd med nominell effekt på 16 MW samt samt förbränning av olja i två pannor med effekt 50 respektive 25 MW.

FB-anläggningen kan regleras ner till 80% av full last.

3.2.2 Energiproduktionsanläggning vid Stenvreten

Stenvretens energiproduktionsanläggning är uppbyggd av två fliseldade värmepannor på vardera 5,8 MW samt en oljeeldad panna om 10 MW för reservdrift. Med dagens energiproduktionsanläggningar planeras vid full drift flismängden 125 000 m³s/år brännas vilket motsvarar ca 8900 m³ olja/år.

3.2.3 Energiproduktionsanläggning vid Tjädern

Tjädern inrymmer oljeeldade värmepannor med nominell effekt på totalt 23 MW. Centralen används som reserv och spetslastanläggning.

4 TEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR ENERGIUTVINNING UR BEHANDLAT AVLOPPSVATTEN VID ENKÖPINGS AVLOPPSRENINGSVERK

4.1 Allmänt

Behandlat avloppsvatten är en mycket bra värmekälla till värmepump. Vattnet håller en relativt hög temperatur, tillgången är säker och priset lågt. Restriktioner brukar vara långt avstånd till lämplig avnämare.

4.2 Enköpings avloppsreningsverk

4.2.1 Geografisk placering

Enköpings avloppsreningsverk ligger i direkt anslutning till AB Enköpings Värmeverks produktionsanläggning Simpan. Avståndet mellan utloppskanalen och panncentralen är endast 257 m. Se Figur 4.1.

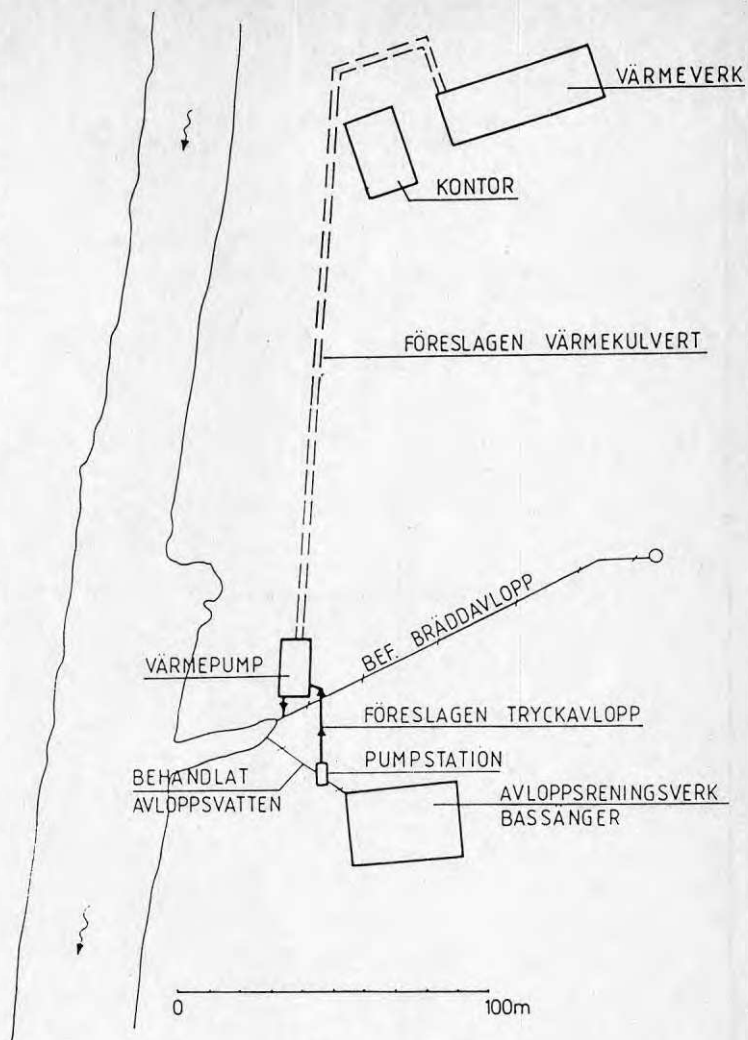
4.3 Avloppsvattnets energiinnehåll

Vid avloppsreningsverket mäts och registreras flödet kontinuerligt. Temperaturen efter reningsverket avläses varje dag.

Den effekt som kan erhållas från värmekällan är produkten av flöde multiplicerat med temperatursänkningen. För energiutvinning av avloppsvattnet är därför inte temperaturen eller flödet intressant var för sig.

För att få ett mått på hur stor den utvinningsbara energimängden är per år har för varje dygn flödet multiplicerats med aktuell temperatursänkning. Hänsyn har tagits till att flödet nattetid endast är 60% av det på dagen. Temperatursänkningen beräknas ske från mätt temperatur till $+2^{\circ}\text{C}$. Den mätta temperaturen varierar över året med lägst värden under eftervintern.

Med utgångspunkt i dessa beräkningar har Tabell 6.2 upprättats. Tabellen redovisar den termiska effekt som en värmepump med värmefaktor 3 kan avge dels under dagtid dels under nattetid.



Figur 4.1 Geografisk placering av Enköpings avloppsreningsverk och AB Enköpings Värmeverks energiproduktionsanläggning Simpan.

5 ENERGIPRISER

AB Enköpings Värmeverk har för närvarande möjlighet att använda olja, kol och flis. Inköpspriserna för ovanstående energislag har erhållits från Enköpings Värmeverk AB, för att användas i detta arbete.

Värmepumpen tänks eldriven och Statens Vattenfallsverks högspännings-tariff N2 används för beräkning av elpriset. Elskatt ingår med 40 kr/MWh

Energi slag	Inköpspris	Värmevärde	Pannverk-ningsgrad	Värme-faktor	Energikostnad per producerat energienhet
Olja	1433 kr/m ³	10,85 MWh/m ³	92		150 kr/MWh
Kol	500 kr/ton	7,6 MWh/ton	90		73 kr/MWh
Flis	80 kr/m ³	0,8 MWh/m ³	85		120 kr/MWh
El	160 kr/MWh	-	-	3	53 kr/MWh

6 LÖNSAMHETSBEDÖMNING AV VÄRMEPUMP.

6.1 Inledning.

Många energiverk förfogar över, eller står i begrepp att investera i energiproduktionsanläggningar med differentierad primärenergiförsörjning, tex kol, flis, el mm. Med hänsyn till de ändrade förhållandena på energiområdet finns det anledning att fråga sig om denna anläggningmix kan förbättras i något avseende! Finns det tex anledning att komplettera anläggningen med en värmepump, avsedd att tillvarata den energi som finns i kommunens avloppsvatten.

Av särskilt intresse i detta sammanhang är naturligtvis de ekonomiska konsekvenserna. Är investeringen lönsam är allt frid och fröjd - speciellt om den dessutom är mer lönsam än alternativen. Är å andra sidan anläggningen ej lönsam, måste andra och tunga skäl till för att investeringen skall kunna rättfärdigas. I sådana fall kan skäl som riskspridning och skonsamhet mot miljön utgöra poster som uppväger nackdelarna ur lönsamhetssynpunkt.

Detta kan också sägas utgöra utgångspunkterna för två skilda ansatser när det gäller att bedöma en investerings lönsamhet: den företagsekonomiska lönsamhetsanalysen kontra den samhällsekonomiska lönsamhetsanalysen.

Skillnaden mellan dessa två ansatser kan populärt uttryckas som att den företagsekonomiska analysen är mer begränsad i konsekvensbedömningarna. Dels omfattar analysen enbart de konsekvenser som direkt berör investeraren (företaget/organisationen), medan den samhällsekonomiska analysen vidgar bedömningarna till att omfatta konsekvenserna för samhället som helhet. Dessutom brukar de samhällsekonomiska analyserna omfatta poster som ej går att uttrycka i kronor och ören, sk BenefitCost-analys, medan de företagsekonomiska analyserna vanligtvis är av krassare karaktär och omfattar endast sådana konsekvenser som resulterar i penningflöden. Sysselsättningskonsekvenser, miljökonsekvenser osv är alltså poster av stor betydelse i den samhällsekonomiska analysen, medan de knappt berörs i den företagsekonomiska analysen.

I tider med krympande ekonomiska ramar för såväl samhälleliga institutioner som för företag och enskilda, får den företagsekonomiska analysen allt större betydelse. Kan ej investeringen betala sig själv, måste resurser tillskjutas. Resurser som man skulle kunna använda på annat sätt. Konkurrensen mellan olika målsättningar hårdnar när de samlade resurserna krymper och därmed blir det även allt svårare att hävda att användningen av resurser för ett visst ändamål är det enda rätta.

Kan å andra sidan en viss investering betala sig själv - dvs om den är lönsam i företagsekonomisk bemärkelse - undviks i hög grad denna svåra prioriteringssituation. I föreliggande analys koncentreras därför lönsamhetsbedömningen till att omfatta enbart den företagsekonomiska lönsamheten.

6.2 Kalkylräntefot.

Valet av kalkylräntefot har en central roll i all lönsamhetsbedömning. Ofta kan marginella förändringar av kalkylräntefoten ha större betydelse för bedömningen av ett projekts lönsamhet än de besparingar eller fördyringar som omfattande tekniska förändringar resulterar i.

Kalkylräntans huvudsakliga funktion i lönsamhetsbedömningarna är att ge uttryck för tidpunktens betydelse för värdet av en framtida besparing eller fördyring: ju högre kalkylränta man väljer att arbeta med, desto mindre anses en sådan framtida besparing eller fördyring vara värd!

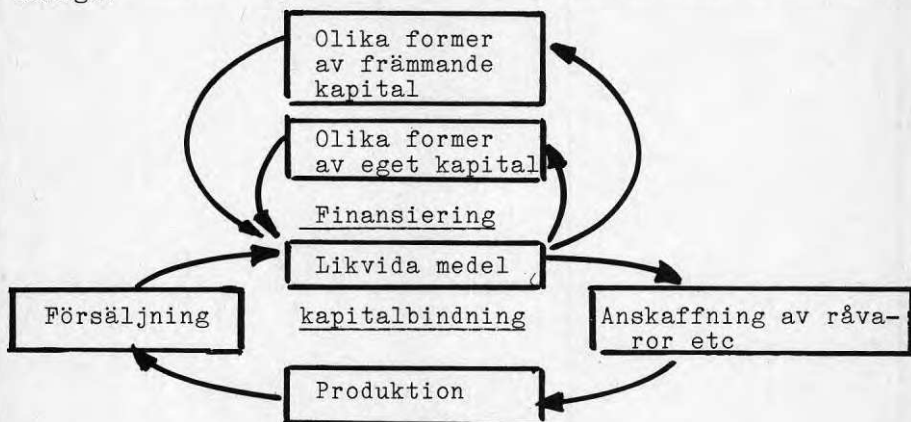
Valet av kalkylräntefot kan därmed få avgörande betydelse för utfallet av en lönsamhetsbedömning - allt annat lika! Om den valda kalkylräntan är alltför hög, kommer investeringsprojekt onödigtvis att bedömas som olönsamma. Speciellt kommer projekt av mer långsiktig karaktär att missgynnas av en alltför hög kalkylränta.

Trots detta är valet av kalkylräntefot ofta slentrianmässigt och ej föremål för närmare analys. Vid samtal med företrädare för kommuner, har tex framkommit att man av kommunförbundet rekommenderats att utgå från en kalkylränta på 14% i lönsamhetsbedömningarna. Denna ränta anses avspegla den genomsnittliga kostnaden för de finansieringsalternativ som står kommunerna i allmänhet till buds. En viss osäkerhet har dock framskymtat huruvida dessa 14% skall anses avspegla en real eller en nominell kapitalkostnad - en inte oväsentlig skillnad; skillnaden mellan real och nominell ränta utgörs nämligen i stora drag av inflationens storlek. Vid en inflation på 8 - 10%, vilket i dagens inflationsekonomi förefaller vara ett tämligen rimligt antagande (se fig.6.2.), motsvaras alltså 14% nominalränta av c:a 4-6% realränta.

En del kritik har på senare tid rests mot såväl kommuners som privata företags val av kalkylränta. De kalkylräntor som tillämpats har ansetts vara alltför höga och därigenom verkat förlamande på investeringsviljan och diskriminerande när det gäller satsningar på sikt.

Kalkylräntefoten har i huvudsak till uppgift att spegla kostnaden för utnyttjande av det kapital som satsas i en investering. Rent teoretiskt skall denna kostnad beräknas som alternativkostnaden, dvs som den avkastning man skulle få på kapitalet om man använde det på det sätt som ger största möjliga avkastning. Att beräkna en sådan renodlat teoretisk kapitalkostnad innebär dock avsevärda problem. I praktiska sammanhang arbetar man därför snarare med en kapitalkostnad som skall spegla de villkor som är förenade med de medel som ställts till förfogande för en verksamhets bedrivande. Tillfälligheter av olika slag kan dock leda till att denna kapitalkostnad varierar från tillfälle till tillfälle, oberoende av investeringen i sig. Bland annat har situationen på kapitalmarknaden stor betydelse. För att undvika att olika - eller samma - investerings lönsamhet skall bli bedömd utifrån skilda bedömningskriterier, brukar man därför fastställa en kalkylränta som används i samtliga lönsamhetsbedömningar inom ramen

för ett företags eller en organisations verksamhet - en kalkylränta som skall avspegla den genomsnittliga kapitalkostnaden för verksamhetens totala finansiering. Sambandet mellan finansiering, finansieringsbehov och kapital-kostnad kan översiktligt åskådliggöras med hjälp av en figur enligt:



Figur 6.1.

Figuren skall tolkas enligt:

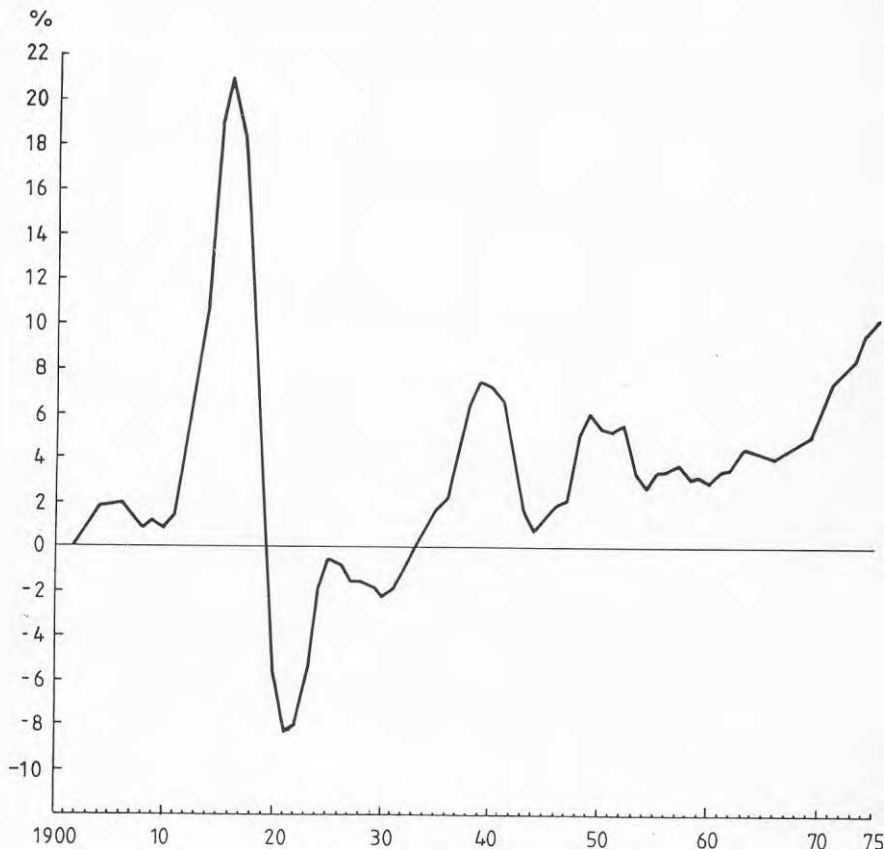
För att en verksamhet skall kunna bedrivas, krävs normalt utlägg för anskaffning av råvaror, betalning av löner osv. Utlägg som man får ersättning för först så småningom; dvs när produkten är såld och kunden betalat det pris eller den avgift som satts på produkten.

