

INSTITUTIONEN FÖR  
**VÄRME- OCH KRAFTTEKNIK**  
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND



Optimering av kraftvärmeverk  
med gasturbinaggregat  
som kraftmaskin

Johan Wallin  
Magnus Wessman

LUTMDN/(TMVK-5208)/1-74/(1991)

**DEPARTMENT OF HEAT AND POWER ENGINEERING  
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
BOX 118, S-221 00 LUND  
SWEDEN**

**DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED**

LUTMDN-TMVK-5208-1-74-91

DE92 506565

# Optimering av kraftvärmeverk med gasturbinaggregat som kraftmaskin

Johan Wallin  
Magnus Wessman

LUTMDN/(TMVK-5208)/1-74/(1991)

Utfört på Sydkraft konsult i Malmö  
November 1991

# MASTER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED  
FOREIGN SALES PROHIBITED RB

Dokumentutgivare  
LU/LTH Institutionen för Värme- och Kraftteknik

Dokumentnamn  
Examensarbete

Dokumentbeteckning  
LUTMDN(TMVK-  
5208YJ-74(1991)  
Ärendebeteckning

Handläggare

Utgivningsdatum  
Dec 1991

Författare  
Johan Wallin  
Magnus Wessman

Dokumenttitel och undertitel

1970 Optimering av kraftvärmeverk med gasturbinaggregat som kraftmaskin.

Referat (sammandrag)

1970 Detta arbete beskriver en metod för optimering av ett kraftvärmeverk med en gasturbin som kraftmaskin. Metoden utgår från att man har ett givet värmebehov som beskrivs av en varaktighetskurva. Varaktighetskurvan ersätts med en ersättningskurva som beskrivs analytiskt. Med hjälp av en funktion som beskriver kostnaden för att producera det värmebehov som föreligger, kan drifttid och effektstorlek för gasturbinen optimeras.

Referat skrivet av

1970 Författarna

Förslag till ytterligare nyckelord

Klassifikationssystem och -klass(er)

1970

Indextermer (ange källa)

1970

Omfång

1970 74 sidor

Ovriga bibliografiska uppgifter

1970

Språk

1970 Svenska

Sekretessuppgifter

1970

ISSN

1970

ISBN

1970

Dokumentet kan erhållas från

1970 Institutionen för Värme- och Kraftteknik  
Box 118  
221 00 LUND

Mottagarens uppgifter

1970

Pris

1970

## **Förord**

Denna rapport ingår som en del i vår utbildning till civilingenjörer vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet behandlar hur optimering av kraftvärmeverk, med ett gasturbinaggregat som kraftmaskin, kan ske med utgångspunkt från en given varaktighetskurva. Optimeringsmetoden bygger på en analytisk metod och skall förhoppningsvis uppfattas som lättförståelig och lättanvänd. Metoden skall dessutom vara lätt att anpassa till olika situationer. Arbetet har utförts på Sydkrafts huvudkontor i Malmö. Vi vill här passa på att tacka alla, som på något sätt hjälpt oss med vårt arbete, och då speciellt:

- handledare civilingenjör Ann-Katrin Larsson, Sydkraft
- handledare och examinator professor Stig Borglin, institutionen för Värme- och Kraftteknik

Dessutom vill vi rikta ett tack till:

- Yngve Larsson för att ha ägnat tid åt uppsatsen och givit oss idén till kapitel 7.
- Nils-Olof Wallin och Lubica Wessman för vettiga synpunkter och förslag till korrigeringar.

Malmö, november 1991

Johan Wallin  
Magnus Wessman

## **Sammanfattning**

Detta arbete beskriver en analytisk metod för optimering av ett kraftvärmeverk med en gasturbin som kraftmaskin. Metoden kan ses som ett smidigt hjälpmedel vid projektering av kraftvärmeverk baserade på gasturbin. Meningen är, att det med utgångspunkt från en given varaktighetskurva, enkelt skall gå att avgöra om en gasturbin överhuvudtaget är intressant.

Metoden bygger på en analytisk funktion, som utgår från att en varaktighetskurva från t ex ett fjärrvämenät ersätts med en ersättningskurva. Funktionen beskriver den totala kostnaden för produktionen av det värme som varaktighetskurvan beskriver. Den totala kostnaden består av gasturbinens och de övriga värmelanläggningarnas rörliga och fasta kostnader, som beskrivs med ett antal termer.

De parametrar som är av intresse vid optimeringen är värmeeffekten, som gasturbinen producerar, och gasturbinens utnyttjningstid. Kostnadsfunktionen har därför optimerats med avseende på värmeeffekten och utnyttjningstiden. Dessa är beroende av varandra och problemet blir därför tredimensionellt.

Med dagens priser på el, bränsle, värme, samt underhålls-, personal- och investeringskostnader krävs det i övrigt extremt goda förutsättningar för att gasturbinen skall kunna uppvisa någon lönsamhet. Det krävs t ex att antingen elpriset stiger med ca 33% eller att förhållandet mellan elpris och bränslepris ökar till runt 2,5. Höga investeringsbidrag för gasturbinen kan göra att en gasturbin lättare visar sig lönsam även med dagens elpriser och bränslepriser.

Förutom att metoden är ett bra hjälpmedel vid projektering av kraftvärmeverk baserade på ett gasturbinaggregat, ger metoden möjlighet till att optimera den årliga drifttiden för en redan införskaffad gasturbin vid ändrade driftförhållanden.

## **Abstract**

This work describes an analytical method of optimising a cogeneration with a gas turbine as prime mover. The method is a facility for projecting a cogeneration plant based on a gas turbine. The function describes the total costs of the production of the heat described by the heat load duration curve.

The idea is that, on basis of a given heat load duration curve, it easily should be possible to determine whether a gas turbine is profitable. The method is based on an analytical function. To get this function the load duration curve has to be replaced by an analytical curve. The function describes the total costs of the heat production, described by the heat load duration curve. The total costs consist of the prime costs and fixed costs of the gas turbine and the other heating plants. This is described by some constants.

The parameters of interest at optimization are the heat efficiency produced by the gas turbine and the utilization time of the gas turbine. The cost function has therefore been optimized upon the heat efficiency and the utilization time. These depend on each other and the problem is therefore three-dimensional.

With today's prices for electricity, fuel and heating as well as maintenance- personnel and investment costs, extremely good conditions are needed to make the gasturbine profitable. Either a raise of the price for the electricity with about 33% is needed or that the ratio of electricity and fuel increases to approx 2.5. High investment subsidies for the gas turbines could make a gas turbine profitable, even with today's electricity- and fuelprices.

Besides being a good help when projecting cogeneration plants with a gas turbine as prime mover, the method gives a possibility to optimize the annual operating time for a certain gas turbine when changing the operating conditions.

# Innehållsförteckning

**Förord**

**Sammanfattning**

**Abstract**

<b>Innehållsförteckning</b>	<b>1</b>
<b>1. Inledning</b>	<b>3</b>
1.1. Bakgrund	3
1.2. Syfte	3
1.3. Förutsättningar	4
1.4. Tillvägagångssätt	5
<b>2. Analytisk uppbyggnad av problemet</b>	<b>6</b>
2.1. Kostnadsfunktionen	6
2.1.1. Exempel för beräkning med förenklad ersättningsfunktion för varaktighetskurvan	9
2.2. Den analytiska ersättningsfunktionen	11
2.2.1. Ersättningsfunktion med brytpunkt	11
2.2.2. Ersättningsfunktion utan brytpunkt	13
2.3. Kostnadsfunktionen uppbyggnad då elpriset inte är konstant under året	13
<b>3. Konstanterna</b>	<b>17</b>
3.1. Kostnadskonstanternas uppbyggnad	17
3.2. Val av anläggningskonstanter	20
<b>4. Känslighetsanalys</b>	<b>24</b>
4.1. Genomförandet av känslighetsanalys	24
4.2. Kostnadskonstanter	24
4.2.1. Variation av kostnadskonstanter	24
4.2.2. En jämförelse mellan kostnadskonstanternas variationer	30
4.3. Anläggningskonstanter	31
4.3.1. Variation av anläggningskonstanter	31
4.3.1.1. Bränslepriserna $p_{11}$ , $p_{21}$ och $p_{31}$	31
4.3.1.2. Bränslepriserna $p_{11}$ , $p_{21}$ och $p_{31}$ samt elpriserna $p_{el,max}$ och $p_{el,min}$	32
4.3.1.3. Förhållandet mellan $p_{el,max}$ och $p_{el,min}$	33
4.3.1.4. Termiska verkningsgraden $\eta_{11}$ och nettoelverkningsgraden $\eta_{1e}$	34
4.3.1.4. Kalkylräntan $i$	35
4.4. Varaktighetskurvans inverkan	36

<b>5. Beräkningsgång och exempel på tillämpningar</b>	<b>38</b>
5.1. En översiktlig beskrivning av beräkningsgången	38
5.1.1. Anpassning av ersättningsfunktionen till given varaktighetskurva	38
5.1.2. Beräkning av kostnadskonstanterna	38
5.1.3. Uträkning av kostnadsfunktionens minimum	39
5.1.4. Korrigering av anläggningskonstanterna	39
5.2. Exempel på tillämpningar	40
5.2.1. Exempel där gasturbinen får utgöra grundlast	40
5.2.2. Exempel med ändrade driftförutsättningar	44
5.2.3. Exempel där gasturbinen inte utgör grundlast	45
5.2.4. Exempel när gasturbinen redan är anskaffad och driftförhållandena ändras	46
5.3. Förhållande mellan elpris och bränslepris	47
<b>6. Internräntemetoden</b>	<b>49</b>
6.1. Räkneexempel med internräntemetoden och förenklad varaktighetskurva	52
<b>7. Kostnadsfunktion som är oberoende av maxeffekten</b>	<b>54</b>
<b>8. Kommentarer</b>	<b>57</b>
<b>9. Referenser</b>	<b>58</b>
<b>Bilagor</b>	
Bilaga 1. Komplement till ersättningsfunktionen	
Bilaga 2. Newton-Raphsons metod	
Bilaga 3. Referensvärden	
Bilaga 4. Investeringskostnader	
Bilaga 5. Varaktighetskurvor för fyra fjärrvärmenät	
Bilaga 6. Nomenklatur	



## **1. Inledning**

### **1.1. Bakgrund**

Med naturgasens introduktion i Sverige under mitten av 80-talet väcktes ett stort intresse för gasturbiner, där gasturbinen får agera som kraftkälla i en anläggning för kombinerad värme- och elproduktion. I Sverige har tidigare mottrycksturbinen varit i stort sett det enda alternativet för samtidig generering av el och värme. Då man har tillgång till naturgas, bör dock gasturbinen betraktas som ett mycket intressant alternativ till mottrycksturbinen. För ångkraftsprocessen (sluten termodynamisk process) har bl a en finländare vid namn Heikel gjort en helt analytisk optimering för mottrycksturbinen. Denna metod optimerar anläggningens elproduktion och är helt oberoende av ekonomiska förutsättningar. Metoden har sedan vidareutvecklats av professor S Borglin där anläggningen maximeras med avseende på den årliga intäkten, och med avseende på maximal avkastning på kapitalet. För en kraftvärmelanläggning baserad på en gasturbin (öppen termodynamisk process) kommer optimeringen att få helt andra förutsättningar än för den slutna processen. Det går därför inte att göra en ekonomiskt oberoende optimering som är relevant, på samma sätt som vid Heikels metod. Detta för att gasturbinen har mycket dåliga dellastegenskaper och därför bör väljas så att den under drifttiden kör på fullast. Den metod vi vill ta fram hoppas vi skall vara lättanvänd och endast kräva en miniräknare till hjälp. Liknande optimeringsmetoder av kraftvärmeverk med gasturbin finns redan framtagna. Dessa är i allmänhet uppbyggda kring ett datorprogram och kräver ofta ganska stor insikt i programmets uppbyggnad för att man skall kunna lita på det resultat som erhålls.

### **1.2. Syfte**

Syftet med examensarbetet har varit att försöka klarlägga principerna för optimering av ett kraftvärmeverk med ett gasturbinaggregat som kraftmaskin. Frågan har då varit vilket tillvägagångssätt som är relevant. Att optimering inte kan ske på samma sätt som för en mottrycksturbin är uppenbart, eftersom gasturbinen inte arbetar under samma förutsättningar. Uppgiften har varit att finna en enkel metod för optimering av gasturbinens effektstorlek och utnyttjningstiden vid en given värmebelastning, samt kartlägga vilka faktorer som styr lönsamheten för en sådan anläggning. Metoden skall ha en bred analytisk uppbyggnad, vara lättanvänd och dessutom vara lätt att anpassa till olika situationer.

### 1.3. Förutsättningar

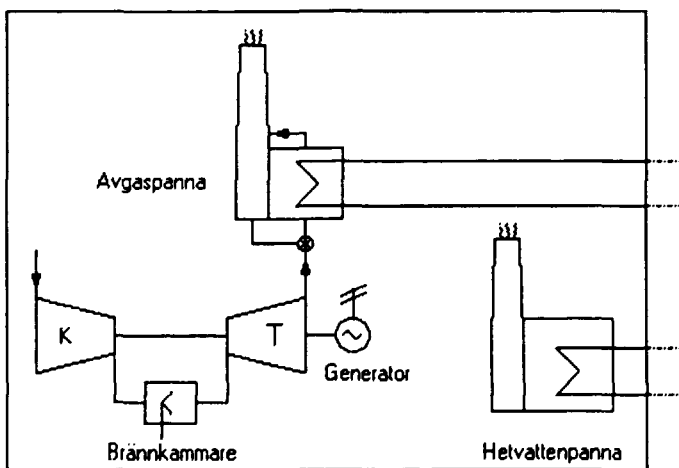
För att problemet skall kunna behandlas på ett systematiskt och överskådligt sätt har vissa förutsättningar fastlagts för arbetet. De förutsättningar som har fastlagts gäller för värmebelastningen, gasturbinen och dessutom för hela kraftverksanläggningen.

Värmebelastningen förutsätts utgöras av ett fjärrvärmenät med en karaktäristisk varaktighetskurva. Denna förutsättning innebär att varaktighetskurvan med god noggrannhet kan approximeras med en analytisk ersättningskurva. Den ersättningskurva som vi valt att använda i arbetet är Rossanders ersättningsfunktion, vilken har visat sig vara en mycket bra ersättningsfunktion då det gäller belastningskurvor för fjärrvärmenät. Antagandet kommer inte bara att förenkla beräkningarna utan också generalisera resultaten till att vara tillämpbara för alla värmebelastningar av detta slag.

Gasturbinen förutsätts att vid drift alltid köras på fullast p g a gasturbinens dåliga delastegenskaper. Dessutom förutsätts gasturbinen vara av konventionell typ utan mellankyllning och rekuperator.

Kraftvärmeanläggningen förutsätts alltid kunna täcka hela värmebehovet, vilket innebär att kraftverksanläggningen inte endast består av en gasturbin med avgaspanna, utan också av en kompletterande hetvattenpanna, som åtminstone är dimensionerad för att täcka värmebehovet tillsammans med gasturbinen. Vi har inte här räknat med någon reservkraft för gasturbinen eftersom detta ligger utanför vårt område.

I figur 1.1 beskrivs hur avgränsningarna har skett. Hetvattenpannan i figuren behöver inte i realiteten vara en panna utan kan bestå av flera värmeproducerande enheter. Det tas inte någon hänsyn till hur värmedistributionen sker.



Figur 1.1. Beskrivning av anläggningsenheterna samt avgränsning för distributionen av värme.

#### **1.4. Tillvägagångssätt**

Problemet har varit att utifrån en given varaktighetskurva optimera utläggningen för en gasturbin med avgaspanna i förhållande till varaktighetskurvans värmebehov. Optimeringen av kraftverksanläggningen sker ur en ekonomisk synvinkel. De ekonomiska metoder som valts vid optimeringen är annuitetsmetoden och internräntemetoden. Annuitetsmetoden är en absolutmetod medan internräntemetoden är en relativmetod. Annuitetsmetoden är den metod som upptar den största delen av arbetet (kapitel 2, 3, 4, 5,7) medan optimering med internräntemetoden (kapitel 6) till största del har tagits med för att visa att resultaten skiljer sig mellan de olika metoderna.

Vid optimering med hjälp av annuitetsmetoden tittar vi endast på kostnaden för att producera varaktighetskurvans värmebehov. Annuitetsmetoden minimerar den årliga kostnaden för att producera varaktighetskurvans värmebehov, vilket är detsamma som att vinsten maximeras för försäljningen av värmen. Detta medför att intäkterna för den producerade värmen inte behöver medtas eftersom intäkterna från värmeförsäljningen är desamma oavsett på vilket sätt uppvärmningen sker. För internräntemetoden krävs det däremot att den årliga vinsten blir positiv, vilket medför att det, till skillnad från annuitetsmetoden, krävs en intäkt från värmeförsäljningen för att ett rimligt resultat skall erhållas. Debiteringen för värmen läggs då på fjärrvärmenätet.

## 2. Analytisk uppbyggnad av problemet

### 2.1. Kostnadsfunktionen

Problemet bygger på att det föreligger ett visst värmebehov för t ex fjärrvärmesystem. Detta värmebehov kan beskrivas med hjälp av en varaktighetskurva (den konsekutiva belastningskurvan). Denna är alltid avtagande vilket är en förutsättning för våra beräkningar. För att kunna sätta upp en analytisk ekvation utan att få för stora uttryck behöver vi en ersättningsfunktion för varaktighetskurvan som matematiskt kan beskrivas någorlunda enkelt. Detta beskrivs mer ingående i kapitel 2.2. Till att börja med betecknar vi varaktighetskurvans ersättningsfunktion för:

$$x = x(\tau) ; \quad (2:1)$$

och dess invers för:

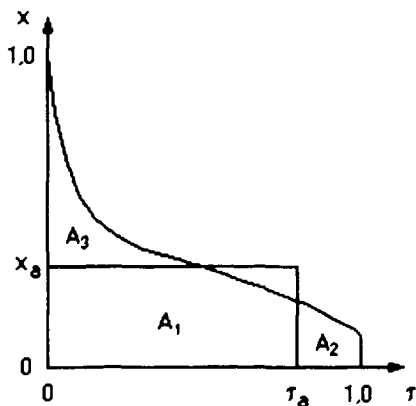
$$\tau = \tau(x) ; \quad (2:2)$$

$\tau$  är den dimensionslösa variabeln för tiden och  $x$  betecknar den dimensionslösa variabeln för effekten:

$$\tau = t / t_a ; \quad 0 \leq \tau \leq 1 ;$$

$$x = P / P_{\max} ; \quad 0 \leq x \leq 1 ;$$

Variabeln  $t$  betecknar drifttiden för gasturbinen i timmar per år och konstanten  $t_a$  är drifttiden för fjärrvärmearläggningen under ett år. Variabeln  $P$  betecknar den värmeeffekt som gasturbinen avger till avgaspannan och  $P_{\max}$  är den maximala effekten för fjärrvärmearläggningen.



Figur 2.1. Dimensionslöst varaktighetsdiagram med värmeflödet  $A_1$  från gasturbinen inritad.

Fortsättningsvis kommer vi att kalla  $\tau_a$  och  $x_a$  i figur 2.1 för  $\tau$  respektive  $x$ . Ur figuren ser man att areorna blir:

$$A_1 = x\tau ; \quad (2:3)$$

$$A_2 = \int_{\tau}^1 x(s)ds ; \quad (2:4)$$

$$A_3 = \int_x^1 \tau(s)ds ; \quad (2:5)$$

Arean innanför varaktighetskurvan betecknar den fjärrvärme som måste levereras till kunderna. Intäkterna från kunderna är desamma oavsett vilket sätt uppvärmningen sker på. Därför har vi bestämt oss för att endast titta på kostnaden för att producera denna värmemängd. Då uppvärmningen sker med gasturbin ger denna ett tillskott på elsidan och därmed en intäkt. Eftersom vi inte bryr oss om intäkter på värmesidan lägger vi el-intäkten som minuspost på utgifterna. Funktionen som beskriver de årliga utgifterna kallar vi för kostnadsfunktionen och bygger på annuitetsmetoden. Denna får följande utseende:

$$\frac{f(\tau, x)}{P_{\max}} = (k_{11} - k_{13})A_1 + k_{12}x + k_2A_2 + k_{31}A_3 + k_{32}(1 - x) ; \quad (2:6)$$

Den första termen  $k_{11}A_1$  beskriver den rörliga kostnaden för gasturbinen, dvs bränsle och driftskostnader som är energirelaterade. Termen  $k_{12}x$  ger kapitalkostnaden för gasturbinen och de fasta kostnader som är relaterade till kapitalkostnaden. Denna term är inte helt linjärt beroende av effekten utan avtar i allmänhet med gasturbinens storlek och varierar beroende på gasturbintillverkaren. Detta beskrivs i kapitel 3. Termen  $k_{13}A_1$  beskriver de elintäkter som gasturbinen inbringar. Här bör påpekas att konstanterna  $k_{11}$  och  $k_{13}$  kan skrivas som en konstant. Anledningen till att detta inte görs, är dels att vi senare i beräkningarna kommer variera elpriset mellan topplast och låglast, och dels att vi lättare skall kunna se hur de olika konstanterna påverkar kostnaden. Vi har här för enkelhetens skull valt att dela  $k_{11}$  och  $k_{13}$  redan från början. Termen  $k_2A_2$  beskriver den rörliga kostnaden för hetvattenpannan, som körs på sommaren då gasturbinen inte är igång, medan termen  $k_{31}A_3$  ger den rörliga kostnaden då hetvattenpannan körs vid topplast när gasturbinens värme inte räcker till. Konstanterna  $k_2$  och  $k_{31}$  kan också skrivas som en konstant men vi har valt att separera dessa. Detta för att kunna ta hänsyn till skillnader mellan driften under låglast respektive topplast för hetvattenpannan. Denna har betydligt fler starter och stoppar vid topplast och därmed sämre verkningsgrad. Slutligen ger den sista termen  $k_{32}(1 - x)$  kapitalkostnaden för hetvattenpannan. Här har vi antagit att samma panna som används vid topplast också används under den tid då gasturbinen inte är i drift. Vi har dessutom antagit att hetvattenpannan måste ha en större effekt vid topplast än vid låglast då gasturbinen inte kör. Konstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{13}$ ,  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$

bestämmer hur kostnadsbilden kommer att se ut för anläggningen. Därför benämner vi dessa konstanter fortsättningsvis för kostnadskonstanter.

