

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

DIPLOMITYÖ

**VERKKOLIIKETOIMINNAN TEHOKKUUSMITTAUKSEN
OHJAUSVAIKUTUSTEN ANALYSOINTIJÄRJESTELMÄ**

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun Sähkötekniikan osastoneuvoston kokouksessa 23.10.2002.

Diplomityön tarkastajat ovat professori Jarmo Partanen ja assistentti Jukka Lassila.
Diplomityön ohjaaja on professori Jarmo Partanen.

Lappeenrannassa 5.11.2002

Samuli Honkapuro
Ruotsalaisenraitti 3 A 10
53850 Lappeenranta
puh. 0400 – 841 387

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Samuli Honkapuro	
Työn nimi: Verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksen ohjausvaikutusten analysointijärjestelmä	
Osasto: Sähkötekniikka	
Vuosi: 2002	Paikka: Lappeenranta
Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 83 sivua, 33 kuvaa ja 1 taulukko. Tarkastaja: professori Jarmo Partanen 2. tarkastaja: assistentti Jukka Lassila	
Hakusanat: verkkoliiketoiminta, sähköjakelu, Data Envelopment Analysis	
Keywords: Electricity distribution business, Data Envelopment Analysis	
<p>Tässä diplomityössä oli tavoitteena suunnitella ja toteuttaa verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksen ohjausvaikutusten analysointijärjestelmä.</p> <p>Verkkoliiketoiminta on monopoliasemassa olevaa liiketoimintaa, jossa ei ole kilpailusta johtuvaa pakotetta pitää liiketoimintaa tehokkaana ja hintoja alhaisina. Tämän vuoksi verkkoliiketoiminnan hinnoittelua ja toiminnan tehokkuutta tulee valvoa viranomaisen toimesta. Tehokkuusmittauksessa käytettäväksi menetelmäksi on valittu DEA-menetelmä (Data Envelopment Analysis).</p> <p>Tässä työssä on esitelty DEA-menetelmän teoreettiset perusteet sekä verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksessa havaitut ongelmat. Näiden perusteella on määritelty analysointijärjestelmältä vaadittavat ominaisuudet sekä kehitetty kyseinen järjestelmä.</p> <p>Tärkeimmiksi järjestelmän ominaisuuksiksi osoittautuivat herkkyysanalyysin tekeminen ja etenkin sitä kautta suoritettava keskeytysten hinnan laskeminen sekä mahdollisuudet painokertoimien rajoittamiselle.</p> <p>Työn loppuosassa on esitelty järjestelmästä saatavia konkreettisia tuloksia, joiden avulla on pyritty havainnollistamaan järjestelmän käyttömahdollisuuksia.</p>	

ABSTRACT

Author: Samuli Honkapuro

Name of the Thesis: Computing system for analysing the effects of the benchmarking of the electricity distribution companies

Department: Electrical Engineering

Year: 2002

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology.

83 pages, 33 pictures and 1 table.

Supervisor professor Jarmo Partanen.

2nd supervisor assistant Jukka Lassila

Keywords: Electricity distribution business, Data Envelopment Analysis

The aim of this work is to develop a computing system for analysing the effects of the benchmarking of the electricity distribution companies.

Electricity distribution business operates as a so-called natural monopoly and there is no pressure from the markets to keep prices and costs at reasonable level. Therefore the operational efficiencies of the distribution companies and pricing of the network services are supervised by an authority. The benchmarking method is DEA (Data Envelopment Analysis).

The theoretical methods of DEA and the problems discovered in the efficiency benchmarking of the distribution companies are presented. The features of the analysing system designed to solve discovered problems are defined based on the theoretical methods of DEA.

Major features of system turned out to be sensitivity analysis, determining the outage costs and weight restrictions. Results from calculations performed are presented to illustrate the usability of analysing system.

Alkusanat

Tämä diplomityö on osa Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa (LTKK) tehtävää tutkimushanketta ”Verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksen kehittäminen ja tehokkuusmittauksen vaikutukset jakeluverkon kehittämiseen”. Tutkimushankkeen rahoittajina toimivat Sähköenergialiitto Sener, Energia-alan keskusjärjestö Finergy ja Sähkövoimatekniikan kehityspooli.

Haluan lausua suuret kiitokset työni tarkastajille Jarmo Partaselle ja Jukka Lassilalle. Heiltä sain paljon arvokkaita neuvoja sekä opastusta tätä diplomityötä tehdessäni.

Kiitän myös vanhempiani koko opiskelutaipaleeni aikana saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Lappeenrannassa 5.11.2002

Samuli Honkapuro

Sisällysluettelo

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	3
1 JOHDANTO	5
2 VERKKOLIIKETOIMINNAN VALVONTA	7
2.1 SALLITUN TUOTON MÄÄRITTÄMINEN	7
2.1.1 <i>Sitoutuneen pääoman määrä</i>	8
2.1.2 <i>Sitoutuneen pääoman tuotto</i>	9
2.2 TEHOKKUUSMITTAUS	11
3 DEA-MENETELMÄ	14
3.1 MENETELMÄ GRAAFISESTI	15
3.1.1 <i>CCR-malli</i>	16
3.1.2 <i>BCC-malli</i>	17
3.2 DEA-MENETELMÄ MATEMAATTISESTI	19
3.3 YMPÄRISTÖTEKIJÄT	26
3.4 SUPERTEHOKKUUS	26
3.5 PAINOKERTOIMIEN RAJOITUKSET	27
3.5.1 <i>Painokertoimien absoluuttinen rajoittaminen</i>	29
3.5.2 <i>Painokertoimien suhteelliset rajoitukset</i>	30
3.5.3 <i>Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen</i>	31
3.6 HERKKYYSANALYYSI	31
3.7 LASKENTAMENETELMIÄ	33
3.7.1 <i>Simplex-menetelmä</i>	36
4 ONGELMAKOHTIA TEHOKKUUSMITTAUKSESSA	39
4.1 MERKITYKSETTÖMÄT TEKIJÄT	39
4.2 KESKEYTYSAIKA	41
4.2.1 <i>Keskeytysten hinta</i>	44
4.3 TEHOKKAAT JA SUPERTEHOKKAAT YHTIÖT	46
4.4 MAHDOLLISIA RATKAISUKEINOJA ONGELMIIN	47

5	ANALYSOINTIJÄRJESTELMÄ	48
5.1	JÄRJESTELMÄLTÄ VAADITTAVAT OMINAISUUDET	48
5.2	KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS	49
5.2.1	<i>Lindo Api</i>	49
5.2.2	<i>Tietojen luku ja tulosten tallennus</i>	50
5.2.3	<i>Laskennan eteneminen</i>	51
5.2.4	<i>Herkkyyshanalyysi</i>	55
5.2.5	<i>Painokertoimien rajoitukset</i>	56
5.2.6	<i>Tehokkuuskäyrät</i>	59
5.2.7	<i>Tehokkaan toimintapisteen etsiminen</i>	60
5.3	JÄRJESTELMÄN TESTAUS	62
6	JÄRJESTELMÄSTÄ SAATAVAT TULOKSET JA NIIDEN MERKITYS	64
6.1	TEHOKKUUSLASKENNASTA SAATAVIEN TULOSTEN MERKITYS	64
6.1.1	<i>Tehokkuusluku</i>	64
6.1.2	<i>Painokertoimet ja virtuaaliset tuotokset</i>	65
6.1.3	<i>Vertailuyhtiöt</i>	65
6.2	HERKKYYSANALYYSIN TULOSTEN MERKITYS.....	66
6.2.1	<i>Keskeytysten hinta</i>	67
6.3	PAINOKERTOIMIEN RAJOITTAMISEN VAIKUTUKSET TULOSSIIN.....	67
6.3.1	<i>Painokertoimien suhteellinen rajoittaminen</i>	68
6.3.2	<i>Painokertoimien absoluuttinen rajoittaminen</i>	74
6.3.3	<i>Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen</i>	77
7	YHTEENVETO	81
	LÄHDELUETTELO	82

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

C	pääoman kustannus
c	vapaa muuttuja
CRS	Constant Returns to Scale, vakioskaalatuotot
D	korollisen vieraan pääoman määrä
DAO	Data Access Objects
DEA	Data Envelopment Analysis
DLL	Dynamic Link Library, dynaaminen linkkikirjasto
E	oman pääoman määrä
<i>h</i>	tehokkuusluku
H	hintaa
JHA	jälleenhankinta-arvo
K	yksiköiden lukumäärä
KK	kohtuullinen kustannustaso
LP	Linear Programming, lineaarinen optimointi
m	panosten lukumäärä
n	tuotosten lukumäärä
NDRS	Non-Decreasing Returns to Scale, ei-laskevat skaalatuotot
NIRS	Non-Increasing Returns to Scale, ei-nousevat skaalatuotot
NKA	nykykäyttöarvo
OpK	yrityksen kontrolloitavissa olevat operatiiviset kustannukset
R	tuotto
s	slack- eli pelivaramuuttuja
t	veroaste
<i>u</i>	tuotoksen painokerroin
<i>v</i>	panoksen painokerroin
VRS	Variable Returns to Scale, muuttuvat skaalatuotot

WACC	Weighted Average Cost of Capital, pääoman painotettu keskikustannus
x	panos
y	tuotos

Kreikkalaiset

β	Beeta-kerroin
ε	pieni positiivinen vakio
θ	tehokkuuteen tarvittava suhteellinen vähennys panoksista
λ	osallistumiskerroin

Alaindeksit

0	tarkasteltavana oleva yksikkö
D	vieras pääoma
E	oma pääoma
f	kontrolloimaton
kesk	keskeytysaika
m	markkinat
opo	oma pääoma
r	riskitön

1 Johdanto

Vuonna 1995 voimaan tullut sähkömarkkinalaki (386/1995) muutti suomalaisen sähköjakelusektorin täysin. Laki takasi kuluttajille oikeuden valita sähköntoimittajan vapaasti, sähkömyynnistä tuli siis kilpailtua liiketoimintaa. Sähköjakelu puolestaan pysyi monopolitoimintana.

Sähkömarkkinalain 1 § 1 momentin mukaan lain tavoitteena on varmistaa edellytykset tehokkaasti toimiville sähkömarkkinoille. Tavoitteen saavuttamisen ensisijaisina keinoina ovat terveen ja toimivan taloudellisen kilpailun turvaaminen sähköön tuotannossa ja myynnissä sekä kohtuullisten ja tasapuolisten palveluperiaatteiden ylläpito sähköverkkojen toiminnassa. Saman lain 4 § 1 momentin mukaan sähköverkkotoimintaa saa harjoittaa vain sähkömarkkinaviranomaisen antamalla luvalla ja 6 § 1 momentin mukaan jakeluverkonhaltijalle annettavassa sähköverkkoluvassa määritetään luvanhaltijalle maantieteellinen vastuualue jakeluverkon osalta. Sähkömarkkinalain 17 § 1 momentin mukaan jakeluverkonhaltijalla on yksinoikeus rakentaa jakeluverkkoa vastuualueellaan. Näin ollen sähköverkkoliiketoiminta on luonteeltaan lakiin perustuvaa monopolitoimintaa. Toisaalta sähköjakeluverkot ovat myös ns. luonnollisia monopoleja, koska rinnakkaisten jakeluverkkojen rakentaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. /1/

Sähkömarkkinalain 14 § 2 momentissa sanotaan, että verkkopalvelujen hinnoittelun on oltava kohtuullista. Sähkömarkkinalakia koskevan hallituksen esityksen (138/1994 vp.) mukaan hinnoittelun tulisi vastata toiminnan kustannuksia. Monopoli-asemassa olevalla sähköverkonhaltijalla ei kuitenkaan ole kilpailusta johtuvaa kannustinta pitää hintojaan alhaisina ja toimintaansa tehokkaana. Tällöin mahdollinen toiminnan tehotomuus voidaan kompensoida korkeammilla hinnoilla. Kilpailunrajoituslakia sovellettaessa otetaan huomioon monopolihinnoittelun arvioinnissa, mikä on

yrityksen kustannustaso verrattuna kustannuksiin, joihin yrityksellä olisi tosiasiallinen mahdollisuus. Korkeat kustannukset eivät siis välttämättä oikeuta korkeisiin hintoihin. /1, 2/

Jotta olisi mahdollista arvioida monopolitoiminnan tehokkuutta, täytyy olla jokin menetelmä, jolla voidaan verrata eri yksiköitä toisiinsa tasapuolisesti. Tällöin voidaan määrittää, onko jonkin yksikön kustannustaso ja toiminnan tehokkuus kohtuullisella tasolla. Energiamarkkinavirasto on Helsingin kauppakorkeakoulun selvityksen perusteella valinnut tehokkuusmittauksessa käytettäväksi panosorientoituneen DEA-menetelmän (Data Envelopment Analysis), joka perustuu yhtiöiden suhteelliseen vertaamiseen. Tehokkuuteen vaikuttaviksi tekijöiksi on valittu operatiiviset kulut, sähkön laatu, siirretyn energian määrä, verkkopituus sekä asiakasmäärä. Näiden perusteella lasketaan yhtiöille tehokkuusluku, joka on välillä 0-1. Mikäli tehokkuusluku on 1, on yrityksen toiminta tehokasta. Jos tehokkuusluku on alle yhden, täytyy yhtiön tehostaa toimintaansa. /3/

Tässä tutkimushankkeessa on tavoitteena selvittää edellä esitetyn sähkönjakeluverkkoyhtiöiden tehokkuusmittauksen vahvuuksia ja heikkouksia ohjausvaikutuksen näkökulmasta sekä etsiä ratkaisumalleja esiintyviin ongelmiin. Koska verkkoyhtiöiden kehittäminen on pitkäjänteistä, on toivottavaa, että tehokkuusmittauksen ohjausvaikutukset ovat ennakoitavissa ja niiden suuruus on samantasoinen vuodesta toiseen.

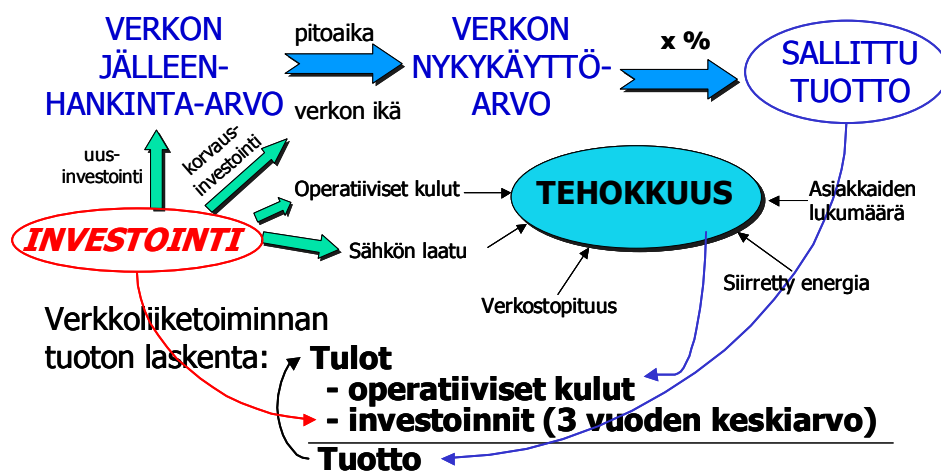
Jotta alkuarvoihin sekä itse malliin tehtävien muutosten vaikutusta pystyttäisiin tehokkaasti simuloimaan, täytyy tehdä hyvin paljon laskelmia erilaisilla lähtötietojen kombinaatioilla. Koska tällaisten laskelmien suorittaminen nykyisin saatavilla olevilla ohjelmistoilla on hyvin työlästä ja aikaa vievää, päädyttiin kehittämään tarkoitukseen soveltuva analysointijärjestelmä. Tässä diplomityössä on selvitetty kyseiseltä järjestelmältä vaadittavia ominaisuuksia sekä kehitetty järjestelmä.