Att det tar en viss tid innan man får ersättning för de gjorda utläggerna innebär att kapital binds i verksamheten. Denna kapitalbindning måste finansieras på ett eller annat vis. Dvs man måste finna någon som är villig att ställa medel till förfogande för "förskottering" av de nödvändiga utläggerna. Av tradition brukar man tala om två huvudsakliga finansieringsformer; dels finansiering med eget kapital och dels finansiering med främmande kapital. Oberoende av finansieringsform, är dock förfogandet över kapital alltid förenat med en viss kostnad! För det främmande kapitalet är denna kostnad uttryckt som en räntekostnad. För finansiering med eget kapital gäller att detta kapital är förknippat med ett avkastningskrav som ägarna ställer på företaget!

De villkor som är kopplade till det främmande kapitalet - och då speciellt banklånen - utgör en naturlig utgångspunkt när man försöker bedöma kapitalkostnaden i allmänhet. Förutom rent principiella skäl - som att kreditvillkoren på lånemarknaden avspeglar en marknadsmässig prövning av räntorna - motiveras detta av bankkrediternas förhållandevis stora betydelse för finansieringen av företags verksamhet rent generellt.

"Normal" utlåningsränta i bank ligger för närvarande på c:a 15%. Övriga kreditformer är sedan förenade med räntevillkor som ligger en bit ovan eller under denna nivå, beroende bland annat på hur pass stor säkerhet man kan erbjuda, om lånen är subventionerade eller ej osv.

För banklånen - som alltså utgör en utgångspunkt för kostnadsbedömningarna - gäller enligt ovan att den nominella utlåningsräntan för närvarande är ungefär 15%. Eftersom inflationen kan förväntas ligga i intervallet 8 - 10%, kan följaktligen den reala avkastning som bankerna kräver antas ligga i storleksintervallet 5 - 7%



Figur: 6.2 Inflationstaktens utveckling.

(Källa: Dahmen & Eliasson (ed): Industriell utveckling i Sverige. IUI 1980.)

Huruvida man skall utgå från real eller nominell ränta i lönsamhetsbedömningarna, beror på förutsättningarna i övrigt. Om man förutsätter att alla kalkylposters priser i stort sett kommer att förändras i takt med inflationen, kan man utgå från dels de priser som råder i nuläget och dels ett reellt avkastningskrav. Detta förenklar naturligtvis i hög grad kalkylarbetet. Om en eller flera av posterna i kalkylen förväntas vara drabbade av prisökningar som avviker markant från den allmänna prisförändringen i ekonomin, kan man dock ej tillämpa detta förenklande beräkningsätt. Man måste då endera räkna med de nominella priserna och ett nominellt avkastningskrav, eller

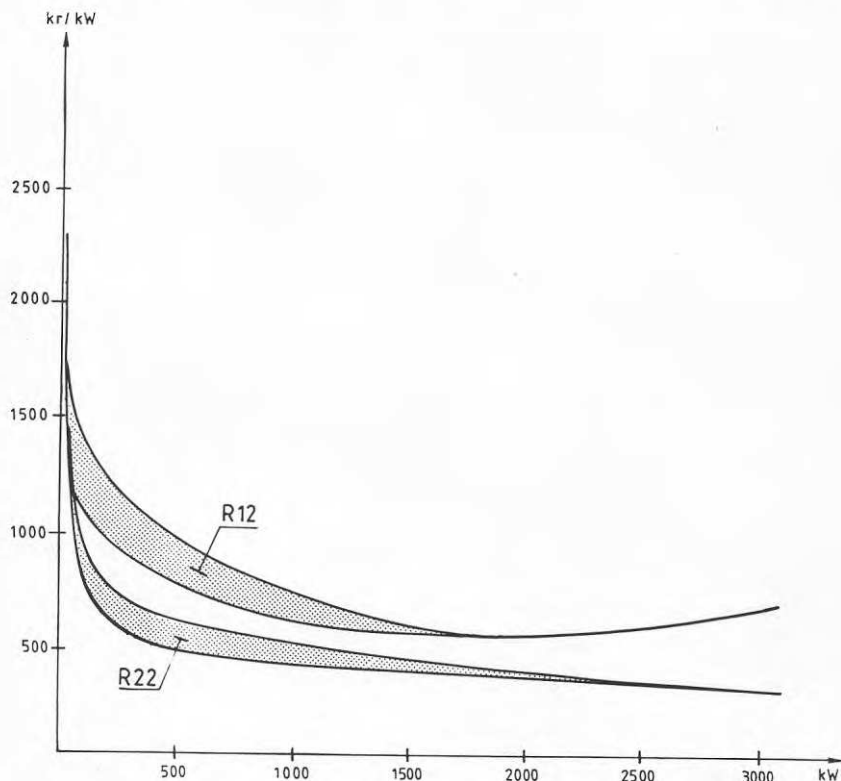
multiplicera de aktuella posterna med en faktor som uttrycker den relativa prisökningen för dessa poster och diskontera med en real kalkylränta. Den i förhållande till den allmänna prisökningen relativt stora prisökningen för olja under 70-talet har gjort problemet med relativ prisökning speciellt problematiskt. Många tecken tyder dock på att den snabba prisökningen på olja nu avtagit och i stora drag kan antas ligga i paritet med övrig prisutveckling.

EN REAL KALKYLRÄNTA PÅ CA 6% BORDE ALLSÅ KUNNA SÄGAS UTGÖRA EN REALISTISK AVSPEGLING AV KAPITALKOSTNADEN RENT ALLMÄNT. MÖJLIGEN UPPRÄKNAD MED NÅGON ELLER NÅGRA PROCENTENHETER FÖR ATT KOMPENSERA FÖR RISKTAGANDE.

6.3 Optimering av värmepumpsanläggning.

6.3.1 Investeringskostnaden för en värmepumpsanläggning.

Kostnaden för ett värmepumpsaggregat kan uttryckas som en funktion av dess nominella effekt: ju större aggregat, desto dyrare ställer ju sig investeringen. Sambandet mellan kostnad och effekt för själva värmepumpsaggregat kan beskrivas grafiskt enligt:



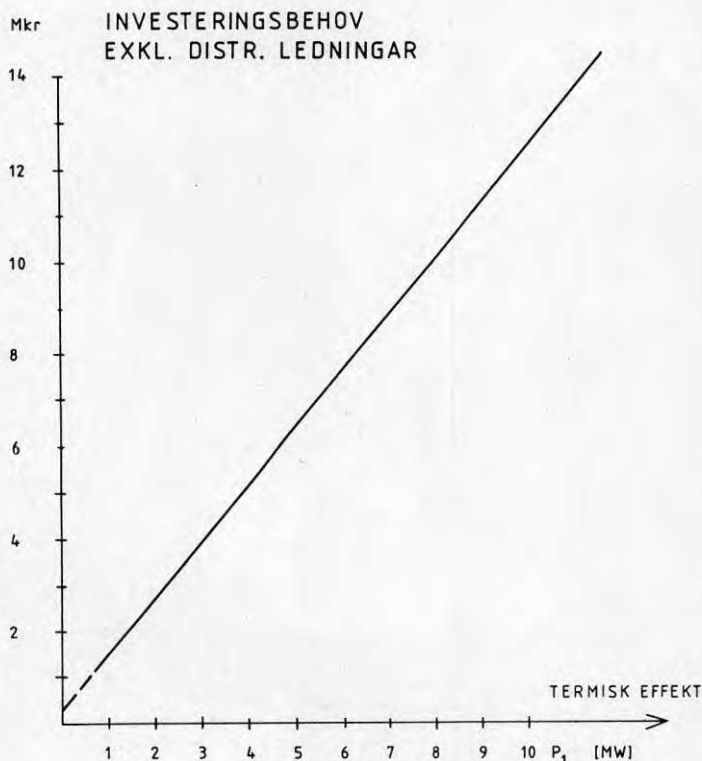
Figur 6.3. Sambandet mellan effekt och kostnad för ett värmepumpsaggregat.

Investeringen i en värmepumpsanläggning innebär dock betydligt mer än bara anskaffningen av ett värmepumpsaggregat. Ytterligare investeringar för byggnader, kraftförsörjning, ledningar osv tillkommer. Detta innebär att totala kostnaden för investeringen kommer att uppgå till betydligt större belopp! Även de tillkommande kostnaderna är till en del funktioner av värmepumpens storlek, men också funktioner av andra förhållanden - förhållanden som är mer eller mindre specifika för varje enskilt investeringsprojekt.

Bland de tillkommande kostnaderna är ledningskostnaderna av speciellt intresse. Medan kostnaden för värmepumpsanläggningen exklusive ledningar är tämligen jämförbar från fall till fall, är kostnaden för de ledningar som är nödvändiga för transport av värmevatten och värmekälla i hög grad avhängig av de mer precisa förutsättningarna för värmepumpens placering. Ledningskostnaderna är därför individuell för varje enskild anläggning.

Investeringskostnaden för ett värmepumpssystem kan alltså uppdelas i två komponenter: dels kostnaden för anläggningen exklusive ledningar och dels kostnaden för det nödvändiga ledningssystemet.

På basis av de erfarenheter som föreligger av värmepumpssystem av olika storlekar, kan sambandet mellan värmepumpseffekt och investeringskostnad exklusive ledningar beskrivas grafiskt enligt:



Figur 6.4. Sambandet mellan storlek och investeringsbehov (IO) exklusive ledningar.

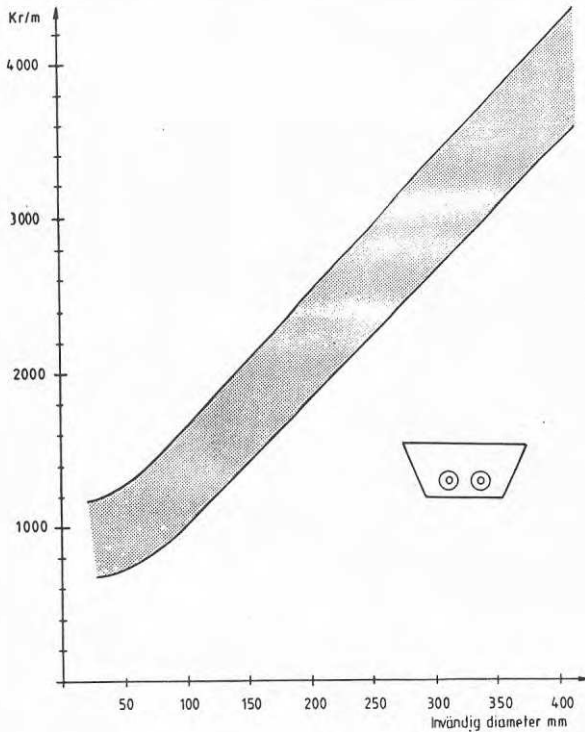
Uttryckt som en formel kan sambandet beskrivas enligt:

$$IO \text{ exkl. ledningar} = 560.000 + 1.190Pv$$

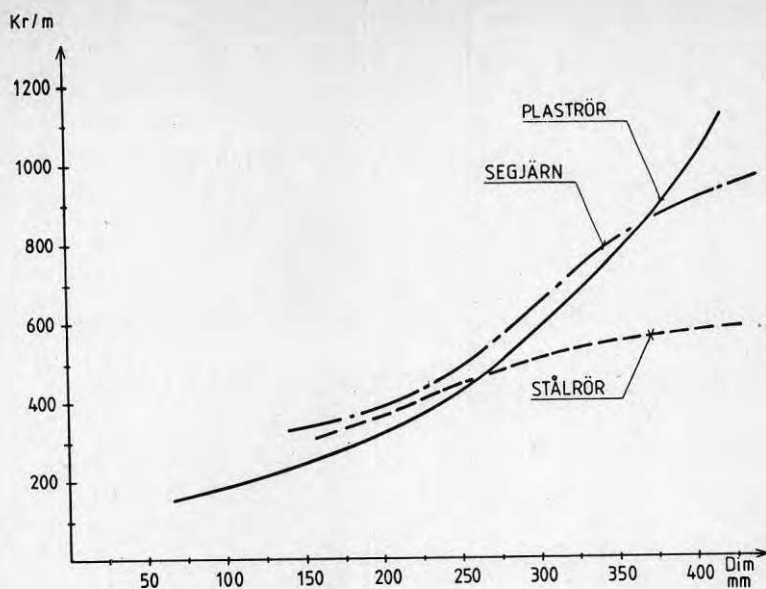
Av naturliga skäl är kostnaden för ledningarna i hög grad en funktion av hur pass långa dessa ledningar måste göras: ju längre ledningar som krävs, desto dyrare ställer sig investeringen.

Två skilda ledningstyper är aktuella: dels värmekällsledning och dels värmevattensledning. Kostnaden per löpmeter ledning varierar rätt avsevärt mellan dessa två typer av ledningar. Isoleringsbehov, fogmetod, rörmaterial mm gör att investeringskostnaden per löpmeter värmevattensledning är betydligt högre än investeringskostnaden per löpmeter värmekällsledning (Detta innebär att placeringen av värmepumpen kan göras till föremål för en ekonomisk bedömning i sig.)

Kostnaden per löpmeter ledning är dessutom en funktion av diametern på ledningarna: ju större diameter, desto högre pris per meter.



Figur 6.5: Sambandet mellan diameter och löpmeterpris för värmevattensledning.



Figur 6.6: Sambandet mellan diameter och löpmeterpris för värmekällsledning.