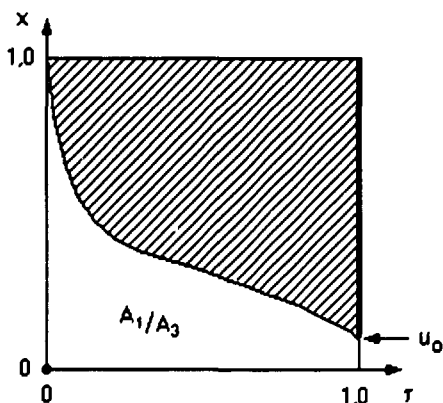
Då ekv (2:3), (2:4) och (2:5) sätts in i (2:6) fås:

$$\frac{f(\tau, x)}{P_{\max}} = (k_{11} - k_{13})x\tau + k_{12}x + k_2 \int_{\tau}^1 x(s)ds + k_{31} \int_x^1 \tau(s)ds + k_{32}(1 - x); \quad (2:7)$$

Här bör påpekas att funktionen endast gäller då  $x$  och  $\tau$  ligger utanför det område som varaktighetskurvan innesluter, d v s det område som är streckat i figur 2.2. Om  $x$  och  $\tau$  ligger innanför det område som varaktighetskurvan innesluter får kostnadsfunktionen ett annat utseende. I bilaga 1 förklaras varför denna funktion inte behöver undersökas. För att leta upp ett eventuellt minimum för kostnaden får vi söka efter en stationär punkt inom ränderna och på ränderna för funktionen  $f(\tau, x)$ . Detta gör vi genom att derivera ekvation (2:7) med avseende på  $x$  och  $\tau$  samt lösa det ekvationssystem som erhålles:

$$\begin{cases} \frac{\delta f}{\delta x} = (k_{11} - k_{13})\tau + k_{12} - k_{31}\tau(x) - k_{32} = 0; & (2:8) \\ \frac{\delta f}{\delta \tau} = (k_{11} - k_{13})x - k_2x(\tau) = 0; & (2:9) \end{cases}$$

Den rand som är intressant att undersöka är  $\tau = 1$ , ( $u_0 < x < 1$ ) och den är markerad med en tjock linje i figur 2.2, där  $u_0$  betecknar mineffekt för varaktighetskurvan. Punkten ( $\tau = 0$ ,  $x = x$ ) kan också vara av intresse, framför allt om man finner stationära punkter utanför ränderna. Vid den randen som är markerad med tunn linje i figur 2.2, där  $x = 1$ , ( $u_0 < \tau < 1$ ) infaller inget kostnadsminimum då konstanterna antar rimliga värden.



Figur 2.2. Varaktighetskurva. Visar randen  $\tau = 1$ , ( $u_0 < x < 1$ ) och punkten  $\tau = 0$ ,  $x = 0$ .

För att undersöka randen vid  $\tau = 1$ , ( $u_0 < x < 1$ ) sätter vi  $\tau = 1$  i ekvation (2:7). Funktionen får då utseendet:

$$\frac{f(1,x)}{P_{\max}} = k_{11}x + k_{12}x - k_{13}x + k_{31} \int_x^1 \tau(s)ds + k_{32}(1-x); \quad (2:10)$$

För att finna minimikostnaden på randen deriverar vi funktionen (2:10) och erhåller:

$$\frac{\delta f(1,x)}{\delta x} = k_{11} - k_{13} + k_{12} - k_{31}\tau(x) - k_{32} = 0; \quad (2:11)$$

I punkten (0,0) kan kostnadsfunktionen se ut på två olika sätt beroende på vilken av termerna  $k_{31}A_2$  eller  $k_{31}A_3$  man använder sig av. Vi använder oss här av  $k_{31}A_3$  och erhåller:

$$\frac{f(0,0)}{P_{\max}} = k_{31} \int_0^1 \tau(x)dx + k_{32}; \quad (2:12)$$

Problemet ligger i att hitta en lösning till dessa ekvationer, och för att göra det måste vi ha en analytisk ersättningsfunktion för varaktighetskurvan, dvs  $x(\tau)$ . För att få det hela överskådligt presenterar vi ett enkelt exempel där vi väljer den analytiska ersättningskurvan på ett sätt som gör att vi slipper lösa ekvationssystemet (2:8) och (2:9) numeriskt.

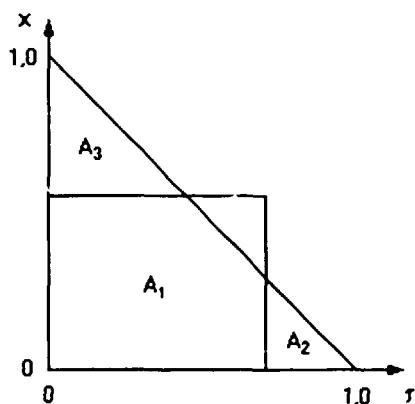
### **2.1.1. Exempel för beräkning med förenklad ersättningsfunktion för varaktighetskurvan**

Vi väljer ersättningsfunktionen i figur 2.3 där:

$$x(\tau) = 1 - \tau;$$

dess inversa funktion blir:

$$\tau(x) = 1 - x;$$



Figur 2.3. Förenklad ersättningsfunktion  $x(\tau) = 1 - \tau$ .

Ekvation (2:8) och (2:9) ger då

$$\begin{cases} (k_{11} - k_{13})\tau + k_{12} - k_{31}(1 - x) - k_{32} = 0 ; \\ (k_{11} - k_{13})x - k_2(1 - \tau) = 0 ; \end{cases}$$

Vi löser ut  $\tau$  och  $x$ :

$$\begin{cases} \tau = \frac{(k_{11} - k_{13})(k_{32} + k_{31} - k_{12}) - k_{31}k_2}{(k_{11} - k_{13})^2 - k_{31}k_2} ; & \text{(A)} \\ x = \frac{k_2(1 - \tau)}{k_{11} - k_{13}} ; & \text{(B)} \end{cases}$$

För att lösa problemet behövs värden på kostnadskonstanterna. Dessa värden väljs till följande (se bilaga 3):

$$\begin{array}{lll} k_{11} = 1600 & k_{12} = 400 & k_{13} = 1200 \\ k_2 = 1000 & k_{31} = 900 & k_{32} = 100 \end{array}$$

Enheten på samtliga kostnadskonstanter är [kr/kWår].

Med dessa värden instoppade i de två formlerna (A) och (B) blir  $\tau = 0,89$  och  $x = 0,27$ .

Vidare blir kostnadsfunktioner: (2:7) med dessa värden insatta:

$$\frac{f(\tau=0,89, x=0,27)}{P_{\max}} = 523 \text{ [kr/kWår]} ;$$

Värdena betecknar en stationär punkt i vår kostnadsfunktion och vi bör för säkerhets skull undersöka ränderna. Med våra värden instoppade i ekv (2:11) blir  $x = 0,22$  och ekv



(2:10) ger  $f(1, x=0,22) / P_{\max} = 528$  [kr/kWår]. Kostnadsfunktionen i punkten (0,0) ges av ekvation (2:12) som här blir:

$$\frac{f(0,0)}{P_{\max}} = \frac{k_{31}}{2} + k_{32} ;$$

Med värdena insatta blir  $f(0,0)/P_{\max} = 550$  [kr/kWår]. Den lägsta kostnaden blir i detta fallet vid  $f(\tau=0,89, x=0,27) = 523$  [kr/kWår]. Detta innebär att vi funnit ett minimum för kostnadsfunktionen som ligger innanför ränderna.

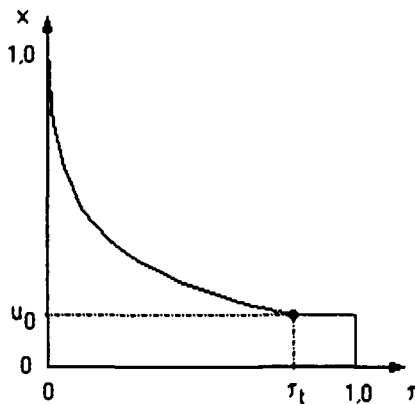
## 2.2. Den analytiska ersättningsfunktionen

Varaktighetskurvan ser i allmänhet inte ut på ett sådant sätt att man kan ersätta den med en rät linje utan att man får betrakta det som en mycket grov approximation. Därför presenterar vi en ersättningsfunktion (Rossanders ersättningskurva) som beskriver de flesta varaktighetskurvor utomordentligt väl. Den givna ansatsen är:

$$x = a + b\tau^\lambda ; \quad (2:13)$$

### 2.2.1. Ersättningsfunktion med brytpunkt

Om man har en varaktighetskurva där man har en längre period då man inte behöver värma bostäderna (förutsatt att värmebehovet gäller fjärrvärme), utan endast behöver fjärrvärme för beredning av tappvarmvatten så får kurvan mer ett utseende som påminner om figur 2.4.



Figur 2.4. Ersättningsfunktion med brytpunkt.

Funktionen måste uppfylla två villkor, nämligen:

$x$  måste avta kontinuerligt då  $0 \leq \tau \leq \tau_t$

ytan under ersättningskurvan måste vara densamma som ytan under varaktighetskurvan, dvs belastningsfaktorn:

$$u_a = \frac{P_{med}}{P_{max}} ; \quad (2:14)$$

Där  $P_{med}$  betecknar medelvärdet av värmeeffekten för fjärrvärmenätet och belastningsfaktorn,  $u_a$ , beskriver arean under ersättningskurvan:

$$u_a = \int_0^{\tau_t} x(\tau) d\tau + u_0 (1 - \tau_t) ; \quad (2:15)$$

Vidare bör ändpunkten sättas till:

$$u_0 = \frac{P_{min}}{P_{max}} ; \quad (2:16)$$

Med hjälp av det första villkoret bestämmer vi de båda konstanterna  $a$  och  $b$ :

Då	$\tau = 0$	är	$x = 1,0$	vilket ger	$a = 1,0$ ;
Vid	$\tau = \tau_t$	är	$x = u_0$	vilket ger	$b = (u_0 - 1) * 1 / \tau_t^\lambda$ ;

Sätter vi in detta i den angivna ansatsen får vi:

$$x(\tau) = 1 - (1 - u_0) \left( \frac{\tau}{\tau_t} \right)^\lambda ; \quad (2:17)$$

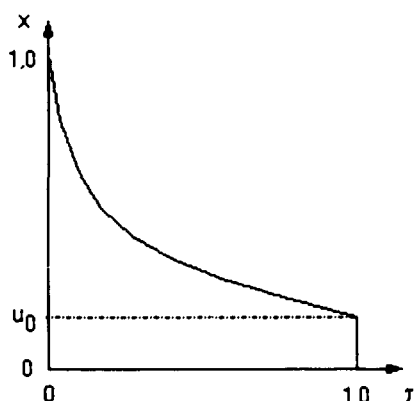
$$\tau(x) = \tau_t \left( \frac{1 - x}{1 - u_0} \right)^{1/\lambda} ; \quad (2:18)$$

Beräknas integralen (2:15) kan vi lösa ut lambda:

$$\lambda = \frac{u_a - u_0}{\tau_t(1 - u_0) + u_0 - u_a} ; \quad (2:19)$$

### 2.2.1. Ersättningskurva utan brytpunkt

En ersättningsfunktion utan brytpunkt får betraktas som en mycket bra approximation för våra varaktighetskurvor här i Norden och i länder med motsvarande eller kallare klimat. Kurvan utan brytpunkt är en förenkling av kurvan med brytpunkt och är lättare att använda eftersom man inte behöver hålla reda på brytpunkten. Kurvan beskrivs i figur 2.5.



Figur 2.5. Ersättningsfunktion utan brytpunkt, dvs  $\tau_1 = 1.0$ .

Våra formler (2:17), (2:18) och (2:19) får då för  $\tau_1 = 1.0$  följande utseende:

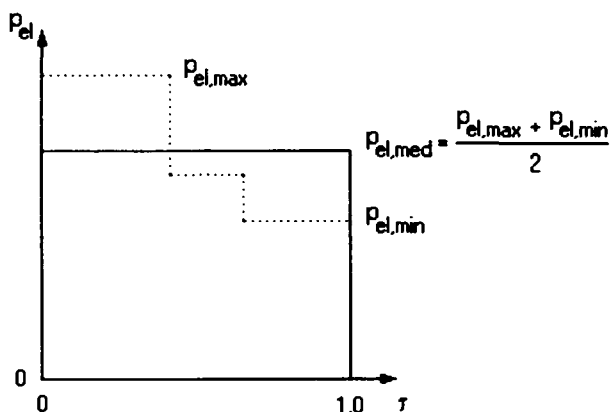
$$x(\tau) = 1 - (1 - u_0)\tau^\lambda \quad (2:20)$$

$$\tau(x) = \left[ \frac{1 - x}{1 - u_0} \right]^{1/\lambda} \quad (2:21)$$

$$\lambda = \frac{u_a - u_0}{1 - u_a}; \quad (2:22)$$

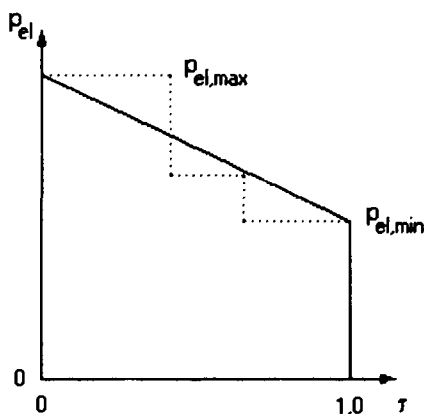
### 2.3. Kostnadsfunktionens uppbyggnad då elpriset inte är konstant under året

Vi har i föregående kapitel räknat på ett medelvärde av elpriset som hålls konstant under året. Därför har vi låtit elpriset  $p_{el,med}$  ingå i konstanten  $k_{13}$ . Elpriset beskrivs i figur 2.6 och 2.7.



Figur 2.6. Elpriset är konstant under årets gång. Den streckade linjen är den verkliga eltariffen.

Arean under kurvan beskriver inkomsten från den genererade elmängden. Att använda ett konstant elpris under årets gång är en approximation som påverkar resultatet ganska mycket eftersom det blir alldeles för gynnsamt att köra gasturbinen under låglastperioden. Därför ersätter vi approximationen  $p_{el,med}$  med en annan approximation. Denna går ut på att man varierar elpriset mellan ett maxvärde som råder vid toppbelastningen och ett minvärde vid låglast. I figur 2.6 är den heldragna linjen den kurva som vi använder i våra beräkningar och den streckade är den verkliga eltariffen.



Figur 2.7. Elprisets variation under årets gång.

Med den heldragna linjen blir elprisfunktionen:

$$P_{el} = P_{el,max} - (P_{el,max} - P_{el,min})\tau ; \quad (2:23)$$

Eftersom det är arean som beskriver elintäkterna måste vi integrera elprisfunktionen från 0 till  $\tau$ .

$$\int_0^{\tau} (p_{el,max} - (p_{el,max} - p_{el,min})s) ds = (p_{el,max} - (p_{el,max} - p_{el,min})\tau/2)\tau ; \quad (2:24)$$

Om vi sätter in resultatet från ekv (2:24) i ekv (2:7) får vi:

$$\begin{aligned} \frac{f(\tau,x)}{P_{max}} &= k_{11}\tau + k_{12}x - k''_{13}(p_{el,max} - (p_{el,max} - p_{el,min})\tau/2)\tau x + \\ &+ k_2 \int_{\tau}^1 x(s)ds + k_{31} \int_x^1 \tau(s)ds + k_{32}(1-x) ; \end{aligned} \quad (2:25)$$

Lägg märke till att  $k''_{13}$  är inte samma konstant som  $k_{13}$ . I konstanten  $k_{13}$  ingår  $p_{el,med}$  medan i konstanten  $k''_{13}$  har  $p_{el,med}$  brutits ut. Detta innebär att denna konstant får en annan enhet. Därför bakar vi in  $p_{el,max}$  i konstanten  $k''_{13}$  och kallar denna för  $k'_{13}$ . Termen  $k_{13}x\tau$  får då följande utseende:

$$k''_{13}(p_{el,max} - (p_{el,max} - p_{el,min})\tau/2)\tau x = k'_{13}(1 - (1 - \frac{p_{el,min}}{p_{el,max}})\tau/2)\tau x ; \quad (2:26)$$

Efter denna korrigeringen har återigen alla konstanterna enheten [kr/kWår]. Om vi sätter in resultatet från ekv (2:26) i ekv (2:25) erhåller vi:

$$\begin{aligned} \frac{f(\tau,x)}{P_{max}} &= k_{11}\tau + k_{12}x - k'_{13}(1 - (1 - \frac{p_{el,min}}{p_{el,max}})\tau/2)\tau x + \\ &+ k_2 \int_{\tau}^1 x(s)ds + k_{31} \int_x^1 \tau(s)ds + k_{32}(1-x) ; \end{aligned} \quad (2:27)$$

Fortsättningsvis kallar vi konstanten  $k'_{13}$  för  $k_{13}$ . Den slutliga kostnadsfunktionen med ersättningfunktionen (2:17) och dess invers (2:18) blir:

$$\begin{aligned} \frac{f(\tau,x)}{P_{max}} &= k_{11}\tau + k_{12}x - k_{13}(1 - (1 - \frac{p_{el,min}}{p_{el,max}})\tau/2)\tau x + \\ &+ k_2 \int_{\tau}^1 \left[ 1 - (1 - u_0) \left( \frac{s}{\tau} \right)^{\lambda} \right] ds + k_{31} \int_x^1 \tau_t \left( \frac{1-s}{1-u_0} \right)^{1/\lambda} ds + k_{32}(1-x) ; \end{aligned} \quad (2:28)$$

Deriverar vi denna funktion med avseende på  $x$  och  $\tau$  erhåller vi:

$$\begin{cases} \frac{\delta f}{\delta x} = k_{11}\tau - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau/2\right)\tau + k_{12} - k_{31}\tau_t \left(\frac{1-x}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} - k_{32} = 0 ; & (2:29) \\ \frac{\delta f}{\delta \tau} = k_{11}x - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right)x - k_2 \left[1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_t}\right)^\lambda\right] = 0 ; & (2:30) \end{cases}$$

Dessa tre ekvationer (2:28), (2:29) och (2:30) är de ekvationer vi utslutande kommer att använda i det kommande kapitlet som handlar om känsligheten hos de olika konstanterna, nämligen känslighetsanalysen. Visserligen går det inte finna någon analytisk lösning för ekvationssystemet (2:29) och (2:30) såvida man inte väljer ett  $\lambda$ -värde på 0,5, men å andra sidan är det mycket lätt att numeriskt finna lösningar till ekvationssystemet. Detta utförs i bilaga 2. För att undersöka ränderna behövs följande fullständiga ekvationer:

$$\begin{aligned} \frac{f(1,x)}{P_{max}} &= k_{11}x + k_{12}x - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)/2\right)x + k_{31} \int_x^1 \tau_t \left(\frac{1-s}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} ds + \\ & k_{32}(1-x) ; \end{aligned} \quad (2:31)$$

$$\frac{f(0,0)}{P_{max}} = (k_2 \text{ eller } k_{31}) \int_0^1 x(s)ds + k_{32}(1-x) ; \quad (2:32)$$

$$\frac{\delta f(1,x)}{\delta x} = k_{11} - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)/2\right) + k_{12} - k_{31}\tau_t \left(\frac{1-x}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} - k_{32} = 0 ; \quad (2:33)$$

### 3. Konstanterna

#### 3.1 Kostnadskonstanternas uppbyggnad

Kostnadskonstanterna som har använts i kostnadsfunktionen i föregående kapitel, ekvation (2:28), är uppbyggda av konstanter, som vi i fortsättningen kallar för anläggningskonstanter. Dessa anläggningskonstanter är specifika för olika anläggningar och yttre omständigheter. Här nedan skall kostnadskonstanternas uppbyggnad beskrivas mer ingående. Det man bör beakta är att kostnadsfunktionen är relaterad till det värmebehov som varaktighetskurvan beskriver. När vi i fortsättningen talar om gasturbinen inkluderar detta också tillhörande avgaspanna.

Produkten  $x\tau k_{11}$  i ekvation (2:28) beskriver gasturbinens rörliga kostnader, där  $x\tau$  är den dimensionslösa energi som gasturbinen alstrar i form av värme till fjärrvärmenätet. Kostnadskonstanten  $k_{11}$  skall beskriva hur mycket det kostar att ha gasturbinen i drift för att producera denna energimängd. Kostnadskonstanten  $k_{11}$  får följande utseende:

$$k_{11} = \frac{p_{1f} f_{1e} t_a}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} ; \quad [\text{kr/kWår}] \quad (3:1)$$

- $p_{1f}$  - bränslepris, [kr/kWh]
- $f_{1e}$  - energikostnadskoefficient (rörlig drift- och underhållsfaktor)
- $t_a$  - årlig drifttid, [timmar/år]
- $\phi_1$  - värmeåtervinningsfaktor för avgaspannan
- $\eta_{1t}$  - gasturbinens termiska verkningsgrad

De rörliga kostnaderna för gasturbinen beror främst på bränslekostnaden,  $p_{1f}$ . Till de rörliga kostnaderna hör också rörliga drift- och underhållskostnader. Dessa kostnader får vi med genom att multiplicera med en energikostnadskoefficient,  $f_{1e}$ . Energikostnadskoefficienten ger en procentuell ökning av bränslekostnaden och dess uppgift är att ta hänsyn till de rörliga drift- och underhållskostnaderna. Eftersom kostnadsfunktionen är uppbyggd kring varaktighetskurvas värmebehov, måste vi i konstanten  $k_{11}$  justera värmebehovet till gasturbinens bränsleeffekt. Effekten  $x$  talar om hur stor del av varaktighetskurvas effektbehov som gasturbinen tillgodoser. Vad är det då som sker från det att bränslet har tillförts gasturbinen tills att värme har levererats till fjärrvärmenätet? Gasturbinen har en viss termisk verkningsgrad,  $\eta_{1t}$ . Termen  $1 - \eta_{1t}$  är den del av energin som återstår efter expansionen i gasturbinen. Efter gasturbinen finns en avgaspanna installerad, vars uppgift är att tillvarata gasturbinens heta avgaser för hetvattenproduktion till fjärrvärmenätet. Avgaspannan kan inte utnyttja dessa avgaser till 100%, vilket innebär att den har en viss verkningsgrad. Denna verkningsgrad kallas för pannans värmeåtervinningsfaktor,  $\phi_1$ . Genom att dividera med  $1 - \eta_{1t}$  och med  $\phi_1$  får vi värmeeffekten relaterad till gasturbinens bränsleeffekt. Eftersom  $x$  och  $\tau$  är dimensionslösa (se definition i början på kapitel 2.1),

erhålles rätt enhet vid multiplikation med  $t_a$ . Multiplikation med fjärrvärmenätets maximala effekt,  $P_{\max}$ , har skett redan vid uppbyggnaden av den analytiska kostnadsfunktionen, varför den ej finns med här.