2 Verkkoliiketoiminnan valvonta

Hallituksen esityksessä sähkömarkkinalaiksi (138/1994 vp.) on todettu, että monopoliasemassa olevalta sähköverkkotoiminnalta tulee edellyttää hinnoittelun kohtuullisuutta ja hinnoittelun tulee vastata toiminnan kustannuksia. Toisaalta esityksen perusteluissa on todettu, että hinnoittelun tulee turvata riittävä tulorahoitus ja vakavaraisuus. Tulot saavat kattaa sähköverkon rakentamisen, ylläpidon sekä käytön aiheuttamat kohtuulliset kustannukset sekä antaa sijoitetulle pääomalle kohtuulliseksi katsottavan tuoton. Lakia tulkittaessa ongelmaksi muodostuikin kohtuullisen tuoton ja kohtuullisten kustannusten määrittäminen. /2/

2.1 Sallitun tuoton määrittäminen

Sähköverkkoliiketoiminnan sallittu tuotto ja todellinen laskennallinen tuotto määritetään kuvan 1 esittämällä tavalla. Tällöin todellinen laskennallinen tuotto lasketaan vähentämällä liikevaihdosta kulut sekä kolmen viimeisen vuoden investointien keskiarvo. Sallittu tuotto puolestaan määritetään liiketoimintaan sitoutuneen pääoman ja Energiamarkkinaviraston määrittämien tuottoprosenttien avulla. Mikäli laskennallinen tuotto ylittää sallitun tuoton, katsotaan että yhtiön hinnoittelu on kohtuutonta, ja sen tulee muuttaa toimintaansa. /4/



Kuva 2.1 Verkkoliiketoiminnan sallitun tuoton määrittäminen. /4/

2.1.1 Sitoutuneen pääoman määrä

Energiamarkkinavirasto on todennut, että kohtuullisen tuoton määrittämisen perusteena on oltava sähköverkkoyhtiön todellinen sitoutunut pääoma. Yrityskaupoista saatuja hintoja ei voida hyväksyä suoraan nykykäyttöarvon määrittelyperusteiksi, sillä niihin saattaa sisältyä monopoliaseman ja sähkön vähittäismyyntiasiakkaiden hankkimisesta maksettua lisää. Myöskään kirjanpitoarvo ei kaikilta osin ole käyttökelpoinen, johtuen erilaisista poistokäytännöistä. /5/

Selvästi suurin käyttöomaisuuden osa sähköyhtiöillä on luonnollisestikin sähköverkko. Sähköverkolle täytyy siis määrittää nykykäyttöarvo (NKA). Tällöin määritetään ensin sähköverkon jälleenhankinta-arvo (JHA) verkostokomponenttien yksikkömäärien ja yksikköhintojen avulla. Tämän jälkeen sähköverkon nykykäyttöarvo määritetään verkostokomponenttien nykyisen iän ja pitoaikojen avulla yhtälön (2.1) mukaisesti. /4/

$$NKA = \left(1 - \frac{ikä}{pitoaika}\right) \cdot JHA \quad (2.1)$$

Sitoutuneeseen pääomaan lasketaan mukaan sähköverkkotoiminnan kannalta oleellisiksi katsottavat sijoitukset sekä aineelliset ja aineettomat hyödykkeet. Sitoutunut pääoma jaetaan omaan sekä korolliseen ja korottomaan vieraaseen pääomaan, joille määritetään kullekin oma tuotto prosentti. /5/

2.1.2 Sitoutuneen pääoman tuotto

Yrityksen sitoutuneen pääoman kohtuullista tuottoastetta on rahoitusteoriassa tavallisesti tarkasteltu pääoman painotetun keskikustannuksen (WACC, Weighted Average Cost of Capital) perusteella, joka on esitetty yhtälössä (2.2). /5/

$$WACC = C_D \cdot (1 - t) \cdot \frac{D}{D + E} + C_E \cdot \frac{E}{D + E} \quad (2.2)$$

missä

C_D = korollisen vieraan pääoman kustannus

C_E = oman pääoman kustannus

t = veroaste

D = korollisen vieraan pääoman määrä

E = oman pääoman määrä

WACC-menetelmää käytettäessä erotellaan pääoma omaan sekä korolliseen ja korottomaan vieraaseen pääomaan, joille määritellään korkotasot. Koska koroton vieras pääoma ei aiheuta kustannuksia, on se jätetty yhtälöstä (2.2) pois. Oman pääoman kustannusta voidaan arvioida pääomaerien hinnoittelumallilla (CAPM, Capital Asset Pricing Model), jonka mukaan sijoituskohteen tuoton odotusarvo muodostuu riskittömästä tuotosta sekä riskilisästä. Malli on esitetty yhtälössä (2.3). /5/

$$R_{opo} = R_r + \beta_{opo} \cdot (R_m - R_r) \quad (2.3)$$

missä

R_{opo} = Oman pääoman tuottovaatimus

R_r = Riskitön korkokanta

β_{opo} = Beeta-kerroin

R_m = Markkinoiden keskimääräinen tuotto

$R_m - R_r$ = Markkinoiden riskipremio

Riskittömänä tuottona voidaan käyttää pitkää korkoa, esimerkiksi viiden tai kymmenen vuoden valtion obligaation korkoa. Riskilistä puolestaan muodostuu osakemarkkinoiden keskimääräisestä riskipremiosta, eli riskittömän tuoton päälle odotettavasta keskimääräisestä lisätuotosta, sekä beeta-kertoimesta, joka kuvaa tarkasteltavan liiketoiminnan tai yrityksen riskiä suhteessa kaikkien sijoituskohteiden keskimääräiseen riskiin. /5/

Verkkoliiketoimintaa tarkasteltaessa on päädytty käyttämään riskittömänä korkokantana valtion 5 vuoden obligaation tuottoa, koska sen sisältämän korkoriskin katsotaan vastaavan parhaiten Suomessa sähköverkkotoimintaa harjoittavan yrityksen korkoriskiä. Vuoden 2001 lopussa kyseinen korko oli 4,54 % /6/. Energiamarkkinavirasto on määritellyt verkkoliiketoiminnalle beeta-kertoimen arvoksi 0,3 ja riskipremioksi 5 %. /5/

Vieraan pääoman kustannuksina voitaisiin käyttää toteutuneita korkokuluja. Sähkömarkkinalain perustelujen mukaan tulee kuitenkin ottaa huomioon, mikä on yrityksen kustannustaso verrattuna kustannuksiin, joihin yrityksellä olisi tosiasiallinen mahdollisuus. Tämän vuoksi kohtuullisena vieraan pääoman kustannuksena on päädytty käyttämään yrityslainojen keskimääräistä korkotasoa. Vieraan pääoman kustannuksista vähennetään verottajan kuluosuus voimassaolevan verokannan mukaisesti, mikäli tarkasteltavana oleva yritys on yhteisöverovelvollinen.

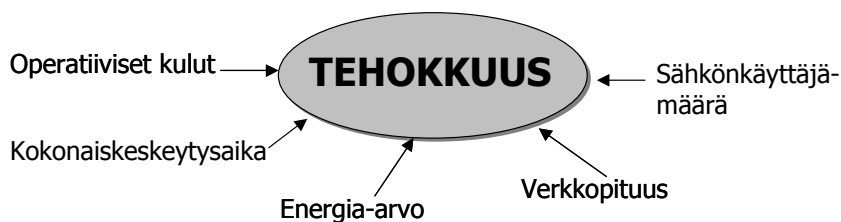
/5/ Vuoden 2001 lopussa yrityslainojen keskimääräinen korkotaso oli 4,70 % ja yhteisöverokanta 29 % /6/.

2.2 Tehokkuusmittaus

Koska monopolitoiminnassa ei ole kilpailusta johtuvaa pakotetta pitää liiketoimintaa tehokkaana ja hintoja alhaisina, täytyy monopolihinnoittelun arvioinnissa ottaa huomioon, mikä on yrityksen kustannustaso verrattuna kustannustasoon, johon yrityksellä olisi toiminnan tehostamisella mahdollisuus päästä.

Energiamarkkinavirasto on päätenyt käyttämään sähköverkkoliiketoiminnan tehokkuuden mittaamiseen panosorientoitunutta DEA-menetelmää muuttuvilla skaalatuotoilla. Menetelmässä mitataan tarkasteltavien yhtiöiden suhteellista tehokkuutta, jolloin tehokkaat yhtiöt muodostavat tehokkuusrintaman, johon tehottomia yhtiöitä verrataan. Malli antaa yhtiöille tehokkuusluvun väliltä 0...1, siten että yhtiö on tehokas, mikäli sen tehokkuusluku on 1. Toisinaan käytetään myös prosenttilukuja 0...100 %.

Tehokkuusarvioinnissa käytettävät laskentaparametrit ovat operatiiviset kulut, siltä osin kuin ne ovat yrityksen kontrolloitavissa, asiakkaiden kokema kokonaiskeskeytysaika, siirretyn energian määrä painotettuna jännitetasoilla valtakunnallisilla siirtohintojen keskiarvoilla, eri jännitetasojen yhteenlaskettu verkkopituus sekä sähkönkäyttäjämäärä. Näistä operatiiviset kulut on kontrolloitu panostekijä, keskeytysaika kontrolloimaton panostekijä, energia-arvo tuotostekijä ja verkkopituus sekä sähkönkäyttäjämäärä ympäristötekijöitä. /3/ Tässä tapauksessa käytettävä panosorientoitunut malli käsittelee tuotos- ja ympäristötekijöitä samalla tavalla. Kontrolloimaton panostekijä puolestaan käsitellään ikään kuin se olisi negatiivinen tuotos, eli se käyttäytyy tuotoksen tavoin sillä erotuksella, että sen arvon suurentaminen pienentää tehokkuutta.



Kuva 2. 2 Tehokkuusmittauksessa käytettävät laskentaparametrit.

Koska operatiiviset kulut ovat käytettävässä mallissa ainoa yhtiön kontrolloitavissa oleva panostekijä, nähdään tehokkuusluvusta suoraan, kuinka paljon operatiivisia kuluja tehottoman yhtiön tulee pienentää tullakseen tehokkaaksi. Esimerkiksi, jos yhtiön tehokkuusluku on 0,8, täytyy sen pienentää kulujaan 20 % tullakseen tehokkaaksi.

Tehokkuusluku siis kertoo, millaisilla kustannuksilla kaikkein tehokkain samantapaisissa olosuhteissa toimiva yhtiö on saavuttanut saman tuotannon tason, kuin ao. yhtiö. Tällöin voidaan katsoa, että DEA-menetelmän antaman tehokkuusluvun mukainen kustannustaso vastaa Sähkömarkkinalain 14 § 2 momentin yksityiskohtaisissa perusteluissa mainittua kustannustasoa, johon yrityksellä on tosiasiallinen mahdollisuus. /7/

Koska DEA-menetelmällä saatuun tehokkuuslukuun sisältyy erilaisia epävarmuustekijöitä, ei sitä voi soveltaa hintavalvonnassa sellaisenaan, vaan siihen täytyy lisätä tietty virhemarginaali. Virhemarginaalin tarkoitus on välttää tilanteita, joissa yritykselle asetetaan mittausvirheen takia suurempia tehostusvaatimuksia, kuin mitkä ovat realistisia. Energiamarkkinavirasto on päättänyt käyttämään 0,1:n suuruista virhemarginaalia. Virhemarginaali lisätään yhtiön tehokkuuslukuun, jolloin kohtuullinen kustannustaso voidaan määrittää yhtälöllä (2.4) /7/

$$KK = (h + 0,1) \cdot OpK \quad (2.4)$$

missä

KK = kohtuullinen kustannustaso

h = yhtiön tehokkuusluku

OpK = yhtiön kontrolloitavissa olevat operatiiviset kustannukset

Jos yhtiön tehokkuusluku on alle 0,9, sen kohtuulliset kustannukset muodostuvat pienemmiksi kuin yhtiön todelliset operatiiviset kustannukset. Tällöin yhtiön katsotaan perineen liikaa kustannuksia toiminnastaan. Jos tehokkuusluku on tasan 0,9, ei asiasta aiheudu enempiä toimenpiteitä. /7/

Tehokkuusluvun ollessa yli 0,9 yhtiön kohtuulliset kustannukset ovat korkeammat kuin todelliset kustannukset. Tällöin yhtiölle annetaan kannustinlisä, eli yritys saa ottaa toiminnastaan tuottoa yli kohtuullisen tason kannustinlisää vastaavalla rahamäärällä. /7/

3 DEA-menetelmä

Ensimmäisenä ajatuksen suhteellisesta tehokkuudesta esitti M.J. Farrell jo vuonna 1957. Cooper, Charnes ja Rhodes esittelivät vuonna 1978 Farrelin ajatuksiin pohjautuvan suhteelliseen tehokkuuden mittaamiseen perustuvan DEA-mallin. Tuolloin esiteltyä mallia kutsutaan nykyisin CCR-malliksi tekijöidensä mukaan. Vuonna 1984 Banker, Charnes ja Cooper esittelivät ns. BCC-mallin, johon oli lisätty mahdollisuus arvioida tehokkuutta muuttuvien skaalatuottojen tilanteessa, ts. tilanteessa, jolloin tuotosten ei voida olettaa kasvavan samassa suhteessa panosten kanssa. /8/

DEA-menetelmää käytettäessä ajatellaan, että yksikkö voi pyrkiä tehokkuuteen joko tuottamalla vakiotuotosta mahdollisimman pienillä panoksilla tai tuottamalla mahdollisimman suurta tuotosta vakiopanoksilla. Tällöin puhutaan panos- tai tuotosorientoituneesta mallista. Panosorientoituneessa mallissa tarkastellaan panosten pienennystarvetta tuotosten pysyessä vakiona. Tuotosorientoituneessa mallissa puolestaan tarkastellaan tuotosten lisäystarvetta panosten pysyessä vakiona.

Alun perin DEA-menetelmä kehitettiin mittaamaan voittoa tavoittelemattomien organisaatioiden, kuten koulujen, sairaaloiden yms. tehokkuutta. Perinteiset tehokkuuden arviointimenetelmät eivät sovellu tällaiseen ympäristöön, jossa joudutaan ottamaan huomioon tekijöitä, jotka eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Nykyisin DEA-menetelmän käyttö on kasvanut hyvin voimakkaasti ja sitä käytetään moniin erilaisiin tarkoituksiin. /3/

3.1 Menetelmä graafisesti

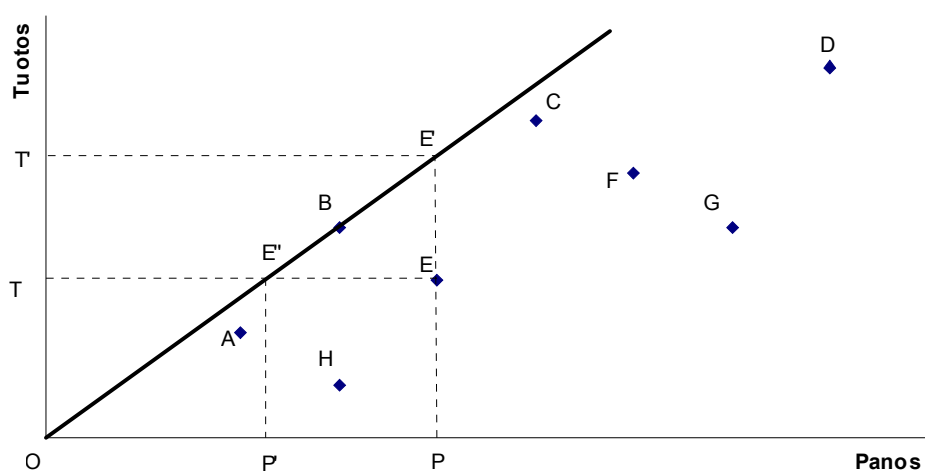
DEA-menetelmässä tehokkuusluku muodostuu tuotosten ja panosten painotettujen summien osamäärästä. Jokaiselle tarkasteltavalle yksikölle etsitään parhaan mahdollisen tehokkuusluvun tuottavat positiiviset painokertoimet, kuitenkin siten, ettei yhdenkään yksikön tehokkuusluku kasva panosorientoituneessa tarkastelussa yli yhden tai laske tuotosorientoituneessa tarkastelussa alle yhden kyseisillä painokertoimilla. /8/

Tehokkuusluku kertoo panosorientoituneessa mallissa sen, kuinka suuren osan yksikkö saisi panoksistaan käyttää ollakseen tehokas. Tuotosorientoituneessa mallissa tehokkuusluvusta puolestaan nähdään, kuinka paljon yksikön tulisi tuottaa tuotoksia nykyiseen verrattuna, jotta kyseinen yksikkö olisi tehokas. Tehokkuusluvut ovat siis panosorientoituneessa mallissa välillä $0 \dots 1$ ja tuotosorientoituneessa mallissa ≥ 1 . Tehokkaan yksikön tehokkuusluku on orientaatiosta riippumatta aina yksi.

Tehokkaat yksiköt sekä niiden lineaarikombinaatiot muodostavat tehokkuusrintaman, johon tehottomia yksiköitä verrataan. Tässä vaiheessa on hyvä huomioida, että DEA-mallin muodostama tehokkuusrintama on empiirinen, eli se on muodostettu suoraan vertailujoukon yksiköistä. Mahdollistahan olisi muodostaa myös teoreettinen tehokkuusrintama, jossa määritettäisiin minkälaisiin tuotos-panos-suhteisiin yksiköillä olisi teoreettinen mahdollisuus päästä. Tehokkuusrintama voidaan havainnollistaa helposti 2-ulotteisessa koordinaatistossa, mikäli panosten ja tuotosten yhteismäärä on enimmillään kolme. Seuraavissa esimerkeissä tarkastellaan yhden panoksen ja yhden tuotoksen tilannetta.

3.1.1 CCR-malli

CCR-mallissa, joka tunnetaan myös nimellä CRS-malli (Constant Returns to Scale, vakioskaalatuotot), oletetaan että jokaisen yksikön tuottavuus on yhtä suuri. Toisin sanoen tuotosten oletetaan kasvavan suoraan verrannollisesti panoksiin nähden. CCR-mallin tehokkuusrintama on esitetty kuvassa 3.1. Yhtiön tehokkuusluku määritetään sen suhteellisesta etäisyydestä tehokkuusrintamaan. /8/



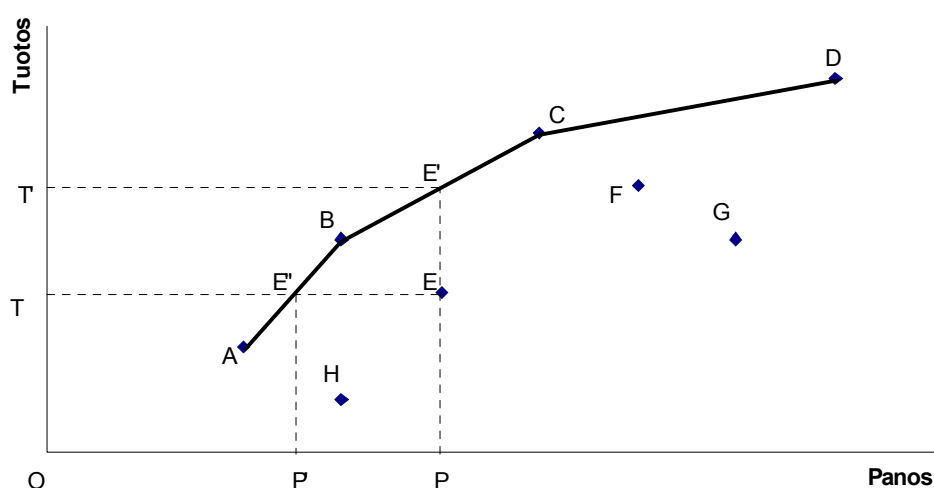
Kuva 3.1 CCR-tehokkuusrintama yhden panoksen ja yhden tuotoksen tapauksessa.