Detta innebär att kostnaden för nödvändiga ledningar även är en funktion av värmepumpens maxeffekt. Ju större effekt värmepumpen dimensioneras för, desto grövre ledningar krävs. Sambandet mellan anläggningseffekt och nödvändig diameter på värmevattensledningen kan beräknas enligt formeln:

$$D_{vv} = \sqrt{\frac{4}{c_{pvv} \times \pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_v}{v_{vv} \times \Delta t_{vv} \times \rho_{vv}}}$$

D_{vv} = ledningsdiameter, värmevattensledning. (m)
 c_{pvv} = värmevattnets värmekapacitet. (kJ/kg C°)
 P_v = värmepumpens termiska effekt. (kW)
 v_{vv} = värmevattnets strömningshastighet. (m/s)
 Δt_{vv} = värmevattnets temperaturhöjning. (C°)
 ρ_{vv} = värmevattnets densitet. (kg/m³)

Sambandet mellan anläggningseffekt och nödvändig diameter på värmekällsledningen kan beräknas enligt formeln:

$$D_{vk} = \sqrt{\frac{4}{c_{pvk} \times \pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_v \times (\Phi - 1)}{v_{vk} \times \Delta t_{vk} \times \rho_{vk} \times \Phi}}$$

D_{vk} = ledningsdiameter, värmekällsledning. (m)
 c_{pvk} = värmekällans värmekapacitet. (kJ/kg C°)
 P_v = värmepumpens termiska effekt. (kW)
 v_{vk} = värmekällans strömningshastighet. (m/s)
 Δt_{vk} = värmekällans temperaturhöjning. (C°)

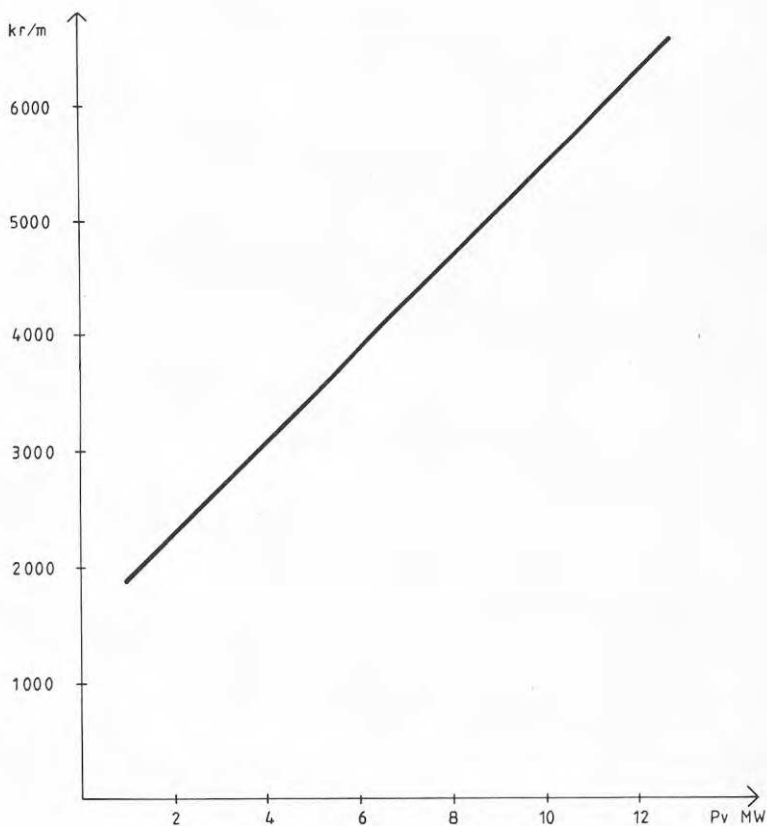
γ_k = värmvattnets densitet.

Φ = värmefaktor.

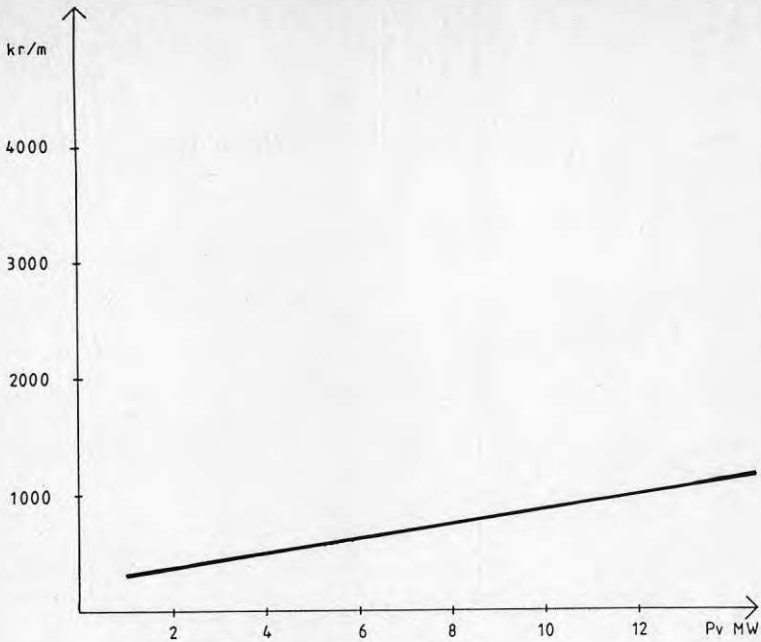
(kg/m^3)
(-)

Med hjälp av dessa två samband kan man formulera ett samband mellan värmepumpsanläggningens effekt och löpmetrpriset på de värmvattnets och värmekällsledningar som är nödvändiga!

Under förutsättning att värmekällans temperatursänkning är 4°C och värmebärarens temperaturhöjning är 8°C samt under förutsättning att markförhållandena är av normal karaktär, kan dessa samband mellan investeringsbehov per löpmetr ledning för värmvattenledningen respektive värmekällan och anläggningens effekt beskrivas grafiskt enligt figurer 6.7 och 6.8.



Figur 6.7. Sambandet mellan anläggningseffekt och löpmeterkostnad för värmvattnsledning.



Figur 6.8. Sambandet mellan anläggningseffekt och löpmeterkostnad för värmekällsledning.

Sambanden kan även uttryckas som formler enligt:

- a) Investeringsbehov/m värmevattenledning = $1.500 + 0,4P_v$
 b) Investeringsbehov/m värmekällsledning = $275 + 0,06P_v$

Det totala investeringsbehovet för värmepumpen inklusive ledningar för värmevatten och värmekälla kan alltså uttryckas enligt:

$$c) I_{0tot} = 560.000 + 1.190P_v + L_{vv}(1.500 + 0,4P_v) + L_{vk}(275 + 0,06P_v)$$

I_{0tot} = investeringsbehovet totalt (kr)
 P_v = värmepumpens termiska effekt (MW)
 L_{vv} = längden på värmevattenledningen (m)
 L_{vk} = " " värmekällsledningen (m)

6.3.2 Besparingseffekter av en värmepumpsinvestering.

För att fördyringen i form av investeringskostnader skall vara ekonomiskt motiverad, krävs att värdet av motsvarande besparingar som möjliggörs är minst lika stort.

Besparingseffekterna av en värmepumpsinvestering kan också formuleras i termer av en lägre årskostnad för en och samma energiproduktion.

Årskostnaden för ett värmeverks energiproduktion kan delas upp i energikostnader och omkostnader. Energifkostnaden är en funktion av dels i vilken omfattning man utnyttjar olika produktionsanläggningar samt dels respektive produktionsanläggnings energipris. Omkostnaderna utgörs av kostnader för personal, underhåll, försäkringar, allmänna omkostnader mm.

Även om man kan anta att även omkostnaderna kommer att påverkas av en investering i en värmepumpsanläggning, förutsätts dock denna påverkan vara av marginell betydelse. En värmepumps eventuella ekonomi förutsätts huvudsakligen vara baserad på dess låga energipris och därmed dess förmåga att påverka och förbilliga energiproduktionen under året.

6.3.3 Energipriser.

De ekonomiska fördelarna med en värmepump är alltså i huvudsak baserade på dess lägre kostnade per producerad energienhet i jämförelse med alternativa produktionsanläggningar.

För de enskilda produktionsanläggningarna utom värmepumpen, kan energipriset beräknas utifrån formeln:

$$c = \frac{p}{E \times \eta}$$

c = energipriset

p = inköpspriset för det aktuella energislaget.

E = värmevärdet för det aktuella energislaget.

η = verkningsgrad hos den aktuella anläggningen.

För närvarande kan energipriset vid kol-, flis- och oljeeldning beräknas uppgå till:

<u>Värmekälla</u>	<u>Energipris</u>
kolpanna	ck = 0,078 kr/kWh
flispanna	cf = 0,118 kr/kWh
oljepanna	co = 0,150 kr/kWh

För värmepumpens del gäller att energipriset kan delas upp i dels kostnaden för drift av kompressorn och dels kostnaden för den nödvändiga transporten av vatten genom ledningarna fram till och bort från värmepumpsanläggningen.

Dessa båda kostnadskomponenter kan beräknas enligt:

a) Kostnaden för drift av kompressorn = $\frac{cel}{\Phi}$

cel = priset på elkraft
 Φ = värmefaktorn

b) Överförings- = $cel \left(\left(\frac{Rvk \times Lvk}{cpvk \times \Delta tvk \times \varphi vk \times \eta pvk} \right) + \right.$
 kostnaden $\left. + \left(\frac{Rvv \times Lvv \times (\Phi - 1)}{cpvv \times \Delta tvv \times \varphi vv \times \eta pvv \times \Phi} \right) \right)$

Rvv = ledningsmotstånd, värmevattenledning.

Rvk = " , värmekällledning

Lvv = ledningslängden, värmevattenledning

Lvk = " , värmekällledning

Δtvk = temperaturändring hos värmekällan.

Δtvv = " " värmevattnet.

ηp = verkningsgraden hos de pumpar som pumpar värmekällan respektive värmevattnet genom ledningarna.

φ = 1.000 kg/m^3

cpvv = värmevattnets värmekapacitet.

cpvk = värmekällans värmekapacitet.

Under förutsättning att:

cel = 0,16 kr/kWh

Φ = 3

R = 0,3 kPa/m

tvk = 4°C

tvv = 8°C

ηp = 0,7

φ = 1.000 kg/m^3

cpvv = cpvk = 4,2,

kan alltså kostnaden per producerad kWh för värmepumpens del beräknas enligt:

c) $cv = \frac{0,16}{3} + \frac{0,16}{4,2 \times 1000} \times \left(\frac{0,3 \times Lvk}{4 \times 0,7} + \right.$
 $\left. + \frac{0,3 \times Lvv \times (3-1)}{8 \times 0,7 \times 3} \right)$

6.3.4 Beräkning av energikostnaden.

Av avgörande betydelse för storleken på energikostnaden är storleken på det energibehov man skall tillgodose. Men även variationerna över året har stor betydelse för de direkta kostnadernas storlek!

För befintliga anläggningar kan medeleffektbehovet vid olika tillfällen under året erhållas från journaler som förs av energiverken. För nyproducerade anläggningar beräknas effektbehovet som en funktion av en statistiskt beräknad variation i utetemperaturen.

Effektbehovet är naturligtvis störst under årets kalla månader och minst under sommarmånaderna. Variationerna över året kan beskrivas grafiskt enligt:

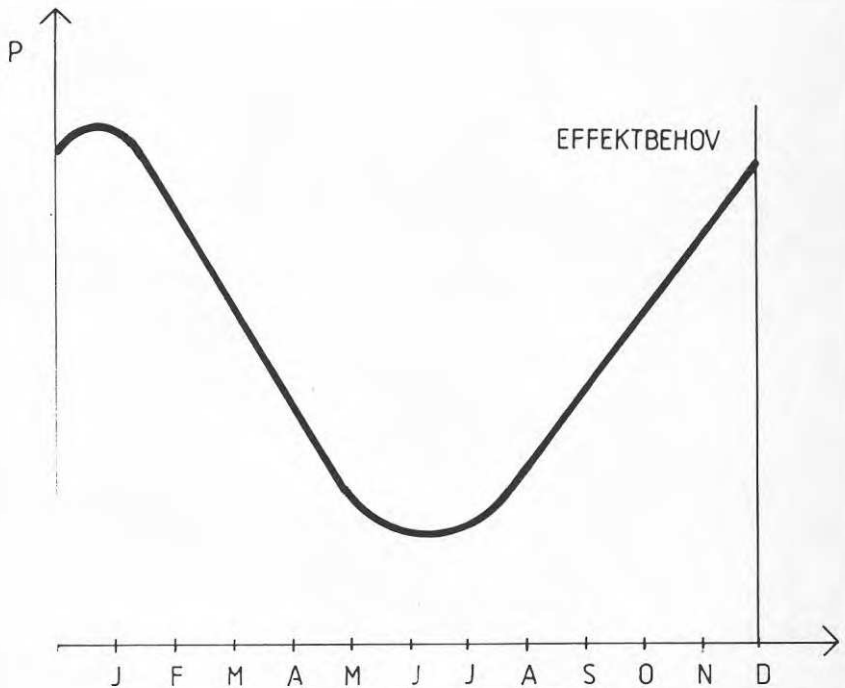


Fig. 6.9. Principskiss över effektbehovets variation över året.

Effektbehovet kan tillgodoses med hjälp av olika produktionsenheter, tex oljepannor, flispannor, kolpannor och värmepumpar. Alla dessa produktionsenheter har speciella egenskaper, både med avseende på ekonomi och teknik.

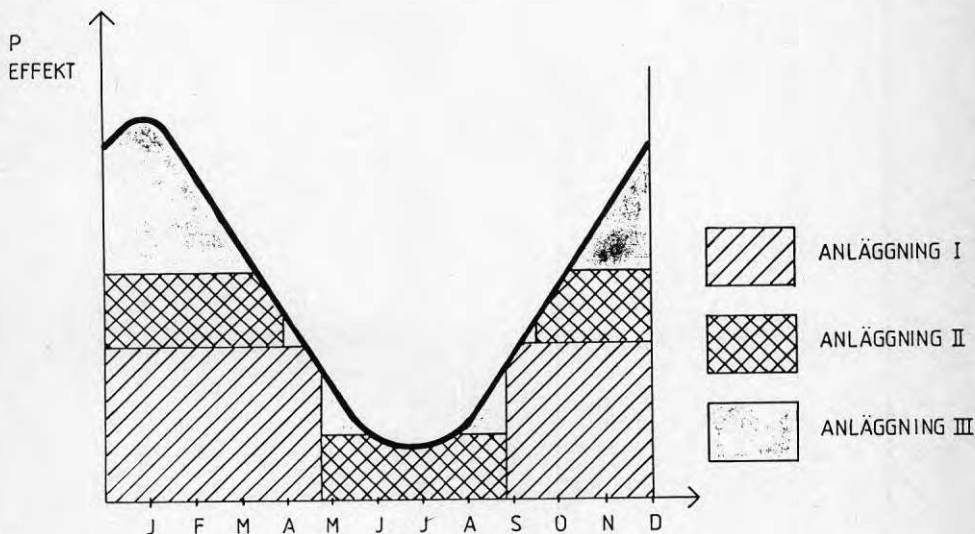
Tre faktorer som har speciell betydelse för energikostnaden för tillgodoseendet av ett givet effektbehov är de tillgängliga produktionsanläggningarnas energipris, deras maxeffekt samt hur mycket man kan reducera de olika anläggningarnas effekter.