Produkten  $x_{k_{12}}$  i ekvation (2:28) beskriver gasturbinens årliga fasta kostnad, där  $k_{12}$  skall tala om hur mycket gasturbinen kommer att kosta för en viss installerad effekt. Kostnadskonstanten  $k_{12}$  får följande utseende:

$$k_{12} = \frac{J_1 f_{1p} a_i^n}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} \eta_{1e} ; \quad [\text{kr/kWår}] \quad (3:2)$$

$$a_i^n = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} ; \quad (3:3)$$

- $J_1$  - investeringskostnad för gasturbinen [kr/kW<sub>el</sub>]
- $f_{1p}$  - effektkostnadscoefficient (fast drift- och underhållsfaktor)
- $i$  - kalkylränta
- $n$  - avskrivningstid [år]
- $a_i^n$  - annuitetsfaktor
- $\eta_{1e}$  - gasturbinens nettoelverkningsgrad

I gasturbinens fasta kostnader ingår gasturbinens investeringskostnad per installerad kilowatt el. Till de fasta kostnaderna räknas också fasta drift- och underhållskostnader. För att detta skall komma med har vi multiplicerat med en effektkostnadscoefficient,  $f_{1p}$ , vilken ger en procentuell ökning av investeringskostnaden. Grundinvesteringen som görs vid anskaffning av en gasturbin måste på något sätt fördelas över det antal år som gasturbinen är i drift. Den metod som valts är annuitetsmetoden. Vid genomförande av en investeringsbedömning måste man fastlägga en ekonomisk livslängd och en viss kalkylränta. Kalkylräntan är ett uttryck för att man har ett krav på att insatt kapital skall förränta sig. Annuitetsmetoden fördelar kostnaden lika över alla åren under den ekonomiska livslängden. Beräkning av annuitetsfaktorn kan ses i ekvation (3:3). Denna faktor multipliceras sedan med investeringskostnaden för att få reda på den årliga kapitalkostnaden, dvs annuiteten. Eftersom gasturbinens investeringskostnad är relaterad till dess eleffekt måste denna justeras så att den gäller för den dimensionslösa effekten  $x$ . Detta sker på samma sätt som för konstanten  $k_{11}$ . Vi dividerar med avgaspannans värmeåtervinningsfaktor,  $\phi_1$ , och med  $1 - \eta_{1t}$ . Då har vi fått den bränsleeffekt som gasturbinen har. För att anpassa detta till gasturbinens eleffekt multiplicerar vi med gasturbinens nettoelverkningsgrad,  $\eta_{1e}$ .



Produkten  $\tau(1 - (1 - p_{el,min}/p_{el,max})\tau/2)k_{13}$  talar om hur stor intäkten blir för gasturbinens elproduktion eller med hur mycket kostnaden minskar med minskat elinköp. Denna produkt är en negativ post i kostnadsfunktionen. Kostnadskonstanten  $k_{13}$  får följande utseende:

$$k_{13} = \frac{t_a p_{el,max}}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} \eta_{1e} ; \quad [kr/kWår] \quad (3:4)$$

Samma sak gäller här som för konstanten  $k_{12}$ , dvs  $x$ :et är relaterat till varaktighetskurvans värmeeffekt och ej till turbinens eleffekt. Vi dividerar med  $\phi_1$  och  $1 - \eta_{1t}$  och multiplicerar med  $\eta_{1e}$  av samma anledning som för kostnadskonstanten  $k_{12}$ , dvs för att få reda på den genererade elenergin. Eftersom produkten multipliceras med  $\tau$  multiplicerar vi även med  $t_a$ .

Produkten  $A_2 k_2$  och  $A_3 k_{31}$  beskriver de rörliga kostnader som krävs för generering av den energi som ytan  $A_2$  respektive  $A_3$  beskriver. Denna energimängd genereras med en hetvattenpanna. Kostnadskonstanten  $k_2$  samt  $k_{31}$  får följande utseende:

$$k_2 = \frac{p_{2f} f_{2e} t_a}{\eta_2} ; \quad [kr/kWår] \quad (3:5)$$

$$k_{31} = \frac{p_{3f} f_{3e} t_a}{\eta_3} ; \quad [kr/kWår] \quad (3:6)$$

- $p_{2f}, p_{3f}$  - bränslepris [kr/kWh]
- $f_{2e}, f_{3e}$  - energikostnadscoefficient (rörlig drift och underhållsfaktor)
- $\eta_2, \eta_3$  - pannverkningsgrad

Dessa konstanter är identiskt uppbyggda. Skillnaden är endast den att de hänförs till olika areor. De rörliga kostnaderna för pannan beror i huvudsak på bränslekostnaden,  $p_2$  respektive  $p_3$ . Till de rörliga kostnaderna tillkommer förutom bränslekostnaden även rörliga drift- och underhållskostnader. Detta tar vi hänsyn till med hjälp av energikostnadscoefficienterna,  $f_{2e}$  respektive  $f_{3e}$ . Eftersom pannan har en viss verkningsgrad måste vi dividera med verkningsgraden för att få fram den bränslemängd som går åt för att producera energiinnehållet som  $A_2$  och  $A_3$  representerar. Eftersom produkten multipliceras med  $\tau$  multiplicerar vi även med  $t_a$  för att termen skall få rätt enhet.

Produkten  $(1-x)k_{32}$  är pannans eller pannornas fasta kostnader. Pannorna skall täcka den del av varaktighetskurvans effekt som ej gasturbinen täcker, dvs  $1-x$ . Kostnads-konstanten  $k_{32}$  talar om hur stora de årliga investeringskostnaderna blir för effekten  $1-x$ , och får följande utseende:

$$k_{32} = J_{23} f_{23} a_i^n ; \quad [\text{kr/kWår}] \quad (3:7)$$

$J_{23}$  - investeringskostnad för hetvattenpanna [kr/kWvärme]  
 $f_{23}$  - effektkostnadscoefficient (fast drift- och underhållsfaktor)

Pannans eller pannornas fasta kostnader beror huvudsakligen på pannornas investeringskostnad per kilowatt värme. Till de fasta kostnaderna räknas också fasta drift- och underhållskostnader. För att ta hänsyn till detta har vi multiplicerat med en effektkostnadscoefficient,  $f_{23}$ , vilken kan sägas vara en procentsats av investeringskostnaden. Denna kostnad skall sedan fördelas över det antal år som valts som avskrivningsår, vilket sker med hjälp av en annuitetsfaktor, ekvation (3:3). Detta sker på samma sätt som för gasturbinen och med samma metod. Här tillkommer inte någon pannverkningsgrad eftersom pannornas investeringskostnad definieras efter producerad värme.

När kostnadskonstanternas uppbyggnad är definierade kan kostnadsfunktionen (ekvation 2:28) skrivas med hjälp av anläggningskonstanterna. Kostnadsfunktionen får då följande utseende:

$$\frac{f(x, \tau)}{P_{\max}} = \frac{p_{11} f_{1e} t_a}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} x^\tau + \frac{J_1 f_{1p} a_i^n}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} \eta_{1e} x - \frac{t_a p_{el, \max}}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} \eta_{1e} (1 - (1 - \frac{p_{el, \min}}{p_{el, \max}})^{\tau/2})^\tau x +$$

$$+ \frac{p_{21} f_{2e} t_a}{\eta_2} \int_0^1 \left[ 1 - (1 - u_0) \left( \frac{s}{\tau_t} \right)^\lambda \right] ds + \frac{p_{31} f_{3e} t_a}{\eta_3} \int_0^1 \tau_t \left( \frac{1-s}{1-u_0} \right)^{1/\lambda} ds + J_{23} f_{23} a_i^n (1-x); \quad (3:8)$$

### 3.2 Val av anläggningskonstanter

Hur skall då anläggningskonstanterna väljas? Denna fråga är kanske den fråga som är svårast att besvara. Konstanterna är helt och hållet beroende av vilka kostnadsposter som inkluderas i dessa. Olika leverantörer lämnar olika uppgifter om vad som ingår i deras prisuppgifter. För att kunna genomskåda dessa detaljer krävs att man är väl insatt i branschen. Här nedan skall vi beskriva vad man bör tänka på när anläggningskonstanterna väljs och vad som bör inkluderas i dessa.

Uppdelning för genomgången av anläggningskonstanterna sker enligt följande:

Investeringskostnader	- $J_1$ och $J_2$
Verkningsgrader	- $\phi_1$ , $\eta_{11}$ , $\eta_{1e}$ , $\eta_1$ och $\eta_2$
Bränsle priser samt elpriser	- $p_{1f}$ , $p_{2f}$ , $p_{3f}$ , $p_{el,max}$ och $p_{el,min}$
Energikostnadskoefficienter	- $f_{1e}$ , $f_{2e}$ och $f_{3e}$
Effektkostnadskoefficienter	- $f_{1p}$ och $f_{2p}$
Annuitetsfaktor	- $i$ och $n$

Investeringskostnaderna  $J_1$  och  $J_2$  skall inkludera både de direkta kostnaderna samt övriga kostnader. I bilaga 4 ges en uppräknig av de kostnader som eventuellt bör medtagas. Det kan även förekomma kostnader som skall räknas till investeringskostnaderna som ej är uppräknade här. Investeringskostnaderna skall anges i kr/kW<sub>el</sub> för gasturbinen och i kr/kW<sub>värme</sub> för hetvattenpannan. De specifika investeringskostnaderna varierar beroende på effektstorlek på gasturbinen respektive hetvattenpannan. Gasturbinens specifika investeringskostnad är betydligt högre för låga effekter än för höga. Jämförelse mellan en 0.3 MW:s gasturbin och en 24 MW:s gasturbin visar att den specifika kostnaden är mer än dubbelt så stor för den mindre gasturbinen [2]. När vi har talat om gasturbinen har även tillhörande avgaspannan inkluderats. För hetvattenpannor behöver inte den specifika investeringskostnaden variera så drastiskt. Det kan även vara så att en mindre panna har lägre specifik kostnad än en större panna, vilket beror på att en liten panna ofta tillverkas i större serier och därmed kan bli billigare än en stor panna. En stor panna kan ersättas med ett par mindre pannor. De valda investeringskostnaderna bör i efterhand kontrolleras så att de är rimliga för den effekt som erhållits. Genom att kontrollera den erhållna effekten på gasturbinen kan man fastslå om rätt specifik kostnad valts. Hur man tar hänsyn till detta visas i kapitel 5.2.1. Gasturbinens respektive hetvattenpannas effekt fås enligt följande:

$$P_{g,el} = \frac{x P_{max}}{(1 - \eta_{1f}) \phi_1} \eta_{1e} ; \quad (3:9)$$

$$P_p = (1 - x)P_{max} ; \quad (3:10)$$

$P_{g,el}$  - gasturbinens nettoeffekt [MW<sub>el</sub>]  
 $P_p$  - hetvattenpannas effekt [MW<sub>värme</sub>]

Verkningsgraderna  $\phi_1$ ,  $\eta_{11}$ ,  $\eta_{1e}$ ,  $\eta_1$  och  $\eta_2$  skall försöka beskriva anläggningarnas prestanda. Uppgifter om verkningsgraderna erhålls av leverantör och tillverkare. Värmeåtervinningsfaktorn  $\phi_1$  talar om hur mycket av energiinnehållet i avgaserna som utnyttjas av avgaspannan. Här bör man vara noga med att rätt verkningsgrad används, nämligen gasturbinens nettoelverkningsgrad. Verkningsgraderna är i hög grad beroende av investeringskostnaderna. Högre verkningsgrader bidrar i allmänhet till att investeringskostnaderna ökar.

Det bör påpekas att bränslepriserna kan vara olika för el- respektive värmeproduktion, beroende på de skatteregler som antas gälla [2]. Till bränslepriserna bör också de skatter som hänförs sig till visa bränslen inkluderas. Då elpriset ska uppskattas bör man se till vad motsvarande mängd el hade kostat att köpa. Utifrån detta skall ett maxpris och ett minpris väljas. Ett minskat elinköp minskar även abonnemangsavgiften och effektavgiften. Detta bör också tas med i elpriset, vilket sker antingen genom att höja elpriset eller genom att minska energikostnads-koefficienten  $f_{1e}$ . Hänsyn till detta kan också tas genom att den årliga investeringskostnaden minskas.

Energikostnads-koefficienterna  $f_{1e}$ ,  $f_{2e}$  och  $f_{3e}$  är de koefficienter eller påläggsfaktorer som skall beskriva rörliga drift- och underhållskostnader. Till den rörliga kostnaden räknas här både den rörliga driftkostnaden och den rörliga underhållskostnaden. Problemet ligger i att avgöra vad som är en rörlig kostnad respektive en fast kostnad. Till de rörliga kostnaderna skall det rörliga underhållet och reparationerna ingå, liksom driftel, visst driftmaterial, transporter, skatter samt de tjänster som är knutna till driften. När man bestämt hur stora de rörliga drift- och underhållskostnaderna skall vara måste energikostnads-koefficienterna bestämmas. Nedan visas hur koefficienterna inverkar på de rörliga kostnaderna som är knutna till driften. En viss kostnads-koefficient ger alltså ett bidrag till den rörliga kostnaden enligt följande:

$$f_{1e} : \frac{p_{1f}(f_{1e} - 1)}{\eta_{1e}} \quad [\text{kr/kWh}_{el}]$$

$$f_{2e} : p_{2f}(f_{2e} - 1) \quad [\text{kr/kWh}_{värme}]$$

$$f_{3e} : p_{3f}(f_{3e} - 1) \quad [\text{kr/kWh}_{värme}]$$

Effektkostnads-koefficienterna  $f_{1p}$  och  $f_{23p}$  är de koefficienter eller påläggsfaktorer som skall beskriva den fasta delen av drift- och underhållskostnaden. Till dessa kostnader räknas bl a personal, den fasta underhållskostnaden, material, lager och försäkringar. Samma problem finns här som för de rörliga kostnaderna, dvs att avgöra vad som skall vara en fast kostnad respektive en rörlig kostnad. Det är svårt att i förväg avgöra hur stor effektkostnads-koefficienterna skall vara. I de ekvationer som presenteras nedan ingår variabeln  $\tau$ . Därför bör det ske en kontroll i efterhand för att se hur stort bidrag effektkostnads-koefficienterna ger till den fasta drift- och underhållskostnaden.

$$f_{1p} : \frac{J_1 a_i^n (f_{1p} - 1)}{t_a \tau} \quad [\text{kr/kWh}_{el}]$$

$$f_{23p} : \frac{J_{23} a_i^n (1 - x)(f_{23p} - 1)}{t_a (A_2 + A_3)} \quad [\text{kr/kWh}_{värme}]$$

Vad som tillfaller den rörliga respektive den fasta delen kan få vissa konsekvenser för resultatet, vilket framgår i kapitel 4. De rörliga och fasta drift- och underhållskostnaderna ger tillsammans en total drift- och underhållskostnad. Det gäller alltså att på ett förnuftigt sätt fördela den totala kostnaden för driften och underhållet så att rätt andel tillfaller den rörliga respektive den fasta delen.

Val av kalkylränta och avskrivningsår måste fastläggas för genomförande av beräkningarna. Den ekonomiska livslängden,  $n$ , kan väljas på olika sätt, men motsvarar i princip den tid som anläggningen skall vara i drift. Om höga förräntningskrav föreligger, kan den ekonomiska livslängden väljas kortare. Införandet av kalkylränta,  $i$ , är ett uttryck för att man har ett krav på att insatt kapital skall förränta sig. Det finns två olika typer av kalkylräntor, beroende på om man räknar med fast penningvärde eller nominellt penningvärde. Konsekvenserna är att kalkylräntan måste väljas olika beroende på i vilken typ av penningvärde som beräkningen genomförs .

## **4. Känslighetsanalys**

### **4.1. Genomförandet av känslighetsanalys**

En känslighetsanalys av kostnadsfunktionen visar här vilka konstanter som får störst inverkan på resultatet, samtidigt som den skall ge en god förståelse för kostnadsfunktionens uppförande. Dessutom kan den fungera som ett hjälpmedel då man räknar på ett verkligt fall, dvs ge en fingervisning om hur kostnadsbilden förändras då någon parameter ändrar sig. Vid genomförandet av känslighetsanalysen för kostnadsfunktionen måste de ingående anläggningskonstanterna bestämmas. Anläggningskonstanterna har tagits fram genom litteraturstudier [1,2,3,5] och personsamtal [6]. De anläggningskonstanter som valts till referensvärden kan ses i bilaga 3. Målet har varit att ge anläggningskonstanterna så realistiska värden som möjligt. Ett medvetet undantag har gjorts vid val av elpriserna som valts ca 45% över dagens elpriser. Detta har gjorts för att vi skall få önskade utgångsvärden i våra beräkningar, så att en tillfredsställande känslighetsanalys skall kunna genomföras.

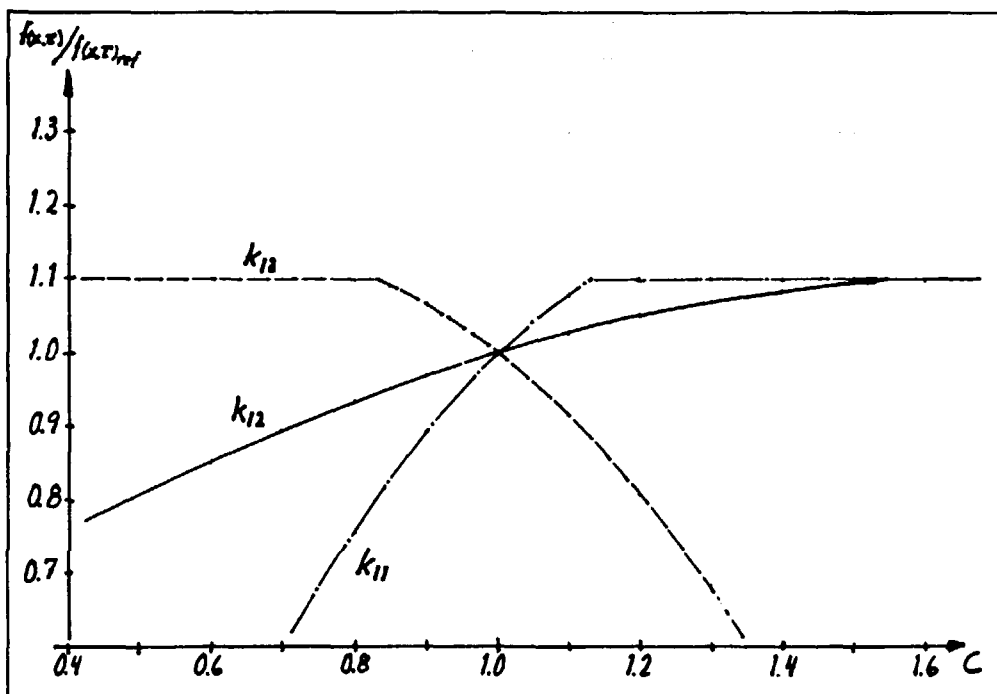
När anläggningskonstanterna valts har vi utgått från att alla anläggningar för värmeproduktionen i fjärrvärmenätet måste uppföras på nytt. Detta är med största sannolikhet ej ett realistiskt fall, eftersom ett fjärrvärmenät vanligen redan har anläggningar för sin värmeproduktion. Varaktighetskurvan som använts för beräkningen av känslighetsanalysen är Vämamos, vilken kan ses i bilaga 5. Då känslighetsanalysen genomförs varieras kostnadsfunktionen antingen genom att en kostnadskonstant eller flera anläggningskonstanter varieras. Detta sker med hjälp av en variationskonstant,  $C$ , som multipliceras med den kostnadskonstant i ekv (2:28) eller de anläggningskonstanter i ekv (3:8) som valts att varieras. Variationskonstanten  $C$  varieras från 0,4 - 1,6. Vid presentationen av känslighetsanalysen presenteras resultatet relativt det ursprungliga värdet dvs då  $C = 1$ . Dessa värden kallar vi för referensvärdena  $x_{ref}$ ,  $\tau_{ref}$  och  $f(\tau, x)_{ref}/P_{max}$  och de har följande värden:

$$x_{ref} = 0,2820 ; \quad \tau_{ref} = 0,8477 ; \quad f(\tau, x)_{ref}/P_{max} = 422,7 \text{ [kr/kWår]}$$

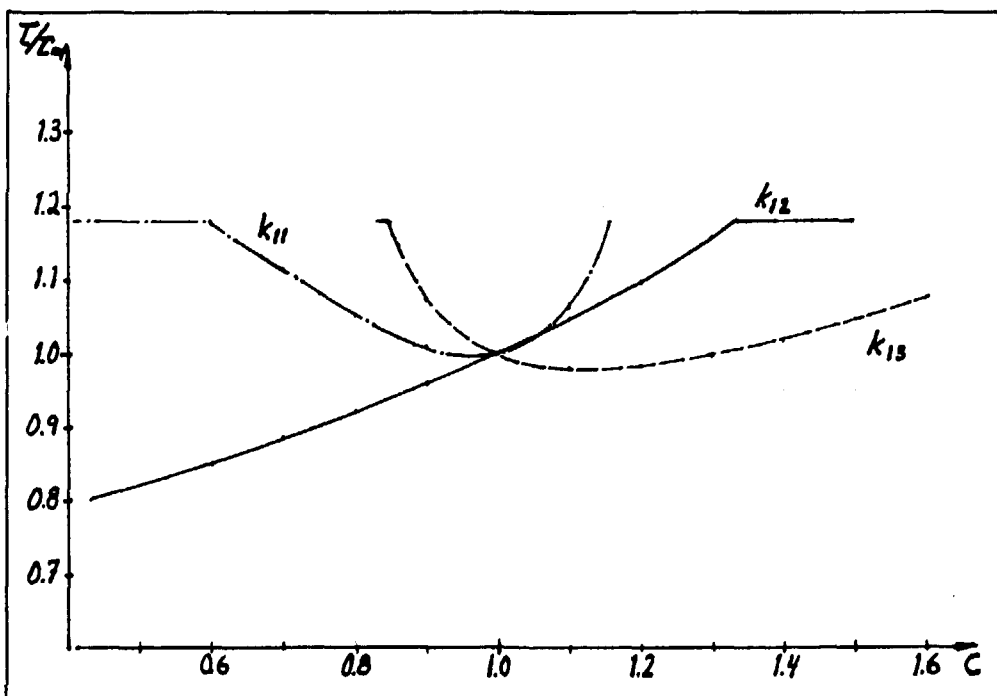
### **4.2. Kostnadskonstanter**

#### **4.2.1. Variation av kostnadskonstanter**

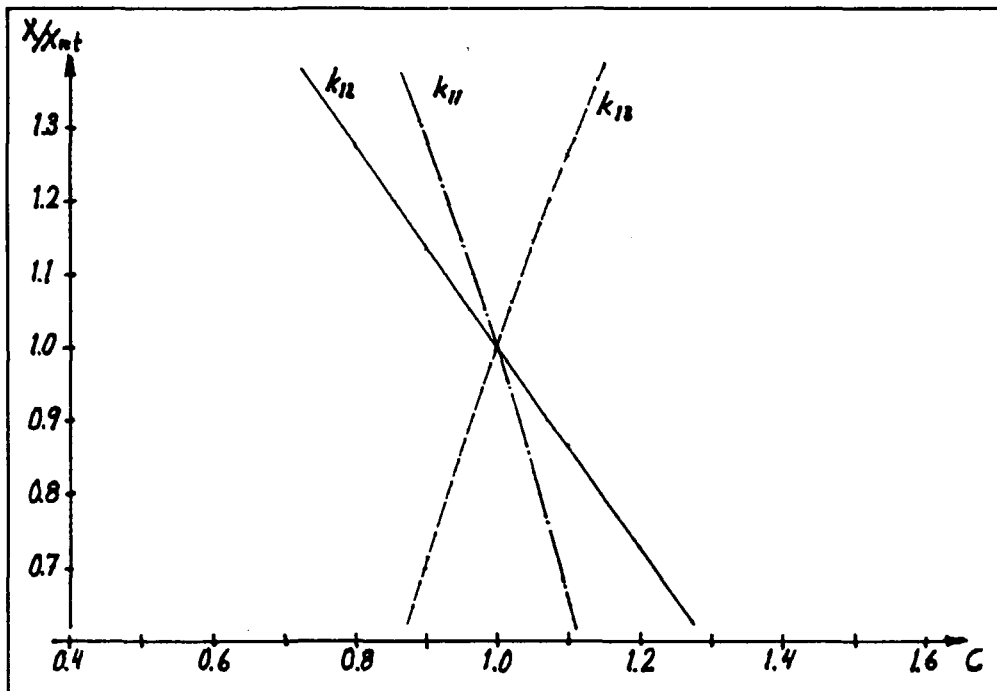
Känslighetsanalysen av kostnadskonstanterna har skett genom att en kostnadskonstant varieras i taget i ekv (2:28). Variationen av kostnadskonstanterna vill visa vilken eller vilka kostnadskonstanter som får den största inverkan på resultatet, dvs om det är den rörliga eller fasta delen för gasturbinen respektive hetvattenpannan som får störst betydelse. Kostnadskonstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$ :s individuella variation presenteras i figurerna 4.1 - 4.3 och  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$ :s individuella variation presenteras i figurerna 4.4 - 4.6. Vid jämförelse mellan kostnadskonstanternas variationer bör ej för stort intresse ägnas åt brytpunkterna i figurerna 4.1 - 4.6. Utan det är kurvornas inbördes lutningar och trender som är av intresse.