Tässä tapauksessa ainoaksi tehokkaaksi yksiköksi muodostuu yksikkö B, joten se on myös ainoa vertailuyksikkö kaikille tehottomille yksiköille. Kyseinen yksikkö toimii siis parhaalla panos-tuotos-suhteella. Otetaan tehottomista yksiköistä lähempään tarkasteluun yksikkö E. Panosorientoituneessa mallissa tehokkuuteen pyritään minimoimalla panokset ja pitämällä tuotokset vakiona. Tällöin yksikköä E vastaava tehokkuusrintaman piste löytyy pisteestä E'' ja sitä vastaava panosten arvo on P'. Yksikkö E olisi siis tehokas, mikäli se käyttäisi panoksia määrän P sijasta määrän P'. Tehokkuusluku panosorientoituneessa mallissa on tehokkaan ja toteutuneen panosten käytön suhde P'/P . Tuotosorientoituneessa mallissa pidetään panokset vakiona, jolloin yksikköä E vastaava tehokkuusrintaman piste on piste E'. Tehokkuusluku määritellään tehokkaan ja toteutuneen tuotoksen suhteena T'/T . /8/

3.1.2 BCC-malli

CCR-mallissa oletettiin, että skaalaetuja tai –haittoja ei synny eli tuotokset kasvavat samassa suhteessa panosten kanssa. Käytännössä näin ei kuitenkaan aina ole. Esimerkiksi suurten alkuinvestointien vuoksi ei voida olettaa, että tuotokset kasvaisivat suorassa suhteessa panoksiin.

BCC-mallissa, joka myös tunnetaan nimellä VRS-malli (Variable Returns to Scale, muuttuvat skaalatuotot) oletetaan, että yksikön tuottavuus riippuu sen koosta. Tällöin yksikköä verrataan ainoastaan sen kanssa samaa kokoluokkaa oleviin yksikköihin. /3/ Kuvassa 3.2 on esitetty BCC-mallin tehokkuusrintama yhden panoksen ja yhden tuotoksen tapauksessa.

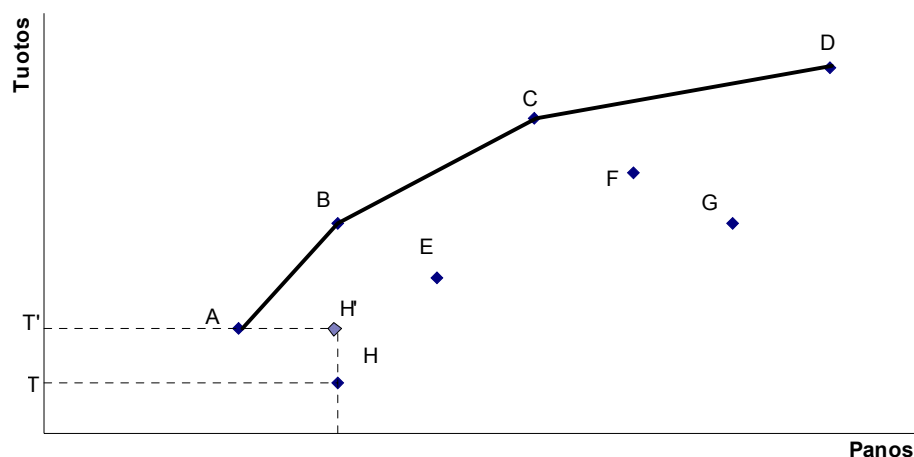


Kuva 3.2 BCC-mallin tehokkuusrintama yhden panoksen ja yhden tuotoksen esimerkissä.

Tässä esimerkissä tehokkaita yksiköitä ovat A, B, C ja D, joiden lineaarikombinaatiot muodostavat tehokkuusrintaman. Jos tarkastellaan taas yksikköä E, muodostuu sen tehokkuus samalla tavoin kuin CCR-mallissa. Panosorientoituneessa mallissa yksikön E tehokkuus on P'/P ja tuotosorientoituneessa mallissa T'/T . /8/

Panosorientoituneessa mallissa yksikköä E vastaava tehokkuusrintaman piste on piste E'. Kyseinen piste on yksiköiden A ja B muodostamalla tehokkuusrintaman osalla. Voidaan siis ajatella, että A ja B muodostavat virtuaaliyksikön E', johon yksikköä E verrataan. A ja B ovat siis E:n vertailuyksiköitä. A ja B osallistuvat virtuaaliyksikön muodostamiseen ns. osallistumiskertoimen määrämällä suuruudella. Osallistumiskerroin siis määrittää millä osuudella mikäkin vertailuyksikkö osallistuu virtuaalipisteen muodostamiseen. Osallistumiskertoimien summa BCC-mallissa on yksi. Graafisessa tarkastelussa osallistumiskertoimen suuruus nähdään virtuaalipisteen etäisyydestä sen muodostaviin yksiköihin. /8/

Toisinaan tehoton yksikkö voi sijaita sellaisessa kohdassa, ettei sitä voida verrata suoraan tehokkuusrintamaan. Tällöin sanotaan, että yksikön vertailupiste sijaitsee tehokkuusrintaman heikosti tehokkaalla osalla. Tällainen yksikkö on esimerkiksi oleva yksikkö H, jonka etäisyys tehokkuusrintamasta on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Yksikön H tehokkuuden muodostuminen ja ns. pelivaramuuttuja DEA-mallissa.

Voidaan ajatella, että yksikön H tulee lisätä tuotoksiaan määrällä $T'-T$, jolloin se siirtyy pisteeseen H' . Vasta silloin kyseiselle yksikölle löydetään vertailupiste

tehokkuusrintamalta. Tällaisessa tapauksessa sanotaan, että yksiköllä on pelivaraa (slack) kyseisen tekijän suhteen. Pelivaramuuttujan arvo yksikölle H on siis $T'-T$. /8/

3.2 DEA-menetelmä matemaattisesti

Matemaattisesti tarkasteltuna DEA-menetelmä on lineaarisen optimoinnin (LP, Linear Programming) sovellus. Tavoitefunktiona on tuotosten ja panosten painotettujen summien osamäärä. Panosorientoituneen vakioskaalatuottoisen mallin (CCR-malli) perusmuoto on esitetty yhtälöissä (3.1) – (3.3). /8/

$$\text{Max } h_0 = \frac{\sum_{j=1}^n u_j y_{j0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (3.1)$$

s.e.

$$\frac{\sum_{j=1}^n u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \leq 1 \quad ; k = 1, \dots, K \quad (3.2)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon \quad ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

missä

h	= yksikön tehokkuusluku	u	= tuotoksen painokerroin
v	= panoksen painokerroin	y	= tuotos
x	= panos	m	= panosten lukumäärä
n	= tuotosten lukumäärä	K	= yksiköiden lukumäärä
ε	= pieni positiivinen vakio		

Menetelmässä etsitään siis panosten ja tuotosten painokertoimille kunkin yksikön kohdalla optimaaliset arvot kuitenkin siten, ettei minkään yksikön tehokkuusluku ylitä arvoa 1 kyseisillä painokertoimilla. Optimointi tehdään jokaiselle yksikölle erikseen, jolloin tarkasteltava yksikkö esiintyy tavoitefunktiossa alaindeksillä 0, mutta rajoitefunktioissa alkuperäisellä indeksillään.

Panosorientoituneessa mallissa panosten käyttö pyritään minimoimaan tuotosten pysyessä vakiona. Tämä voidaan ymmärtää tavoitefunktion (3.1) kautta siten, että tavoitefunktio saavuttaa maksimiarvonsa, kun panokset saavuttavat minimiarvon.

Tuotosorientoituneessa mallissa tuotokset pyritään puolestaan maksimoimaan panosten pysyessä vakiona. Tällöin optimointitehtävä saa seuraavanlaisen muodon:
/8/

$$\text{Min } h_0 = \frac{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}}{\sum_{j=1}^n u_j y_{j0}} \quad (3.4)$$

s.e.

$$\frac{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}{\sum_{j=1}^n u_j y_{jk}} \geq 1 \quad ; k = 1, \dots, K \quad (3.5)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon \quad ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

Tuotosorientoituneen mallin tavoitefunktio siis saavuttaa minimiarvonsa tuotosten maksimiarvolla.

Edellä esitetty malli on kuitenkin epälineaarinen ja sillä on ääretön määrä optimaalisia ratkaisuvaihtoehtoja. Mikäli (u^*, v^*) on eräs optimaalinen ratkaisu, on tällöin myös $(\beta u^*, \beta v^*)$ optimaalinen ratkaisu, mikäli $\beta > 0$. Malli on kuitenkin helposti muutettavissa lineaariseen muotoon. Panosorientoituneen CCR-mallin lineaarinen muoto on esitetty yhtälöissä (3.7) – (3.10) /8/

$$\text{Max } h_0 = \sum_{j=1}^n u_j y_{j0} \quad (3.7)$$

s.e.

$$\sum_{j=1}^n u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 0 \quad ; k = 1, \dots, K \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (3.9)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon \quad ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3.10)$$

Muuttuvien skaalatuottojen mallissa (BCC-malli) katsotaan, että tuotokset eivät välttämättä kasva suoraan verrannollisesti panosten kasvuun nähden. Matemaattisessa tarkastelussa ainoa ero vakioskaalatuottoiseen malliin on vapaa muuttuja c_0 . Pyrittäessä minimoimaan panoksia (panosorientaatio) lisätään vapaa muuttuja tuotoksiin, mikäli tavoitteena puolestaan on tuotoksien maksimointi (tuotosorientaatio), vähennetään kyseinen muuttuja panoksista. Panosorientoitunut BCC-malli on esitetty yhtälöissä (3.11) - (3.14) /8/

$$\text{Max } h_0 = \frac{\sum_{j=1}^n u_j y_{j0} + c_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (3.11)$$

s.e.

$$\frac{\sum_{j=1}^n u_j y_{jk} + c_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \leq 1 \quad ; k = 1, \dots, K \quad (3.12)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon \quad ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3.13)$$

$$c_0 \text{ rajoittamaton} \quad (3.14)$$

Panosorientoituneen BCC-mallin lineaarimuoto on esitetty yhtälöissä (3.15) – (3.19)

/8/

$$\text{Max } h_0 = \sum_{j=1}^n u_j y_{j0} + c_0 \quad (3.15)$$

s.e.

$$\sum_{j=1}^n u_j y_{jk} + c_0 - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 0 \quad ; k = 1, \dots, K \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (3.17)$$

$$u_j, v_i \geq \varepsilon \quad ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3.18)$$

$$c_0 \text{ rajoittamaton} \quad (3.19)$$

Tarkastelemalla muuttujan c_0 :n arvoa, saadaan selville, toimiiko yksikkö paikallisesti nousevien-, laskevien- vai vakioskaalatuottojen alueella. Tämä on arvokas lisätieto tehokkuusmittauksessa. c_0 :n ollessa negatiivinen kyseessä ovat laskevat skaalatuotot, mikäli c_0 on positiivinen, ovat kyseessä nousevat skaalatuotot. Näistä käytetään usein myös nimityksiä ei-nousevat skaalatuotot (NIRS, Non-Increasing Returns to Scale) ja

ei-laskevat skaalatuotot (NDRS, Non-Decreasing Returns to Scale). Jos c_0 saa arvon nolla, on kyseessä vakioskaalatuotot, eli siis aikaisemmin esiteltyä CCR-mallia vastaava tilanne. Malliin voidaan myös asettaa rajoituksia c_0 :lle, jolloin tarkastelu rajoitetaan tietynlaisiin skaalatuottoihin. /9/

DEA-mallille, kuten kaikille lineaarisen optimoinnin malleille, voidaan muodostaa duaalimalli. Duaalimallista saadaan hyödyllistä lisätietoa optimaalisesta ratkaisusta. Panosorientoituneen CCR-mallin duaali on esitetty yhtälöissä (3.20) – (3.24). /8/

$$\text{Min } h_0 = \theta_0 - \varepsilon \sum_{j=1}^n s_j^+ - \varepsilon \sum_{i=1}^m s_i^- \quad (3.20)$$

s.e.

$$y_{0j} - \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{kj} + s_j^+ = 0 \quad ; j = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

$$\theta_0 x_{0i} - \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ki} - s_i^- = 0 \quad ; i = 1, \dots, m \quad (3.22)$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0 \quad (3.23)$$

$$\theta_0 \text{ rajoittamaton} \quad (3.24)$$

missä

- h = yksikön tehokkuusluku
- λ = osallistumiskerroin
- s = slack- eli pelivaramuuttuja
- θ = tehokkuuteen tarvittava suhteellinen vähennys tarkasteltavan yksikön panoksista

Panosorientoituneen BCC-mallin duaali puolestaan on esitetty yhtälöissä (3.25) – (3.30). /8/

$$\text{Min } h_0 = \theta_0 - \varepsilon \sum_{j=1}^n s_j^+ - \varepsilon \sum_{i=1}^m s_i^- \quad (3.25)$$

s.e.

$$y_{0j} - \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{kj} + s_j^+ = 0 \quad ; j = 1, \dots, n \quad (3.26)$$

$$\theta_0 x_{0i} - \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ki} - s_i^- = 0 \quad ; i = 1, \dots, m \quad (3.27)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1 \quad (3.28)$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0 \quad (3.29)$$

$$\theta_0 \text{ rajoittamaton} \quad (3.30)$$

Historiallisista syistä johtuen edellä esitettyä duaalimallia kutsutaan usein primaalimalliksi ja primaalimallia puolestaan duaalimalliksi. /8/ Tässä työssä käytetään kuitenkin selvyyden vuoksi yhtälöissä (3.15) - (3.19) esitetystä mallista nimitystä primaalimalli ja yhtälöissä (3.25) - (3.30) esitetystä mallista nimitystä duaalimalli.

Kun primaalimalleissa CCR- ja BCC-mallien erona oli BCC-malliin lisätty vapaa muuttuja c_0 , on duaalimallien erotuksena BCC-mallissa oleva rajoite osallistumiskertoimien summalle (yhtälö (3.28)).

Kuten primaalimallien kohdalla, myös duaalimalleissa kyseisen lisärajoitteen avulla voidaan tarkastelussa rajoittua käyttämään nousevia-, laskevia-, muuttuvia- tai vakioskaalatuottoja. Mikäli rajoitetta ei ole lainkaan, ovat kyseessä vakioskaalatuotot. Mikäli osallistumiskertoimien summa on rajoitettu tasan yhteen, kuten edellä, ovat kyseessä muuttuvat skaalatuotot. NIRS-mallissa kyseinen summa saa olla korkeintaan yksi /10/.

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k \leq 1 \quad (3.31)$$

NDRS-mallissa summan tulee puolestaan olla vähintään yksi /10/.

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k \geq 1 \quad (3.32)$$

Esitetty duaalimalli voidaan ymmärtää aikaisemmin esitetyn graafisen esimerkin kautta. Voidaan ajatella, että jokaiselle yksikölle muodostetaan vuorollaan virtuaaliyksikkö muiden yksiköiden lineaarikombinaationa. Tämä virtuaaliyksikkö tuottaa saman määrän tuotoksia kuin vertailtava yksikkö, mutta käyttää vähemmän panoksia. Vertailuryhmän yksiköt osallistuvat virtuaaliyksikön muodostamiseen osallistumiskertoimen (λ) määräämällä arvolla. Muodostettu virtuaaliyksikkö on siis se tehokkuusrintaman piste, johon tehotonta yksikköä verrataan.

Yhtälöissä oleva θ on määrä, jonka yksikkö saa käyttää panoksistaan, ollakseen tehokas. Tavoitefunktiossa olevat pienet positiiviset vakiot (ϵ) takaavat sen, että pelivaramuuttujat otetaan optimoinnissa huomioon. Koska vakioiden arvo on kuitenkin hyvin pieni (luokkaa 10^{-30}) voidaan olettaa, että tehokkuusluku on yhtä kuin θ . /8/

Edellisen perusteella voidaan siis sanoa, että yksikkö on tehokas jos ja vain jos $\theta = 1$ ja kaikki slack-muuttujat ovat nollia. /8/

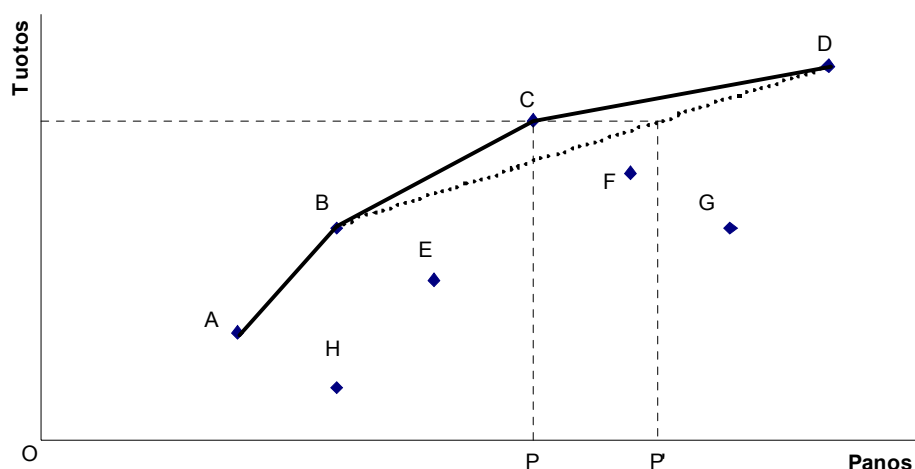
3.3 Ympäristötekijät

Normaalisti DEA-mallissa katsotaan, että yksiköllä on mahdollisuus vaikuttaa kaikkiin mallissa oleviin panos- ja tuotostekijöihin. Käytännössä näin ei kuitenkaan aina ole. Tehokkuusmittauksessa voi olla mukana myös sellaisia tekijöitä, joiden suuruuteen yksiköllä ei ole selvää mahdollisuutta vaikuttaa. Tällaisia tekijöitä voivat olla esimerkiksi ilmastosta tai toimintaympäristöstä riippuvat tekijät. Näitä tekijöitä kutsutaan ympäristötekijöiksi tai kontrolloimattomiksi tekijöiksi.