Genom att utgå från att kriteriet för ett värmeverks energiproduktion är att tillgodose ett givet energibehov till lägsta möjliga kostnad, kan den direkta årskostnaden för energiproduktionen beräknas grafiskt.

Strävan efter kostnadsminimering innebär att en prioriteringsordning föreligger när det gäller utnyttjandet av olika värmekällor för att tillgodose ett givet effektbehov; man strävar hela tiden efter att utnyttja en viss produktionsanläggnings kostnadsfördelar maximalt innan man börjar utnyttja nästa produktionsanläggning.

Förutsatt:

1. Att man förfogar över en anläggning som består av tre skilda produktionsanläggningar; anläggning I, anläggning II samt anläggning III.
2. Att man känner de olika produktionsanläggningarnas respektive maxeffekt och reducerbarhet, samt
3. Att anläggning I:s energipris är lägre än anläggning II:s, som i sin tur är lägre än anläggning III:s energipris, kan utnyttjandet av de olika anläggningarna beskrivas grafiskt enligt:

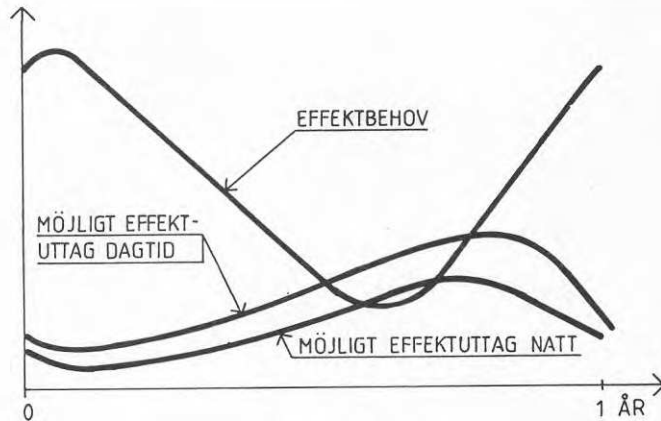


Figur 6.10. Principskiss för hur man kan beräkna omfattningen på utnyttjandet av de olika produktionsanläggningarna som ett värmeverk förfogar över.

VÄRMEVERKETS ENERGIKOSTNAD KAN SEDAN BESTÄMMAS GENOM ATT MAN BERÄKNAR STORLEKEN PÅ DE YTOR SOM MOTSVARAR ENERGIPRODUKTION MED OLIKA PRODUKTIONSANLÄGGNINGAR SAMT MULTIPLICERAR DESSA YTOR MED RESPEKTIVE PRODUKTIONSANLÄGGNINGENS ENERGIPRIS. UR BERÄKNINGSTEKNISK SYNPUNKT ÄR DET UNDERLÅTANDE ATT UTTRYCKA DE OLIKA KURVORNA SOM LIGGER TILL GRUND FÖR BERÄKNINGARNA I FORM AV RÅTA LINJER. DÄRIGENOM KAN MAN TILLÄMPA VANLIGA GEOMETRISKA METODER FÖR ATT BERÄKNA DE AKTUELLA YTORNA!

6.3.5 Betydelsen av variationer i tillgång och temperatur på avloppsvattnet.

För en värmepump som är avsedd att ta tillvara den energi som finns i avloppsvatten, föreligger ytterligare begränsande faktorer; tillgång och temperatur på avloppsvattnet avgör hur pass stor effekt som kan utvinnas ur detta. Detta möjliga effektuttag varierar över året. Lägst är det som regel under de kallaste månaderna och störst under sommar och höstmånaderna. Dessutom varierar möjligheten att utvinna effekt ur avloppsvattnet över dygnets timmar. I huvudsak är tillgången på avloppsvatten större under dagtid än under nattetid, varför maximalt möjligt effektuttag också är större under dagen än under natten! Dessa begränsningar måste beaktas när man försöker bedöma ett värmeverks energiproduktion när man förfogar över en värmepump. Detta kan man göra genom att komplettera ovanstående graf med de aktuella kurvorna för maximalt möjliga effektutvinning ur avloppsvattnet:



Figur 6.11. Kurvor över effektbehovets variation över året samt maximalt möjligt effektuttag ur avloppsvattnet vid olika tidpunkter.

För fastställande av energikostnaden för det aktuella värmeverket går man till väga på samma sätt som tidigare. Dvs man beräknar storleken på de ytor som representerar olika produktionsanläggningars utnyttjade samt multiplicerar dessa ytor med respektive produktionsanläggningars energipris.

6.3.6 Beräkning av energikostnaden som en funktion av värmepumpens effekt.

Så länge värmepumpen är relativt liten och så länge ett visst effektbehov ständigt föreligger finns i princip inga hinder att utnyttja värmepumpens hela kapacitet under hela året. Detta gäller så länge:

- 1) effekten på värmepumpen inte vid något tillfälle överstiger effektbehovet, samt
- 2) den effekt värmepumpen dimensionerats för ej överstiger maximalt möjliga effektuttag ur avloppsvattnet vid något tillfälle.
- 3) den temperatur som värmepumpen kan leverera värmevattnet vid inte överskrids.

Ju större man gör värmepumpen, desto kortare tider kan man dock förväntas kunna utnyttja dess hela effekt. Dessutom påverkar värmepumpens storlek möjligheterna att utnyttja övriga produktionsanläggningar. En marginell ökning i värmepumpseffekt kan få en dominoeffekt när det gäller utnyttjandet av tillgängliga produktionsanläggningar! Kostnadskonsekvenserna av en värmepumpsinvestering är alltså en funktion av storleken på denna värmepump.

Genom att göra skilda antaganden om värmepumpens effekt samt beräkna den direkta kostnaden för energibehovets tillgodoseende under dessa skilda antaganden, kan man formulera energikostnaden som en funktion av värmepumpseffekten. Som en konsekvens av produktionsanläggningarnas tekniska egenskaper samt effektbehovets variation över året kommer denna funktion för energikostnadens beroende av storleken på värmepumpen att ha olika utseende inom avgränsade intervall.

6.3.7 Optimal värmepumpseffekt.

Såväl den årliga besparingen som möjliggörs av en investering i en värmepump som storleken på denna investering kan således uttryckas som funktioner av värmepumpens storlek.

På grund av begränsningar i tillgång och temperatur på avloppsvattnet och på grund av variationer och begränsningar i behovet av värmeenergi, kan dessutom den besparing som möjliggörs av en marginell ökning i värmepumpseffekt förutsättas vara avtagande med ökande värmepumpseffekt, medan den marginella fördyringen av investeringskostnaderna är tämligen oberoende av värmepumpseffekten.

Det är därför av yttersta vikt att söka optimera värmepumpseffekten, dvs att söka dimensionera värmepumpen så att maximal lönsamhet kan erhållas. Detta kan göras på traditionellt ekonomiskt vis genom att man beräknar respektive marginalkostnad och marginalintäkt samt beräknar vid vilket värde som dessa är lika stora.

Vid den värmepumpsstorlek som anges av att marginalbesparingen är lika med marginalfördyringen, är det ej lönsamt med ytterligare effektökningar. Den eventuella ytterligare årliga besparing som en ökning av värmepumpens effekt utöver den punkt som angivits av kurvornas skärningspunkt är ej tillräcklig för att uppväga motsvarande marginella fördyring i investeringskostnader!

6.3.8. Beräkning av marginalbesparing och marginalfördyring.

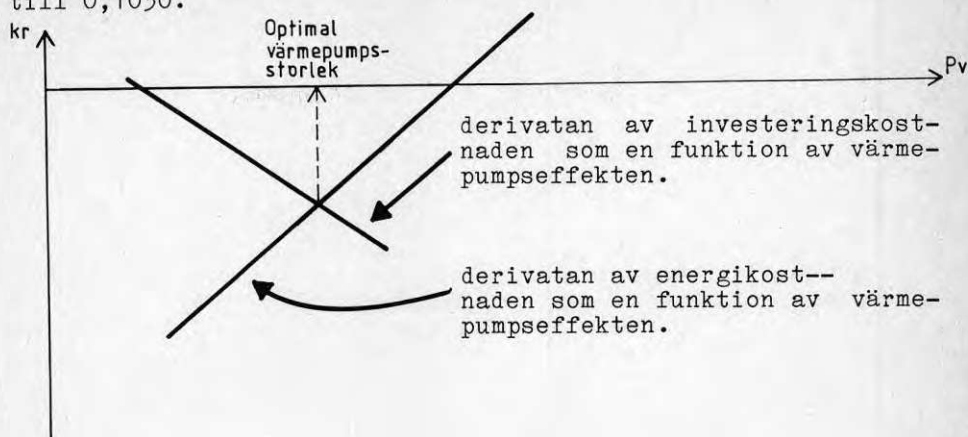
Marginalfördyringen respektive marginalbesparingen erhålls genom att ekvationerna för investeringskostnaden respektive energikostnaden deriveras med avseende på värmepumpseffekten. Eftersom funktionen för energikostnaden har olika utseende inom olika intervall, kommer även derivatan/marginalbesparingen att ha olika utseende inom dessa olika intervall.

För att bedömningarna skall vara ekonomiskt korrekta måste man även - som nämndes i inledningen - ta hänsyn till tidsfaktorn! Besparingar och fördyringar inträffar vid skilda tidpunkter. För att kunna jämföra de olika beloppen, måste man därför diskontera dem.

I princip kan man välja mellan två alternativa diskonteringsmetoder: nuvärdesmetoden och annuitetsmetoden. Dessa båda kalkylmetoder är varianter på samma grundläggande diskonteringsstänkande: man tar hänsyn till tidsfaktorn i beräkningarna genom att multiplicera den olika beloppen i kalkylen med en speciell diskonteringsfaktor som dels skall avspegla kapitalkostnaden och dels varierar med beloppens tidsmässiga avstånd från nutillfället. Men medan man med nuvärdesmetoden diskonterrar tillbaka alla framtida belopp till nutillfället och där jämför värdet av besparingar med motsvarande investeringskostnad, innebär annuitetsmetoden att man vänder på förfarandet och slår ut värdet av investeringen över investeringens ekonomiska livslängd i form av lika stora årliga belopp; annuiter.

För beräkning av den optimala värmepumpseffekten används annuitetsmetoden. Investeringskostnaden slås alltså ut över

investeringens livslängd med en diskonteringsfaktor, som vid 6% kalkylränta och 15 års beräknad ekonomisk livslängd uppgår till 0,1030.



Figur 6.12. Principskiss för beräkning av optimal värmepumpseffekt.

6.3.9 Besparingseffekten.

När man bestämt storleken på värmepumpen, kan man beräkna den besparingseffekt investeringen leder till.

I princip jämför man då energikostnaden i utgångsläget, dvs när värmepumpseffekten = +/- 0 MW, med energikostnaden när värmepumpseffekten är den optimala.

Mellanskillnaden utgör den årliga besparingen.

6.3.10 Investeringens lönsamhet.

Investeringens lönsamhet kan bedömas med olika metoder. Bla:

- a) Nuvärdeметoden: genom diskontering beräknar man ett nuvärde av de framtida besparingseffekterna.

Från detta nuvärde drar man sedan investeringskostnaden.

Mellanskillnaden utgör investeringens nuvärde.

Är detta positivt är investeringen lönsam.

- b) Internräntemetoden: genom att låta kalkylräntan vara en variabel samt beräkna vid vilket värde på denna kalkylränta som investeringens nuvärde är +/- 0, kan man beräkna hur stort avkastningskrav projektet orkar "bära" och fortfarande vara lönsamt.

Det värde på kalkylräntan man därvid erhåller kallas investeringens internränta.

Den internränta man erhåller måste sedan bedömas mot bakgrund av kapitalkostnadens uppskattade storlek. Är internräntan större än kapitalkostnaden är investeringen lönsam!

6.4 Optimering av värmepumpsanläggning för AB Enköpings värmeverk.

6.4.1 Investeringskostnaden.

Enligt avsnitt 6.3, kan investeringskostnaden för en värmepumpsanläggning kan beräknas som en funktion av dess effekt enligt formeln:

$$I_{0tot} = 560.000 + 1.190P_v + L_{vv}(1.500 + 0,4P_v) + L_{vk}(275 + 0,06P_v)$$

$$\begin{aligned} I_{0tot} &= \text{investeringsbehovet} && \text{(kr)} \\ P_v &= \text{värmepumpens termiska effekt} && \text{(MW)} \\ L_{vk} &= \text{längden på värmekällledningen} && \text{(m)} \\ L_{vv} &= \text{" " värmevattenledningen} && \text{(m)} \end{aligned}$$

För Enköpings Värmeverks del avses värmepumpen att bli placerad så att de respektive ledningarnas längd blir:

$$\begin{aligned} L_{vk} &= 40 \text{ m} \\ L_{vv} &= 260 \text{ m} \end{aligned}$$

Detta innebär att investeringskostnaden kan beräknas enligt:

$$\begin{aligned} I_{0tot} &= 560.000 + 1.190P_v + 260(1.500 + 0,4P_v) + 40(275 + 0,06P_v) = \\ &= 961.000 + 1.296,4P_v \end{aligned}$$

På grund av dåliga markförhållanden för planerad värmepumps- och ledningsförläggning, bedöms anläggningen fördyras utöver ovanstående beräkning med ca 1,5 miljoner!

6.4.2 Marginalfördyringen.

Marginalfördyringen beräknas som derivatan av investeringskostnaden.

$$dI_{0tot}/dP_v = 1.296,4$$

$$\begin{aligned} \text{Annuiteten av denna} \\ \text{marginalfördyring (6\%;15år)} &= 0,1030 \times 1.296,4 = 133,5 \text{ kr} \end{aligned}$$

6.4.3 Energifriset för värmepumpen.

Längden på de respektive ledningarna hade också betydelse för kostnaden för energiproduktion i en värmepumpsanläggning. Enligt avsnitt 6.3.3 kan detta energipris beräknas enligt formeln:

$$cv = \frac{0,16}{3} + \frac{(0,3 \times Lvk + 0,3 \times 2 \times Lvv \times (3-1))}{4 \times 0,7 \times 8 \times 0,7 \times 3}$$

Då längden på värmekäll- och värmevattensledningen för Enköpings del beräknas bli 40 m resp. 260 m, kan formeln för energiprisets beräkning skrivas som:

$$cv = \frac{0,16}{3} + \frac{(0,3 \times 40 + 0,3 \times 2 \times 260 \times (3-1))}{4 \times 0,7 \times 8 \times 0,7 \times 3} =$$

$$= 0,054 \text{ kr/kWh}$$

Det framgår att kostnaden för transport av värme- och värmekällsvatten är ytterst marginell.

6.4.4. Energitillämpningens enheternas effekt och reducerbarhet.

AB Enköpings Värmeverk förfogar fn (se avsnitt 3.2.) över en värmeanläggning som ur beräkningstekniskt avseende kan anses bestå av kolpanna på 16MW, 2 flispannor på vardera 5,8 MW samt oljepannor med "tillräcklig" effekt för att hela behovet av energi skall kunna tillgodoses.