Figur 4.1. Den relativa kostnaden  $f(\tau,x)/f(\tau,x)_{ref}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$ . För  $f(\tau,x)/f(\tau,x)_{ref} = 1,1$  existerar ingen gasturbin.



Figur 4.2. Den relativa tiden  $\tau/\tau_{ref}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$ . Vid  $\tau/\tau_{ref} = 1,18$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttningstid, dvs  $\tau = 1,0$ .



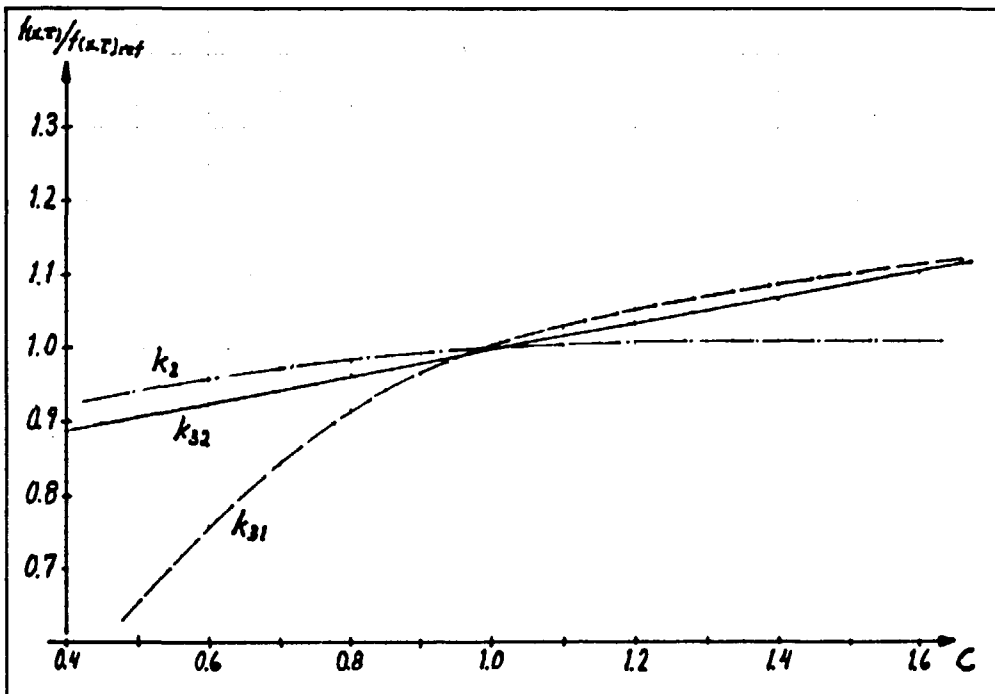
Figur 4.3. Den relativa effekten  $x/x_{nt}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$ .

Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_{11}$ , vilken beskriver gasturbinens rörliga kostnadsdel visas i figur 4.1 - 4.3. Kostnadskonstanten  $k_{11}$  har redan ett så högt värde att en ökning ej är möjlig med mer än till ca  $C=1,14$ . Då  $C$  är större än  $1,14$  existerar inte någon gasturbin utan kostnadsminimum hittas i punkten  $(0,0)$ , dvs då dimensionslösa tiden  $\tau$  respektive effekten  $x$  är lika med noll. Dimensionslösa tiden  $\tau$  har ett minimum vid ca  $C=1$ . Då ca  $C=0,60$  har  $\tau$  nått full utnyttningstid, dvs  $\tau=1$ , och därefter fortsätter endast  $x$  att öka. I figur 4.7 visas hur den dimensionslösa effekten  $x$  och tiden  $\tau$  i princip samvarierar i ett varaktighetsdiagram när kostnadskonstanten  $k_{11}$  ändras.

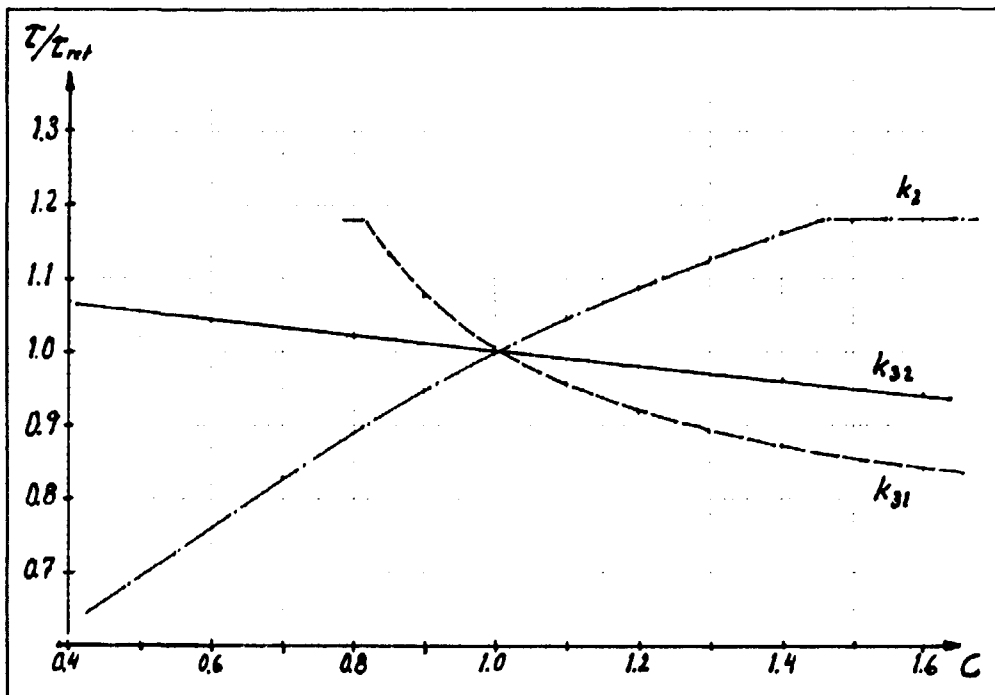
Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_{12}$ , vilken beskriver gasturbinens fasta kostnadsdel, visas i figur 4.1 - 4.3. Att den dimensionslösa tiden  $\tau$  ökar samtidigt som den dimensionslösa effekten minskar och tvärtom, förklaras i texten till figur 4.8. Då ca  $C = 1,33$  har  $\tau$  nått full utnyttningstid, dvs  $\tau = 1,0$ . För  $C > 1,5$  finner vi ingen minimikostnad för någon gasturbin, utan minsta kostnaden har vi i punkten  $(0,0)$ .

Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_{13}$ , vilken beskriver gasturbinens genererade elintäkt kan ses i figur 4.1 - 4.3. Ökning av  $k_{13}$  ger en lägre kostnad vilket är naturligt eftersom intäkterna ökar. Dimensionslösa tiden  $\tau$  har ett minimum vid ca  $C=1,1$ . Vid värde på ca  $C < 0,84$  finner man inget kostnadsminimum för någon gasturbin utan minsta kostnaden hittas i punkten  $(0,0)$ . I figur 4.7 visas hur den dimensionslösa effekten  $x$  och tiden  $\tau$  i princip varierar i ett varaktighetsdiagram när kostnadskonstanten  $k_{13}$  varierar.

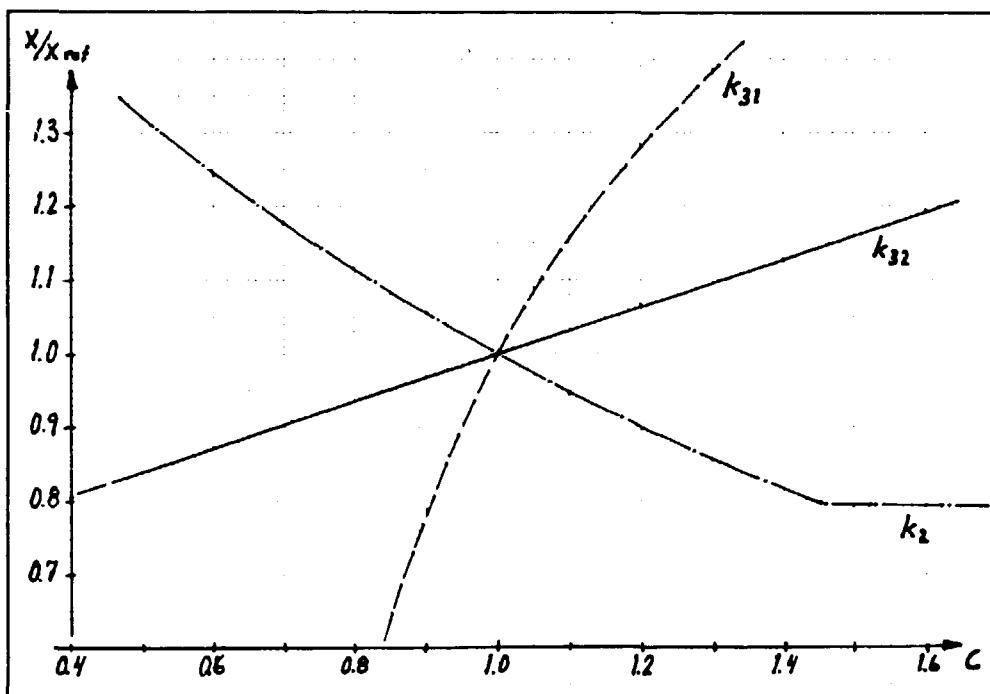




Figur 4.4. Den relativa kostnaden  $f(\tau, x)/f(\tau, x)_{ref}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$ .



Figur 4.5. Den relativa tiden  $\tau/\tau_{ref}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$ . Vid  $\tau/\tau_{ref} = 1,18$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttjningstid, dvs  $\tau = 1,0$

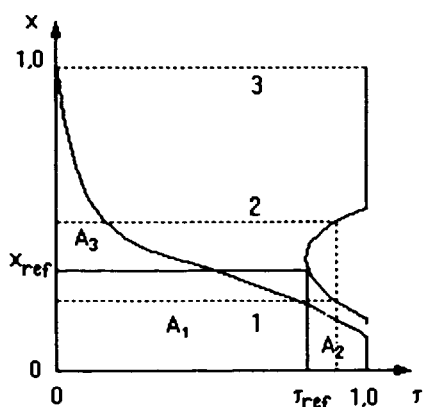


Figur 4.6. Den relativa effekten  $x/x_{ref}$  som funktion av variationskonstanten  $C$ , för kostnadskonstanterna  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$ .

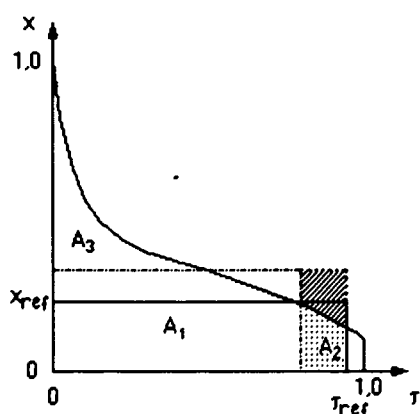
Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_2$ , vilken beskriver area  $A_2$ 's rörliga kostnadsdel visas i figur 4.4 - 4.6. Vid ca  $C=1,46$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  erhållit full utnyttningstid. Eftersom full utnyttningstid har nåtts har arean  $A_2$  försvunnit ur ekvationen och därför ändras ingen variabel i kostnadsfunktionen vid en ytterligare ökning. I figur 4.8 framgår hur  $x$  och  $\tau$  i princip samvarierar i varaktighetskurvan för variation av kostnadskonstanten  $k_2$ .

Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_{31}$ , vilken beskriver area  $A_3$ 's rörliga kostnadsdel visas i figur 4.4 - 4.6. Vid ca  $C=0,8$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttningstid, dvs  $\tau=1$ . Vid en ytterligare minskning hittas inget minimum för någon gasturbin.

Känslighetsanalysen för kostnadskonstanten  $k_{32}$ , vilken beskriver hetvattenpannans fasta kostnadsdel kan ses i figur 4.4 - 4.6. Vid ökning av de fasta kostnaderna stiger  $f(\tau, x)$ , samtidigt som  $x$  ökar och  $\tau$  minskar. En minskning av  $k_{32}$  ger en minskning av  $f(\tau, x)$ , samtidigt som  $x$  minskar och  $\tau$  ökar. I figur 4.8 framgår hur  $x$  och  $\tau$  i princip samvarierar i varaktighetskurvan för variation av kostnadskonstanten  $k_{32}$ .



Figur 4.7. Här illustreras hur de dimensionlösa variablerna  $x$  och  $\tau$  ändras då kostnadskonstanterna  $k_{11}$  och  $k_{13}$  varieras. Den heldragna linjen för  $x_{ref}$  respektive  $\tau_{ref}$  visar referensalternativet. Den heldragna kurvan till höger visar hur en kontinuerlig variation av antingen  $k_{11}$  eller  $k_{13}$  påverkar de dimensionlösa variablerna  $x$  och  $\tau$ . Linje 1 visar var variablerna  $x$  och  $\tau$  hamnar om  $k_{11}$  ökar eller  $k_{13}$  minskar. Linje 2 visar var variablerna  $x$  och  $\tau$  hamnar om  $k_{11}$  minskar eller  $k_{13}$  ökar. Linje 3 visar ett extremfall, vilket inträffar om  $k_{11}$  är mycket lågt eller  $k_{13}$  mycket högt. Förklaringen till att  $x$  och  $\tau$  samvarierar på detta sätt är att värmeförbrukningen från gasturbinen blir mindre betydelsefull jämfört med elintäcket då förhållandet mellan elpriset och bränslepriset ökar.



Figur 4.8. Här visas hur de dimensionlösa variablerna  $x$  och  $\tau$  varierar i förhållande till varandra. Vid minskad effekt  $x$  ökar tiden  $\tau$  och tvärtom. Om effekten  $x$  ökar och tiden  $\tau$  minskar innebär detta att den årliga kostnaden blir lägre än om tiden  $\tau$  skulle vara konstant. En förklaring till detta är att det blir dyrare att producera den streckade och prickade arean med gasturbin än att enbart producera den prickade arean med en hetvattenpanna. Förhållandet mellan  $x$  och  $\tau$  ändras på detta sätt oavsett vilken av kostnadskonstanterna  $k_{12}$ ,  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$  som varieras.

#### **4.2.2. En jämförelse mellan kostnadskonstanternas variationer**

Jämförelsen mellan de olika variationerna av kostnadskonstanterna i ekvation (2:28) visar att det finns en betydlig skillnad mellan konstanternas påverkan av den årliga kostnaden. Jämförelsen får ske utifrån det att anläggningskonstanterna har valts på ett korrekt sätt och att elpriset har satts 45% högre än dagens elpris.

Om vi tittar på kostnaden  $f(\tau, x)$  för variationerna av  $k_{11}$  och  $k_{13}$  ser vi i figur 4.1 att de i stort sätt har samma kostnadskänslighet, fast med ett omvänt förhållande till varandra. Kostnadskonstanten  $k_{12}$  påverkar inte kostnaden i lika hög grad. För den dimensionslösa effekten  $x$  ger alla tre kostnadskonstanterna ( $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$ ) hög känslighet vid variation. Den dimensionslösa tiden  $\tau$  får ett mycket speciellt utseende vid variation av kostnadskonstanterna  $k_{11}$  och  $k_{13}$ . Se figur 4.7. Att kostnadskonstanterna  $k_{11}$  och  $k_{13}$  får samma utseende är inte så konstigt om man tittar på kostnadsfunktionen (2:7). De är båda beroende av variablerna  $x$  och  $\tau$ . Vilken av kostnadskonstanterna  $k_{11}$  och  $k_{13}$  som ger störst känslighet vid variation på det sätt som skett här beror på vilken av termerna framför  $x\tau$  som är störst. Tiden  $\tau$  finner ett minimum för utnyttningstiden. Från en låg effekt när  $\tau=1$  tills att  $\tau$  har nått minimumet reagerar  $x$  och  $\tau$  i förhållande till varandra enligt figur 4.8. När sedan minimumet har nåtts så ökar både  $x$  och  $\tau$  samtidigt. Detta förhållande kan förklaras med att varaktighetskurvans värmebehov blir mindre väsentligt gentemot elproduktionen. Förhållandet mellan elintäkterna och gasturbinens rörliga kostnader får ett så stort värde i kostnadsfunktionen att både  $x$  och  $\tau$  ökar samtidigt.

Vilken roll spelar då kostnadskonstanterna  $k_2$ ,  $k_{31}$  och  $k_{32}$  för resultatet? Dessa konstanter hänför sig till hetvattenpannan. Något som klart ses är att hetvattenpannans specifika investeringskostnad, vilken beskrivs av kostnadskonstanten  $k_{32}$ , får en liten betydelse. Variationen av  $k_{32}$  påverkar kostnaden  $f(\tau, x)$  och den dimensionslösa effekten mindre än de övriga kostnadskonstanter. De rörliga kostnadskonstanterna  $k_2$  och  $k_{31}$  påverkar  $x$  och  $\tau$  i olika riktningar. Kostnadskonstanten  $k_{31}$  påverkar resultatet i förvånansvärt hög grad i förhållande till vad kostnadskonstanten  $k_2$  gör. Detta innebär inte att arean  $A_3$  i sig har någon inverkan på utläggningen av gasturbinen. Vilket kan utläsas ur kostnadsfunktionen då den deriveras med avseende på den dimensionslösa effekten  $x$ , ekv (2:29).

Något som tydligt ses är att de rörliga kostnaderna ger störst känslighet vid variationen. Den dimensionslösa tiden  $\tau$  tycks inte vara speciellt känslig för variationerna utan befinner sig ofta inom ett område kring 0,8-0,95. Känsligheten för den dimensionslösa effekten  $x$  får däremot större konsekvenser, eftersom den specifika investeringskostnaden för gasturbinen är beroende av effekten.

### 4.3. Anläggningskonstanterna

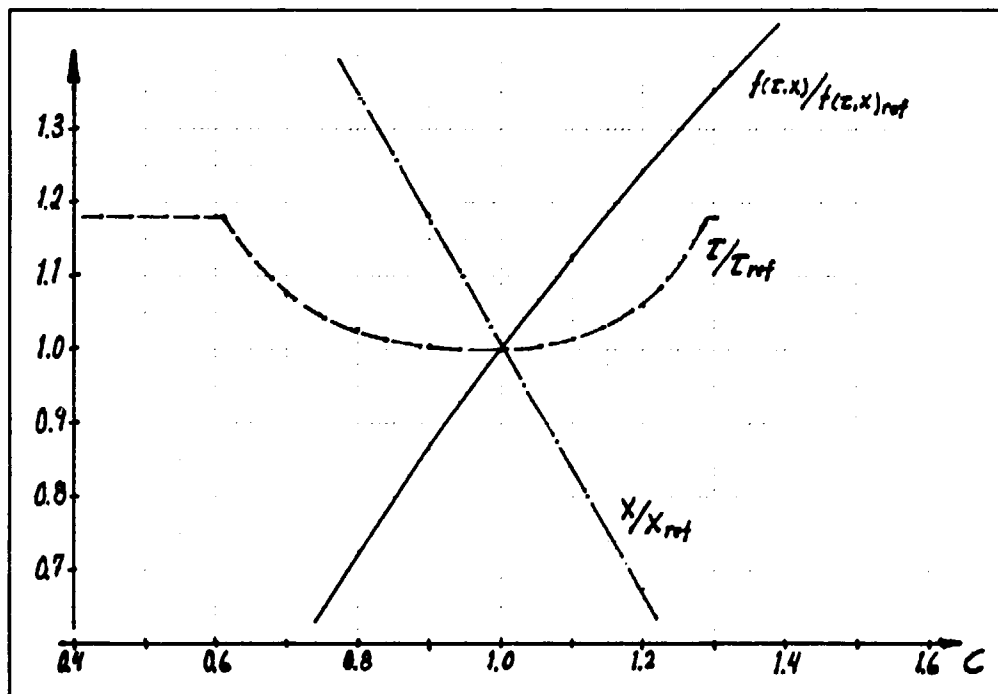
#### 4.3.1. Variation av anläggningskonstanter

Variation av anläggningskonstanterna görs på samma sätt som för kostnadskonstanterna. De anläggningskonstanter som varieras är de vilka ingår i flera kostnadskonstanter. Att variera de anläggningskonstanter som endast ingår i en kostnadskonstant är onödigt, eftersom detta får exakt samma effekt som variation av motsvarande kostnadskonstant. De anläggningskonstanter som valts att varieras samtidigt är följande:

- Bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$ .
- Bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$  samt elpriserna  $p_{el,max}$  och  $p_{el,min}$ .
- Förhållandet mellan  $p_{el,max}$  och  $p_{el,min}$ .
- Gasturbinens termiska vevningsgrad  $\eta_{11}$  och nettoelverkningsgraden  $\eta_{1e}$ .
- Kalkylräntan  $i$ .

##### 4.3.1.1. Bränslepriserna $p_{11}$ , $p_{21}$ och $p_{31}$

Variation av bränslepriserna sker genom att en variationskonstant,  $C$ , multipliceras med varje bränslepris. Detta görs eftersom bränslepriserna på marknaden oftast följs åt. Prissättningen på gas sker dessutom genom alternativprissättning. Nedan i figuren 4.9 visas resultatet av beräkningarna.