Panosorientoituneessa mallissahan tehokkuuteen pyrittiin pitämällä tuotokset vakiona ja minimoimalla panoksia. Tällöin voidaan ajatella, että panostekijät ovat ainoat yksikön kontrolloitavissa olevat tekijät ja tuotostekijöitä käsitellään kontrolloimattomina tekijöinä. Kontrolloimaton panostekijä voidaan tällaisessa tapauksessa ottaa mukaan malliin käsittelemällä sitä negatiivisen tuotoksen kaltaisena tekijänä.

3.4 Supertehokkuus

Normaalisti panosorientoituneessa DEA-menetelmässä voi yksikön tehokkuusluku olla korkeintaan 1. Tällöin yksiköt joiden tehokkuusluku on 1, muodostavat tehokkuusrintaman, johon tehottomia yksiköitä verrataan. Tästä menettelystä seuraa kuitenkin haittapuolena se, että tehokkaat yksiköt katsotaan yhtä tehokkaiksi. Haluttaessa arvioida tehokkaiden yksiköiden tehokkuuslukua, voidaan käyttää supertehokkuusmallia. Tässä mallissa tarkasteltava yksikkö poistetaan vertailujoukosta eli toisin sanoen tehokkuusrintama muodostetaan ilman tarkasteltavaa yksikköä. /11/ Yksikkö on tehokas, mikäli se sijaitsee tehokkuusrintaman ulkopuolella. Kuvassa 3.4 on esitetty yhden panoksen ja yhden tuotoksen esimerkki supertehokkuudesta.



Kuva 3.4 Tehokkuusrintama yhden panoksen ja yhden tuotoksen tapauksessa tarkasteltaessa yksikön C supertehokkuutta.

Normaalitilanteessa tehokkuusrintama kulkee pisteiden A, B, C ja D kautta. Kun tarkastellaan yksikön C supertehokkuutta, muodostetaan tehokkuusrintama ilman kyseistä yksikköä. Tällöin tehokkuusrintama kulkee pisteiden B ja D välillä pitkin katkoviivaa. Supertehokkaan yksikön tehokkuusluku, joka siis on yli 1, voidaan määrittää etäisyydestä tehokkuusrintamaan samalla tavoin, kuin aikaisemmin on esitetty. Yksikön C tehokkuudeksi muodostuu siten P'/P .

Matemaattisessa tarkastelussa supertehokkuus saadaan selville, kun tarkasteltava yksikkö poistetaan rajoiteyhtälöistä.

3.5 Painokertoimien rajoitukset

Normaalisti DEA-mallissa panosten ja tuotosten painokertoimien (v , u) ainoa rajoite on positiivisuusehto. Tällöin malli voi hakea jokaiselle yksikölle optimaaliset painokertoimet nollan ja äärettömän väliltä. Tämä seikka saattaa aiheuttaa eri tekijöille hyvinkin erilaisen ja epärealistisen arvostuksen. Yksikkö voi tulla tehokkaaksi vertailuryhmästä poikkeavan panos- tai tuotosprofiilinsa johdosta,

painottamalla vain tiettyjä tekijöitä. Tällöin suuri osa tekijöistä ei vaikuta lainkaan yksikön tehokkuuteen, eikä yksikkö ole välttämättä aidosti tehokas. Jotta tällaiselta ongelmalta vältyttäisiin, voidaan painokertoimille asettaa rajoituksia.

Voidaan myös ajatella, että jokin mallissa mukana oleva panos- tai tuotostekijä on tehokkuuden kannalta merkityksellisempi kuin jokin toinen tekijä. Tällöin kyseisen tekijän vaikutusta yksikön tehokkuuteen saadaan lisättyä suurentamalla sen painokerrointa.

Painokertoimien rajoittamista on usein vastustettu siksi, että silloin luovutaan DEA-mallin perusoletuksesta, painojen vapaasta valinnasta. DEA-mallin alkuperäinen ideahan on esittää jokainen yksikkö parhaassa mahdollisessa valossa, eli jokainen yksikkö saa valita sellaiset painokertoimet, joilla se saavuttaa parhaan tehokkuuden. Tällöin painokertoimet vaihtelevat hyvinkin paljon vertailuryhmän sisällä. Tämän vaihtelun katsotaan kuvastavan yksiköiden toimintaa erilaisissa toimintaympäristöissä, mutta vaihtelu saattaa myös aiheutua poikkeavasta tuotos- tai panosprofiilista ja sitä kautta peittää todellisen tehottomuuden. /12/

Asetettaessa painokertoimille rajoituksia, vähenevät DEA-mallin tavoitefunktion mahdolliset ratkaisut. Mikäli asetetut rajoitteet pois sulkevat ilman rajoitteita saadun optimaalisen ratkaisun, yksikön tehokkuusluku todennäköisesti pienenee. Voidaankin sanoa, että painokertoimien rajoittamisen seurauksena tehokkuusluvut joko pienenevät tai pysyvät samoina. Mitä tiukemmat rajoitteet asetetaan, sitä suurempi muutos on verrattuna rajoittamattomaan tilanteeseen. /12/

Käytännössä painokertoimien rajoittaminen voidaan toteuttaa useilla erilaisilla menetelmillä. Painokertoimille voidaan asettaa absoluuttisia tai suhteellisia rajoituksia. Lisäksi virtuaalisia tuotoksia, eli painokertoimen ja sitä vastaavan tekijän tuloa, voidaan rajoittaa.

3.5.1 Painokertoimien absoluuttinen rajoittaminen

Painokertoimille voidaan asettaa ylä- ja alarajoiksi absoluuttiset lukuarvot, joiden sisällä kertoimien tulee pysyä. Käytännössä tämä tapahtuu yksinkertaisesti lisäämällä optimointimallin rajoiteyhtälöihin kyseiset rajoitukset. Rajoitusten matemaattinen muoto on esitetty yhtälöissä (3.33) – (3.34). /13/

$$\alpha \leq u_i \leq \beta \quad (3.33)$$

$$\chi \leq v_i \leq \gamma \quad (3.34)$$

missä

u_i = tuotoksen i painokerroin

v_i = panoksen i painokerroin

$\alpha, \beta, \chi, \gamma$ = vakio

Koska painokertoimien suuruus riippuu panos- ja tuotostekijöiden suuruudesta, vaihtelevat painokertoimien arvot hyvinkin paljon vertailujoukon sisällä. Tällöin voi olla vaikea asettaa painokertoimille sellaisia rajoituksia, jotka kohtelisivat yksiköitä tasapuolisesti. Painokertoimilla ei myöskään yleensä ole konkreettista ymmärrettävää merkitystä, jolloin niille asetettavien absoluuttisten rajoitusten merkitystä on vaikea hahmottaa.

Määritettäessä absoluuttisia rajoituksia painokertoimille, on lähtökohtana oltava rajoittamattoman mallin painokertoimet. Näiden perusteella voidaan määrittää rajoitusten suuruusluokka. Rajoitteilla voidaan esimerkiksi rajata pois äärimmäisen pienet ja äärimmäisen suuret painokertoimet, tai määrittää rajat sellaisiksi, että tietty määrä yksiköistä on jo valmiiksi asetettavien rajoitteiden sisällä. Rajoitteita asetettaessa on muistettava, että rajoitteet muuttavat tehokkuusrintamaa. On siis mahdollista, että tietyillä rajoitteilla mikään yksikkö ei sijoitu tehokkuusrintamalle. Rajoitukset voivat myös johtaa joidenkin yksiköiden kohdalla sallitun alueen häviämiseen, eli tällöin yksikölle ei löydy lainkaan sellaisia painokertoimia, joilla optimointitehtävän rajoitukset toteutuvat. /12/

3.5.2 Painokertoimien suhteelliset rajoitukset

Painokertoimille voidaan absoluuttisten rajoitusten sijasta määrätä suhteellisia rajoituksia. Yksinkertaisin tapa suhteelliseen rajoittamiseen on panosten ja tuotosten painokertoimien asettaminen järjestykseen. Esimerkiksi, jos tiedetään, että tuotos A on arvokkaampi kuin tuotos B, voidaan asettaa kyseisten tuotosten painokertoimille tätä tilannetta vastaava rajoite. Tässä tapauksessa määrättäisiin siis tuotoksen A painokerroin suuremmaksi kuin tuotoksen B. Tässä ei kuitenkaan oteta kantaa siihen, kuinka paljon arvokkaampi tuotos A on. /14/

Yleisemmin käytetty suhteellinen rajoitemalli onkin *varmuusalue*-malli (Assurance Region, AR), jossa kahden tekijän painokertoimien suhteelle asetetaan ylä- ja alarajat. Mikäli rajoitettavana on kaksi tuotosta tai kaksi panosta, käytetään mallista nimitystä AR I. Tällainen rajoite on esitetty yhtälössä (3.35). /14/

$$\alpha \leq \frac{u_i}{u_{i+1}} \leq \beta \quad (3.35)$$

missä

u = tuotoksen painokerroin

α, β = vakio

Mikäli rajoite puolestaan asetetaan tuotoksen ja panoksen painokertoimen välille puhutaan AR II –rajoitteesta. Tällainen rajoite on esitetty yhtälössä (3.36). /14/

$$\alpha \leq \frac{u_i}{v_i} \leq \beta \quad (3.36)$$

missä

u = tuotoksen painokerroin

v = panoksen painokerroin

α, β = vakio

3.5.3 Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen

Virtuaalisella tuotoksella tarkoitetaan painokertoimen ja sitä vastaavan tekijän tuloa. Virtuaaliselle tuotokselle (tai virtuaaliselle panokselle) voidaan asettaa absoluuttisia rajoituksia tai sitä voidaan rajoittaa suhteellisesti verrattuna johonkin toiseen virtuaaliseen tuotoksen tai kaikkien virtuaalisten tuotosten summaan. Nämä rajoitevaihtoehdot esitetään matemaattisesti yhtälöissä (3.37) – (3.39).

$$\alpha \leq u_i y_i \leq \beta \quad (3.37)$$

$$\alpha \leq \frac{u_i y_i}{u_{i+1} y_{i+1}} \leq \beta \quad (3.38)$$

$$\alpha \leq \frac{u_i y_i}{\sum_{k=1}^n u_k y_k} \leq \beta \quad (3.39)$$

Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen voidaan ajatella painokertoimien absoluuttiseksi rajoittamiseksi, kuitenkin sillä erotuksella, että nyt jokaisella yksiköllä rajoite on erilainen, johtuen siinä olevasta yksikkökohtaisesti vaihtelevasta lähtötiedosta. /13/

3.6 Herkkyysanalyysi

Yksittäisen tekijän vaikutus tehokkuuteen voidaan määrittää herkkyysanalyysin avulla. Tällöin yhtiön tehokkuusluku lasketaan ensin alkuperäisillä lähtöarvoilla. Tämän jälkeen tehdään tarkasteltavaan tekijään pieni muutos ja lasketaan tehokkuusluku uudelleen. Kun verrataan tehokkuudessa tapahtunutta muutosta tarkasteltavan tekijän lähtöarvossa tehtyyn muutokseen, saadaan tulokseksi tehokkuuden muutosherkkyys kyseisen tekijän suhteen.

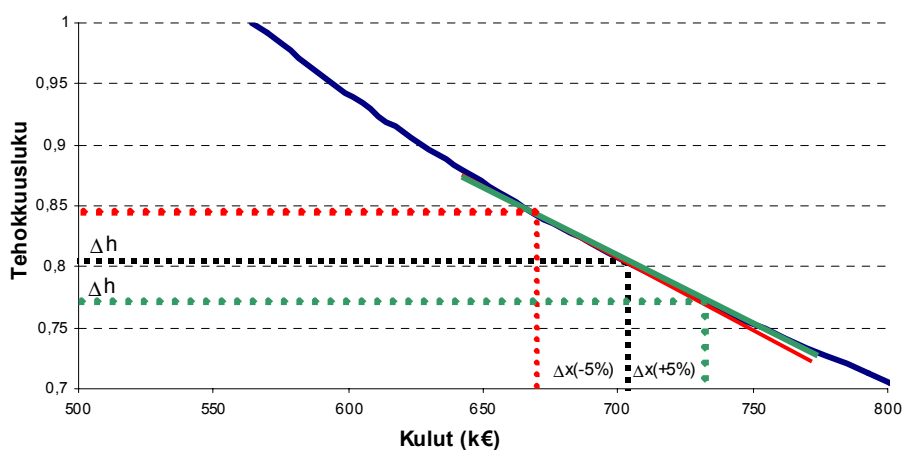
$$\text{muutosherkkyys} = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (3.40)$$

missä

Δh = absoluuttinen muutos tehokkuudessa

Δx = prosentuaalinen muutos tarkasteltavassa tekijässä

Muutosherkkyden yksiköksi muodostuu siten [%-yksikköä / %]. Muutosherkkyys voidaan määrittää myös graafisesti tehokkuuskäyrästä. Kuvassa 3.5 on esitetty erään yhtiön tehokkuusluku kulujen funktiona.



Kuva 3.5 Erään yhtiön tehokkuusluku kulujen funktiona.

Muutosherkkyys voidaan määrittää tehokkuuskäyrän kulmakertoimena tarkasteltavassa pisteessä. Kuvaan 3.5 on piirretty tehokkuuskäyrän kulmakertoimia vastaavat suorat, tarkastelumarginaalina 5 %. Kuten kuvasta huomataan, riippuu kulmakerroin tehtävän muutoksen suunnasta. Tältä eroavaisuudelta voidaan kuitenkin välttyä tarkastelemalla differentiaalisen pientä muutosta.

3.7 Laskentamenetelmiä

Yleisesti lineaarisen optimoinnin ratkaisu voidaan hahmottaa graafisesti siten, että rajoiteyhtälöt rajaavat alueen, jota kutsutaan sallituksi alueeksi. Tarkasteltaessa ns. yleisessä muodossa olevaa mallia, jossa on n muuttujaa ja m rajoiteyhtälöä, on sallittu alue korkeintaan n -ulotteinen monitahokas. Tavoitefunktion optimiratkaisu (jos sellainen löytyy) löydetään puolestaan jostakin sallitun monitahokkaan kärjestä. /15/

Otetaan esimerkiksi seuraavanlaisen yleisessä muodossa olevan lineaarisen optimointiongelman ratkaiseminen:

$$\text{Max } z = x + 3 \cdot y \quad (3.41)$$

s.e.

$$x \leq 12 - y \quad (3.42)$$

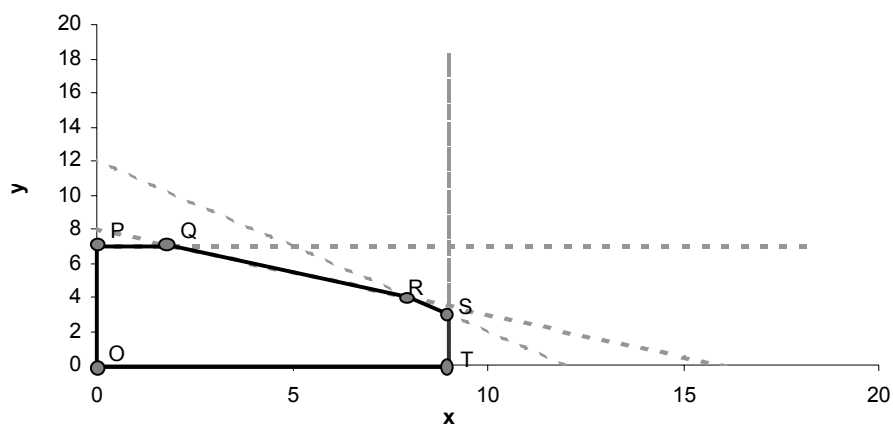
$$y \leq 8 - 0,5 \cdot x \quad (3.43)$$

$$x \leq 9 \quad (3.44)$$

$$y \leq 7 \quad (3.45)$$

$$x, y \geq 0 \quad (3.46)$$

Tässä esimerkissä muuttujia on kaksi ($n=2$) ja rajoiteyhtälöitä neljä ($m=4$), joten tehtävä voidaan esittää graafisesti 2-ulotteisessa koordinaatistossa.



Kuva 3.6 Esimerkki lineaarisen optimointiongelman ratkaisemisesta graafisesti.

Kuvan 3.6 vasempaan alakulmaan on merkitty näkyviin rajoiteyhtälöiden rajoittama sallittu alue. Optimiratkaisu löytyy nyt jostakin sallitun alueen kärkipisteestä. Tämän esimerkin tavoitefunktio saavuttaa suurimman arvonsa pisteessä Q. Muuttujien arvot kyseisessä pisteessä ovat; $x = 2$ ja $y = 7$ ja tavoitefunktion arvo $z = 23$.