Reducerbarheten för de olika produktionsanläggningarna är:

- a) Flispannor 33%
- b) Kolpanna 20%
- c) Oljepannor 100%

Finns det anledning att komplettera denna anläggning med en värmepumpsanläggning, och hur stor bör då denna vara? Värmepumpsaggregatet förutsätts bestå av två separata pumphuset. Reducerbarheten för vardera av dessa aggregat är:

- d) Värmepumpar 50%

6.4.5 Effektbehovets variation över året.

Medeleffektbehovet under olika månader framgår av följande tabell som ställts samman med utgångspunkt i de journaler som förts av energiverkets personal:

Tabell 6.1. Medeleffektbehovet för olika månader under året.

<u>Månad</u>	<u>Effektbehov(MW)</u>
Januari	46,8
Februari	51,0
Mars	43,4
April	29,8
Maj	17,0
Juni	8,5
Juli	6,8
Aug	9,4
Sept	18,7
Okt	32,3
Nov	40,8
Dec	42,5

6.4.6 Variationer i maximal termisk effekt från värmepump.

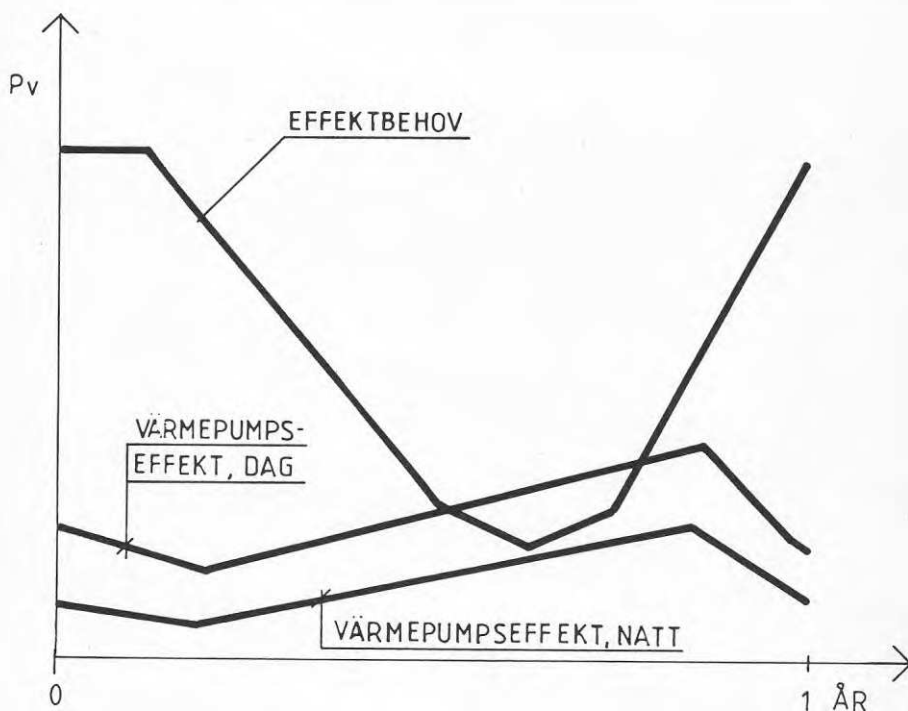
Variationen över året i maximalt möjlig effektutvinning med värmepump under dag - respektive nattetid, framgår av följande tabell, som även den är sammanställd av data ur de journaler som förs av det kommunala avloppsreningsverkets personal:

Tabell 6.2. Variationer i maximal termisk effekt från värmepump under respektive dag- resp. nattetid.
Värmefaktor = 3

<u>Månad</u>	<u>Genomsnittlig max effekt under dagtid (08.00 - 24.00)(MW)</u>	<u>Genomsnittlig maxeffekt under nattetid (00.00 - 08.00)(MW)</u>
Jan	4,8	3,0
Feb	4,7	2,4
Mar	3,8	2,1
Apr	6,5	3,6
Maj	7,1	3,9
Jun	9,3	5,1
Jul	10,7	5,9
Aug	11,0	6,0
Sep	12,8	7,1
Okt	15,0	8,3
Nov	9,3	5,3
Dec	7,4	4,1

6.4.7 Beräkning av energikostnaden som en funktion av värmepumpseffekten

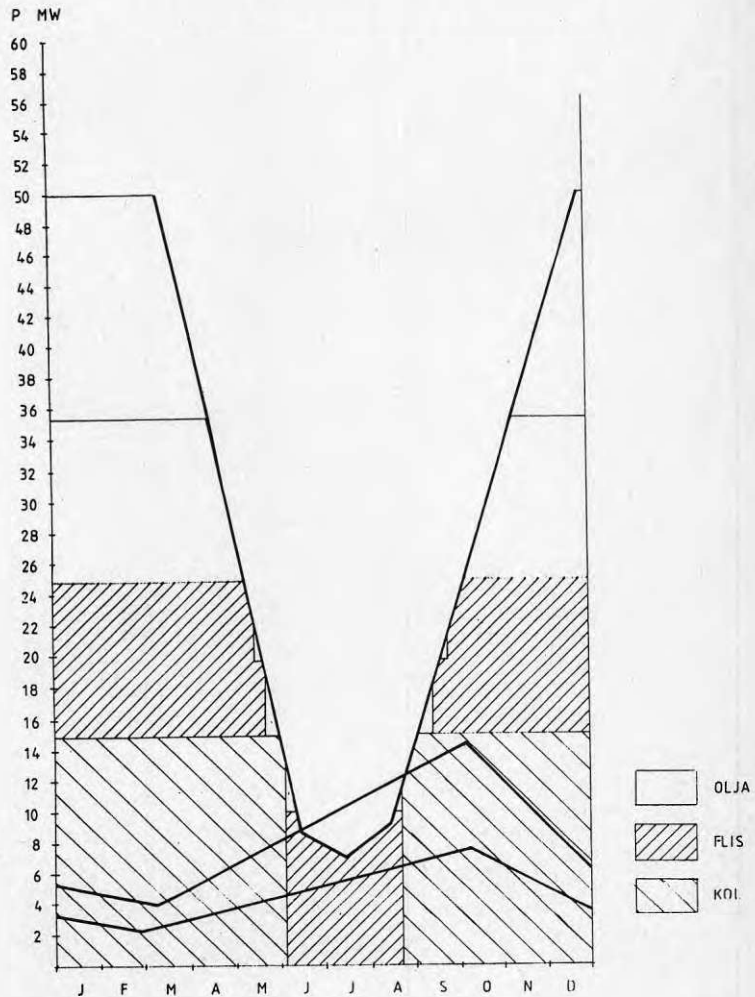
Med hjälp av minsta kvadratmetoden kan man beskriva effektbehovet under året i form av fyra räta linjer samt maximal termisk effekt vid skilda tidpunkter i form av dels tre räta linjer som skall avspegla möjligheterna att utvinna effekt under dagtid och dels tre räta linjer som skall avspegla möjligheterna under nattetid:



Figur 6.13. Effektbehovets variation under året samt maximal termisk effekt från värmepumpen vid skilda tidpunkter under året och under dygnet.

Med utgångspunkt i dels denna figur och dels de data som föreligger rörande de tillgängliga produktionsanläggningarnas maxeffekt och reducerbarhet, kan man energikostnaden under olika antaganden om nominell värmepumpseffekt beräknas grafiskt.

I utgångsläget, dvs när man ej förfogar över någon värmepump, kan utnyttjandet av de tillgängliga produktionsanläggningarna beskrivas enligt:



Figur 6.14. Optimal driftstrategi i utgångsläget, dvs när man ej investerat i värmepump ($P_v=0$).

Energikostnaden kan beräknas enligt:

$$C = \overset{1,975}{\int} (P(h)-39,3)dh \times co + \overset{7,500}{\int} (P(h)-39,3)dh \times co + \\ + 100,937,6 \times ck + 73,057,1 \times cf + 60,867,8 \times co$$

Inom intervallet $0 < P_v < 0,3$ kan energikostnaden beräknas som en funktion av P_v enligt:

$$C = \overset{1,975}{\int} (P(h)-39,3)dh \times co + \overset{8,760}{\int} (P(h)-39,3)dh \times co + 8,760P_v \times \\ \times co + 100,937,6 \times ck - 1,937,5P_v \times ck + 73,057,1 \times cf - \\ - 1,632,9P_v \times cf - 64,6P_v^2 \times cf + 60,867,8 \times co - \\ - 5,088,8P_v \times co - 64,6P_v^2 \times co$$

När värmepumpseffekten överstiger 0,3 MW kommer flispannornas begränsade reducerbarhet att göra sig gällande. Man måste använda oljepannorna för att kompensera för flispannans begränsningar.

Därmed får formeln för energiprisets beräkning ett något annorlunda utseende. Detta utseende har formeln sedan i intervallet $0,3 < P_v < 1,9$, sedan gör sig återigen den begränsade reducerbarheten sig påmind och formeln ändrar utseende.

Formeln kommer alltså att ha olika utseende inom olika intervall.

Beräkningarna begränsas till följande 19 intervall:

- 0,0 < P_v < 0,3
- 0,3 < P_v < 1,9
- 1,9 < P_v < 2,0
- 2,0 < P_v < 2,3
- 2,3 < P_v < 2,4
- 2,4 < P_v < 3,1
- 3,1 < P_v < 3,6
- 3,6 < P_v < 3,8
- 3,8 < P_v < 4,1
- 4,1 < P_v < 5,2
- 5,2 < P_v < 6,2
- 6,2 < P_v < 7,0
- 7,0 < P_v < 7,7
- 7,7 < P_v < 8,6
- 8,6 < P_v < 9,1
- 9,1 < P_v < 9,2
- 9,2 < P_v < 12,2
- 12,2 < P_v < 14,3

Även om ytterligare intervall kan urskiljas, bedöms dock dessa vara tämligen ointressanta för beräkningarna! En ytterligare ökning av värmepumpens nominella effekt utöver 14,3 MW resulterar i ett negativt bidrag till energikostnaden (se fig 6.15.).

Funktionerna för energikostnadens beräkning inom de olika intervallen får följande utseenden:

$$0 < P_v < 0,3:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 8,760 Pvcv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 7,2941,6cf - 1,736,3Pvcf - 64,6Pc^2cf + 60,755,1co - 5,088,8Pvco + 64,6Pv^2co$$

$$0,3 < P_v < 1,9:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 8,760 Pvcv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 73,278,8cf - 3,339,2Pvcf + 352,1Pv^2cf + 60,296,8co - 3,422,8Pvco - 352,1Pv^2co$$

$$1,9 > P_v < 2,0:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 8,760 Pvcv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 70,994,7ck - 1,739,2Pvcf + 133,4Pv^2cf + 62,679,6co - 5,063,3Pvco - 133,4Pv^2co$$

$$2,0 < P_v < 2,3:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 8,760 Pvcv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 69,194,8cf - 71,7Pvcf - 283,3Pv^2cf + 64,246,2co - 6,688,8Pvco + 283,3Pv^2co$$

$$2,3 < P_v < 2,4:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco - 2,327,8cv + 10,793,3Pvcv - 444,4Pv^2cv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 69,194,8cf - 71,7Pvcf - 283,3Pv^2cf + 66,574co - 8,722,1Pvco + 727,7Pv^2co$$

$$2,4 < P_v < 3,1:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco - 2,327,8cv + 10,793,3Pvcv - 444,4Pv^2cv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 67,341,8cf + 1,021,7Pvcf - 416,7Pv^2cf + 68,429co - 9,815,5Pvco + 861,1Pv^2co$$

$$3,1 < P_v < 3,6:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 354,2cv + 9,068,4Pvcv - 166,7Pv^2cv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 67,341,8cf + 1,021,7Pvcf - 416,7Pv^2cf + 68,074,8co - 10,123Pvco + 1,027,8Pv^2co$$

$$3,6 < P_v < 3,8:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 354,2cv + 9,068,4Pvcv - 166,7Pv^2cv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 85,794,2cf - 6,411,6Pvcf + 218,7Pv^2cf + 49,572,4co - 2,690,6Pvco + 392,4Pv^2co$$

$$3,8 < P_v < 4,1:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + 845,8cv + 9,701,7Pvcv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 85,794,2cf - 6,411,6Pvcf + 218,7Pv^2cf + 50,772,4co - 3,323,9Pvco + 475,7Pv^2co$$

$$4,1 < P_v < 5,2:$$

$$C = \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco + \sqrt[4]{P(h)-39,3} dhco - 11,545,8cv + 14,946,9Pvcv - 829,9Pv^2cv + 100,937,6ck - 1,937,5Pvck + 87,977,4cf - 7,504,9Pvcf + 352,1Pv^2cf + 59,232co - 7,475,7Pvco + 985,2Pv^2co$$

$$5, 2 < P_v < 5, 7:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 1.407, 2cv + 9.981 Pvcv - 1.702, 5Pv^2 cv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 74.028, 7cf - 3.717, 4Pvcf + 133, 4Pv^2 cf + 60.429, 9co - 6.338, 5Pvco + 727, 7Pv^2 co$$

$$5, 7 < P_v < 6, 2:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 1.407, 2cv + 9.981 Pvcv - 1.702, 5Pv^2 cv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 70.109, 1co - 8.788, 4Pvco + 861, 1Pv^2 co$$

$$6, 2 < P_v < 7, 0:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco - 1.792, 8cv + 11.014, 3Pvcv - 1.785, 5Pv^2 cv + 100.937, 5ck - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 73.309, 1co - 9.821, 7Pvco + 944, 4Pv^2 co$$

$$7, 0 < P_v < 7, 7:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco - 15.364, 4cv + 14.897, 7Pvcv - 2.063, 6Pv^2 cv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 66.523, 3co - 7.880, 4Pvco + 805, 5Pv^2 co$$

$$7, 7 < P_v < 8, 6:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco - 482, 7cv + 11.036, 1Pvcv - 1.813, 6Pvcv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 51.641, 6co - 4.018, 4Pvco + 555, 5Pv^2 co$$

$$8, 6 < P_v < 9, 1:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 24.453, 5cv + 5.266, 8Pvcv - 1.480, 3Pv^2 cv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 43.334, 7co - 2.068, 7Pvco + 440, 9Pv^2 co$$

$$9, 1 < P_v < 9, 2:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 31.939, 7cv + 3.633, 8Pvcv - 1.391, 3Pv^2 cv + 100.937, 6co - 1.937, 5Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 47.077, 8co - 2.885, 2Pvco + 485, 4Pv^2 co$$

$$9, 2 < P_v < 12, 2:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 39.006, 4cv + 3.633, 8Pvcv - 1.474, 7Pvcv + 100.937, 6Pvck - 1.937, 6Pvck + 64.570, 1cf - 1.290, 8Pvcf + 40.011, 1co - 2.885, 2Pvco + 568, 8Pv^2 co$$

$$12, 2 < P_v < 14, 3:$$

$$C = \frac{1}{4} \int_{h_1}^{h_2} (P(h) - 39, 3) dhco + \frac{1}{4} \int_{h_3}^{h_4} (P(h) - 39, 3) dhco + 17.590, 3cv + 7.149, 9Pvcv - 1.619, 2Pv^2 cv + 100.937, 6ck - 1.937, 5Pvck + 1.290, 8cf - 61.427, 2co - 6.401, 3Pvco + 713, 3Pvco$$

$$h_1 = 0$$

$$h_2 = 1.975$$

$$h_3 = 7.500$$

$$h_4 = 8.760$$

6.4.8 Marginalbesparingen.

Marginalbesparingen erhålls genom att man deriverar energikostnaden med avseende på värmepumpseffekten. Derivatans uttrycker hur mycket lägre energikostnaden blir om man ökar värmepumpens effekt marginellt. Marginalbesparingen blir därmed lika med denna derivata med ombytt tecken.