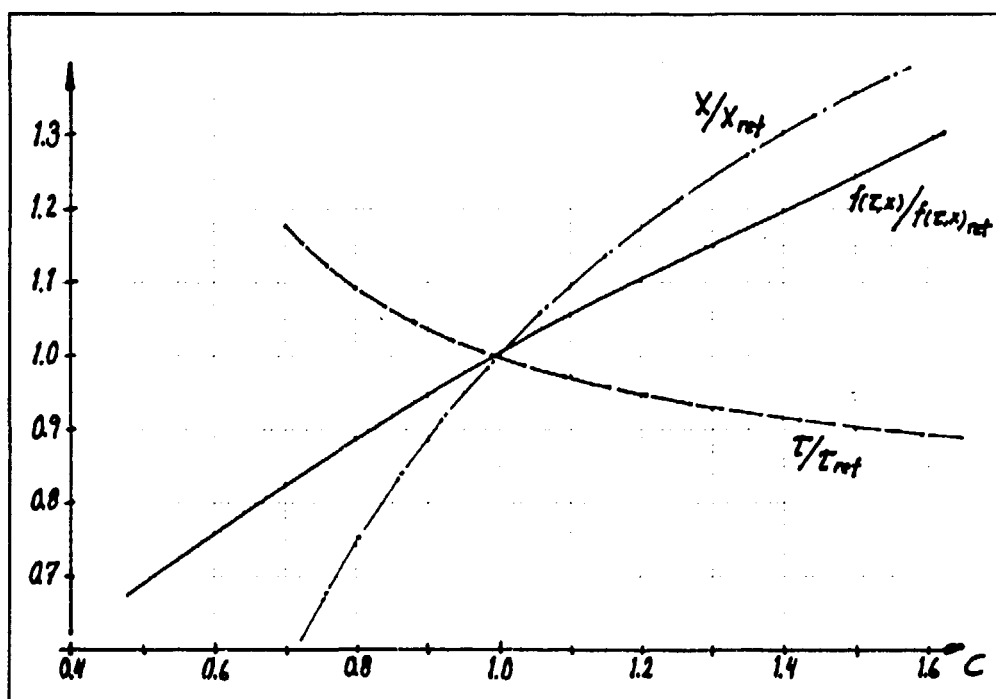


Figur 4.9. Variation av bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$ . Vid  $\tau/\tau_{ref}=1,18$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttjningstid, dvs  $\tau=1,0$ .

Vid ca  $C=1,31$  har bränslepriset stigit så mycket att den minsta kostnaden hittas i punkten  $f(0,0)$ , dvs gasturbinen är inte lönsam. Den dimensionslösa tiden  $\tau$  når full utnyttningstid vid ca  $C=0,62$ . För ytterligare minskat  $C$  ökar endast effekten. Hur den dimensionslösa effekten  $x$  och tiden  $\tau$  varierar i förhållande till varandra visas i ett varaktighetsdiagram, figur 4.7. Variationen av bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$  är detsamma som en samtidig variation av  $k_{11}$ ,  $k_2$  och  $k_{31}$ . Kostnadskonstanternas enskilda variation visas figurerna 4.1 - 4.6. Variationen av bränslepriserna i figur 4.9 har i stort sett samma utseende som variationen av kostnadskonstanten  $k_{11}$ . Skillnaden är att variationen av bränslepriserna ger mer utdragna kurvor jämfört med variationen av  $k_{11}$ . Detta bekräftar tidigare resultat som visat att de rörliga kostnaderna för gasturbinen har större känslighet än vad de rörliga kostnaderna för hetvattenpannan har. När bränslepriserna samvarieras är det alltså gasturbinens bränslepris som får störst betydelse för resultatet på kostnadsfunktionen.

#### 4.3.1.2. Bränslepriserna $p_{11}$ , $p_{21}$ och $p_{31}$ samt elpriserna $p_{el,max}$ och $p_{el,min}$

När elpriset har varierats samtidigt med bränslepriserna har detta skett på samma sätt som för enbart bränslepriserna. Figur 4.10 visar resultatet av variationen.



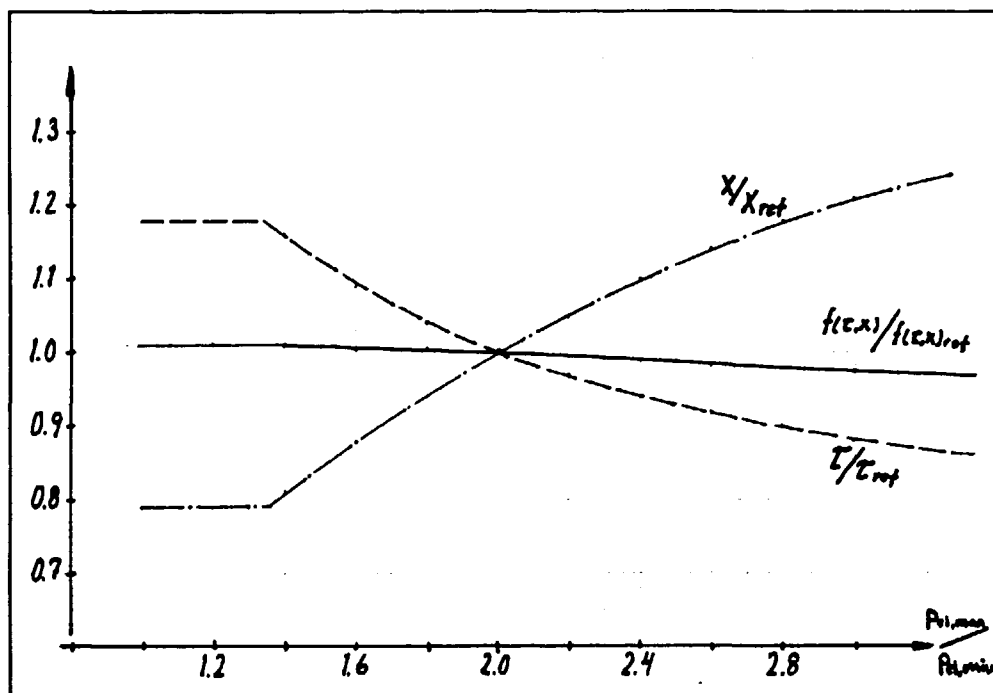
Figur 4.10. Variation av bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$  samt  $p_{el,max}$  och  $p_{el,min}$ .

Kostnaden stiger också när bränslepriserna och elpriset ökas med samma grad. Då ca  $C=0,7$  har  $\tau$  nått full utnyttningstid och för  $C<0,7$  hittas den lägsta kostnaden i punkten  $f(0,0)$ , dvs gasturbinen är inte lönsam. Hur förhållandet mellan  $x$  och  $\tau$  varierar kan ses i figur 4.8. Denna variation får samma innebörd som en samvariation av  $k_{11}$ ,  $k_{13}$ ,  $k_2$  och  $k_{31}$ .

När även elpriset är med vid variationen är det inte lika lätt att dra någon slutsats om elpriset eller vilket av bränslepriserna som får störst betydelse för resultatet.

#### 4.3.1.3. Förhållandet mellan $p_{el,max}$ och $p_{el,min}$

För att visa att skillnaden mellan  $p_{el,max}$  och  $p_{el,min}$  har inverkan på resultatet har vi valt att variera förhållandet mellan  $p_{el,max}$  och  $p_{el,min}$ . Variationen har skett genom att hålla  $p_{el,medel}$  konstant. Se figur 2.6. Förhållandet  $p_{el,max}/p_{el,min} = 2,0$  är vårt referensalternativ. I figuren 4.11 visas resultatet av variationen för  $p_{el,max}/p_{el,min}$ .

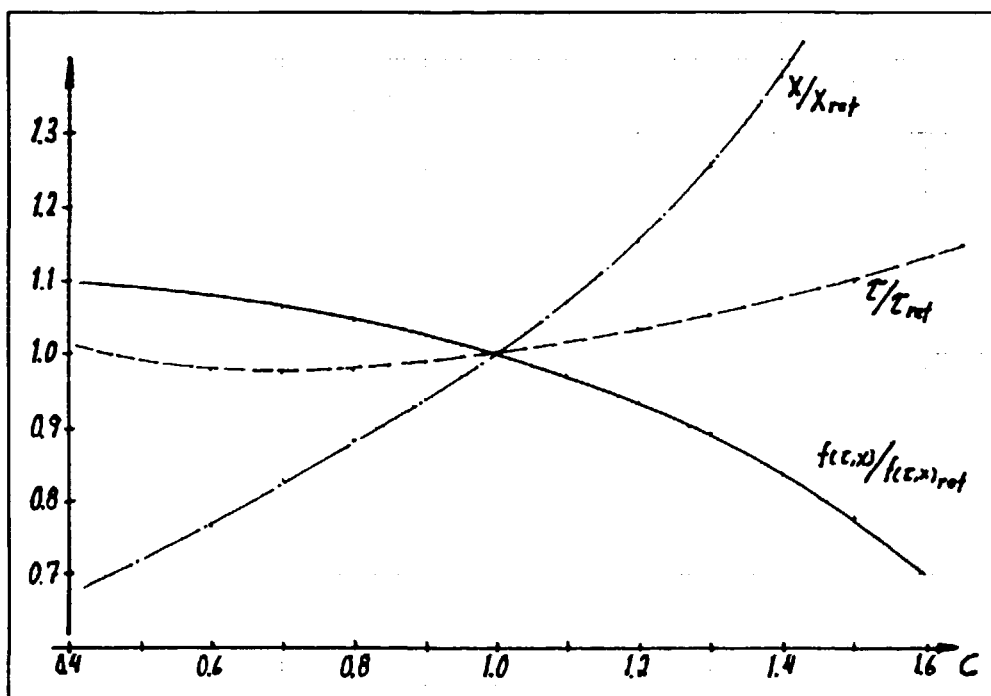


Figur 4.11. Variation av  $p_{el,max}/p_{el,min}$ .

När förhållandet ökar kommer kostnaden att minska lite samtidigt som effekten  $x$  ökar och tiden  $\tau$  minskar. Vid förhållande  $p_{el,max}/p_{el,min} = 1,27$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttjningstid, dvs  $\tau=1$ . För en ytterligare minskning ändras varken  $\tau$  eller  $x$ , eftersom  $p_{el,medel}$  är konstant. När  $p_{el,max}/p_{el,min} = 1$  är elpriset konstant under året och en fortsatt minskning är inte realistisk.

#### 4.3.1.4. Termiska verkningsgraden $\eta_{11}$ och nettoelverkningsgraden $\eta_{10}$

Gasturbinens termiska verkningsgrad  $\eta_{11}$  och nettoelverkningsgraden  $\eta_{10}$  har valts att varieras samtidigt p g a att de i praktiken följs åt. I figur 4.12 visas resultatet då  $\eta_{11}$  och  $\eta_{10}$  varieras.



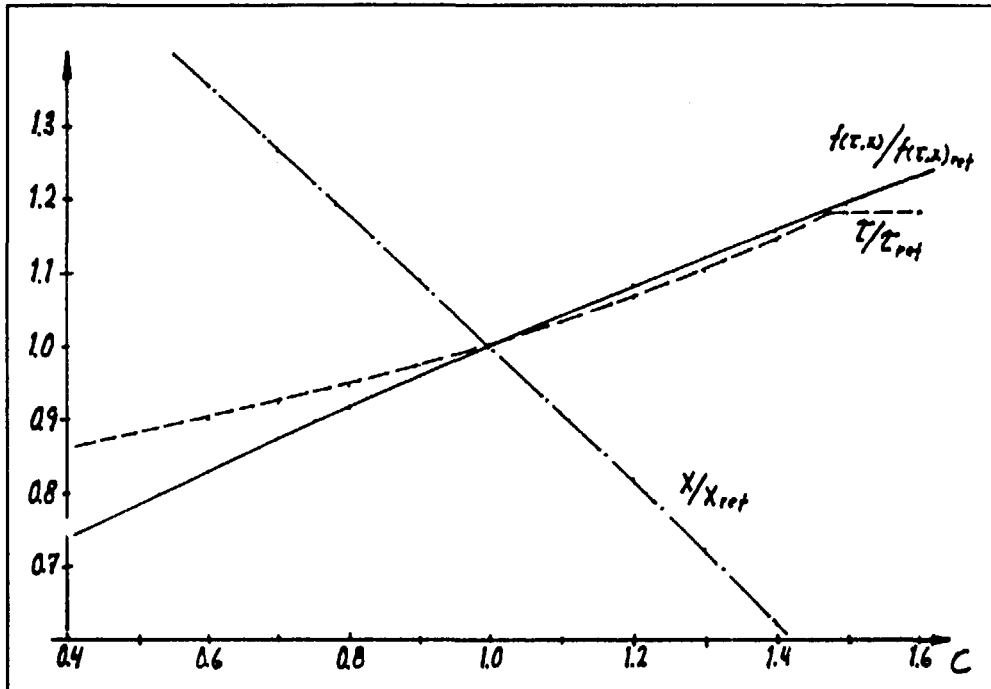
Figur 4.12. Variationen av gasturbinens termiska verkningsgrad  $\eta_{11}$  och nettoelverkningsgraden  $\eta_{10}$ .

En ökning av gasturbinens termiska verkningsgrad  $\eta_{11}$  och nettoelverkningsgraden  $\eta_{10}$  ökar den dimensionslösa effekten  $x$  samtidigt som den dimensionslösa tiden  $\tau$  ökar. Den dimensionslösa tiden  $\tau$  erhåller ett minimum inom vårt variationsområde vid ca  $C=0,7$ . Varaktighetsdiagrammet i figur 4.7 visar  $x$  och  $\tau$ :s utseende. Variationen av den termiska verkningsgraden och elverkningsgraden får samma innebörd som en samtidig variation av  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{21}$ , fast med omvänt förhållande. Vid jämförelse av figurerna 4.1 - 4.3 och 4.12 kan man se att det är kostnadskonstanterna  $k_{11}$  och  $k_{12}$  som har störst inverkan på resultatet, dvs kurvorna har samma lutning som  $k_{11}$  och  $k_{12}$ . Skillnaden är den att kurvorna får ett mer utplanat utseende och en utdragen form vid variation av  $\eta_{11}$  och  $\eta_{10}$ .



#### 4.3.1.4. Kalkylränta i

Vi har även valt att visa hur kalkylräntan  $i$  inverkar på resultatet. Valet av kalkylränta bestäms ofta av företagets policy och målsättning. Kalkylräntan beror dessutom på om kalkylen genomförs i fast eller nominellt penningvärde. I figur 4.13 visas resultatet då kalkylräntan  $i$  varierar.

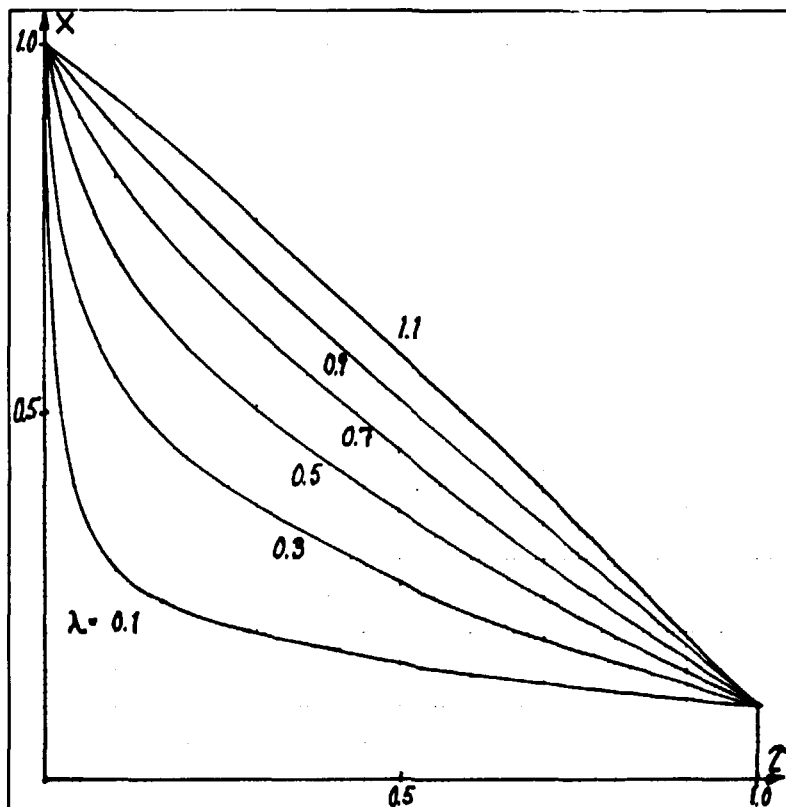


Figur 4.13. Variation av kalkylräntan  $i$ . Vid  $\tau/\tau_{ret} = 1,18$  har den dimensionslösa tiden  $\tau$  nått full utnyttjningstid, dvs  $\tau = 1,0$ .

Variationen av kalkylräntan visar att kostnaden  $f(\tau, x)$  och dimensionslösa tiden  $\tau$  endast påverkas marginellt. För den dimensionslösa effekten  $x$  har valet av kalkylräntan däremot stor betydelse. Denna variation kan ses som en samtidig variation av kostnadskonstanterna  $k_{12}$  och  $k_{32}$  i vilka annuitetsfaktor ingår. I vårt fall är det  $k_{12}$  som påverkar resultatet i mest.

#### 4.4. Varaktighetskurvans inverkan

Vilken inverkan får varaktighetskurvans utseende på kostnadsfunktionens resultat, ekvation (2:28)? För att på ett överskådligt sätt visa att varaktighetskurvans utseende har stor inverkan på flera väsentliga parametrar har vi låtit lambdavärdet,  $\lambda$ , variera från 0,1 till 1,1 samtidigt som  $\tau_1$  och  $u_0$  hållits konstanta. Dessa har valts till:  $\tau_1 = 1,0$  och  $u_0 = 0,1$ . Hur kostnadsfunktionen påverkas vid variationen av lambdavärdet presenteras i tabellen nedan. I figur 4.14 visas hur variationen av lambdavärdet påverkar varaktighetskurvans utseende.



Figur 4.14. Figuren visar hur variationen av lambdavärdet,  $\lambda$ , påverkar ersättningsfunktionens utseende då  $\tau_1 = 1,0$  och  $u_0 = 0,1$ .

Här nedan presenteras resultatet av beräkningarna vid varierat lambdavärde.

$\lambda$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
$f(\tau, x)/P_{max}$	245,89	353,08	428,25	483,94	526,65	560,25
$x$	0,1245	0,2090	0,2899	0,3614	0,4243	0,4799
$\tau$	1,0	0,8632	0,8241	0,8097	0,8039	0,8020
$u_0$	0,1818	0,3077	0,4000	0,4706	0,5263	0,5714
$f(\tau, x)/$ $(P_{max} \cdot u_0)$	0,1544	0,1310	0,1222	0,1174	0,1142	0,1132

Anläggningskonstanterna är desamma som för referensalternativet, bilaga 3. Hur dimensionslösa effekten  $x$ , tiden  $\tau$  och  $f(\tau, x)/P_{\max}$  räknas ut visas i bilaga 2. Den dimensionslösa aren  $u_a$  har beräknats ur ekvation (2:15). För att en korrekt jämförelse skall kunna göras har kostnaden per producerad kWh beräknats,  $f(\tau, x)/(P_{\max} t_a U_a)$ .

Ett litet lambdavärde ger en liten area med en skarp kurva (figur 4.14) medan ett högre lambdavärde ger en fyllig varaktighetskurva. Ju högre lambdavärde desto större gasturbin och mindre kostnad per kWh. Något anmärkningsvärt är att den dimensionslösa tiden  $\tau$  nästan håller sig konstant kring 0,8 - 0,9, utom då  $\lambda = 0,1$  vid  $\tau=1$ .

Jämförelse har också skett med varaktighetskurvor tagna från fyra fjärrvärmeverk. Dessa kan ses i bilaga 5. Nedan visas resultatet av beräkningarna.

Ort	Värnamo	Lund	Oskarshamn	Älmhult
$P_{\max}$ [MW <sub>v</sub> ]	22	220	21	28
$u_a$	0,3950	0,3990	0,3125	0,2508
$u_o$	0,12	0,10	0,11	0,10
$\tau_i$	1,0	1,0	0,9	1,0
$\lambda$	0,4545	0,4980	0,3383	0,2013
$f(x, \tau)/P_{\max}$	422,7	427,6	357,7	305,4
$x$	0,2820	0,2892	0,2136	0,1657
$\tau$	0,8477	0,8243	0,8265	0,9106
$f(x, \tau)/(P_{\max} t_a U_a)$	0,122	0,122	0,131	0,139
$P_g$ [MW <sub>el</sub> ]	3,16	32,63	2,30	2,38

Här ses att lambdavärdet befinner sig i intervallet 0,2 - 0,45 för de valda varaktighetskurvorna. I bilaga 5 ses hur ersättningsfunktionen överensstämmer med de verkliga varaktighetskurvorna. Ersättningsfunktionen får i dessa fall anses ge mycket bra ersättningskurvor till varaktighetskurvorna. För de fyra varaktighetskurvorna har också maximala effekten  $P_{\max}$  presenterats. Detta för att kunna visa hur stor gasturbin som erhålles av den beräknade effekten  $x$ .  $P_g$  ges av ekvation (3:9).

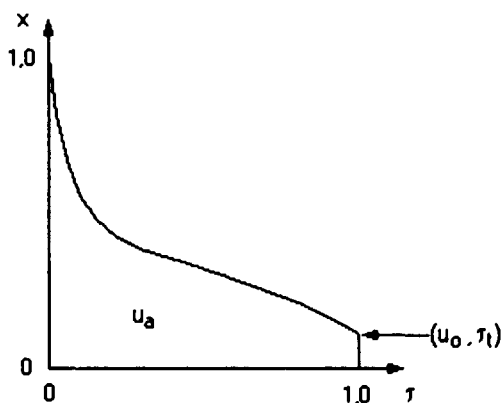
Variationen av lambdavärdet,  $\lambda$ , i ersättningsfunktionen för varaktighetskurvorna, visar att kurvornas utseende får stor betydelse på den dimensionslösa effekten  $x$ . Ett högt värde på  $x$  eftersträvas eftersom det ger lägre specifik investeringskostnad för gasturbinen. Därför är det önskvärt att ha ett så högt värde på  $x$  som möjligt. Dessutom kan man säga att ett dåligt utnyttjat fjärrvärmenät får en varaktighetskurva med litet lambdavärde och ett bra utnyttjat fjärrvärmenät erhåller ett stort lambdavärde. Jämförelse kan ske mellan Lunds och Älmhults varaktighetskurvor, där Lund har ett ganska högt lambdavärde jämfört med Älmhults. Ett högre lambdavärde ger alltså bättre förutsättningar för att en tillfredsställande lösning skall hittas för kostnadsfunktionen, ekvation (2:28).

## 5. Beräkningsgång och exempel på tillämpningar

### 5.1. En översiktlig beskrivning av beräkningsgången

#### 5.1.1. Anpassning av ersättningsfunktion till given varaktighetskurva

Då man har en varaktighetskurva given skall ersättningskurvan anpassas så väl som möjligt. Detta gör man enklast genom att mäta upp och räkna ut  $u_a$ , som varaktighetskurvan innesluter. Se figur 5.1. Då detta görs skall man se till att arean verkligen blir dimensionslös på så sätt som beskrivs i början av kapitel 2.1. Parametern  $u_a$  beskrivs i ekvation (2:14)



Figur 5.1. Dimensionslös varaktighetskurva där arean  $u_a$  och den dimensionslösa mineffekten  $u_0$  samt  $\tau$  finns beskrivna.