Edellä esitettiin lineaarinen optimointitehtävä yleisessä muodossa. Tehtävä voidaan muuntaa standardimuotoon siirtämällä vakiot oikealle puolelle ja lisäämällä jokaiseen *pienempi tai yhtä suuri kuin* -rajoitukseen ei-negatiivinen pelivaramuuttuja (slack variable) ja vähentämällä jokaisesta *suurempi tai yhtä suuri kuin* -rajoituksesta ei-negatiivinen ylijäämämuuttuja (surplus variable). Esimerkin optimointitehtävä on esitetty standardimuodossa yhtälöissä (3.47)-(3.52). /15/

$$\text{Max } z = x + 3 \cdot y \quad (3.47)$$

s.e.

$$x + y + A = 12 \quad (3.48)$$

$$0,5 \cdot x + y + B = 8 \quad (3.49)$$

$$x + C = 9 \quad (3.50)$$

$$y + D = 7 \quad (3.51)$$

$$x, y, A, B, C, D \geq 0 \quad (3.52)$$

Kuten edellä todettiin, löytyy tehtävän optimiratkaisu jostakin sallitun monitahokkaan kärkipisteestä. Verrattaessa optimointitehtävän standardimuotoa kuvan 3.6 esittämään graafiseen ratkaisuun havaitaan, että jokaisessa sallitun alueen kärkipisteessä kaksi muuttujista on arvoltaan nolliä. Muuttujia, joiden arvo on nolla kutsutaan ei-kantamuuttujiksi ja muita muuttujia kantamuuttujiksi. Näin saavutettua ratkaisua puolestaan kutsutaan kantaratkaisuksi. Mikäli kaikki kantamuuttujat ovat ei-negatiivisia, on kyseessä sallittu kantaratkaisu, joka siis vastaa jotain sallitun monitahokkaan kärkipistettä. Yleisesti voidaankin todeta, että sallittu kantaratkaisu on sellainen, jossa n-m muuttujaa on nolliä ja loput m muuttujaa, jotka voidaan ratkaista rajoiteyhtälöistä, ovat ei-negatiivisia. /15/

Taulukossa 3.1 on esitetty esimerkkitehtävän muuttujien sekä tavoitefunktion arvot sallituissa kantaratkaisuissa.

Taulukko 3.1 Esimerkkitehtävän muuttujien ja tavoitefunktioiden arvot sallituissa kantaratkaisuissa.

Kärki	Ei kantamuuttujat		Kantamuuttujat				Tavoitefunktion arvo ($z = x+3y$)
O	$x=0$	$y=0$	$A=12$	$B=8$	$C=9$	$D=7$	0
P	$x=0$	$D=0$	$y=7$	$A=5$	$B=1$	$C=9$	21
Q	$B=0$	$D=0$	$x=2$	$y=7$	$A=3$	$C=7$	23
R	$B=0$	$A=0$	$x=8$	$y=4$	$C=1$	$D=3$	20
S	$C=0$	$A=0$	$x=9$	$y=3$	$B=6,5$	$D=4$	18
T	$C=0$	$y=0$	$x=9$	$A=3$	$B=3,5$	$D=7$	9

Optimiratkaisu olisi siis mahdollista löytää laskemalla tavoitefunktion arvo kaikissa monitahokkaan kärkipisteissä ja valitsemalla näistä suurimman tai pienimmän arvon antava, riippuen optimoinnin suunnasta. Tällainen menettely aiheuttaisi kuitenkin kohtuuttoman suuren laskentaurakan. Tämän vuoksi on kehitetty tehokkaampia algoritmeja lineaaristen optimointitehtävien ratkaisuun. /15/

3.7.1 Simplex-menetelmä

Selvästi suosituin lineaaristen optimointitehtävien ratkaisumenetelmä on nykyäänkin Simplex-menetelmä, jonka kehitti G.P. Danzig jo vuonna 1947. Menetelmän periaate on lyhyesti selitettynä seuraava: Optimiratkaisun etsiminen aloitetaan jostakin sallitun monitahokkaan kärkipisteestä. Kyseisestä kärkipisteestä edetään sellaiseen viereiseen kärkipisteeseen, jossa tavoitefunktion arvo paranee. Tätä jatketaan niin kauan kuin tavoitefunktion arvoa voidaan vielä parantaa. Tällä menetelmällä optimikärki löydetään äärellisen askelmäärän jälkeen. /15/

Ratkaistaessa optimointitehtävä simplex-menetelmällä, muutetaan tavoiteyhtälön ja rajoiteyhtälöt sisältävä yhtälöryhmä ensin simplex- eli kantamuotoon. Tällöin jokaisella rivillä on yksi muuttuja (rivin kantamuuttuja), jonka kerroin kyseisellä rivillä on 1 ja muilla riveillä nolla. Nyt kantamuuttujien sekä tavoiteyhtälön arvot nähdään suoraan yhtälöiden oikealta puolelta. Edellä esitetyn esimerkin eräs simplex-muoto on:

$$z \quad -x \quad -3y \qquad \qquad = 0 \qquad (3.53)$$

$$x \quad +y \quad +A \qquad \qquad = 12 \qquad (3.54)$$

$$0,5x \quad +y \quad +B \qquad \qquad = 8 \qquad (3.55)$$

$$x \qquad \qquad +C \qquad \qquad = 9 \qquad (3.56)$$

$$\qquad y \qquad \qquad +D \qquad \qquad = 7 \qquad (3.57)$$

Tässä kantamuuttujia ovat A , B , C ja D ja ei-kantamuuttujia x ja y . Sanotaan, että tämä on kantaa $\{A, B, C, D\}$ vastaava simplex-muoto. Kun verrataan tätä muotoa kuvaan 3.6, huomataan, että se vastaa pistettä O , jossa siis x ja y ovat nollia.

Simplex-laskenta etenee seuraavanlaisesti: /15/

1. Etsitään jokin sallittu lähtökantaratkaisu ja muutetaan tehtävä sitä vastaavaan simplex-muotoon.
2. Etsitään sellainen ei-kantamuuttuja, jonka vaihtaminen nykyiseen kantaan parantaisi tavoiteyhtälön arvoa, merkitään kyseistä muuttujaa x_u :lla. Mikäli tällaista ei-kantamuuttujaa ei löydy, lopetetaan, nykyinen kantaratkaisu on optimaalinen.
3. Lasketaan, mikä kantamuuttuja tulee ensimmäisenä nolllaksi x_u :ta kasvatettaessa, merkitään tätä x_p :llä.
4. Käsitellään yhtälöryhmää alkeisrivioperaatioilla siten, että x_u tulee kantamuuttujaksi x_p :n tilalle ja palataan kohtaan 2.

Tarkasteltaessa edellä esitettyä lähtökantaratkaisua havaitaan, että x :llä ja y :llä on negatiivinen kerroin z -rivillä, eli niiden vaihtaminen kantaan parantaisi z :n arvoa. Valitaan näistä y , koska sen suurentaminen kasvattaa tavoitefunktion arvoa enemmän. Reunaehdot y :n kasvattamiselle ovat seuraavanlaiset, kun x pidetään nolllana.

$$A \leq 12 - y \tag{3.58}$$

$$B \leq 8 - y \tag{3.59}$$

$$D \leq 7 - y \tag{3.60}$$

Huomataan, että kasvatettaessa y :tä tulee D ensimmäisenä nolllaksi, vaihdetaan siis se pois kannasta. Kun yhtälöryhmää käsitellään alkeisrivioperaatioilla, saadaan seuraavanlainen, kantaa $\{y, A, B, C\}$ vastaava simplex-muoto.

$$z \quad -x \qquad \qquad +3D \quad = 21 \qquad (3.61)$$

$$x \quad +A \quad -D \quad = 5 \qquad (3.62)$$

$$0,5x \quad +B \quad -D \quad = 1 \qquad (3.63)$$

$$x \quad +C \quad = 9 \qquad (3.64)$$

$$y \quad +D \quad = 7 \qquad (3.65)$$

Nyt siis ollaan kuvan 3.6 pisteessä P, jossa $y = 7$ ja $x = 0$. Tässä kantaratkaisussa x :n kerroin z -rivillä on edelleen negatiivinen, josta voidaan päätellä, että sen vaihtaminen kantaan parantaisi tavoiteyhtälön arvoa. Kasvatettaessa x :n arvoa, tulee B ensimmäisenä nolllaksi, joten vaihdetaan se pois kannasta. Kantaa $\{x, y, A, C\}$ vastaava simplex-muoto on nyt seuraavanlainen.

$$z \quad \quad +2B \quad +D \quad = 23 \qquad (3.66)$$

$$\quad +A \quad -2B \quad +D \quad = 3 \qquad (3.67)$$

$$x \quad +2B \quad -2D \quad = 2 \qquad (3.68)$$

$$\quad -2B \quad +C \quad +2D \quad = 7 \qquad (3.69)$$

$$y \quad \quad \quad +D \quad = 7 \qquad (3.70)$$

Nyt on siirrytty kuvan 3.6 pisteeseen Q, joka havaittiin graafisessa ratkaisussa optimaaliseksi. Koska kaikkien z -rivillä olevien muuttujien kertoimet ovat nyt positiivisia, voidaan päätellä ratkaisun olevan myös simplex-algoritmin kriteereiden kannalta optimaalinen. Kantamuuttujien ja objektifunktion arvot nähdään nyt suoraan yhtälöiden oikeanpuolen arvoista; $x = 2$, $y = 7$, $A = 3$, $C = 7$ ja tavoitefunktion arvo z on 23. Ei-kantamuuttujat B ja D ovat nolllia.

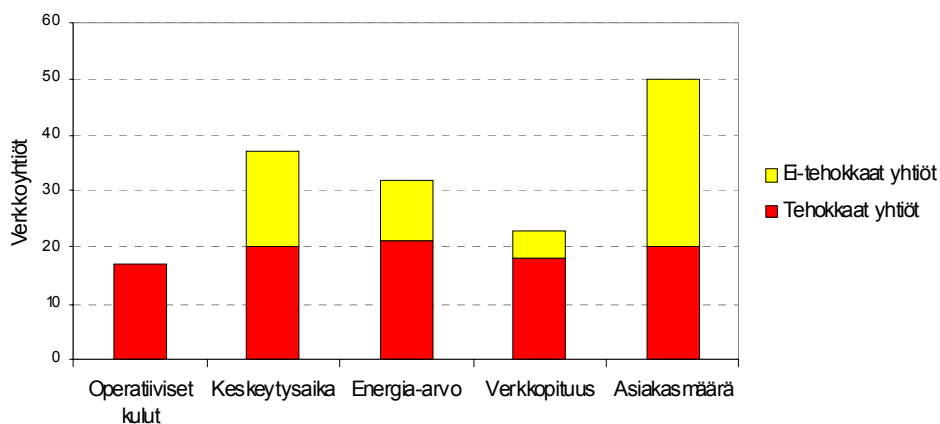
4 Ongelmakohtia tehokkuusmittauksessa

Verkkoyhtiöiden tehokkuusarvioinnin tavoitteena on ohjata yhtiön toimintaa kustannustehokkaaksi. Koska jakeluverkkojen kehittäminen on pitkäjänteistä toimintaa, on tärkeää, että mallin ohjausvaikutukset ovat ennakoitavissa ja suhteellisen samansuuruisia vuodesta toiseen. Ohjausvaikutusten tulisi myös olla sellaisia, että ne ohjaavat verkoston kehittämistä teknistaloudellisesti järkevään suuntaan.

Tehokkuusmittauksen ongelmia on etsitty tutkimalla 95 jakeluverkkoyhtiön tehokkuusluvun käyttäytymistä erilaisilla lähtötietoihin tehtävillä muutoksilla. Lisäksi on vertailtu vuoden 1999 ja 2000 tehokkuuslukuja, jotta löydettäisiin tehokkuuslukuissa tapahtuneita muutoksia selittäviä tekijöitä. /16/

4.1 *Merkityksettömät tekijät*

Tarkasteltaessa eri tekijöihin tehtävien muutoksien vaikutusta tehokkuuslukuun huomattiin, että joidenkin tekijöiden alkuarvon muuttaminen ei vaikuttanut yhtiön tehokkuuteen. Tällöin malli on valinnut kyseiselle tekijälle sellaisen painokertoimen, että tekijä jätetään huomiotta tehokkuutta laskettaessa. Kuvassa 4.1 on esitetty sellaiset yhtiöt, joilla jonkin lähtötiedon muuttamisella ei ole välitöntä vaikutusta tehokkuuslukuun. Kuvassa yhtiöt on jaoteltu tehokkaisiin ja ei-tehokkaisiin yhtiöihin. Tehokkaiden yhtiöiden kohdalla tehokkuusluku on rajattu arvoon 1, ts. supertehokkuusmallia ei ole käytetty. /16/



Kuva 4.1. Niiden tehokkaiden ja ei-tehokkaiden yhtiöiden lukumäärät, joilla on merkityksettä tekijöitä. /16/

Koska operatiiviset kulut ovat mallin ainoa kontrolloitavissa oleva panostekijä, on sillä selvä vaikutus tehottoman yhtiön tehokkuuteen. Muiden tekijöiden osalta tilanne ei ole näin selvä.

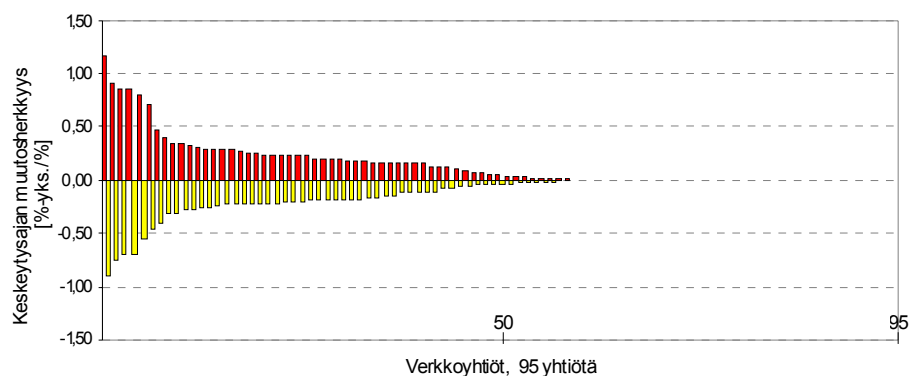
Tarkastellaan seuraavassa ei-tehokkaiden yhtiöiden merkityksettä tekijöitä. Kuvasta 4.1 nähdään, että n. 17 ei-tehokkaalla yhtiöllä keskeytysajan lyhentämisellä ei ole tehokkuuslukuun vaikutusta. Nämä 17 ei-tehokasta yhtiötä joutuvat lyhentämään keskeytysaika keskimäärin 29 % ennen kuin keskeytysajan lyheneminen näkyy tehokkuusluvussa. Kuvassa 4.1 esitetyille ei-tehokkaille yhtiöille muiden tekijöiden suhteen tilanne on seuraava: /16/

- *Energia-arvoa* on kasvatettava keskimäärin 19 % ennen kuin tämä näkyy tehokkuusluvussa.
- *Verkkopituutta* on kasvatettava keskimäärin 79 % ennen kuin tämä näkyy tehokkuusluvussa.
- *Sähkökäyttäjämäärää* on kasvatettava keskimäärin 25 % ennen kuin tämä näkyy tehokkuusluvussa.

4.2 Keskeytysaika

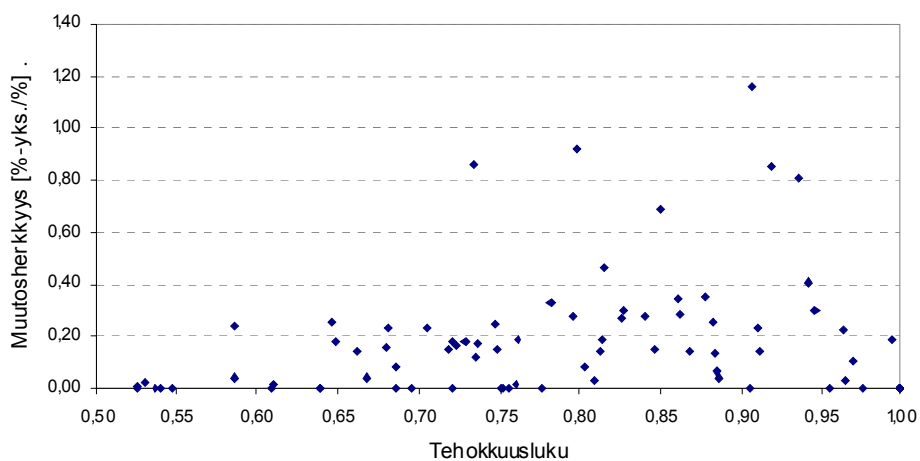
DEA-mallin käyttöönoton yhteydessä erityistä problematiikkaa on aiheuttanut keskeytysaikojen käsittely. Aluksi keskeytysaika oli kontrolloimaton panostekijä. Sitten se muutettiin kontrolloiduksi panostekijäksi, jolloin se oli rinnastettavissa operatiivisiin kuluihin. Nyt on jälleen palattu alkuperäiseen malliin, jossa keskeytysaika on kontrolloimaton panostekijä. Perusteluna tälle on, että sähkömarkkinalaissa jakeluverkkoyhtiön edellytetään toimivan kustannustehokkaaksi. Tehottomasti toimiva yhtiö ei voi päästä pinteestä sähkön laatua parantamalla, ainoastaan operatiivisten kulujen katsotaan olevan yhtiön kontrolloitavissa. Käytännössä keskeytysajan muutoksilla on hyvin vaihteleva vaikutus tehokkuuteen. Vuoden 1999 tunnusluvuilla 40 yhtiöllä ei keskeytysajan muuttaminen vaikuta yhtiön tehokkuuteen. Toisaalta joillakin yhtiöillä keskeytysajalla on suurempi vaikutus tehokkuuteen kuin kuluilla. /16/

Keskeytysajalle lasketut tehokkuuden muutosherkkyydet on esitetty suuruusjärjestyksessä kuvassa 4.2. Positiivisella asteikolla olevat pylväät kuvaavat sitä, miten tehokkuusluku kasvaa yhtiöittäin, kun keskeytysaika lyhennetään yhdellä prosentilla. Negatiivisella asteikolla olevat pylväät kuvaavat vastaavasti sitä, miten tehokkuusluku pienenee, kun keskeytysaika kasvatetaan yhdellä prosentilla. Noin 40 yhtiöllä keskeytysajan muuttaminen ei vaikuta välittömästi tehokkuuslukuun. /16/



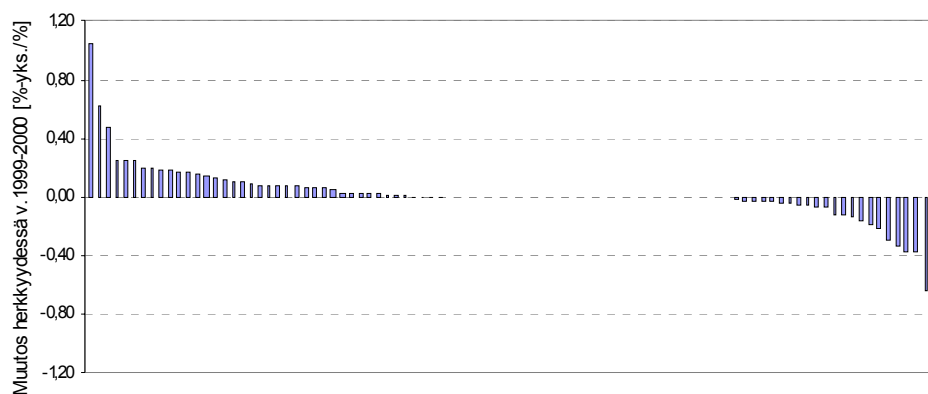
Kuva 4.2. Keskeytysajan muutosherkkydet suuruusjärjestyksessä. Kuvasta nähdään, ettei keskeytysajan kasvattaminen tai lyhentäminen vaikuta tehokkuuteen n. 40 yhtiöllä. /16/

Keskeytysajan vaikutus tehokkuuteen siis vaihtelee yhtiöiden välillä hyvinkin voimakkaasti. Kuvassa 4.3 on esitetty keskeytysajan lyhentämisen muutosherkkyden ja tehokkuusluvun välinen yhteys. Yhtiön tehokkuusluvun ja muutosherkkyden välillä ei ole nähtävissä selvää riippuvuutta.