Eftersom funktionen för energikostnadens beroende av värmepumpseffekten har olika utseende i olika intervall, kommer även derivatan att byta utseende inom dessa intervall.

$$\frac{0 < P_v < 0,3}{dC/dP_v} = 8.760c_v - 1.937,5c_k - 1.736,3c_f - 129,2P_v c_f - 5.088,8c_o + 129,2P_v c_o$$

$$\frac{0,3 < P_v < 1,9}{dC/dP_v} = 8.760c_v - 1.937,5c_k - 3.339,2c_f + 704,2P_v c_f - 3.422,8c_o - 704,2P_v c_o$$

$$\frac{1,9 < P_v < 2,0}{dC/dP_v} = 8.760c_v - 1.937,5c_k - 1.739,2c_f + 266,8P_v c_f - 5.063,3c_o - 266,8P_v c_o$$

$$\frac{2,0 < P_v < 2,3}{dC/dP_v} = 8.760c_v - 1.937,5c_k - 71,7c_f - 566,6P_v c_f - 6.688,8c_o + 566,6P_v c_o$$

$$\frac{2,3 < P_v < 2,4}{dC/dP_v} = 10.793,3c_v - 888,8P_v c_v - 1.937,5c_k - 71,7c_f - 566,6P_v c_f - 8.722,1c_o + 1.455,4P_v c_o$$

$$\frac{2,4 < P_v < 3,1}{dC/dP_v} = 10.793,3c_v - 888,8P_v c_v - 1.937,5c_k + 1.021,7c_f - 833,4P_v c_f - 9.815,5c_o + 1.722,2P_v c_o$$

$$\frac{3,1 < P_v < 3,6}{dC/dP_v} = 9.068,4c_v - 333,4P_v c_v - 1.937,5c_k + 1.021,7c_f - 833,4P_v c_f - 10.123,9c_o + 2.055,6P_v c_o$$

$$\frac{3,6 < P_v < 3,8}{dC/dP_v} = 9.068,4c_v - 333,4P_v c_v - 1.937,5c_k - 6.411,6P_v c_f + 437,4P_v c_f - 2.690,6c_o + 784,8P_v c_o$$

$$\frac{3,8 < P_v < 4,1}{dC/dP_v} = 9.701,7c_v - 500P_v c_v - 1.937,5c_k - 6.411,6c_f + 437,4P_v c_f - 3.323,9c_o + 951,4P_v c_o$$

$$\frac{4,1 < P_v < 5,2}{dC/dP_v} = 14.946,9c_v - 1.659,8P_v c_v - 1.937,5c_k - 7.504,9c_f + 704,2P_v c_f - 7.475,7c_o + 1.970,4P_v c_o$$

$$\frac{5,2 < P_v < 5,7}{dC/dP_v} = 9.981c_v - 833,4P_v c_v - 1.937,5c_k - 3.717,4c_f + 266,8P_v c_f - 6.338,5c_o + 1.455,4P_v c_o$$

$$5,7 < P_v < 6,2:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 9,981 cv - 833,4 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 8,788,4 co + 1,722,2 P_v co$$

$$6,2 < P_v < 7,0:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 11,014,3 cv - 1000 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 9,821,7 co + 1,888,8 P_v co$$

$$7,0 < P_v < 7,7:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 14,897,7 cv - 1,555,6 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 7,880 co + 1,611,0 P_v co$$

$$7,7 < P_v < 8,6:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 11,036,1 cv - 1,055,6 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 4,018,4 co + 1,111,0 P_v co$$

$$8,6 < P_v < 9,1:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 5,266,8 cv - 389 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 2,068,7 co + 881,8 P_v co$$

$$9,1 < P_v < 9,2:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 3,633,8 cv - 211 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 2,885,2 co + 970,8 P_v co$$

$$9,2 < P_v < 12,2:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 3,633,8 cv - 377,8 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 2,885,2 co + 1,137,6 P_v co$$

$$12,2 < P_v < 14,3:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = 7,149,9 cv - 666,8 P_v cv - 1,937,5 ck - 1,290,8 cf - 6,401,3 co + 1,426,6 P_v co$$

Under förutsättning att energipriserna är de ovan nämnda, dvs:

$$cv = 0,054 \text{ kr/kWh,}$$

$$ck = 0,078 \text{ kr/kWh,}$$

$$cf = 0,118 \text{ kr/kWh,}$$

$$co = 0,150 \text{ kr/kWh,}$$

blir derivatans värde i de olika intervallen:

$$0 < P_v < 0,3:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = -646,3 + 4,1 P_v$$

$$0,3 < P_v < 1,9:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = -585,5 - 22,5 P_v$$

$$1,9 < P_v < 2,0:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = -642,8 - 8,5 P_v$$

$$2,0 < P_v < 2,3:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = -689,9 + 18,3 P_v$$

$$2,3 < P_v < 2,4:$$

$$\frac{dC}{dP_v} = -885,1 + 103,6 P_v$$

$$\frac{2,4 < Pv < 3,1:}{dC/dPv} = -920 + 111,9Pv$$

$$\frac{3,1 < Pv < 3,6:}{dC/dPv} = -1.059,4 + 191,9Pv$$

$$\frac{3,6 < Pv < 3,8:}{dC/dPv} = -821,6 + 151,3Pv$$

$$\frac{3,8 < Pv < 4,1:}{dC/dPv} = 882,4 + 167,3Pv$$

$$\frac{4,1 < Pv < 5,2:}{dC/dPv} = -1.351 + 289,1Pv$$

$$\frac{5,2 < Pv < 5,7:}{dC/dPv} = -1.001,6 + 173,3Pv$$

$$\frac{5,7 < Pv < 6,2:}{dC/dPv} = -1.082,7 + 213,3Pv$$

$$\frac{6,2 < Pv < 7,0:}{dC/dPv} = -1.181,9 + 229,3Pv$$

$$\frac{7,0 < Pv < 7,7:}{dC/dPv} = -680,9 + 157,7Pv$$

$$\frac{7,7 < Pv < 8,6:}{dC/dPv} = -310,2 + 109,7Pv$$

$$\frac{8,6 < Pv < 9,1:}{dC/dPv} = -329,3 + 111,3Pv$$

$$\frac{9,1 < Pv < 9,2:}{dC/dPv} = -540 + 134,2Pv$$

$$\frac{9,2 < Pv < 12,2:}{dC/dPv} = -540 + 150,2Pv$$

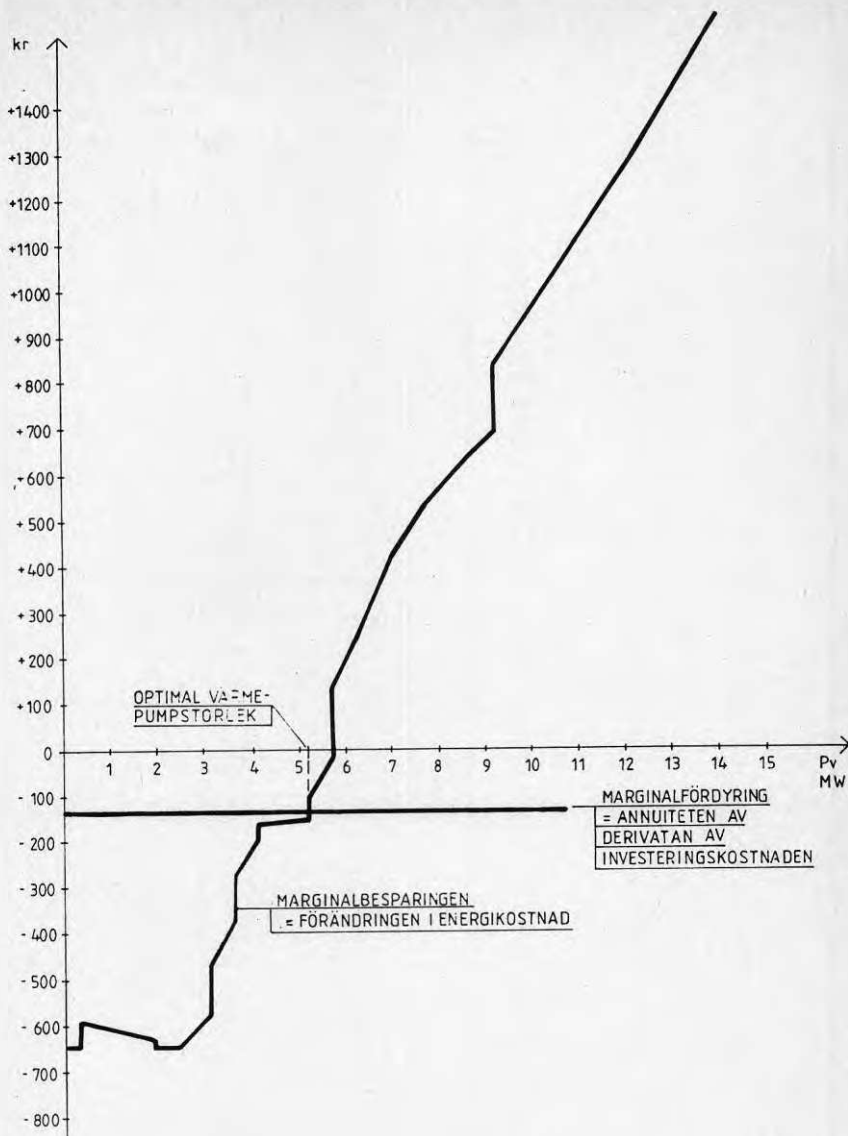
$$\frac{12,2 < Pv < 14,3:}{dC/dPv} = -877,5 + 178Pv$$

Derivatans värden vid intervallgränserna blir därmed:

<u>Intervall:</u>	<u>Derivatans vär- de vid vänster intervallgräns:</u>	<u>Derivatans vär- de vid höger intervallgräns:</u>
0,0<Pv<0,3	-646,3	-645,1
0,3<Pv<1,9	-592,3	-628,3
1,9<Pv<2,0	-659,0	-659,8
2,0<Pv<2,3	-653,3	-647,8
2,3<Pv<2,4	-636,5	-636,5
2,4<Pv<3,1	-651,4	-573,1
3,1<Pv<3,6	-464,5	-368,6
3,6<Pv<3,8	-276,9	-246,7
3,8<Pv<4,1	-246,7	-196,5
4,1<Pv<5,2	-165,7	-152,3
5,2<Pv<5,7	-100,4	- 13,8
5,7<Pv<6,2	+133,1	+239,8
6,2<Pv<7,0	+239,8	+423,2
7,0<Pv<7,7	+423,0	+533,4
7,7<Pv<8,6	+534,5	+633,2
8,6<Pv<9,1	+627,9	+683,5
9,1<Pv<9,2	+681,2	+694,6
9,2<Pv<12,2	+841,8	+1.292,4
12,2<Pv<14,3	+1.294,1	+1.667,9
....		

6.4.9 Optimal värmepumpseffekt.

Optimal värmepumpseffekt erhålls som den effekt som anges av skärningspunkten mellan marginalbesparings- och (annuiteten av) marginalfördringen:



Figur 6.15. Marginalkostnad, marginalfördyring samt optimal värmepumpseffekt.

OPTIMAL VÄRMEPUMPSEFFEKT BÖR ALLTSÅ FÖR AB ENKÖPINGS VÄRME-
VERK VARA CA 5MW.

6.4.10 Värmepumpens lönsamhet.

a) Nuvärdet

Investeringsprojektets nuvärde lönsamhet erhålls genom att man beräknar nuvärdet av den årliga besparing som en värmepump på 5MW resulterar i, samt subtraherar investeringsbeloppet från detta nuvärde.

$$\begin{aligned} \text{Årlig besparing med en 5MW:s värmepump} &= \overset{1976}{\left(\overset{3740}{P(h)-39,3} \right) dxco + \left(\overset{5740}{P(h)-39,3} \right) dxco + 100.937,6ck + 72.941,6cf + 60.755,1co) -} \\ &= \left(\overset{7500}{\left(\overset{3740}{P(h)-39,3} \right) dxco + \left(\overset{5740}{P(h)-39,3} \right) dxco - 11.545,8cv + 74.734,5cv -} \right. \\ &\quad \left. - 20.747,5cv + 100.937,6ck - 9.687,5ck + 87.977,4cf - 37.524,5cf \right. \\ &\quad \left. + 8.802,5cf + 59.232co - 37.378,5co + 24.630co \right) = -42.441,2cv + 9.687,5ck \\ &\quad + 13.686,2cf + 14.271,6co = (-2.991,8 + 755,6 + 1.615,0 + 2.140,7) \times 10^3 \\ &= 2.219,5 \times 10^3 \end{aligned}$$

Nuvärdet av den årliga besparingen vid 6% (realt) avkastningsskrav samt 15 års ekonomisk livslängd:

$$V(\text{Årlig besparing}) = 9,7122 \times 2.219,5 \times 10^3 = 21.556.200 \text{ kr}$$

"Normal" investeringskostnad:

$$\begin{aligned} V(I_{0\text{tot}})_N &= 560.000 + 1.190Pv + 260(1.500 + 0,4Pv) + 40(275 + 0,06Pv) = \\ &= 961.000 + 1.296,4Pv = 961.000 + 6.482 \times 10^3 = \\ &= 7.443.000 \text{ kr} \end{aligned}$$

Investeringskostnad inklusive tillägg på grund av svåra markförhållanden (se avsnitt 6.4.1):

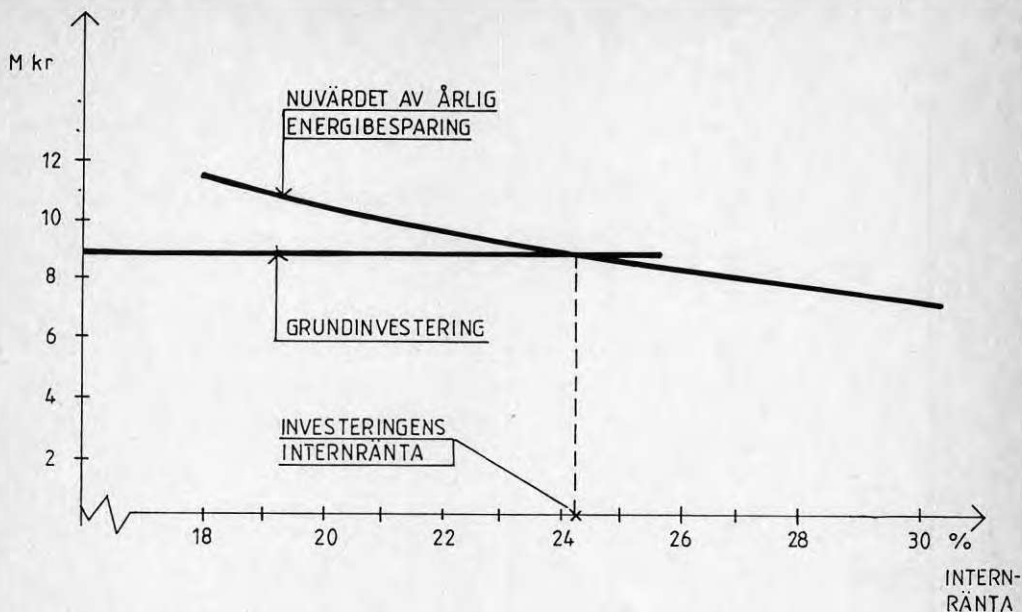
$$V(I_{0\text{tot}}) = 7.443.000 + 1.500.000 = 8.943.000$$

Nuvärdet av investeringsprojektet som helhet blir alltså ungefär:

$$V = 21.600.000 - 8.900.000 = 12.700.000 \text{ kr.}$$

b) Internräntan

Bestämning av projektets internränta kan ske grafiskt enligt:



Figur 6.16. Bestämning av projektets internränta.