Efter det att  $u_a$  är uträknat bestämmer man en minimeffekt  $u_0$  (ekv 2:16), som beskriver den lägsta belastningen under det aktuella året. Innan man går vidare måste man bestämma om man skall använda en ersättningskurva med eller utan brytpunkt. Därefter bestäms  $\tau$ , som inte nödvändigtvis behöver sättas till 1 bara för att man valt att använda en ersättningskurva utan brytpunkt. Dessa värden sätts sedan in i ekv (2:19) och ett  $\lambda$ -värde erhålls. Då detta är utfört, har vi alla parametrar som bestämmer ersättningskurvan, som beskrivs av ekvation (2:17) och (2:18).

#### 5.1.2. Beräkning av kostnadskonstanterna

För att räkna ut kostnadskonstanterna behövs data om anläggningen. Då dessa uppgifter valts kan man räkna ut kostnadskonstanterna enligt ekvationerna (3:1) - (3:7). Här bör påpekas att gasturbinens specifika investeringskostnad,  $J_1$ , i ekvation (3:2) skall väljas med hänsyn till varaktighetskurvans maxeffekt, eftersom gasturbinens specifika investeringskostnad i allmänhet varierar med gasturbinens eleffekt. Vi menar att om man tar hänsyn till detta innan man går vidare i beräkningarna så sparar man en del arbete. Med de värden på anläggningskonstanterna som finns presenterade i bilaga 3 brukar gasturbinens värmeeffekt i allmänhet ligga mellan 10% och 30% av varaktighetskurvans

maxeffekt. Detta medför att gasturbinens eleffekt kan uppskattas till mellan 5% och 15% av  $P_{max}$ , förutsatt att gasturbinen utgör grundlasten i fjärrvärmesystemet. För existerande anläggningar skall ett medelvärde för anläggningskonstanterna bestämmas för area  $A_2$  respektive  $A_3$ . I våra beräkningar utgår vi från att det inte finns några hetvattenpannor eller annan utrustning till det befintliga fjärrvärmenätet. Naturligtvis måste i stort sett alla fjärrvärmeverk redan ha driftdugliga hetvattenpannor innan man anskaffar en gasturbin. Därför behöver man inte investera i nya sådana och följdaktligen uteblir investeringskostnaden för dessa. Däremot finns det en årlig fast kostnad för hetvattenpannan. Det här påverkar förvisso inte resultatet nämnvärt, men den sista termen i kostnadsfunktionen blir dock mindre, se figurerna 4.4 - 4.6 då  $k_{32}$  varierar.

### **5.1.3. Uträkning av kostnadsfunktionens minimum**

Då alla kostnadskonstanter är uträknade har vi alla uppgifter i kostnadsfunktionen. Vi kan då leta upp den stationära punkten i funktionen genom att lösa ekvationssystemet (2:29) och (2:30). Ekvationssystemet löses lämpligtvis med Newton-Raphsons metod (se bilaga 2). Om man finner en lösning till ekvationssystemet innanför ränderna innebär detta nästan uteslutande att punkten beskriver ett kostnadsminimum för kostnadsfunktionen. Här bör man undersöka om det  $x$ -värde vi räknat fram, omräknat till eleffekt, överensstämmer med den eleffekt på gasturbinen som vi använde när  $J_1$  uppskattades. Stämmer detta mot all förmodan illa överens, är det lämpligt att uppskatta ett nytt  $J_1$  och därefter räkna ut en ny stationär punkt med utgång av detta värde. Om däremot  $J_1$  stämmer bra, använder vi dessa aktuella värden i kostnadsfunktionen och får ut en årlig kostnad för anläggningen. För att försäkra sig om att detta är den lägsta möjliga årskostnaden undersöker vi randen  $f(\tau = 1, x)$  genom att lösa ekvation (2:33). Här efter stoppar vi in de aktuella värdena i vår kostnadsfunktion och får ut en ny årlig kostnad. För att gardera oss undersöker vi slutligen den årliga kostnaden för anläggningen utan gasturbin, nämligen  $f(0,0)$ , ekv (2:32).

### **5.1.4. Korrigering av anläggningskonstanterna**

Det  $x$ -värde vi räknat fram ger tillsammans med ekvation (3:8) en eleffekt på gasturbinen som sannolikt inte överensstämmer med de gasturbiner som finns tillgängliga på marknaden. Följdaktligen får man leta upp den eller de gasturbiner som passar bäst för ens behov vad gäller effekt och eventuellt andra aspekter. Här efter ger denna gasturbin ett nytt värde på  $x$  som vi använder i ekvation (2:30). Detta ger i sin tur ett nytt optimalt  $\tau$ -värde. Ekvation (2:30) löses förslagsvis med Newton-Raphsons metod enligt bilaga 2. Vi räknar ut kostnadsfunktionen i denna punkt och de andra två punkterna enligt föregående beskrivning med de nya anläggningskonstanterna instoppade. Då har vi ett givet minimum för kostnadsfunktionen.

## 5.2. Exempel på tillämpningar

### 5.2.1. Exempel där gasturbinen får utgöra grundlast

Vi har valt ut en varaktighetskurva som härstammar från Lund för att tillämpa vår kostnadsfunktion. Varaktighetskurvan för Lunds fjärrvärmenät finns beskriven i bilaga 5 och även den ersättningsfunktion som vi räknar fram i exemplet. Vi har använt oss av en ersättningskurva utan brytpunkt. Denna ger en god approximation. Vi vill poängtera att punkten  $u_0$  inte nödvändigtvis behöver sättas till varaktighetskurvans minimivärde utan sätts här till ett lägre värde. Detta syns tydligt då man ritar upp ersättningskurvan. För beräkningar med ersättningskurva utan brytpunkt är det inget krav att  $\tau_1$  sätts till 1,0, utan kan mycket väl sättas till ett mindre värde och ändå beräknas med en kontinuerlig ersättningskurva. Vi väljer:

$$u_0 = 0,10 ; \quad \tau_1 = 1,0 ;$$

och beräknar:

$$u_a = 0,399 ;$$

$$\lambda = 0,498 ;$$

I bilaga 5 visas hur ersättningskurvan överensstämmer med varaktighetskurvan. Anläggningskonstanterna väljs till de värden som finns representerade i bilaga 3 förutom de konstanter som varierar beroende på gasturbinens eleffekt. Vi har en varaktighetskurva med en maxeffekt på 220 MW. Med hjälp av detta värde kan vi uppskatta gasturbinens ungefärliga eleffekt till 11 - 33 MW enligt resonemanget i kapitel 5.2.1. Härav kan vi bättre uppskatta:

gasturbinens termiska verkningsgrad	$\eta_{1t} = 0,32$
gasturbinens nettoelverkningsgrad	$\eta_{1e} = 0,30$
gasturbinens investeringskostnad	$J_1 = 5000 \text{ [kr/kW]}$

Verkningsgraderna har valts högre än de som presenteras i bilaga 3. Detta för att värdena i bilagan utgår från en något mindre turbinstorlek. Dessa värden tillsammans med övriga värden i bilaga 3 och ekvationerna (3:1) - (3:7) ger kostnadskonstanterna:

$k_{11} = 1684,6$	$k_{12} = 485,55$	$k_{13} = 1882,8$
$k_2 = 1002,5$	$k_{31} = 911,04$	$k_{32} = 104,76 \text{ [kr/kWår]}$

Vi räknar med ett elpris som ligger 45% högre än dagens elpris. Detta dels för att elpriset förväntas stiga och dels för att inget kostnadsminimum med gasturbin erhålles med dagens elpriser. Dagnsmedelvärdet på elpriset blir då 0,38 kronor vid maxlast och 0,19 kronor vid minlast.

Med dessa värden i kostnadsfunktionen erhåller vi ett kostnadsminimum med hjälp av ekv (2:29) och (2:30) som löses med Newton-Raphsons metod (bilaga 2) samt kostnaden med ekv (2:28):

$$\tau = 0,833 \quad x = 0,305 \quad f(\tau, x) = 92,10 \quad [\text{Mkr/år}]$$

Då randen  $\tau=1$  undersöks ger ekv (2:33) den dimensionslösa effekten  $x$  och ekv (2:31) ger kostnaden:

$$\tau = 1 \quad x = 0,237 \quad f(1, x) = 93,6 \quad [\text{Mkr/år}]$$

För punkten (0,0) fås kostnaden av ekv (2:32):

$$\tau = 0 \quad x = 0 \quad f(0, 0) = 103,1 \quad [\text{Mkr/år}]$$

Slutligen blir:

$$P_{g,el} = \frac{\eta_{1e}}{\phi(1-\eta_t)} x P_{max} = 35,6 \quad [\text{MWel}]$$

$$P_{g,värme} = x P_{max} = 67,1 \quad [\text{MWvärme}]$$

Detta visar att vi funnit ett kostnadsminimum som ger en gasturbin med  $P_{g,el} = 35,6$  MWel. Här beror de höga effektvärdena på att Lunds varaktighetskurva är mycket gynnsam för en gasturbin och därmed erhåller vi lite högre effekter på gasturbinen än det värde som uppskattats. Nu återstår det att undersöka vad marknaden har för gasturbiner att erbjuda som passar in här.

Vi väljer i referens [4] tre gasturbiner i denna effektstorlek, nämligen LM 5000 PC (33,8 MWel), PG 6541 B (38,34 MWel) och CW 251 PG (46,5 MWel). Här anges ett budgetpris i US dollar på gasturbinerna i vilket gasturbinen, generator, luftintag, utblås, ljuddämpare och standardkontrollsystem ingår. Ett rimligt värde för den specifika kostnaden på avgaspannan och kringutrustning i denna effektstorlek ligger på ett pris runt 3000 kr/kW.

Gasturbinen LM 5000 PC har följande data:

$$P_{g,el} = 33,8 \quad [\text{MWel}] \quad \eta = 36,5 \% \quad \text{vilket ger: } P_{g,bränsle} = 92,6 \quad [\text{MW:bränsle}]$$

$$\text{Budgetpris : } 7 \cdot 240 \quad [\text{kr/kW}] \quad \text{vilket ger: } J_1 = 1680 + 3000 \quad [\text{kr}];$$

Vi antar att den termiska verkningsgraden försämras lite då man kopplar på en avgaspanna. Därför sätter vi verkningsgraderna till:

$$\eta_t = 35,5\% \quad \eta_{1e} = 34\%$$

Detta ger följande värden på de konstanter som måste korrigeras:

$$k_{11} = 1776,0 \quad k_{12} = 646,20 \quad k_{13} = 2249,6 \quad [\text{kr/kWår}]$$

Den dimensionslösa värmeeffekten blir:

$$x = \frac{P_{g,\text{bränsle}} \phi (1 - \eta_t)}{P_{\text{max}}} = 0,2167 ;$$

Detta ger tillsammans med ekv (2:30):

$$\tau = 0,9416 ;$$

De årliga kostnaderna räknas ut med hjälp av ekv (2:28) och (2:31):

$$f(\tau, x) = 92,32 \quad [\text{Mkr/år}]$$

$$f(1, x) = 92,58 \quad [\text{Mkr/år}]$$

Gasturbinen PG 6541 B har följande data:

$$P_{g,el} = 38,34 \text{ [MWel]} \quad \eta = 31,4 \% \quad \text{vilket ger: } P_{g,\text{bränsle}} = 122,1 \text{ [MWbränsle]}$$

$$\text{Budgetpris : } 7 \cdot 230 \text{ [kr/kW]} \quad \text{vilket ger: } J_1 = 1610 + 3000 \text{ [kr];}$$

Vi antar att den termiska verkningsgraden försämras lite då man kopplar på en avgaspanna. Därför sätter vi verkningsgraderna till:

$$\eta_t = 30,5\% \quad \eta_{1e} = 29,5\%$$

Detta ger följande värden på de konstanter som måste korrigeras:

$$k_{11} = 1648,26 \quad k_{12} = 430,71 \quad k_{13} = 1811,47 \quad [\text{kr/kWår}]$$

Den dimensionslösa värmeeffekten blir:

$$x = \frac{P_{g,\text{bränsle}} \phi (1 - \eta_t)}{P_{\text{max}}} = 0,3052 ;$$

Detta ger tillsammans med ekv (2:30):

$$\tau = 0,8308 ;$$



De årliga kostnaderna räknas ut med hjälp av ekv (2:28) och (2:31):

$$f(\tau, x) = 89,54 \quad [\text{Mkr/år}]$$

$$f(1, x) = 91,92 \quad [\text{Mkr/år}]$$

Gasturbinen CW 251 PG har följande data:

$$P_{g,el} = 46,5 \text{ [MWel]} \quad \eta = 32,3 \% \quad \text{vilket ger: } P_{g,bränsle} = 144,0 \text{ [MWbränsle]}$$

$$\text{Budgetpris : } 7 \cdot 219 \text{ [kr/kW]} \quad \text{vilket ger: } J_1 = 1533 + 3000 \text{ [kr];}$$

Vi sätter verkningsgraderna till:

$$\eta_t = 31,2\% \quad \eta_{te} = 30,2\%$$

Detta ger följande värden på de konstanter som måste korrigeras:

$$k_{11} = 1665,0 \quad k_{12} = 437,98 \quad k_{13} = 1873,3 \quad [\text{kr/kWår}]$$

Den dimensionslösa värmeeffekten blir:

$$x = \frac{P_{g,bränsle} \phi (1 - \eta_t)}{P_{\max}} = 0,3512 ;$$

Detta ger tillsammans med ekv (2:30):

$$\tau = 0,8062 ;$$

De årliga kostnaderna räknas ut med hjälp av ekv (2:28) och (2:31):

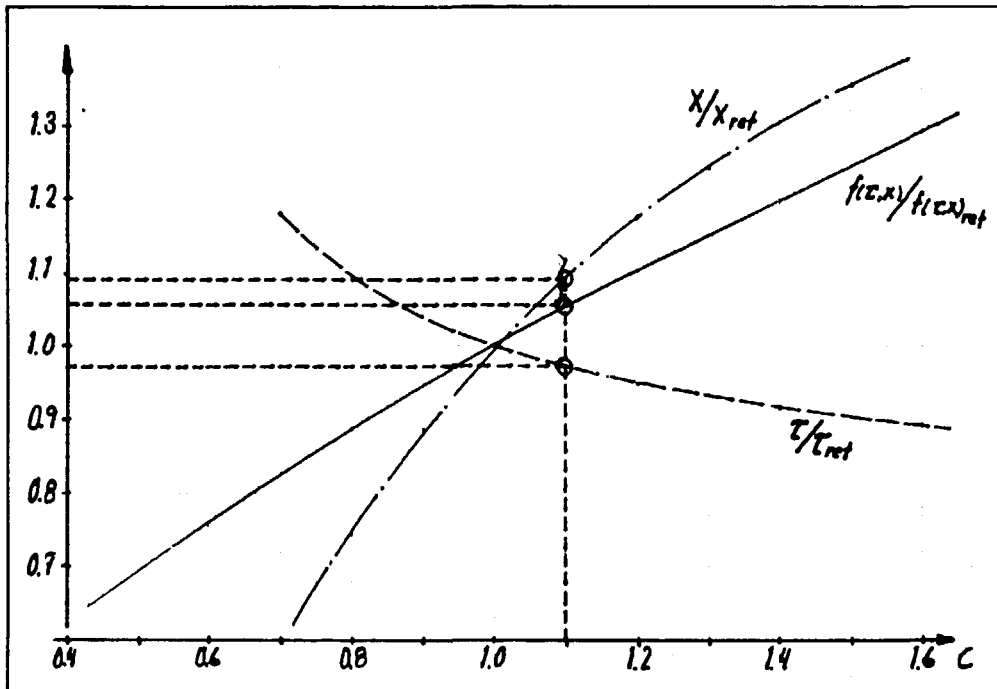
$$f(\tau, x) = 87,94 \quad [\text{Mkr/år}]$$

$$f(1, x) = 91,29 \quad [\text{Mkr/år}]$$

Här visar det sig att CW 251 PG ger den bästa ekonomin för Lunds fjärrvärmeverk. Denna har en något högre effekt än den effekt som räknades fram i början av exemplet. Detta beror delvis på att den specifika kostnaden för denna gasturbin är något lägre än för de andra två och delvis på att verkningsgraden är något högre än för PG 6541 B.

### 5.2.2. Exempel med ändrade driftförutsättningar

Efter att dessa beräkningar genomförts kan det vara så att man vill undersöka hur anläggningen skulle dimensioneras om t ex el- och bränslepriserna stiger med tio procent. Här behöver man inte genomföra räkningarna på nytt utan man kan uppskatta hur effekt, årlig drifttid och årlig kostnad ändrar sig med hjälp av fig 4.10. Se fig 5.2.

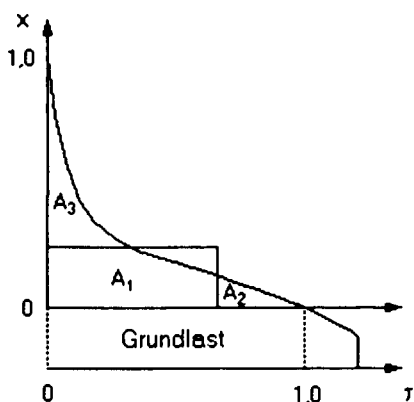


Figur 5.2. Variation av bränslepriserna  $p_{11}$ ,  $p_{21}$  och  $p_{31}$  samt  $p_{Del,max}$  och  $p_{Del,min}$ . Med linjerna för exemplet inritade.

Ur figuren utläses att effekten på gasturbinen bör ökas med ungefär 9% och den årliga drifttiden bör minska med ca 3%. Den årliga kostnaden ökar med ungefär 6%. Dessa siffror stämmer mer eller mindre bra beroende på hur mycket anläggningkonstanternas värden skiljer sig från de antagna värdena som finns presenterade i bilaga 3. Detta beror på att kurvorna inte är helt linjära, men i stort sätt ger det en fingervisning om hur värdena ändrar sig. Denna beräkning kan även göras då det gäller de andra anläggningkonstanterna och kostnadskonstanterna som finns presenterade i kapitel 4.

### 5.2.3. Exempel där gasturbinen inte utgör grundlast

Eftersom Lunds fjärrvärmenät är stort finns det säkert anläggningar som förväntas utgöra grundlast i detta även då man skaffar en gasturbin. Därför räknar vi om exemplet med samma varaktighetskurva, men där gasturbinen inte utgör grundlast. Varaktighetskurvan kapas då av enligt fig 5.3.



Figur 5.3. Varaktighetskurva där grundlasten inte utgörs av gasturbinen.

Varaktighetskurvans parametrar blir följande:

$$\begin{array}{lll} u_o = 0 & t_a = 5500 \text{ [h/år]} & u_a = 0,367 \\ P_{\max} = 150 \text{ [MW]} & \lambda = 0,580 & \end{array}$$

Uppskattad effekt på gasturbinen: 7,5 - 22,5 [MW]

Med hjälp av den uppskattade effekten kan vi bättre fastställa:

$$\begin{array}{ll} \text{gasturbinens termiska verkningsgrad} & \eta_{1t} = 0,32 \\ \text{gasturbinens nettoelverkningsgrad} & \eta_{1e} = 0,30 \\ \text{gasturbinens investeringskostnad} & J_1 = 5100 \text{ [kr/kW]} \end{array}$$

Elpriset varierar från ett maxpris vid  $t = 0$  till ett minpris då  $t_a = 8760$ . Detta medför att minpriset som räknas fram inte överensstämmer med det minpris som ska gälla vid  $t_a = 5500$ . Således måste minpriset korrigeras enligt följande formel:

$$P_{el,min}(t_a=5500) = P_{el,min} + (P_{el,max} - P_{el,min}) (8760 - t_a)/8760 ; \quad (5:1)$$

Detta ger:

$$P_{el,min}(t_a=5500) = 0,233 \text{ [kr/kWh]} ;$$

Följande värden på konstanterna räknas ut:

$$\begin{array}{lll} k_{11} = 1057,7 & k_{12} = 495,26 & k_{13} = 1182,1 \\ k_2 = 629,44 & k_{31} = 572,00 & k_{32} = 104,76 \quad [\text{kr/kWh}] \end{array}$$

Kostnadsfunktionens minimum erhålls då:

$$\tau = 0,9130 \quad x = 0,1104$$

Då randen  $f(1,x)$  och punkten  $f(0,0)$  kontrolleras erhåller vi högre årskostnader än för det givna minimumet.

Gasturbinens effekt ges av ekv (3:8):

$$P_{g,el} = 9,31 \text{ [MWel]}$$

Här får man vara försiktig och kontrollera de värden man antagit på gasturbinen och anläggningen i övrigt, eftersom den uträknade effekten ligger mycket lågt i förhållande till det värde som uppskattades.

Härefter går man tillväga på samma sätt som i föregående exempel. Välj ut ett par gasturbiner i rätt effektstorlek och korriger konstanterna  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  och  $k_{13}$  och lös ekvations-systemet (2:29) och (2:30) enligt bilaga 2.

Detta exempel visar att den årliga drifttiden  $t_a$  har stor inverkan på resultatet, som inte bara beror på  $t_a$  utan även på att  $u_o$  är lika med noll. Även om lambdavärdet är stort (se kapitel 4.4) så erhålls en mycket liten effekt jämfört med exemplet då gasturbinen utgjorde grundlasten. Detta visar att förutsättningarna för gasturbin, när den inte utgör grundlasten, inte är så goda på grund av att  $t_a$  och  $u_o$  antar ogynnsamma värden.

#### **5.2.4. Exempel när gasturbinen redan är anskaffad och driftförhållandena ändras**

Då gasturbinen anskaffas gäller vissa förutsättningar för att gasturbinen skall köras optimalt. Dessa förutsättningar ändras naturligtvis under en längre tid. Detta gäller dels varaktighetskurvans utseende, dels bränslepriser och elpris.

Vi antar först att varaktighetskurvans topp effekt ökar med tio procent medan parametrarna i övrigt behåller sitt utseende. El- och bränslepriser förblir oförändrade. Vi har valt den gasturbin som visade sig ge den lägsta årliga kostnaden i exempel 5.2.1, nämligen CW 251 PG.

Varaktighetskurvans topp effekt blir:  $P_{max} = 242 \text{ [MW]} ;$

Vi räknar ut den relativa effekten:

$$x = \frac{P_{g, \text{bränsle}} \phi (1 - \eta_t)}{P_{\text{max}}} = 0,3193 ;$$

Ekv (2:30) ger:  $\tau = 0,8281 ;$

Detta ger en ökning på den optimala drifftiden med 8 dagar.

Vi antar nu dessutom att bränsle- och elpriserna har stigit med tio procent. Detta medför i sin tur en ökning på  $k_{11}$  och  $k_{13}$  med tio procent. Här bör påpekas att detta inte går att lösa med hjälp av diagrammen i kapitel 4, eftersom effekten ändras där medan i detta fall är konstant. Med hjälp av ekv (2:30) erhålls:

$$\tau = 0,7840;$$

Drifftiden minskar här med drygt 8 dagar.