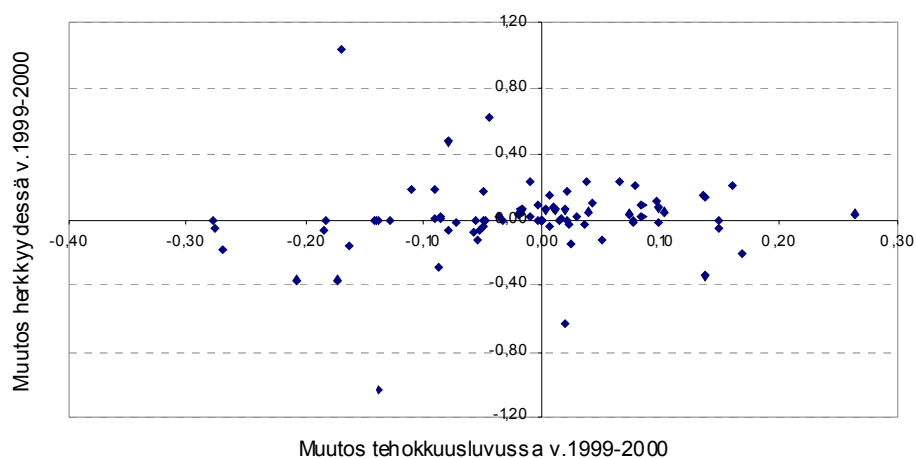
Kuva 4.3. Keskeytysajan muutosherkkyden ja tehokkuusluvun välinen yhteys. /16/

Keskeytysajan muutosherkkydessä tapahtuu myös vuosittaista vaihtelua yhtiön sisällä. Kuvassa 4.4 on esitetty herkkyiden vaihtelu vuosien 1999 ja 2000 välillä.



Kuva 4.4 Keskeytysajan muutosherkkyiden vaihtelu vuosien 1999-2000 välillä. /16/

Kuvasta 4.5. nähdään, ettei keskeytysajassa tapahtuneilla herkkyiden muutoksilla ole selvää korrelaatiota tehokkuusluvussa tapahtuneisiin muutoksiin.



Kuva 4.5 Herkkyksien muutosten ja tehokkuusluvun muutosten välinen yhteys. /16/

4.2.1 Keskeytysten hinta

Koska keskeytysaika vaikuttaa tehokkuuslukuun ja toisaalta tehokkuusluku vaikuttaa yhtiön sallittuun tuottoon, voidaan keskeytysajalle määrittää hinta [€/as,h] vertaamalla saavutettua taloudellista hyötyä keskeytysajan lyhenemiseen. Keskeytyksen hinnan määrittäminen tapahtuu yhtälön (4.1) mukaisesti.

$$H_{kesk} = \frac{\Delta h \cdot kulut}{\Delta kesk} \quad (4.1)$$

missä

H_{kesk} = keskeytyksen hinta

Δh = muutos tehokkuudessa

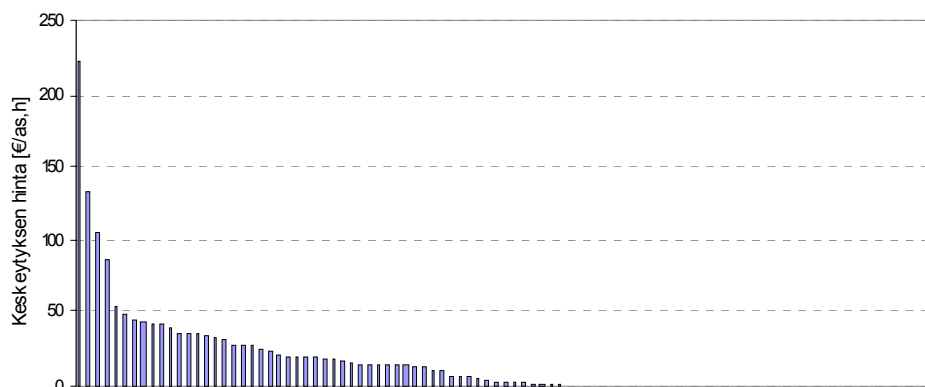
$\Delta kesk$ = muutos keskeytysajassa

Tarkastellaan esimerkiksi yhtiötä, jonka kokonaiskeskeytysaika on 60 000 as,h/a, operatiiviset kulut 3 M€ ja tehokkuusluku 0,700. Tarkasteltavan yhtiön kokonaiskeskeytysaika lyhenee 5 % eli 3000 as,h/a, jonka seurauksena tehokkuusluku kasvaa 2 prosenttiyksikköä 0,720:een. Tehokkuuden paranemisen seurauksena yhtiön sallittu tuotto kasvaa $0,02 \times 3 \text{ M€} = 60\,000 \text{ €}$. Keskeytyksen hinnaksi saadaan esimerkin tapauksessa:

$$H_{kesk} = \frac{60\,000 \text{ €}}{3000 \text{ as,h}} = 20 \frac{\text{€}}{\text{as,h}}$$

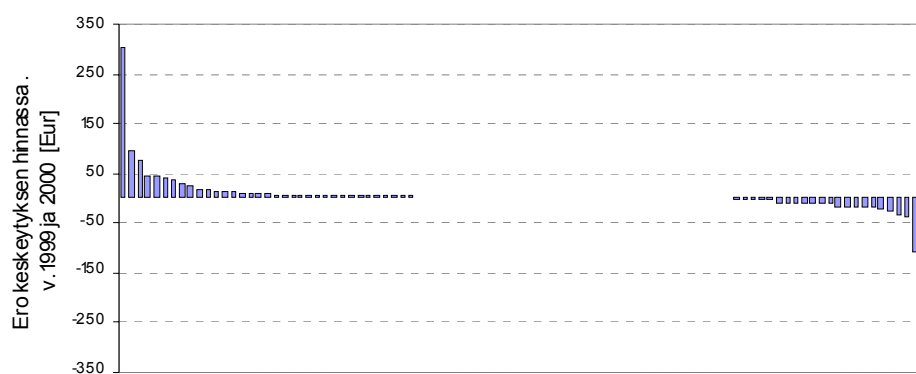
Koko yhtiöjoukkoa tarkasteltaessa noin 40 yhtiön kohdalla keskeytysajan lyhentämisellä tai kasvattamisella ei ollut tehokkuuslukuun välitöntä vaikutusta. Kyseisten yhtiöiden keskeytyksen hinnaksi muodostuu tällöin 0 €/as,h. Keskeytysten hinnan vaihtelu yhtiöjoukossa on hyvin suurta, mikä ilmenee kuvasta 4.6, jossa on esitetty keskeytysten hinnan jakauma. Suurin keskeytyksen hinta vuoden 1999

tunnusluvulla laskettuna oli 223 €/as,h ja keskiarvo koko yhtiöjoukolle on 16,2 €/as,h. /16/



Kuva 4.6. Keskeytyshintojen jakauma. /16/

Keskeytysten hinnassa tapahtuu myös vuosittaista vaihtelua, joka ilmenee kuvasta 4.7. Yhtiökohtaisesti tarkasteltuna keskeytyksen hinnan muutos on ollut keskimäärin ± 15 €/as,h. /16/



Kuva 4.7. Keskeytyshintojen muutos vuosien 1999 ja 2000 välillä. /16/

Edellä esitetyistä tuloksista havaitaan, että ohjausvaikutukset eri yhtiöiden ja vuosien välillä poikkeavat suuresti. Tämä vaikeuttaa merkittävästi tehokkuusmittauksen

valtakunnallista uskottavuutta, sillä jollakin alueella keskeytysten hinta voi olla jopa yli 200 €/as,h, kun toisilla alueilla keskeytyksillä ei ole mitään vaikutusta tehokkuuteen. Käytännössä tämä voisi johtaa pitkällä aikavälillä merkittäviin eroihin sähkönjakelun käyttövarmuudessa samantyyppisissäkin olosuhteissa. Yhden yhtiön vuotuisten ohjausvaikutusten suuri vaihtelu vaikeuttaa merkittävästi investointisuunnittelua, joten verkoston pitkäjänteinen taloudellinen kehittäminen on ongelmallista.

4.3 Tehokkaat ja supertehokkaat yhtiöt

Ongelmallisia tehokkuusmittauksen kannalta ovat ne yhtiöt, joilla lähtötietojen muutosten vaikutus tehokkuuslukuun on hyvin pieni. Tehottomilla yhtiöillä lähtötietojen muuttamisella on useimmiten selvä vaikutus tehokkuuslukuun. Tehokkailta yhtiöillä sitä vastoin useat tekijät saattavat olla täysin merkityksettömiä tehokkuusmittauksen kannalta. Tässä tarkastelussa tekijä on luokiteltu täysin merkityksettömäksi, mikäli sen kymmenkertaistaminen tai jakaminen kymmenenteen osaan ei vaikuta yhtiön tehokkuuteen. Suoritettaessa herkkyyksianalyysiä tehokkaille yhtiöille saatiin seuraavia tuloksia: /16/

- *Operatiivisten kulujen* 10-kertaistaminen ei näy tehokkuusluvussa 6 yhtiöllä.
- *Keskeytysajan* 10-kertaistaminen ei näy tehokkuusluvussa 9 yhtiöllä.
- *Energia-arvon* pienentäminen $1/10$ -osaan ei näy tehokkuusluvussa 19 yhtiöllä.
- *Verkkopituuden* pienentäminen $1/10$ -osaan ei näy tehokkuusluvussa 10 yhtiöllä.
- *Käyttäjämäärän* pienentäminen $1/10$ -osaan ei näy tehokkuusluvussa 19 yhtiöllä.

Näiden lisäksi nykyisen kannustinjärjestelmän kannalta ongelmallisiksi muodostuvat yleisesti ottaen kaikki tehokkaat yhtiöt, koska kannustinlisässä ei oteta huomioon supertehokkuuksia, eli yli yhden meneviä tehokkuuslukuja. Mikäli tehokas yhtiö pyrkii edelleen tehostamaan toimintaansa pienentämällä operatiivisia kuluja, sen kannustinlisä pienenee. Tällöin mallin ohjausvaikutus on täysin väärän suuntainen.

4.4 Mahdollisia ratkaisukeinoja ongelmiin

Muutosherkkyyksien vaihtelua on mahdollista tasoittaa asettamalla tekijöiden painokertoimille kohdassa 3.5 kuvattuja rajoituksia. Tällöin eri tekijöiden vaikutusten ennakoitavuuden odotetaan parantuvan. Rajoitusten asettaminen on kuitenkin ongelmallista, koska on hyvin vaikea löytää sellaiset rajoitukset, jotka kohtelevat tasavertaisesti näin suuren yhtiöjoukon kaikkia yhtiöitä.

Painokertoimille asetettavilla rajoituksilla olisi mahdollista myös poistaa merkityksettömät tekijät mallista. Jos esimerkiksi verkkopituuden painokertoimelle asetetaan jokin absoluuttinen alaraja, tarkoittaa se sitä, että kyseisellä tekijällä on selvä vaikutus yhtiön tehokkuuteen.

Haettaessa ratkaisua kannustinlisän vääristymään tehokkaiden yhtiöiden kohdalla, ei pelkästään mallin asetusten muuttaminen riitä. Tällöin tulee myös miettiä uudelleen kannustinlisän muodostumisen periaatteita.

5 Analysointijärjestelmä

Analysointijärjestelmän kehittämisessä ensimmäinen vaihe oli kartoittaa järjestelmältä vaadittavat ominaisuudet. Kun vaaditut ominaisuudet olivat tiedossa, oli seuraava vaihe selvittää käytettävien laskentamenetelmien teoreettiset perusteet sekä käytettävät ratkaisumallit. Tämän jälkeen tuli valita käyttökelpoisin toteutustapa järjestelmälle ja toteuttaa asetetut vaatimukset täyttävä järjestelmä. Järjestelmästä saatavien tulosten luotettavuudesta oli myös ensi arvoisen tärkeää varmistua.

5.1 Järjestelmältä vaadittavat ominaisuudet

Analysointijärjestelmän kehittämisen lähtökohtana olivat saadut kokemukset OnFront- ja EMS-ohjelmistoilla tehdyistä laskelmista. Näillä ohjelmistoilla on laskettu suurin osa kohdassa 4 esitetyistä tuloksista. Vaikkakin kyseiset ohjelmistot ovat tehokkaita ja laajalti käytössä olevia DEA-laskentaohjelmistoja, havaittiin niiden ominaisuudet riittämättömiksi tämän tutkimushankkeen tarkoituksiin.

Ensimmäiseksi vaadittavista ominaisuuksista tuli esille herkkyyshanalyysi. Kohdan 4.2 tulokset on saatu varioimalla yhden yhtiön yhtä tekijää kerrallaan ja tutkimalla sen vaikutusta tehokkuuslukuun. Koska käytössä oleviin ohjelmistoihin kyseinen alkuarvon muutos pitää tehdä käsin ja erikseen jokaisella laskentakierroksella, on laskenta erittäin työlästä. Koska tuloksista haluttiin sellaisia, että herkkyyshanalyysissä voidaan käyttää erilaisia marginaaleja, oli tehokkuuslukuja käytännössä laskettava jokaisen tekijän kohdalla useilla erilaisilla lähtötietojen arvoilla. Kun tämä laskenta suoritettiin kaikille yhtiöille kahden vuoden lähtöarvoilla, oli laskentaurakka valtava.

Järjestelmään tarvittiin siis toiminto, joka suorittaa laskennan erilaisilla lähtötietojen arvoilla ja tarjoaa käyttäjälle laskennan tuloksista saatavan informaation. Vaikka herkkyyshanalyysin tulokset saadaankin laskemalla, haluttiin järjestelmään

mahdollisuus piirtää myös kuvassa 3.5 esitetyn kaltaisia tehokkuuskäyriä, joista nähdään erilaisten muutosten vaikutus mallin käyttäytymiseen.

Kohdassa 4.4 on esitetty, että asettamalla DEA-mallin painokertoimille rajoituksia, voitaisiin päästä eroon muutosherkkyyksien suuresta vaihtelusta. Järjestelmään haluttiin tämän perusteella mahdollisuus asettaa painokertoimille rajoituksia kohdassa 3.5 esitellyillä tavoilla.

5.2 Käytännön toteutus

Järjestelmän toteutuksessa päätettiin käyttää Visual Basic –ohjelmointikieltä sekä Lindo Systemsin kehittämää *Lindo Api*:a, joka suorittaa tarvittavan lineaarisen optimoinnin. Ohjelmointikieleksi valittiin Visual Basic, koska sillä saadaan toteutettua kohtuullisen helposti graafinen käyttöliittymä sekä yhteydet Excel-taulukkolaskentaohjelmaan tietojen lukua ja tulosten tallennusta varten. Mahdollista olisi ollut myös käyttää yleisesti tehokkaampana pidettyä c-kieltä, mutta koska varsinaisesta laskennasta huolehtii erillinen, ohjelmointikielestä riippumaton proseduuri, ei ohjelmointikielen tehokkuudella ole kovin suurta merkitystä.

5.2.1 Lindo Api

Lindo Api on kokoelma lineaaristen optimointitehtävien ratkaisuun kehitettyjä funktioita. Nämä funktiot on toteutettu kutsumalla sopivin parametrein dynaamisia linkkikirjastoja (Dynamic Link Library, DLL), jotka voidaan liittää osaksi Windows-ohjelmaa. Kyseessä on kaupallinen tuote, mutta tähän tarkoitukseen riitti erinomaisesti siitä tarjolla oleva ilmainen kokeiluversio.