PROJEKTETS INTERNRÄNTA ÄR ALLTSÅ CA 24%. DETTA MÅSTE ANSES VARA EN UTOMORDENTLIGT HÖG SIFFRA DÅ (DEN REALA) KAPITALKOSTNADEN KAN FÖRUTSÄTTAS LIGGA I INTERVALLET KRING 6%!

6.5 Begränsningar med avseende på temperatur

Fram- och returtemperaturer framgår av Figur 3.1. Med 5 MW termisk effekt måste teoretiskt värmepumpen sommartid gå nerreglerad under ca 100 timmar per år på grund av att temperaturkraven ej helt kan uppfyllas. Den tid under vilken nerreglering erfordras beror förutom av framledningstemperaturen på vilken maximal avgiven temperatur som kan tillåtas efter värmepumpen i Figur 3.1 är angivet två gränser +75 och +78°C. Erfarenheter från andra fjärrvärmeverk visar dock att med relativt enkla medel kan temperaturkraven sänkas så att värmepumpen ej begränsas beroende på temperaturen. Begränsningen på grund av temperaturkraven påverkar ej optimal storlek eftersom nerreglerad tid är kort.

7 ELKRAFTFÖRSÖRJNING

7.1 Befintlig elförsörjning och utbyggnadsmöjlighet

Enligt Enköpings elverk kan befintligt nät belastas med 5-6 MW kontinuerligt och start av 2 MW kortsluten asynkronmotor.

Förstärkning av nätet kan ske genom att ny 20 kV ledning dras ca 2,5 km. Den nya ledningen är kostnadsberäknad till 1 000 000 kr.

För anslutning av värmepump utan förstärkning av elnät bedöms kostnaden bli 500 000 kr inklusive ny transformator.

7.2. Begränsningar med avseende på elkraftförsörjning

Befintligt nät begränsar den kortslutna elmotorns effekt till 2 MW. Eftersom elmotoreffekten för en 5 MW värmepump blir ca 1,8 MW behövs i princip inga startströmsbegränsande åtgärder vidtas.

Om det under eventuell projektering visar sig att startströmmarna är för stora kan någon av följande åtgärder göras:

- nätet byggs ut,
- elmotorn förses med utrustning som begränsar startströmmarna.
- värmepumpen dimensioneras för lägre MW effekt än optimalt.
- två aggregat installeras.

I det följande har alternativet med två värmepumpar behandlats. Anläggningen beräknas fördyras med 500 000 kr jämfört med om inga åtgärder hade behövts vidtas.

8 TILLKOMMANDE KOSTNADER

Tillkommande kostnader orsakade av värmepumpinstallationer är i huvudsak beroende på ökat underhåll vilket beräknas uppgå till 1% på totala investeringar d v s 100 000 kr/år.

På övriga energiproduktionsanläggningar torde underhållet sjunka något vilket dock inte införts i kalkylen.

9 INVESTERINGSBEHOV

Investeringsbehovet för ingående komponenter och arbete kan uppdelas enligt:

Värmepump	3 500 kkr
El	700 kkr
Avloppsvatteninstallationer	1 000 kkr
Fjärrvärmeinstallationer	600 kkr
Byggarbeten inkl pålning	2 000 kkr
Övrigt	1 200 kkr
	<hr/>
	9 000 kkr

10 INVERKAN PÅ ISFÖRHÅLLANDE

Värmepumpinstallationen kommer att kyla ner avloppsvattnet till ca 2°C. Den inverkan som detta har på isförhållandena har noggrant utretts i bilaga 1. Beräkningarna visar att påverkan blir ytterst marginell.

AVLOPPSFLÖDE I ENKÖPINGSÅN

Hur påverkas isförhållandena?

Avloppsvattenmängder , q_{avl}

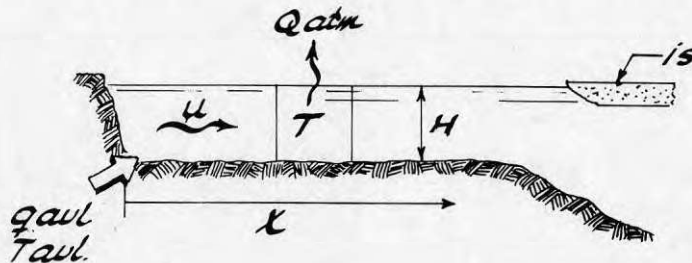
q max	18976 m ³ /d	= 0,22 m ³ /s
q medel	8959 "	= 0,10 "
q min	6345 "	= 0,07 "

Avloppsvattentemperatur , T_{avl}

max	10 °C
min	8 °C

Vattnet utleds i en 8 m bred och ca 35 m lång kanal före utlopp i ån. Djupet i kanalen ej angivet - antas vara 0,5 m. Kanalen är isfri några meter ut i ån.

Vattentemperaturen i kanalen avtar successivt p g a värmeavgivning till atmosfären. Följande modell kan tillämpas



där	T	= temp °C
	H	= djup m
	B	= bredd m
	u	= hastighet m/s
	t	= tid s
	q	= vattenflöde m ³ /s
	Q_{atm}	= värmefflöde W/m ²
	x	= avstånd till avloppsvattenutsläpp

$$-\rho c \times H \frac{dT}{dt} = Q_{atm}$$

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{gavl}{BH} \quad dt = \frac{BH}{gavl} dx$$

$$-\rho c \frac{gavl}{B} \frac{dT}{dx} = Q_{atm}$$

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{B}{\rho c gavl} Q_{atm} = -K Q_{atm}$$

Värmeavgivningen till atmosfären beror främst av vattentemperaturen. Tavl och vindhastigheten va. Inom ett begränsat temperaturintervall är Q_{atm} linjär enligt Macagno & Kennedy (Inst. Hydr. Res., Univ. of Iowa, Rept. 155, 1974).

$$Q_{atm} = \epsilon T + \eta$$

Detta ger:

$$\frac{dT}{dx} = -K (\epsilon T + \eta) \quad \text{gäller för } 0 < T < 5^\circ\text{C}$$

Lösning

$$T = A e^{-\alpha x} - B$$

$$\frac{dT}{dx} = -A \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha x} = -\alpha (T+B)$$

Identifiering ger

$$\alpha = K\epsilon \quad B = \frac{K\eta}{\alpha} = \frac{\eta}{\epsilon}$$

$$T = A e^{-K\epsilon \cdot x} - \frac{\eta}{\epsilon}$$

A bestäms ur randvillkoret

$$T = T_0 \quad \text{för } x = 0$$

$$T_0 = A - \eta/\epsilon \quad A = T_0 + \eta/\epsilon$$

$$T = (T_0 + \eta/\epsilon) e^{-K\epsilon x} - \eta/\epsilon$$

Avståndet till den punkt där isläggning sker bestäms av villkoret $T = 0$. Detta ger

$$0 = (T_0 + \eta/\epsilon) e^{-K\epsilon x_{is}} - \eta/\epsilon$$

$$x_{is} = -\frac{1}{K\varepsilon} \times \ln \frac{\eta}{\varepsilon(T_0 + \eta/\varepsilon)} = \frac{g \cdot c \cdot \text{gavl}}{B \cdot \varepsilon} \ln \left(\frac{\varepsilon}{\eta} \cdot T_0 + 1 \right)$$

I vårt fall räknas med medelvärden av gavl och Tav1 dvs
 $\text{gavl} = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ $\text{Tav1} = 282\text{K}$ (9°C).

Modellen gäller i princip ej för $T > 277\text{K}$ (5°C). Värmeavgivningen till atmosfären blir större än modellens i intervallet $5 < T < 9^\circ\text{C}$ på grund av att utstrålningen är proportionell mot T^4 . Vi väljer därför att räkna med $T_0 = 7^\circ\text{C}$ och antar att modellen gäller approximativt för $T < 7^\circ\text{C}$. Detta ger

$$x_{is} = \frac{4,2 \times 10^6 \times 0,10}{8 \times \varepsilon} \ln \left(7 \frac{\varepsilon}{\eta} + 1 \right) = \frac{5,25 \times 10^4}{\varepsilon} \ln \left(7 \frac{\varepsilon}{\eta} + 1 \right)$$

Konstanterna ε och η ges i bifogade diagram. För några kombinationer av vindstyrka och temperatur erhålls följande värden

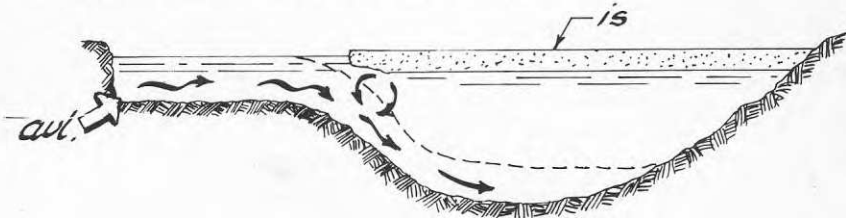
Värden på ε resp η i W/m^2

T_{luft} Vind $^\circ\text{C}$ m/s	-3	-7	-15
0	15/0	17/50	21/150
2,45	24/24	26/97	31/250
4,9	32/48	34/150	39/350

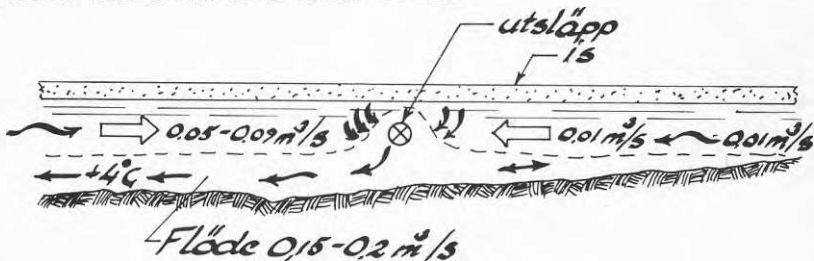
För $T_0 = 7^\circ\text{C}$ blir motsvarande värden på x_{is} i km

T_{luft} Vind $^\circ\text{C}$ m/s	-3	-7	-15	
0		3,8	1,7	km
2,45	4,5	2,1	1,1	"
4,9	2,8	1,5	0,78	"

Isläggingssträckan är avsevärt längre än tillgänglig kanallängd. Kanalen bör således alltid vara isfri. När det fortfarande varma vattnet når fram till ån kommer det att rinna ned som en tung varm bottenström och lägga sig vid botten. Temperaturen vid botten är troligen nära $+4^{\circ}\text{C}$.



Avloppsvattnet kommer inte att hinna kylas mer än några tiondels grader på vägen fram till ån. Blandning med kallare åvatten sker då så att blandningstemperaturen blir $+4^{\circ}\text{C}$ eller något lägre. Den bottenström som bildas av avloppsvatten och inblandat åvatten blir då ca dubbelt så stor som avloppsflödet. Genom att vattenflödet i ån är så litet att det troligen understiger den vattenmängd som blandas in i avloppsvattnet får vi en ström av ytligt vatten från båda hållen mot utsläppet. Mesta delen tas nedströms ifrån.



Värmeuttag ur avloppsvattnet innebär att t_0 minskar. Lägsta utgående temperatur bedöms ej vara lägre än $+2^{\circ}\text{C}$. Detta skulle ge följande värden på isläggingssträckan i kanalen.