### 5.3 Förhållande mellan elpris och bränslepris

Finns det något enkelt förhållande mellan elpriset och bränslepriset? Svaret på den frågan får bli att det är tveksamt. Vi har dock funnit ett förhållande som måste uppfyllas för att en gasturbin överhuvudtaget skall vara att tänka på.

Vi gör den förenklingen att gasturbinens värme utnyttjas till hundra procent i fjärrvärme-produktionen och att elpriset är konstant, dvs  $p_{el,med} = p_{el,min} = p_{el,max}$ . Med dessa förenklingar erhåller vi nedanstående olikhet om vi endast ser på arean  $A_1$  i figur 2.1:

$$k_2 x \tau + k_{13} x \tau > k_{11} x \tau + k_{12} x ; \quad (5:2)$$

Produkten  $k_2 x \tau$  talar om hur mycket det hade kostat att producera detta värmebehov med area  $A_2$ 's produktionsvilkor. Produkten  $k_{13} x \tau$  beskriver elintäkterna, med förutsättning att  $p_{el,med}$  är definierat. Produkten  $k_{11} x \tau$  beskriver gasturbinens rörliga kostnader och produkten  $k_{12} x$  beskriver gasturbinens fasta kostnader. Kostnadskonstanterna är för övrigt desamma som beskrivs i kapitel 3. Detta förhållande förklarar endast att gasturbinens utgifter skall vara mindre än den vinst som den inbringar. Med ekv (3:1) - (3:7) och efter omskrivning ser förhållandet ut så här:

$$\frac{p_{el,med}}{p_{1f}} > \frac{J_1 f_{1p} n}{p_{1f} t_a \tau a_i} + \frac{p_{1f} f_{1e}}{p_{2f} \eta_{1e}} - \frac{f_{2e} (1 - \eta_t) \phi}{\eta_2 \eta_{1e}} ; \quad (5:3)$$

Om insättning av de värden som presenteras i bilaga 3 görs, fås förhållandet:

$$\frac{P_{el,med}}{P_{ff}} > 0.98/\tau + 1,41 \sim 2,5 ; \quad (5:4)$$

Om man sätter  $\tau$  till 0,85, vilket är ett rimligt värde enligt beräkningar i kapitel 4.4, ger detta med  $p_{ff} = 0,10$  enligt bilaga 3:

$$P_{el,med} > 0,2563 \quad [\text{kr/kWh}]$$

Medan dagens elmedelpris under året ligger på ungefär 0,19 kr/kWh. Detta innebär att elpriset måste stiga med 33% innan kostnadsfunktionen (ekv 3:8) skall kunna få ett minimum för någon gasturbin, förutsatt att de övriga anläggningskonstanterna är konstanta.

Något som inte har beaktats vid valet av den specifika investeringskostnaden för gasturbinen,  $J_1$ , är investeringsbidraget för elproduktion, vilket enligt vår vetskaper inte är försämbart.

## 6. Internräntemetoden

I föregående kapitel har vi använt oss av annuitetsmetoden som maximerar den årliga vinsten för anläggningen. Metoden räknar med absoluta värden och är den metoden som är att föredra då det gäller att avgöra om en investering skall genomföras eller ej. Där- emot om det finns olika investeringar att välja mellan, som alla ger positiva årliga intäkter, kan det vara intressant att undersöka vilket av dessa alternativ som ger den största avkastningen i förhållande till hur stor investering som krävs. Här kan man välja mellan att använda återbetalningsmetoden (pay-off) eller internräntemetoden. Båda metoderna räknar relativt hur stor investering som krävs. Vi väljer här att endast presentera en av dem, nämligen internräntemetoden. Denna metod går ut på att maximera avkastningen på det kapital som investeringen kräver. Internräntan kan räknas ut då man sätter vinsten till noll. Vi börjar med:

$$G_{aW} - C_{aP} = 0 ; \quad (6:1)$$

där  $G_{aW}$  är den årliga intäkten och  $C_{aP}$  är kapitalkostnaden för investeringen. Ur ekvation (2:7) bryter vi ut den årliga intäkten  $G_{aW}$  och kapitalkostnaden  $C_{aP}$ :

$$G_{aW} = (k_{13} - k_{11})x\tau - k_2 \int_{\tau}^1 x(s)ds - k_{31} \int_x^1 \tau(s)ds + G_{\text{värme}} ; \quad [\text{kr/år}] \quad (6:2)$$

$$C_{aP} = k_{12}x + k_{32}(1 - x) ; \quad [\text{kr/år}] \quad (6:3)$$

$G_{\text{värme}}$  är den årliga intäkten för fjärrvärmeproduktionen och skrivs som:

$$G_{\text{värme}} = k_4 \int_0^1 \tau(s)ds = k_4 u_a ; \quad [\text{kr/år}]$$

där  $k_4$  är en kostnadskonstant som beskriver hur stor den årliga intäkten för värmeförsäljningen. Den totala investeringen  $J_0$  för anläggningen kan skrivas som:

$$J_0 = \frac{1}{a_i}(k_{12}x + k_{32}(1 - x)) ; \quad [\text{kr/kW}] \quad (6:4a)$$

Eftersom investeringen är oberoende av annuitetsfaktorn är det olämpligt att beteckna  $J_0$  enligt ekvation (6:4a). I konstanterna  $k_{12}$  och  $k_{32}$  ingår en annuitetsfaktor. För att skriva om  $J_0$  utan annuitetsfaktor behöver vi motsvarande konstanter till  $k_{12}$  och  $k_{32}$  där

annuitetsfaktorn är utbruten. Därför använder vi oss av ekvation (3:2) och (3:7) och bryter ut annuitetsfaktorn och kallar dessa konstanter för  $k_{a,12}$  och  $k_{a,32}$ . Dessa blir:

$$k_{a,12} = \frac{J_1 f_{1p}}{(1 - \eta_{1t}) \phi_1} \eta_{1e} \quad [\text{kr/kW}] \quad (6:5)$$

$$k_{a,32} = J_{23} f_{23} \quad [\text{kr/kW}] \quad (6:6)$$

Ekvation (6:4a) får då utseendet:

$$J_o = (k_{a,12}x + k_{a,32}(1 - x)) \quad (6:4b)$$

Då vi skall optimera den relativa avkastningen med avseende på kapitalet får vi:

$$\delta[G_{aW} / J_o] / \delta J_o = 0 \quad (6:7)$$

Efter differentiering ger ekv (6:7):

$$\frac{\delta G_{aW}}{\delta J_o} - \frac{G_{aW}}{J_o} = 0 \quad (6:8)$$

där:

$$\frac{\delta G_{aW}}{\delta J_o} = \frac{\delta G_{aW}}{\delta x} \frac{\delta x}{\delta J_o} \quad (6:9)$$

Ekvation (6:8) och (6:9) ger:

$$\frac{\delta G_{aW}}{\delta x} \frac{\delta x}{\delta J_o} - \frac{G_{aW}}{J_o} = 0 \quad (6:10)$$

tillsammans med ekvation (6:2), (6:3) och (6:4) ger detta ekv (6:11) och för att lösa ut ett optimalt  $\tau$  deriverar vi  $G_{aW}$ , ekv (6:2), med avseende på  $\tau$  och erhåller ekvationssystemet:

$$\left\{ \begin{array}{l} (k_{11} - k_{13})\tau + k_{31}\tau(x) - \frac{k_{12} - k_{32}}{x(k_{12} - k_{32}) + k_{32}} A = 0 \end{array} \right. \quad (6:11)$$

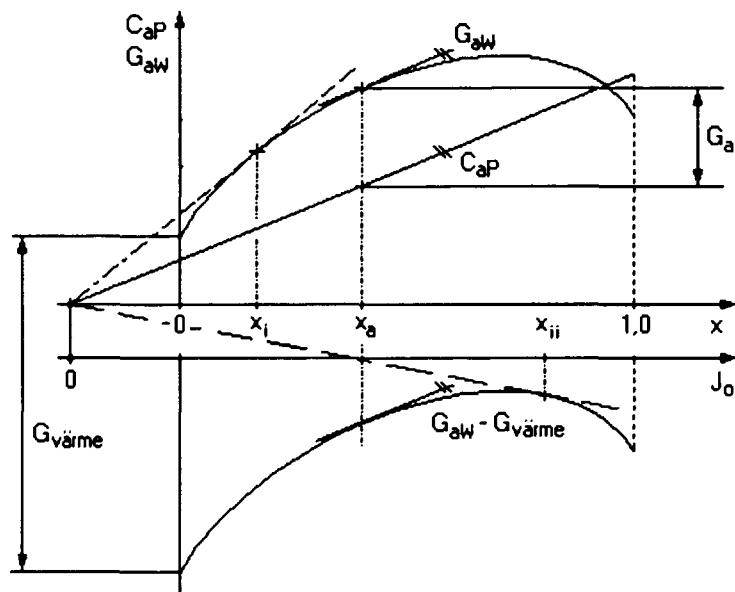
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta G_{aW}}{\delta \tau} = (k_{11} - k_{13})x - k_2x(\tau) = 0 \end{array} \right. \quad (6:12)$$



där:

$$A = \begin{pmatrix} (k_{11} - k_{13})x\tau + k_2 \int x(s)ds + k_{31} \int \tau(s)ds + k_4 \int \tau(s)ds \\ \tau \\ x \\ 0 \end{pmatrix};$$

Då detta ekvationssystem löses erhåller man det  $x$ - och  $\tau$ -värde som ger den största avkastningen på investeringskostnaden  $J_0$ . I figur 6.1 visas hur resultatet påverkas av vilken metod som används, internräntemetoden eller annuitetsmetoden.



Figur 6.1. Figuren beskriver internräntemetoden respektive annuitetsmetoden, där  $x_i$  är den effekt på gasturbinen som ger maximal avkastning på investeringen. Den effekt på gasturbinen som ger maximal årlig vinst beskrivs av  $x_a$ . Den undre kurvan illustrerar att annuitetsmetoden är okänslig för värmeintäkterna medan internräntemetoden kräver ett rimligt värde på  $G_{värme}$  för att ge ett relevant resultat, se  $x_{ii}$ .

I figur 6.1 framgår att fjärrvärmeintäkterna,  $G_{värme}$ , är av mycket stor betydelse då man räknar med internräntemetoden. Fjärrvärmeintäkterna bör väljas så att den årliga vinsten med annuitetsmetoden,  $G_a$  blir positiv. Om ett värde på  $G_{värme}$  väljs så att den årliga vinsten  $G_a$  blir positiv kommer alltid internräntemetoden ge ett lägre värde på gasturbinens effekt än vad annuitetsmetoden ger. Detta framgår i figur 6.1 och vi visar detta med samma exempel som presenteras i kapitel 2.

## 6.1. Räkneexempel med internräntemetoden och förenklad varaktighetskurva

Värden på konstanterna väljs till samma som i exempel 2.1.1.

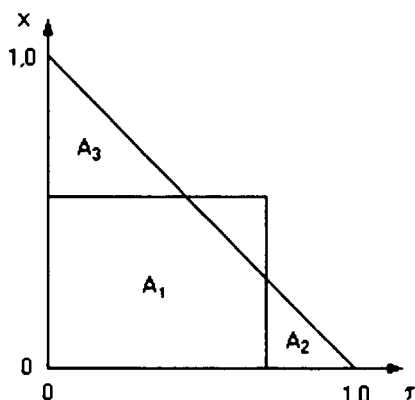
$$\begin{array}{lll} k_{11} = 1600 & k_{12} = 400 & k_{13} = 1200 \\ k_2 = 1000 & k_{31} = 900 & k_{32} = 100 \end{array}$$

Enheten på samtliga kostnadskonstanter är [kr/kWår].

Av ekvation (6:5) och (6:6) erhålls:

$$k_{a,12} = 2750 \quad k_{a,32} = 690$$

Ersättningsfunktionen är också hämtad från exempel 2.1.1, se figur 6.2.



Figur 6.2. Förenklad ersättningsfunktion  $x(\tau) = 1 - \tau$ .

Vi väljer  $k_4$  till  $1,1 \cdot k_2 = 1100$  [kr/kWår], då får vi en liten vinst för fjärrvärmeproduktionen utan gasturbin. Ekvation (6:11) och (6:12) ger:

$$x = 0,21 ; \quad \tau = 0,92 ;$$

Jämför annuitetsmetoden där samma exempel ger  $x = 0,27$  och  $\tau = 0,89$ .

Internräntan kan då räknas fram med hjälp av ekv (6:2) och (6:4):

$$a_i^n = G_{aw} / J_0 ;$$

där

$$J_0(x = 0,21) = 1120 ; \quad \text{och} \quad G_{aw}(x = 0,21 ; t = 0,92) = 187 ;$$

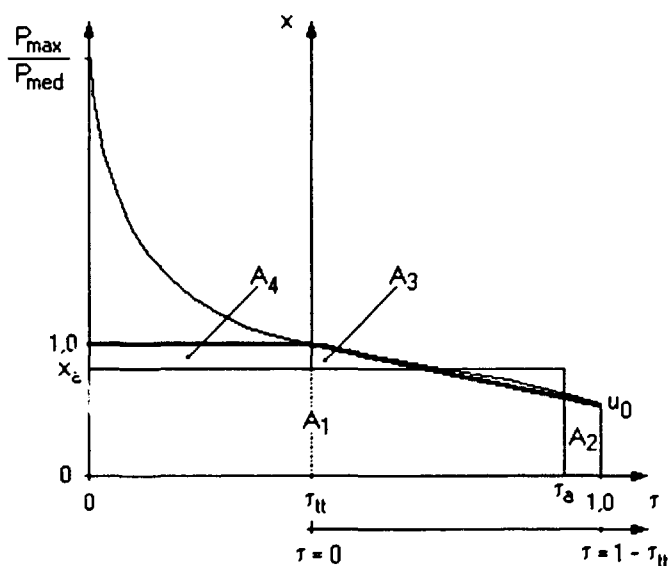
som ger:  $a_i^n = 0,167$

vidare blir:  $i(n = 25) = 16,3\%$

Internräntemetoden är en mycket känslig metod. Den ger stora utslag beroende på hur man väljer  $G_{\text{värme}}$  och den ger i allmänhet en alldeles för liten gasturbin i förhållande till fjärrvärmens maxeffekt. Detta medför att det blir svårare att göra en kalkyl som visar att en gasturbin är lönsam.

## 7. Kostnadsfunktion som är oberoende av maxeffekten

Varaktighetskurvans maxeffekt kan i vissa fall vara en osäker parameter att dimensionera gasturbinen efter. Därför har en alternativ kostnadsfunktion tagits fram som är oberoende av  $P_{\max}$ . Kostnadsfunktionen använder sig av ett konstant elpris under året och varaktighetskurvan approximeras med en rät linje. En uppdelning av varaktighetskurvan sker enligt nedanstående figur 7.1. Utgångspunkten är samma dimensionslösa varaktighetskurva som används i kapitel 2. Till skillnad från tidigare kapitel görs x-axeln dimensionslös med hjälp av medeleffekten,  $P_{\text{med}}$ . När linjen  $x = 1,0$  skär varaktighetskurvan sätts  $\tau$  till 0 (för den nedre axeln) samt att  $\tau_{tt}$  väljs till det värde som illustreras i figur 7.1.



Figur 7.1. Beskrivning av hur areorna och axlarna definieras för den alternativa kostnadsfunktionen.

Ersättningsfunktionen för varaktighetskurvan som används i beräkningarna ersätts med en rät linje som beskrivs av funktionen:

$$x(t) = 1 - \left( \frac{1 - u_0}{1 - \tau_{tt}} \right) \tau ; \quad (7:1)$$

$$\tau(x) = (1 - x) \left( \frac{1 - \tau_{tt}}{1 - u_0} \right) ; \quad (7:2)$$

Definitionen för  $u_0$  är här:

$$u_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\text{med}}}; \quad (7:3)$$

Kostnadskonstanterna är desamma som i kapitel 2, med undantag att  $p_{\text{el,max}} = p_{\text{el,min}} = p_{\text{el,med}}$  för kostnadskonstanten  $k_{13}$ . Kostnadsfunktionen får följande utseende:

$$\frac{f(\tau, x)}{P_{\text{med}}} = (k_{11} - k_{13})A_1 + k_{12}x + k_2A_2 + k_{31}(A_3 + A_4) + k_{32}(1 - x); \quad (7:4)$$

Areorna i ekvation (7:4) beskrivs enligt följande ekvationer:

$$A_1 = x(\tau + \tau_{\text{fl}})$$

$$A_2 = \int_{\tau}^{1-\tau_{\text{fl}}} x(s) ds$$

$$A_3 = \int_x^1 \tau(s) ds$$

$$A_4 = (1 - x)\tau_{\text{fl}}$$

Kostnadsfunktionen minimeras med avseende på  $x$  och  $\tau$ :

$$\begin{cases} \frac{\delta f}{\delta x} = (k_{11} - k_{13})(\tau + \tau_{\text{fl}}) + k_{12} - k_{31}\tau(x) - k_{31}\tau_{\text{fl}} - k_{32} = 0; & (7:5) \\ \frac{\delta f}{\delta \tau} = (k_{11} - k_{13})x - k_2x(\tau) = 0; & (7:6) \end{cases}$$

Ur ekvationssystemet erhålles:

$$\tau = \frac{k_{32} - k_{12} - \tau_{\text{fl}}(k_{11} - k_{13}) + k_{31} \left[ \left( \frac{1 - \tau_{\text{fl}}}{1 - u_0} \right) \left( 1 - \frac{k_2}{k_{11} - k_{13}} \right) + \tau_{\text{fl}} \right]}{k_{11} - k_{13} - \frac{k_{31}k_2}{k_{11} - k_{13}}}; \quad (7:7)$$

$$x = \frac{k_2}{k_{11} - k_{13}} \left[ 1 - \left( \frac{1 - u_0}{1 - \tau_{\text{fl}}} \right) \tau \right]; \quad (7:8)$$

Den årliga drifttiden  $t$  och gasturbinen eleffekt  $P_{g,el}$  räknas ut enligt följande:

$$t = 8760(\tau + \tau_{tt})$$

$$P_{g,el} = \frac{x P_{med}}{(1 - \eta_{1t}) \phi_t} \eta_{1e} :$$

Gasturbinens utläggning blir i stor sätt samma som vid beräkning med kostnadsfunktionen (2:7). Däremot beskriver den alternativa kostnadsfunktionen inte den årliga kostnaden för hela anläggningen utan endast för den del som täcker värmebehovet under effekten  $P_{med}$ . Detta för att funktionen inte tar hänsyn till arean ovanför  $P_{med}$ .

## 8. Kommentarer

Med dagens priser på gasturbiner och med det förhållande mellan el- och bränslepris som råder, krävs det i övrigt mycket goda förutsättningar för att en gasturbin skall vara att tänka på. Med goda förutsättningar menas t ex att fjärrvärmenätet är stort och välutnyttjat och att man finner egen avsättning för den el som genereras samt att det föreligger goda förutsättningar för att hålla investeringskostnaden låg. För att en gasturbin lättare skall bli lönsam krävs bättre tekniska förutsättningar för gasturbinen samt högre el-/bränslepris förhållande.

En del kommuner har förväntat sig att el-/bränslepris förhållandet kommer att stiga i framtiden. Detta tillsammans med investeringsbidrag har medfört att gasturbiner redan har införskaffats eller planerats på en del ställen i landet.

Den metod som är framtagen här är avsedd för att på ett smidigt sätt avgöra om de rätta förutsättningarna för en gasturbin existerar. Dessutom har det varit meningen att metoden skall ge förståelse för vilka faktorer som har störst inverkan på förutsättningarna som krävs för att en gasturbin skall betraktas som lönsam. De osäkerheter som finns i beräkningarna beror inte på kostnadsfunktionen utan till största delen på hur exakt anläggningskonstanterna kan uppskattas. Svårigheten att bestämma den framtida prisutvecklingen på främst el och bränsle medför också stora osäkerheter för lönsamheten.

En intressant vidareutveckling på metoden vore att anpassa kostnadsfunktionen till att även gälla för en gasturbin med mellankylning. I ett kraftvärmeverk finner man en avsättning för värmen som kyls bort i mellankylningen. För detta krävs en mindre modifiering av kostnadsfunktionen.

Då de varma avgaserna från gasturbinen inte till fullo utnyttjas kan det vara fördelaktigt att köra gasturbinen på dellast. Därför vore det intressant att undersöka hur detta påverkar ekonomin för driften av anläggningen.

Vidareutveckling av kostnadsfunktionen för att gälla gasturbin med värmeackumulatorer kan vara intressant, p g a som nämnts ovan, att en del av gasturbinens värme inte kan tillvaratas. Utgångskriteriet har dock varit att gasturbinen i sig bör uppvisa lönsamhet innan det är intressant att undersöka huruvida en ackumulator påverkar lönsamheten.

Eftersom värmeproduktionen i en gasturbinanläggning baseras på värmeåtervinningen ur relativt heta avgaser, så medför inte en sänkning av fjärrvärmemetemperaturen en nämnvärd förbättring.

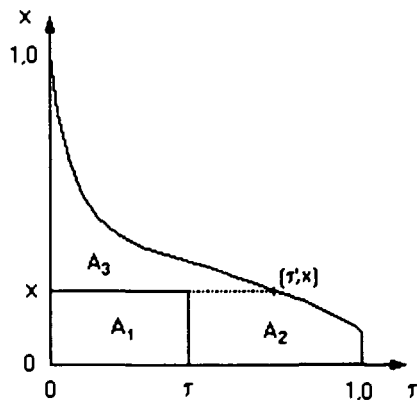
## **9. Referenser**

1. Värmeforsk 293  
Studie över möjligheter till ökad elproduktion i industrier och kraftvärmeverk med utnyttjande av befintliga pannor  
Mars 1988
2. Kraftvärme  
En teknisk och ekonomisk utredning om optimal el- och värmeproduktion i liten och medelstor skala  
Ett samarbetsprojekt mellan Vattenfall, Tekniska Verken Eskilstuna, ABB Stal och Götaverken/Generator, 1989/33
3. Nordisk Gasteknisk Center  
Energiproduktionskostnader med naturgas  
Februari 1991
4. 1990 Gas Turbine World Handbook  
Volume 12  
sid 1-16
5. 1991 Års effekttariff  
Sydkraft
6. Personligt samtal med civ. ing Per-Axel Nilsson  
Sydkraft Konsult



## Bilaga 1. Komplement till kostnadsfunktionen

Här beskrivs varför kostnadsfunktionen inte behöver undersökas då punkten  $(\tau, x)$  ligger innanför den area vilken varaktighetskurvan innesluter.



Figur B.1. Visar värdet från gasturbinen då punkten  $(\tau, x)$  ligger innanför varaktighetskurvan.