Lindo Api sisältää funktioita optimointimallin syöttämiseen ja muokkaamiseen, tietojen lukuun ja kirjoittamiseen, virheiden käsittelyyn, parametrien syöttämiseen ja lukemiseen, optimoinnin suorittamiseen ja tulosten lukemiseen sekä muistin hallintaan. *Lindo Api*:ssa on mahdollisuus suorittaa lineaarinen optimointi käyttäen primaalista tai duaalista simplex-algoritmia. Lisäksi siihen on mahdollista hankkia

Barrier-ratkaisin, joka käyttää barrier- tai sisäpistemenetelmää, joita pidetään simplexiä tehokkaampana erityisesti hyvin suurten optimointiongelmien ratkaisemisessa. Lineaarisen optimoinnin lisäksi *Lindo Api*:lla voidaan ratkaista kvadratiivisiä optimointitehtäviä sekä suorittaa kokonaislukuoptimointia. /17, 18/

Suoritettaessa lineaarista optimointia *Lindo Api*:lla, luodaan ensin optimointiympäristö käyttäen *LScreateEnv* -funktiota. Optimointiympäristö sisältää kaikkia optimointimalleja koskevat tiedot. Optimointiympäristöön puolestaan luodaan yksi tai useampia optimointimalleja käyttäen funktiota *LScreateModel*. Optimointimallit sisältävät kyseisiä malleja koskevat tiedot ja parametrit. Kun optimointimallit on luotu, syötetään optimoinnissa tarvittavat lähtötiedot. Mikäli lähtötiedot sijaitsevat muistissa, käytetään *LSloadLPData* -funktiota, jos tiedot ovat tiedostossa, luetaan ne sieltä käytetystä tiedostomuodosta riippuen joko *LSreadLINDOFile* tai *LSreadMPSFile* -funktiolla. Kun tarvittavat lähtötiedot on syötetty, suoritetaan optimointi halutulla menetelmällä käyttäen funktiota *LSoptimize*. Tavoiteyhtälön optimaalinen arvo luetaan funktiolla *LSgetObjective*. Primaali- ja duaalimallien kertoimet puolestaan luetaan käyttäen funktioita *LSgetPrimalSolution* ja *LSgetDualSolution*. Primaalimallin kertoimet ovat painokertoimia ja duaalimallin kertoimet puolestaan osallistumiskertoimia, joiden perusteella myös vertailuyhtiöt löydetään. Duaalimallissa olevat slack- eli pelivaramuuttujat saadaan luettua funktiolla *LSgetReducedCosts*. Primaalimallin rajoiteyhtälöiden oikean puolen arvot voidaan lukea funktiolla *LsgetSlacks*, näitä arvoja voidaan käyttää esimerkiksi tarkasteltaessa painokertoimien suhteellisten rajoitusten sitovuutta. Kun optimointi on suoritettu ja tulokset luettu, vapautetaan optimointiin varattu muisti funktiolla *LSdeleteEnv*. /18/

5.2.2 Tietojen luku ja tulosten tallennus

Koska tehokkuuslaskennan lähtöarvojen syöttäminen onnistuu parhaiten taulukkomuodossa, on kyseinen toiminto toteutettu käyttäen apuna Excel-

taulukkolaskentaohjelmaa. Kun käyttäjä on tallentanut lähtötiedot Excel-taulukkoon, luetaan ne järjestelmään käyttäen DAO-rajapintaa (Data Access Objects). Laskennasta saatavat tulokset on mahdollista tallettaa niin ikään Excel-taulukoksi. Analysointijärjestelmässä tiedot esitetään kuvassa 5.1 näkyvässä taulukkomuodossa.

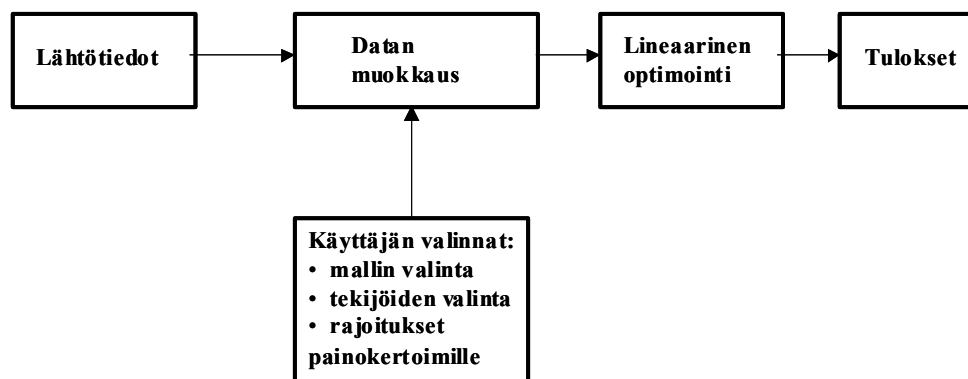
	<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu	<input type="checkbox"/> kontrolloitu	<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu	<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu	<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu	<input type="checkbox"/> kontrolloitu	
	panos	panos	tuotos	tuotos	tuotos	kaapelointiaste	
	nimi	kulut	keskeytykset	energia	verkkopituus	käyttäjä	kaapelointiaste
1	Alajärven Sähkö O	4186	9601	8321	824	4583	1,3
2	Asikkalan Voima O	3864	12203	6182	896	5531	4,28
3	Ekenäs Energi	5503	3019	8453	667	6024	77,28
4	Enontekiön Sähkö	3901	7599	3238	671	1504	0,2
5	Espoon Sähkö Oyj	93586	257043	189732	5076	115137	36,67
6	Esse Elektro-Kraft	3266	4430	5292	851	3414	0,49
7	Etelä-Savon Energ	13604	21139	30709	821	21681	31
8	Etelä-Suomen Ene	10525	22972	17386	1758	9988	4,77
9	Forssan Energia O	9172	11202	19121	736	9816	37,86
10	Fortum Sähköniaki	194845	666932	479193	48901	277615	5,96

Kuva 5.1 Analysointijärjestelmän lähtöarvojen esittäminen.

Excel-taulukon ensimmäisellä rivillä sijaitsevat tekijöiden nimet ja ensimmäisellä sarakkeella puolestaan yhtiöiden nimet. Kun arvot on haettu taulukosta, voi käyttäjä vapaasti valita tekijöiden merkityksen, tekijät voivat olla kontrolloimattomia tai kontrolloituja panoksia tai tuotoksia. Lisäksi voidaan ottaa mukaan kuvan 5.1 viimeisessä sarakkeessa näkyvä kaapelointiaste, joka ei vaikuta millään tavoin laskentaan, mutta antaa lisäinformaatiota vertailuyhtiöistä. Käyttäjällä on mahdollisuus käyttöliittymästä käsin muuttaa arvoja vapaasti, joten muutoksia ei tarvitse välttämättä tehdä Excel-taulukkoon.

5.2.3 Laskennan eteneminen

Laskentaprosessi etenee yksinkertaistetusti kuvan 5.2 esittämällä tavalla; lähtötietojen lukemisen jälkeen muokataan ne sopivaan muotoon ja syötetään *Lindo Api*:in, joka suorittaa lineaarisen optimoinnin ja josta lopputulokset luetaan.



Kuva 5.2 Laskentaprosessin eteneminen järjestelmässä.

Lindo api:in syötetään optimoinnin lähtötiedot käyttäen matriiseja ja vektoreita. Esitettäessä lineaarinen optimointitehtävä matriiseilla, muodostavat rajoiteyhtälöiden kertoimet yhden matriisin, tavoitefunktion kertoimet sekä rajoiteyhtälöiden oikean puolen arvot esitetään vastaavasti vektoreissa. Otetaan esimerkiksi tilanne, jossa on kaksi panosta, joista toinen kontrolloitu ja toinen kontrolloimaton, kolme tuotosta ja K yksikköä. Tämä siis vastaa nykyistä verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittausmallia. Tällöin DEA-malli voidaan esittää yhtälömuodossa seuraavanlaisesti:

$$\text{Max } h_0 = \sum_{i=1}^3 u_i \cdot y_{i0} - v_f \cdot x_{f0} + c_0 \quad (5.1)$$

s.e.

$$\sum_{i=1}^3 u_i \cdot y_{ik} - v \cdot x_k - v_f \cdot x_{fk} + c_0 \leq 0 \quad ; k=1, \dots, K \quad (5.2)$$

$$v_0 \cdot x_0 = 1 \quad (5.3)$$

missä

h_0	= yksikön tehokkuusluku
y	= tuotos
u	= tuotoksen painokerroin
x	= kontrolloitu panos
v	= kontrolloidun panoksen painokerroin
x_f	= kontrolloimaton panos
v_f	= kontrolloimattoman panoksen painokerroin
c_0	= vapaa muuttuja

Sama voidaan esittää matriisimuodossa seuraavasti:

$$\mathbf{h}_0 = [0 \quad -x_{f0} \quad y_{10} \quad y_{20} \quad y_{30} \quad 1] \quad (5.4)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -x_{11} & -x_{f1} & y_{11} & y_{21} & y_{31} & 1 \\ -x_{12} & -x_{f2} & y_{12} & y_{22} & y_{32} & 1 \\ -x_{13} & -x_{f3} & y_{13} & y_{23} & y_{33} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{1K} & -x_{fK} & y_{1K} & y_{2K} & y_{3K} & 1 \\ x_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{b} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1]^T \quad (5.6)$$

$$\mathbf{c} = [\leq \quad \leq \quad \leq \quad \dots \quad \leq \quad =]^T \quad (5.7)$$

missä

\mathbf{h}_0	= tavoiteyhtälön kertoimet sisältävä vektori
\mathbf{a}	= rajoiteyhtälöiden kertoimet sisältävä matriisi
\mathbf{b}	= rajoiteyhtälöiden oikean puolen arvot sisältävä vektori
\mathbf{c}	= rajoitteiden tyytit logisina operaattoreina sisältävä vektori

Tavoitteena on, samoin kuin edellä, maksimoida tavoitefunktion arvo asetettujen rajoitusten puitteissa.

Koska rajoitematriisi saattaa kasvaa hyvinkin suureksi, käytetään sen esittämiseen hajamatriisitekniikka. Tällöin kyseisen matriisin esittämiseen käytetään kolmea vektoria; arvektori, sarakevektori sekä rivivektori. Arvektorissa esitetään matriisin nolasta poikkeavat arvot, sarakevektorissa puolestaan niiden arvektorin lukujen indeksit, jotka aloittavat uuden sarakkeen alkuperäisessä matriisissa. Rivivektori puolestaan kertoo millä rivillä mikäkin arvektorin luku sijaitsee. /18/

Kun lähtötiedot on muokattu edellä esitettyyn matriisimuotoon ja talletettu muistiin, voidaan ne syöttää Lindo api:in kohdassa 5.2.1 esitettyllä tavalla. Laskennan lähtötietoina syötetään muuttujien ja rajoiteyhtälöiden määrä, rajoiteyhtälöt, tavoitefunktion kertoimet, muuttujien ylä- ja alarajat, optimoinnin suunta, rajoiteyhtälöiden oikean puolen arvot sekä rajoitteiden tyypit. Rajoiteyhtälöt syötetään käyttäen edellä esitettyä hajamatriisitekniikkaa.

Laskennassa käytettäväksi DEA-malliksi on valittu yhtälöissä (3.15) - (3.19) esitetty primaalimalli. Yleisesti duaalimallia pidetään nopeampana ratkaista, mutta koska järjestelmään haluttiin mahdollisuus asettaa painokertoimille rajoituksia, täytyy käyttää mallia, jossa nämä kertoimet ovat mukana. Lineaarinen optimointi puolestaan suoritetaan käyttäen kohdassa 3.7.1 kuvattua primaalista simplex-menetelmää.

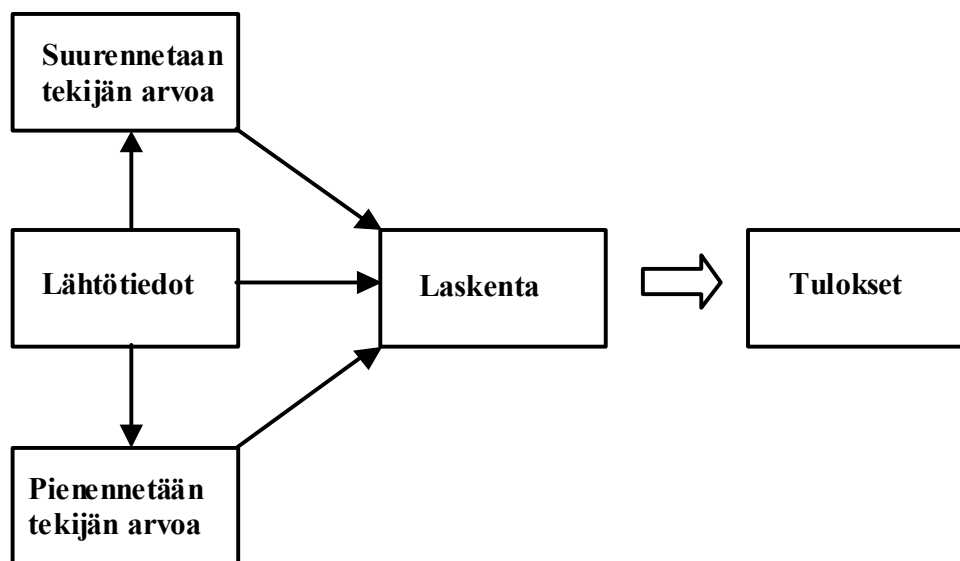
Tulokset luetaan käyttäen kohdassa 5.2.1 kuvattuja funktioita. Tuloksina saadaan tavoitefunktion arvon lisäksi primaali- ja duaalimallien muuttujien arvot. Tässä tapauksessa tavoitefunktion arvo on yhtiön tehokkuusluku, primaalimallin muuttujien arvot ovat painokertoimia ja duaalimallin muuttujien arvot puolestaan osallistumiskertoimia. Lisäksi pelivaramuuttujat saadaan duaalimallin ratkaisun kautta.

Kun laskenta suoritetaan kaikille yhtiöille, tarvitsee laskentakierrosten välillä vaihtaa ainoastaan tavoitefunktion kertoimet, sekä viimeisen rajoiteyhtälön (5.3) kertoimet. Lisäksi, mikäli halutaan selvittää tehokkaiden yhtiöiden supertehokkuudet, täytyy tarkasteltavan yhtiön arvot poistaa rajoiteyhtälöistä.

5.2.4 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysillä määritetään yksittäisen tekijän vaikutus tarkasteltavan yhtiön tehokkuuteen. Käytännössä tämä tehdään varioimalla kyseisen tekijän arvoa ja pitämällä muiden tekijöiden arvot vakioina.

Analysointijärjestelmässä herkkyysanalyysi on toteutettu siten, että ensin suoritetaan normaali tehokkuuslukulaskenta, josta saadaan vertailukohdaksi alkuperäiset tehokkuusluvut. Tämän jälkeen otetaan yksi yhtiö kerrallaan tarkasteluun, tehdään tarkasteltavaan tekijään halutun suuruinen muutos ja lasketaan yhtiön tehokkuusluku. Kun verrataan tehokkuusluvussa tapahtunutta muutosta tarkasteltavaan tekijään tehtyyn muutokseen, saadaan tehokkuusluvun muutosherkkyys kyseisen tekijän suhteen. Koska muutosherkkyuden suuruus saattaa riippua muutoksen suunnasta, lasketaan muutosherkkydet sekä kasvattamalla, että vähentämällä tarkasteltavaa tekijää. Kuvassa 5.3 on esitetty herkkyysanalyysin suorittaminen yhdelle yhtiölle.



Kuva 5.3 Herkkyysanalyysin suorittaminen yhdelle yhtiölle.

Kun herkkyysanalyysillä on saatu määritettyä keskeytysajan muuttamisen aiheuttama tehokkuusluvun muutos [%-yksikköä / %], voidaan keskeytyksen hinta [€/as,h] määrittää kohdan 4.2.1 yhtälöllä (4.1).

5.2.5 Painokertoimien rajoitukset

Järjestelmässä on mahdollisuus asettaa painokertoimille rajoituksia kohdassa 3.5 esitetyillä tavoilla. Painokertoimien suhteelliset rajoitukset on toteutettu lisäämällä mallin rajoiteyhtälöihin vastaavat rajoitteet yhtälöiden (5.8) ja (5.9) esittämällä tavalla.

$$\alpha \cdot u_i + \beta \cdot u_j \leq 0 \quad (5.8)$$

$$\chi \cdot u_i + \gamma \cdot u_j \leq 0 \quad (5.9)$$

missä

u_i = tekijän i painokerroin

u_j = tekijän j painokerroin

$\alpha, \beta, \chi, \gamma$ = vakio

Käyttöliittymä painokertoimien suhteellisten rajoitusten asettamisen osalta on kuvan 5.4 mukainen. Kuvan esimerkissä on asetettu kahden tekijän painokertoimien suhteelliselle suuruudelle sekä ylä- että alaraja. Rajoituksia voidaan asettaa käyttäjän haluama määrä. Rajoitukset voivat olla joko molemminpuolin sitovia tai pelkkiä ylä- tai alarajoja.

painokertoimien suhteelliset rajoitukset

<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="keskeytykset"/>	≤	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="kulut"/>	<input type="button" value="Lisää rajoitteita"/>	<input type="button" value="poista rajoite"/>
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="kulut"/>	≤	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="keskeytykset"/>	<input type="button" value="Lisää rajoitteita"/>	<input type="button" value="poista rajoite"/>

Kuva 5.4 Näkymä käyttöliittymästä painokertoimien suhteellisten rajoitusten asettamisesta.