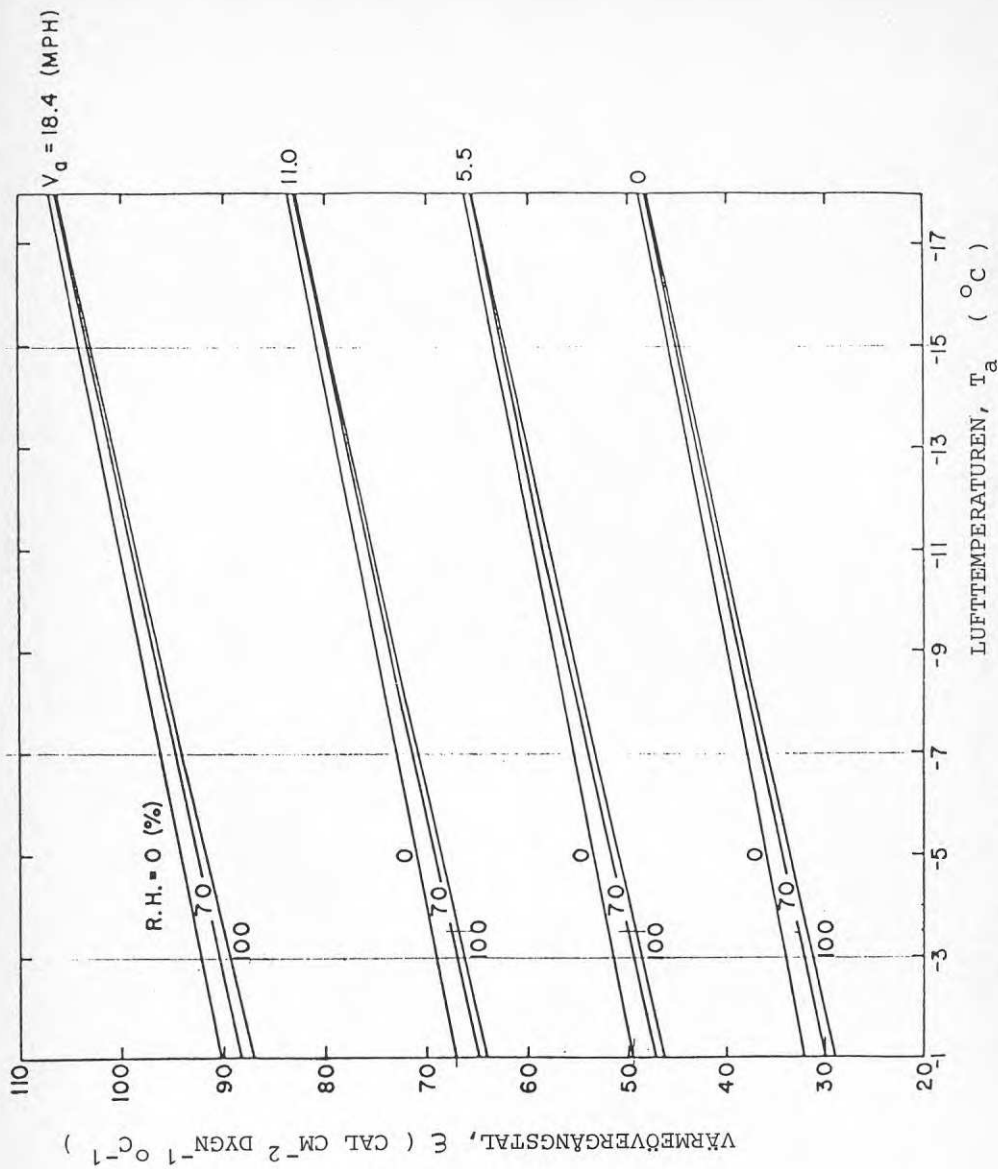
x_{is} för $T_0 = 2^{\circ}\text{C}$ i km

Vind m/s	T_{luft} $^{\circ}\text{C}$		
	-3	-7	-15
0		1,6	0,62
2,45	2,4	0,86	0,38
4,9	1,4	0,58	0,27

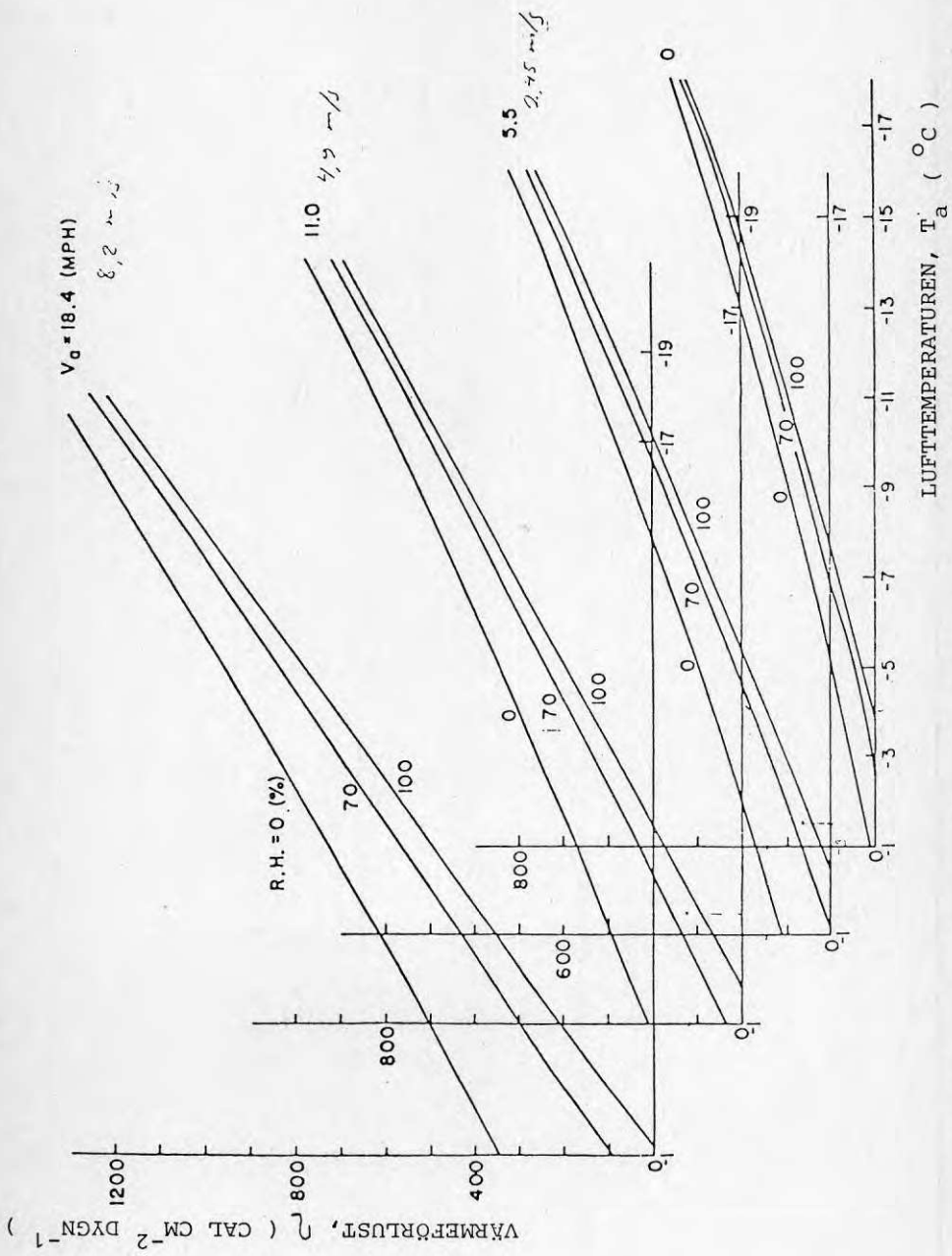
Även i detta fall kommer alltså kanalen att vara isfri och en ganska liten reduktion av temperaturen sker på vägen fram till ån. Liksom tidigare dyker avloppsvattnet ned, men det är inte säkert att det når ända ned till botten utan det kan också inlagras på en mellannivå. Förutsättningen för detta är att det finns en naturlig temperaturskiktning, som i så fall betingas av närheten till varmare sjövattnet. Blandningen mellan avloppsvattnet och åvattnet blir betydligt mindre än i det första fallet.

Det isfria området utanför kanalens mynning i ån blir troligen något mindre i det senare fallet, men skillnaden är inte särskilt stor. Avgörande är här densitetsskillnaden mellan åns ytvatten ($+0^{\circ}\text{C}$) och avloppsvattnet. I de båda fall som be-lysts är densiteten ungefär lika vid temperaturen $6,5$ respektive $1,5^{\circ}\text{C}$. Minst utbredning på det isfria området torde man få då avloppsvattnets temperatur vid utloppet i ån är $+4^{\circ}\text{C}$.

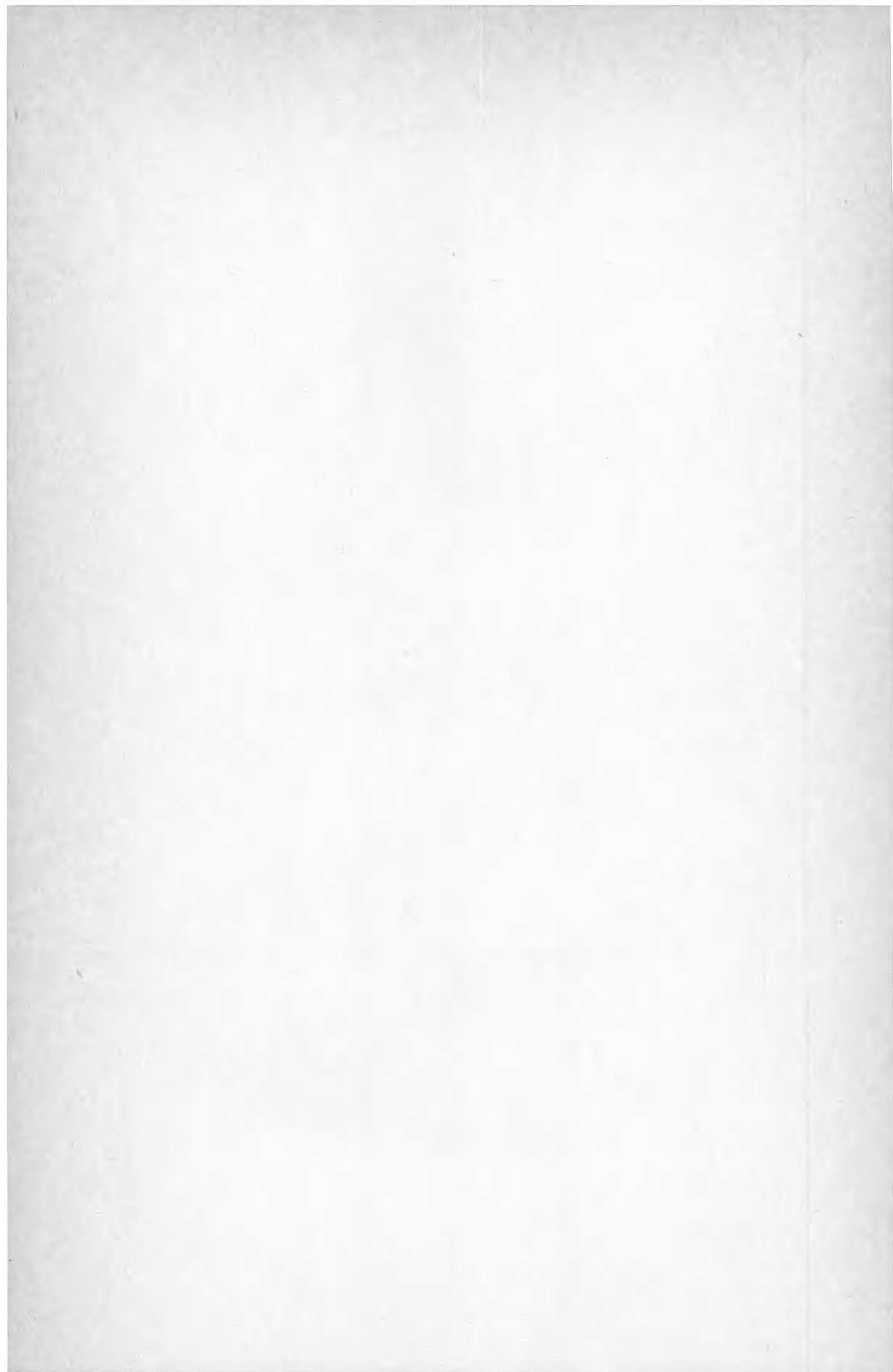
I båda fallen är vattnet från reningsverket tyngre än vattnet direkt under istäcket. Det förs därför ut i Mälaren efter botten eller en bit under isen och påverkar inte istäckets tjocklek.

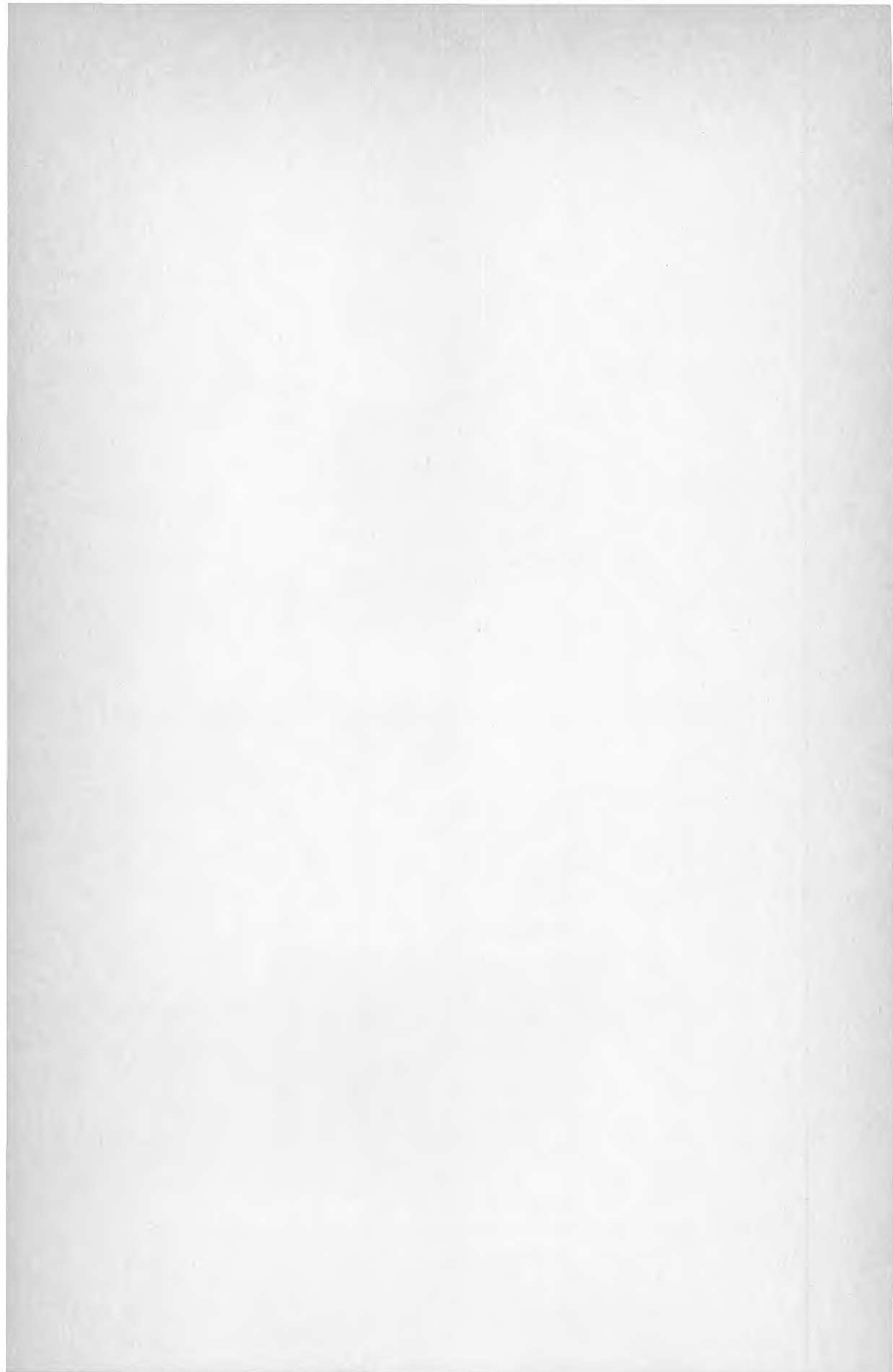


Värmeövergångstal från vattenytan som funktion av lufttemperaturen.



Värmeförlusten som funktion av lufttemperaturen, vindhastigheten och relativa fuktigheten.





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
810775-2 från Statens råd för byggnadsforskning
till VIAK, AB, Vällingby.**

R58: 1983

ISBN 91-540-3913-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700758

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirkapris: 25 kr exkl moms