Om punkten  $(\tau, x)$  ligger innanför den area som varaktighetskurvan innesluter, som i figuren ovan, får kostnadsfunktionen följande utseende:

$$\begin{aligned} \frac{f(\tau, x)}{P_{\max}} &= (k_{11} - k_{13})A_1 + k_{12}x + k_2A_2 + k_{31}A_3 + k_{32}(1 - x) = \\ &= (k_{11} - k_{13} - k_{31})A_1 + (k_2 - k_{31})A_2 + k_{32}(1 - x) + k_{31}A \end{aligned}$$

där:  $A = A_1 + A_2 + A_3$      $A_1 = x\tau$      $A_2 = \int_{\tau}^1 x(s)ds$

d v s:

$$\frac{f(\tau, x)}{P_{\max}} = (k_{11} - k_{13} - k_{31})x\tau + (k_2 - k_{31}) \int_{\tau}^1 x(s)ds + k_{31}A + k_{12}x + k_{32}(1 - x)$$

Under förutsättning att (vilket bör vara fallet med rimliga värden):

$$(k_{11} - k_{13} - k_{31}) < 0 ; \quad (k_2 - k_{31}) \geq 0 ;$$

så avtar värdet för kostnadsfunktionen då  $\tau$  växer till  $\tau'$  (se figur A.1) vilket medför att minimum erhålles då punkten  $(\tau, x)$  ligger på ersättningskurvan.

## Bilaga 2. Newton-Raphsons metod

### B.2.1. Beskrivning för hur ekvationssystemet (2:29) och (2:30) löses med Newton-Raphsons metod

Ekvationssystemet lyder:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta f}{\delta x} = k_{11}\tau - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau/2\right)\tau + k_{12} - k_{31}\tau_t \left(\frac{1-x}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} - k_{32} = 0 ; \end{array} \right. \quad (2:29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta f}{\delta \tau} = k_{11}x - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right)x - k_2 \left[1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_t}\right)^\lambda\right] = 0 ; \end{array} \right. \quad (2:30)$$

För Newton-Raphsons metod behöver vi:

$$\frac{\delta^2 f}{\delta x \delta \tau} = k_{11} - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right) - k_{31}\tau_t \frac{d}{d\tau} \left(\frac{1-x}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} ; \quad (B:1)$$

om x löses ut ur ekv (2:30) får vi:

$$x = \frac{k_2 \left[1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_t}\right)^\lambda\right]}{k_{11} - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right)} ; \quad (B:2)$$

För att lättare derivera x med avseende på  $\tau$  skriver vi om ekvation (B:2):

$$\ln x = \ln k_2 + \ln \left[1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_t}\right)^\lambda\right] - \ln \left[k_{11} - k_{13}\left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right)\right] \quad (B:3)$$

Då vi deriverar ekv (B:3) erhålls följande uttryck:

$$\left(\frac{dx}{d\tau}\right)/x = - \left[ \frac{\lambda(1-u_0) \frac{\tau^{\lambda-1}}{\tau_1^\lambda}}{1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_1}\right)^\lambda} \right] - \left[ \frac{k_{13} \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)}{k_{11} - k_{13} \left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau\right)} \right]; \quad (B:4)$$

slutligen behöver vi:

$$\frac{d}{d\tau} \left( \frac{1-x}{1-u_0} \right)^{1/\lambda} = \frac{1}{(1-u_0)^{1/\lambda}} \frac{1}{\lambda} (1-x)^{1/\lambda-1} \left( -\frac{dx}{d\tau} \right); \quad (B:5)$$

Newton-Raphsons metod lyder:

$$\tau_{k+1} = \tau_k - \frac{\delta f(\tau_k)}{\delta x} / \frac{\delta^2 f(\tau_k)}{\delta x \delta \tau};$$

$$\tau_k = \tau_{k+1};$$

där:

$$\frac{\delta f(\tau_k)}{\delta x} = k_{11}\tau_k - k_{13} \left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau_k/2\right)\tau + k_{12} - k_{31}\tau_k \left(\frac{1-x}{1-u_0}\right)^{1/\lambda} - k_{32} = 0;$$

ges av ekv (2:29) och:

$$\frac{\delta^2 f(\tau_k)}{\delta x \delta \tau} = k_{11} - k_{13} \left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau_k\right) - \frac{k_{31}\tau_k}{(1-u_0)^{1/\lambda}} \frac{1}{\lambda} (1-x)^{1/\lambda-1} A;$$

där:

$$A = x \left[ \left( \frac{\lambda(1-u_0) \frac{\tau_k^{\lambda-1}}{\tau_1^\lambda}}{1 - (1-u_0) \left(\frac{\tau_k}{\tau_1}\right)^\lambda} \right) + \left( \frac{k_{13} \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)}{k_{11} - k_{13} \left(1 - \left(1 - \frac{P_{el,min}}{P_{el,max}}\right)\tau_k\right)} \right) \right];$$

Välj ett startvärde på  $\tau_k$  som ligger runt 0,8. Detta ger ett  $\tau_{k+1}$  som sedan tilldelas  $\tau_k$ . Upprepa detta tills värdet  $\tau_{k+1}$  överensstämmer med  $\tau_k$  med önskad noggrannhet.

### B.2.2. Beskrivning för hur ekvationen (2:30) löses med Newton-Raphsons metod

Ekvationen lyder:

$$\frac{\delta f}{\delta \tau} = k_{11}x - k_{13}\left(1 - \left(1 \cdot \frac{p_{el,min}}{p_{el,max}}\right)\tau\right)x - k_2 \left[1 - (1 - u_0) \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^\lambda\right] = 0 ; \quad (2:30)$$

Då ekvation (2:30) deriveras med avseende på  $\tau$  erhåller vi:

$$\frac{\delta^2 f}{\delta^2 \tau} = k_{13}\left(1 - \frac{p_{el,min}}{p_{el,max}}\right)x + k_2 \lambda (1 - u_0) \frac{\tau^{\lambda-1}}{\tau_0^\lambda} = 0 ;$$

Newton-Raphsons metod:

$$\tau_{k+1} = \tau_k - \frac{\delta f(\tau_k)}{\delta \tau} / \frac{\delta^2 f(\tau_k)}{\delta^2 \tau} ;$$

$$\tau_k = \tau_{k+1} ;$$

Välj ett startvärde på  $\tau_k$  som ligger runt 0,8. Detta ger ett  $\tau_{k+1}$  som sedan tilldelas  $\tau_k$ . Upprepa detta tills värdet  $\tau_{k+1}$  överensstämmer med  $\tau_k$  med önskad noggrannhet.

### Bilaga 3. Referensvärden

Här presenteras värden på anläggningskonstanterna som har använts som utgångsdata för beräkning av känslighetsanalysen. De valda värdena har tagits fram genom litteraturstudier [1,2,3,5] och personsamtal [6], och skall beskriva ett så allmänt fall som möjligt med de gjorda förutsättningarna.

Varaktighetskurva: Värnamo (se bilaga 5)

$P_{max}$ (varaktighetskurvans max effekt)	= 22	[MW]
$U_a$ (varaktighetskurvans dimensionslösa area)	= 0,3950	
$U_o$ (dimensionslösa min effekt)	= 0,12	
$\tau_1$	= 1,0	
$\lambda$	= 0,4545	
$t_a$ (varaktighetskurvans årliga drifttid)	= 8760	[h/år]

Gasturbin med tillhörande avgaspanna:

$J_1$ (specifik investeringskostnad)	= 5000	[kr/kW]
$\eta_{11}$ (gasturbinens termiska verkningsgrad)	= 0,30	
$\eta_{1e}$ (gasturbinens nettoelverkningsgrad)	= 0,28	
$\phi_1$ (avgaspannans värmeåtervinningsfaktor)	= 0,78	
$i$ (kalkylränta för hetvattenpannan)	= 14	[%]
$n$ (avskrivningsår)	= 25	[år]

Hetvattenpanna:

$J_{2e}$ (specifik investeringskostnad)	= 600	[kr/kW]
$\eta_2$ (pannans verkningsgrad för $A_2$ )	= 0,90	
$\eta_3$ (pannans verkningsgrad för $A_3$ )	= 0,90	
$i$ (kalkylränta för hetvattenpannan)	= 14	[%]
$n$ (avskrivningsår)	= 25	[år]

Bränslepriser:

$p_{11}$ (gas)	= 0,10	[kr/kWh]
$p_{21}$ (gas)	= 0,10	[kr/kWh]
$p_{31}$ (olja)	= 0,09	[kr/kWh]

Energikostnadskoefficienter:

$f_{1e}$	= 1,02
$f_{2e}$	= 1,03
$f_{3e}$	= 1,04

## Effektkostnadskoefficienter:

$$f_{1p} = 1,18$$

$$f_{23p} = 1,20$$

## Elpriser:

$$p_{el,max} = 0,38$$

$$p_{el,min} = 0,19$$

[kr/kWh]

[kr7kWh]

## **Bilaga 4. Investeringskostnader**

Här presenteras en lista över de saker vilka bör medtas vid bestämningen av de specifika investeringskostnaderna för gasturbin med avgaspanna och hetvattenpanna. En uppdelning har skett i direkta kostnader och övriga kostnader [3]:

Direkta kostnader:

- Gasturbinanläggning
- Pannanläggning
- Bränslehantering
- Vattenbehandling
- Rökgasrening
- Elektrifiering
- Instrumentering och automatisering
- Rörledning
- VVS-utrustning
- Hjälpustning
- Byggnader

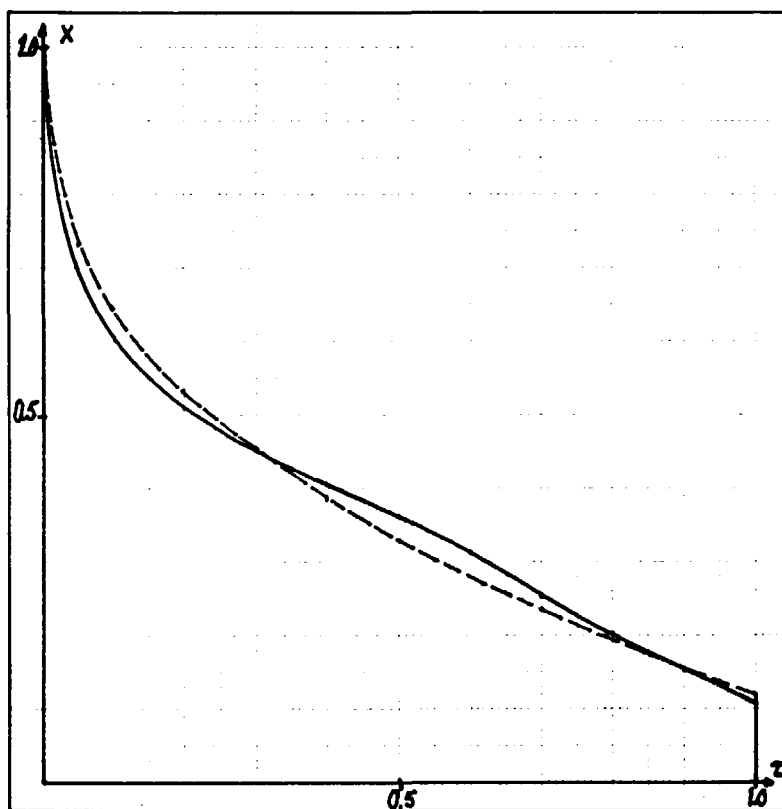
Övriga kostnader:

- Indirekta kostnader
- Ränta under byggnadstiden
- Tilläggsinvestering
- Tullar, skatter, avgifter
- Investeringsbidrag
- Oförutsett

De kostnader vilka är uppräknade under direkta och övriga kostnader är de poster som bör beaktas vid bestämning av de specifika investeringskostnaderna J<sub>1</sub> och J<sub>23</sub>.

## Bilaga 5. Varaktighetskurvor för fyra fjärrvärmenät

### Värnamos varaktighetskurva



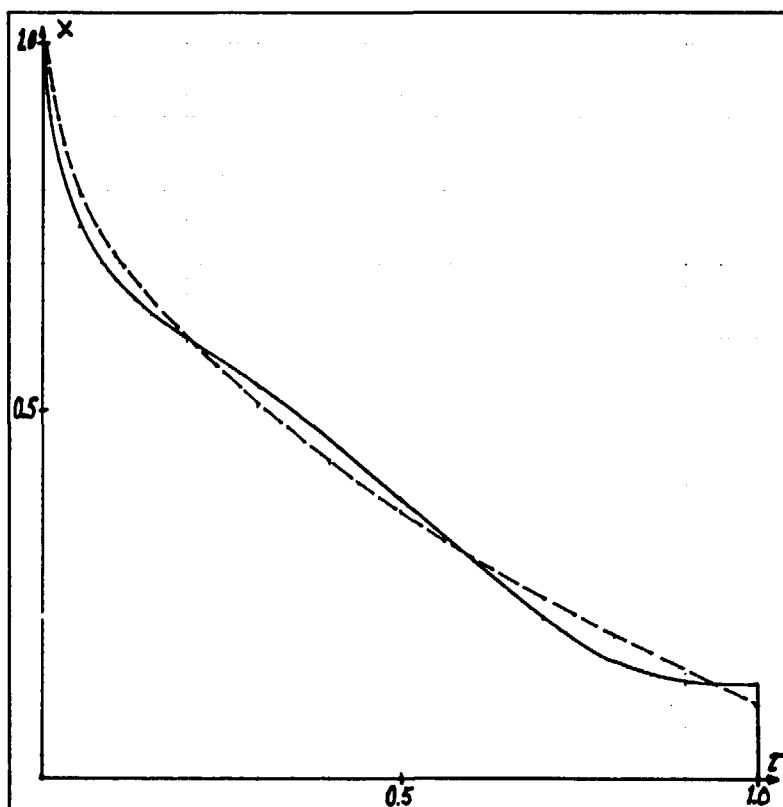
Visar Värnamos varaktighetskurva i dimensionslös form samt den valda ersättningskurvan som använts i beräkningarna. Den streckade kurvan visar ersättningsfunktionens utseende.

Ersättningskurvans värden:

$P_{max}$	= 22	[MW]
$t_a$	= 8760	[h/år]
$\mu_a$	= 0,3950	
$\mu_o$	= 0,12	
$\tau_i$	= 1,0	
$\lambda$	= 0,4545	



### Lunds varaktighetskurva

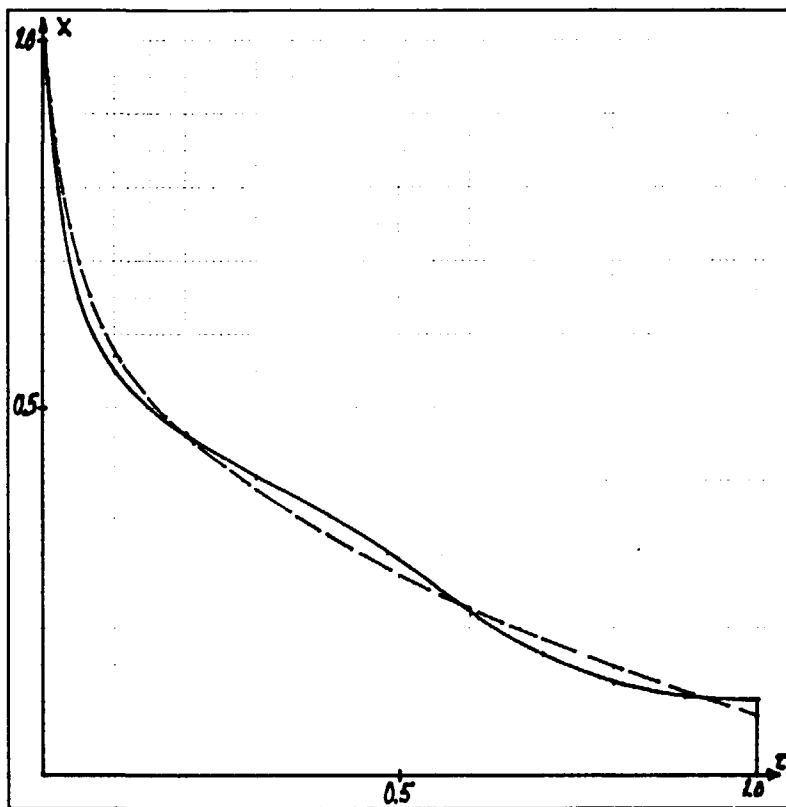


Visar Lunds varaktighetskurva i dimensionslös form samt den valda ersättningskurvan som använts i beräkningarna. Den streckade kurvan visar ersättningsfunktionens utseende.

Ersättningskurvans värden:

$P_{max}$	= 220	[MW]
$t_a$	= 8760	[h/år]
$u_a$	= 0,3990	
$u_o$	= 0,10	
$\tau_i$	= 1,0	
$\lambda$	= 0,4980	

### Oskarshamns varaktighetskurva

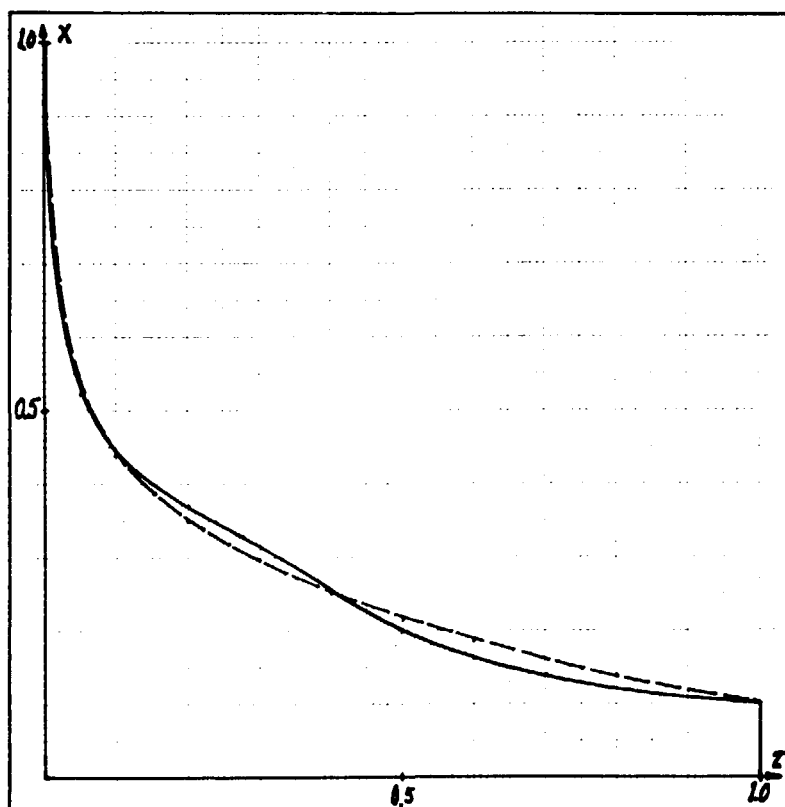


Visar Oskarshamns varaktighetskurva i dimensionslös form samt den valda ersättningskurvan som använts i beräkningarna. Den streckade kurvan visar ersättningsfunktionens utseende.

Ersättningskurvans värden:

$P_{\max}$	= 21	[MW]
$t_a$	= 8760	[h/år]
$u_a$	= 0,3125	
$u_o$	= 0,11	
$\tau_i$	= 0,9	
$\lambda$	= 0,3383	

### Älmhults varaktighetskurva



Visar Älmhults varaktighetskurva i dimensionslös form samt den valda ersättningskurvan som använts i beräkningarna. Den streckade kurvan visar ersättningsfunktionens utseende.

Ersättningskurvans värden:

$P_{\max}$	= 28	[MW]
$t_a$	= 8760	[h/år]
$U_a$	= 0,2508	
$U_o$	= 0,10	
$\tau_i$	= 1,0	
$\lambda$	= 0,2013	

**Bilaga 6. Nomenklatur**

$a_i^n$	- annuitetsfaktor	
$C$	- variationskonstant	
$C_{ap}$	- kapitalkostnad för investering	[kr/år]
$f_{1e}$	- energikostnadskoefficient för gasturbin med avgaspanna	
$f_{2e}$	- energikostnadskoefficient för hetvattenpanna area $A_2$	
$f_{3e}$	- energikostnadskoefficient för hetvattenpanna area $A_3$	
$f_{1p}$	- effektkostnadskoefficient för gasturbin med avgaspanna	
$f_{23}$	- effektkostnadskoefficient för hetvattenpanna	
$f(\tau, x)$	- kostnadsfunktion	[kr/kWår]
$G_{aw}$	- årlig intäkt	[kr/år]
$G_{värme}$	- årlig intäkt för värmeproduktionen	[kr/år]
$i$	- kalkylränta	
$J_0$	- totala investeringen	[kr/kW]
$J_1$	- investeringskostnad för gasturbinen	[kr/kW <sub>el</sub> ]
$J_{23}$	- investeringskostnad för hetvattenpanna	[kr/kW <sub>värme</sub> ]
$k$	- kostnadskonstant	[kr/kWår]
$k_{11}$	- rörliga kostnader för gasturbin med avgaspanna	[kr/kWår]
$k_{12}$	- årlig fast kostnad för gasturbin med avgaspanna	[kr/kWår]
$k_{13}$	- intäkter från elproduktionen	[kr/kWår]
$k_2$	- rörliga kostnader för area $A_2$	[kr/kWår]
$k_{31}$	- rörliga kostnader för area $A_3$	[kr/kWår]
$k_{32}$	- årlig fast kostnad för hetvattenpanna	[kr/kWår]
$k_4$	- årlig intäkt för värmeförsäljningen	[kr/år]
$k_{a,12}$	- $k_{12}$ med utbruten annuitetsfaktor	[kr/kW]
$k_{a,32}$	- $k_{32}$ med utbruten annuitetsfaktor	[kr/kW]
$n$	- avskrivningstid	[år]
$P$	- variabel för värmeeffekt	[kW]
$P_{el,max}$	- elpris under topplast	[kr/kWh]
$P_{el,medel}$	- elmedelpris under året	[kr/kWh]
$P_{el,min}$	- elpris under låglast	[kr/kWh]
$P_{g,el}$	- gasturbinens nettoeffekt	[kW]
$P_{g,bränsle}$	- gasturbinens bränsleeffekt	[kW]
$P_{g,värme}$	- gasturbinens värmeeffekt	[kW]
$P_{max}$	- varaktighetskurvans maxeffekt	[kW]
$P_{med}$	- varaktighetskurvans medeffekt	[kW]
$P_p$	- värmeeffekt för hetvattenpanna	[kW]
$P_{1f}$	- bränslepris för gasturbin	[kr/kWh]
$P_{2f}$	- bränslepris för $A_2$	[kr/kWh]
$P_{3f}$	- bränslepris för $A_3$	[kr/kWh]

$t$	- variabel för tiden	[h]
$t_a$	- årlig drifttid	[h/år]
$\tau_1$	- dimensionslös tid för brytpunkt	
$u_a$	- belastningsfaktor	
$u_o$	- dimensionslös mineffekt	
$x$	- dimensionslös effekt	
$\phi_1$	- värmeåtervinningsfaktor för avgaspannan	
$\eta_{1t}$	- gasturbinens termiska verkningsgrad	
$\eta_{1e}$	- gasturbinens nettoelverkningsgrad	
$\eta_2$	- pannverkningsgrad för $A_2$	
$\eta_3$	- pannverkningsgrad för $A_3$	
$\lambda$	- exponent för ersättningsfunktion	
$\tau$	- variabel för den dimensionslösa tiden	