Kuvan 5.4 esimerkissä kulujen painokertoimen halutaan olevan vähintään 5- ja enintään 10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna. Samat rajoitukset voidaan esittää yhtälöillä (5.11) ja (5.12), kun määrätään, että tekijä i on kulut, tekijä j on keskeytysaika sekä vakiot $\alpha = -1$, $\beta = 5$, $\chi = 1$ ja $\gamma = -10$.

Painokertoimien absoluuttiset rajoitukset on toteutettu asettamalla mallia ratkaistaessa painokertoimille käyttäjän määräämät ylä- ja alarajat yhtälön (5.10) esittämällä tavalla.

$$\alpha \leq u_i \leq \beta \quad (5.10)$$

missä

u_i = tekijän i painokerroin

α, β = vakio

Normaalilanteessahan painokertoimet saavat vaihdella välillä $]0, \infty]$. Koska ratkaisua haettaessa täytyy muuttujille määrittää äärellinen vaihteluväli, on painokertoimien ylä- ja alarajat määritetty yhtälön (5.10) merkintöjä käyttäen $\alpha = 10^{-30}$ ja $\beta = 10^{30}$.

Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen on toteutettu kuten painokertoimien absoluuttinen rajoittaminen, mutta nyt rajoituksen suuruus riippuu rajoitettavan tekijän suuruudesta yhtälön (5.11) mukaisesti.

$$\frac{\alpha}{y_i} \leq u_i \leq \frac{\beta}{y_i} \quad (5.11)$$

missä

u_i = tekijän i painokerroin

y_i = tekijän i arvo

α, β = vakio

Tällöin rajoitus on erilainen jokaiselle tarkasteltavalle yhtiölle. Käyttäjälle rajoitus näkyy kuitenkin yhtälön (5.12) mukaisessa muodossa.

$$\alpha \leq u_i y_i \leq \beta \quad (5.12)$$

missä

u_i = tekijän i painokerroin

y_i = tekijän i arvo

α, β = vakio

Kuvassa 5.5 on esitetty näkymä järjestelmän käyttöliittymästä painokertoimien absoluuttisten rajoitusten sekä virtuaalisten tuotosten rajoitusten asettamisen osalta. Tässä esimerkissä keskeytysajan virtuaaliselle tuotokselle on asetettu alarajaksi 0,1 ja ylärajaksi 0,3.

Rajoite

Ei rajoitetta

Painokerroin

Virtuaalitekijä

Alaraja	Yläraja	Alaraja	Yläraja	Alaraja	Yläraja
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="0,1"/>	<input type="text" value="0,3"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu		<input type="checkbox"/> kontrolloitu		<input checked="" type="checkbox"/> kontrolloitu	
panos		panos		tuotos	

	nimi	kulut	keskeytykset	energia
1	Alajärven Sähkö O	4186	9601	83%
2	Asikkalan Voima O	3864	12203	61%
3	Ekenäs Energi	5503	3019	84%
4	Enontekiön Sähkö	3901	7599	32%

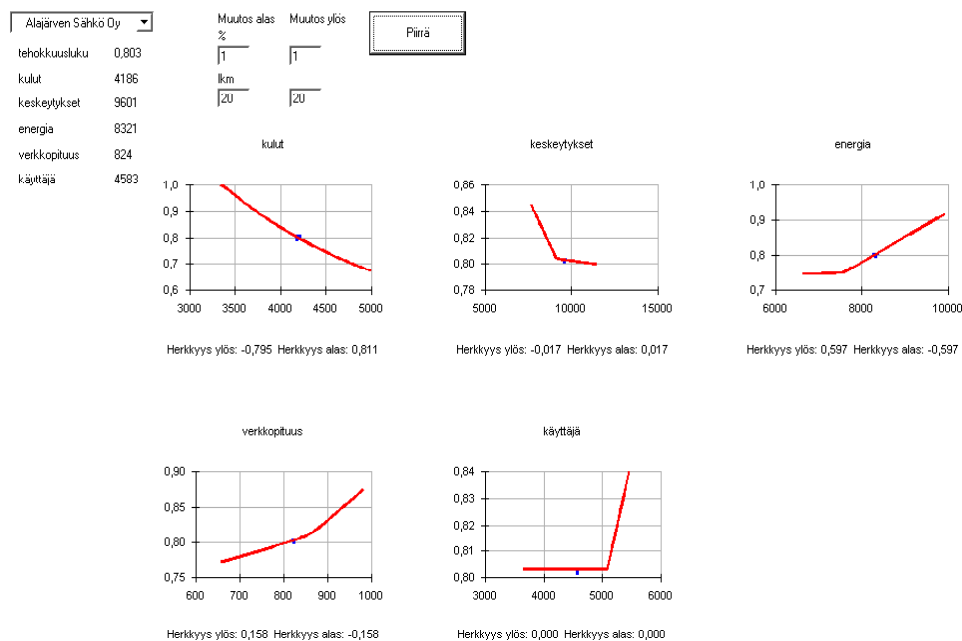
Kuva 5.5 Näkymä käyttöliittymästä painokertoimien absoluuttisten rajoitusten sekä virtuaalisten tuotosten rajoitusten asettamisen osalta.

5.2.6 Tehokkuuskäyrät

Tehokkuuskäyrän avulla voidaan havainnollistaa visuaalisesti yksittäisen tekijän vaikutus tarkasteltavan yhtiön tehokkuuteen. Tehokkuuskäyrän piirtämistä varten lasketaan yhtiön tehokkuusluku varioimalla tarkasteltavana olevaa tekijää ja pitämällä muiden tekijöiden arvot vakioina. Tarkasteltavan tekijän arvo piirretään kuvaajassa x-akselille ja tehokkuusluku y-akselille.

Tehokkuuskäyrien arvopisteiden määrittäminen tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin herkkyysanalyysi. Erona on se, että tässä tapauksessa muutoksia tehdään käyttäjän valitsema määrä molempiin suuntiin.

Analysointijärjestelmässä tehokkuuskäyrien muodostamiseksi käyttäjä valitsee yhtiön, jolle tehokkuuskäyrät halutaan piirtää sekä tekijöihin kerrallaan tehtävien muutosten suuruuden ja lukumäärän. Tehokkuuskäyrät piirretään tämän jälkeen valitun yhtiön kaikille tekijöille, kuten kuvassa 5.6 on esitetty.



Kuva 5.6 Näkymä analysointijärjestelmän tuottamista tehokkuuskäyristä.

5.2.7 Tehokkaan toimintapisteen etsiminen

Usein tehottoman yhtiön kohdalla kiinnostaa, kuinka paljon yhtiön tulisi kutakin tekijää parantaa tullakseen tehokkaaksi. Jokaisella tehottomalla yhtiöllä on kuitenkin hyvin suuri määrä erilaisia panos-tuotos-kombinaatioita, joilla yhtiö on tehokas. Tämän vuoksi onkin mahdotonta etsiä kaikkia näitä vaihtoehtoja, joilla yhtiö tulisi tehokkaaksi. Analysointijärjestelmään on toteutettu kaksi erityyppistä tehokkaan toimintapisteen etsimismenetelmää.

Eräs tehokas toimintapiste löytyy tehokkuusrintaman pisteestä, johon tarkasteltavaa yhtiötä verrataan. Kyseinen piste puolestaan saadaan selville vertailuyhtiöiden osallistumiskertoimien sekä panosten ja tuotosten perusteella. Vaihtoehtoisesti se voidaan selvittää myös slack-muuttujien sekä tehokkuusluvun perusteella.

Tarkastellaan duaalimallin rajoiteyhtälöitä (5.13) ja (5.14)

$$y_{0j} - \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{kj} + s_j^+ = 0 \quad ; j = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

$$\theta_0 x_{0i} - \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ki} - s_i^- = 0 \quad ; i = 1, \dots, m \quad (5.14)$$

Otetaan vielä huomioon määritelmä, jonka mukaan yhtiö on tehokas jos ja vain jos $\theta = 1$ ja kaikki slack-muuttujat ovat nollia. Tällöin tarkasteltava yhtiö on tehokas, mikäli yllä esitetyt rajoiteyhtälöt voidaan kirjoittaa yhtälöissä (5.15) ja (5.16) esitetyllä tavalla.

$$y_{0j} - \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{kj} = 0 \quad ; j = 1, \dots, n \quad (5.15)$$

$$x_{0i} - \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ki} = 0 \quad ; i = 1, \dots, m \quad (5.16)$$

Yhtiö pääsee siis tehokkaaksi kasvattamalla tuotokset ja pienentämällä panokset samansuuruisiksi vertailuyksikön kanssa. Yhtälöissä (5.17) ja (5.18) on esitetty kuinka tehokkaat arvot määräytyvät vertailuyhtiöiden perusteella.

$$y_{tehokas,j} = \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{kj} \quad ; j = 1, \dots, n \quad (5.17)$$

$$x_{tehokas,i} = \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ki} \quad ; i = 1, \dots, m \quad (5.18)$$

missä

$y_{tehokas}$ = tehokas tuotostekijän arvo

$x_{tehokas}$ = tehokas panostekijän arvo

Yhtälöissä (5.19) ja (5.20) on puolestaan esitetty, kuinka tehokas toimintapiste määräytyy slack-muuttujien ja tehokkuusluvun avulla.

$$y_{tehokas,j} = y_{0,j} + s_j^+ \quad ; j = 1, \dots, n \quad (5.19)$$

$$x_{tehokas,i} = \theta_0 x_{0,i} - s_i^- \quad ; i = 1, \dots, m \quad (5.20)$$

Analysointijärjestelmässä tämä toiminto on toteutettu ensin mainitulla tavalla. Käytännössä tällaisen vertailupisteen etsiminen ei kuitenkaan anna kovinkaan paljon informaatiota. Kyseessä on vain yksi tehokkuusrintaman piste, ja yhtä hyvin tarkasteltava yksikkö voi saavuttaa tehokkuuden jossain toisessa pisteessä.

Toinen järjestelmään toteutettu tehokkaan toimintapisteen etsimismenetelmä perustuu yksittäisen tekijän muuttamiseen. Tällöin muiden tekijöiden arvot pidetään vakioina ja muutetaan tarkasteltavan tekijän arvoa kunnes yhtiön tehokkuusluku on 1. Käytännössä laskennalle tarvitaan lopetusehdoksi myös maksimi laskentakierrosten lukumäärä, koska on mahdollista, ettei yhtiö saavutakaan tehokkuutta yksittäisen tekijän muutoksella.

5.3 Järjestelmän testaus

Jotta analysointijärjestelmän tuloksia voitaisiin käyttää hyväksi tutkimuksessa, tulee niiden olla erittäin luotettavia ja täsmätä muilla keinoilla saatujen tulosten kanssa. Käytännössä järjestelmän tulosten luotettavuus on todettu vertaamalla järjestelmästä saatavia tuloksia muilla laskentaohjelmistoilla saataviin tuloksiin. Testauksessa on käytetty luotettaviksi todettuja OnFront- ja EMS-ohjelmistoja, joilla myös suuri osa kohdan 4 tuloksista on laskettu. Tulosten testaamista on suoritettu jokaisessa järjestelmän kehitysvaiheessa. Tällöin on voitu todeta välittömästi, mikäli jokin järjestelmään lisätty ominaisuus vääristää lopputuloksia.

Painokertoimien rajoittamisen toimivuus nähdään myös tehokkuuslaskennasta saatavista optimaalisista painokertoimien arvoista. Mikäli nämä laskennassa käytetyt painokertoimet ovat asetettujen rajoitusten sisällä, toimii painokertoimien rajoittaminen toivotulla tavalla.

Järjestelmästä saatavien tulosten luotettavuutta voidaan jossain määrin arvioida myös yleisesti tunnettujen DEA-mallin ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi rajoitusten asettaminen painokertoimien suuruudelle aiheuttaa kohdassa 3.5 esitettyjä vaikutuksia.

6 Järjestelmästä saatavat tulokset ja niiden merkitys

Järjestelmästä saatavien tulosten tarkoituksena on antaa informaatiota malliin ja sen lähtöarvoihin tehtyjen muutosten vaikutuksesta tehokkuusmittaukseen sekä erityisesti sen ohjausvaikutuksiin. Tulosten avulla on pyritty löytämään selittäviä tekijöitä kohdassa 4 esitetyille tehokkuusmittauksen ongelmakohdille. Lisäksi kohdassa 4.4 esitettyjen ratkaisumallien käytännön vaikutuksia on voitu pohtia laskelmista saatavien tulosten avulla.

6.1 Tehokkuuslaskennasta saatavien tulosten merkitys

DEA-mallin ratkaisusta nähdään yhtiön tehokkuusluvun lisäksi primaali- ja duaalimallien muuttujat sekä rajoiteyhtälöiden oikean puolen arvot. Nämä tiedot puolestaan antavat optimaaliseen ratkaisuun liittyvää lisäinformaatiota. Primaalimallin ratkaisustahan saatiin painokertoimet sekä vapaa muuttuja ja duaalimallista puolestaan osallistumiskertoimet ja niitä vastaavat vertailuyhtiöt sekä pelivaramuuttujat.

6.1.1 Tehokkuusluku

Oleellisin tehokkuuslukulaskennasta saatava tulos on luonnollisestikin tehokkuusluku. Se kertoo, onko yhtiö tehokas vai tehoton. Lisäksi tehokkuusluvusta nähdään suoraan tehottoman yhtiön toiminnan tehostamisen tarve. Mikäli laskennassa käytetään supertehokkuusmallia, pystytään tehokkuusluvun perusteella asettamaan myös tehokkaat yhtiöt tehokkuusjärjestykseen. Ilman supertehokkuusmallia kaikkien tehokkaiden yhtiöiden tehokkuusluku on 1.

Järjestelmä tarjoaa käyttäjälle myös tehokkuuslukujen keskiarvon sekä tehokkaiden yhtiöiden lukumäärän. Näiden tietojen perusteella voidaan nopeasti päätellä muutosten vaikutus yhtiöiden keskimääräiseen tehokkuuteen, menemättä tarkasteluissa kuitenkaan yksittäisten yhtiöiden tasolle.

6.1.2 Painokertoimet ja virtuaaliset tuotokset

Tehokkuusluku ei yksistään kerro sitä, kuinka tarkasteltavan yhtiön tehokkuus muodostuu. Jokin yhtiö saattaa esimerkiksi tulla tehokkaaksi muista poikkeavan panos-tuotos-rakenteensa johdosta. Yhtiön tehokkuuden rakenteesta voidaan päästä selville tarkastelemalla painokertoimia.

Painokertoimien perusteella voidaan päätellä, minkälaisella painoarvolla mikäkin tekijä on mukana tehokkuuden muodostamisessa. Painokertoimien absoluuttinen suuruus ei tosin vielä kerro kovinkaan paljon, koska se riippuu kyseistä kerrointa vastaavan tekijän suuruudesta. Huomattavasti informatiivisempi luku onkin virtuaalinen tekijä, eli tekijän ja sitä vastaavan painokertoimen tulo.

Virtuaalisten panosten summa on panosorientoituneessa mallissa aina 1. Tällöin virtuaalisesta panoksesta nähdään suoraan, millä osuudella kukin panostekijä osallistuu tehokkuuden muodostamiseen. Virtuaalisten tuotosten tapauksessa virtuaalituotosten sekä vapaan muuttujan (c_0) summa on tarkasteltavan yhtiön tehokkuusluku. Tämän perusteella voidaan määrittää myös tuotostekijöiden osuus tehokkuuden muodostamisessa.

Vapaan muuttujan arvo antaa myös tietoa tarkasteltavan yhtiön skaalatuotoista. Mikäli kyseinen muuttuja on negatiivinen, ovat kyseessä paikallisesti laskevat skaalatuotot, jos muuttuja puolestaan on positiivinen ovat kyseessä paikallisesti nousevat skaalatuotot.

6.1.3 Vertailuyhtiöt

Koska duaalimallin rajoitusten mukaisesti kaikkien vertailujoukon yhtiöiden osallistumiskertoimien (λ) on oltava nollaa suurempia, voidaan ajatella, että kaikki yhtiöt osallistuvat vertailuyhtiön muodostamiseen. Käytännössä kuitenkin useimpien

yhtiöiden osallistumiskertoimet ovat hyvin lähellä nollaa, jolloin vertailuyhtiöt löydetään etsimällä selvästi nollasta poikkeavat osallistumiskertoimien arvot.

Vertailuyhtiöiden katsotaan olevan yhtiöitä, jotka toimivat tehokkaasti samankaltaisissa olosuhteissa kuin tehoton vertailtava yhtiö. Tällöin oletetaan, että tehoton yhtiö kykenee tehostamaan toimintansa vertailuyhtiöiden tasolle. Kiinnostavaa onkin, toimivatko vertailuyhtiöt samankaltaisissa olosuhteissa vertailtavan yhtiön kanssa. Tämän vuoksi järjestelmässä on mahdollisuus tuoda mukaan tuloksiin jokin suure, joka ei vaikuta tehokkuuslaskentaan millään tavoin, mutta joka antaa lisäinformaatiota yhtiön toimintaympäristöstä. Tällaisena suurena on näissä laskelmissa käytetty kaapelointiastetta, joka kertoo melko suoraan, onko tarkasteltavana kaupunki- vai maaseutuyhtiö. Kun lasketaan vertailuyhtiöiden osallistumiskertoimilla painotettu kaapelointiasteiden keskiarvo, nähdään verrataanko maaseutuyhtiöitä toisiin maaseutuyhtiöihin ja vastaavasti kaupunkiyhtiöitä toisiin kaupunkiyhtiöihin.

6.2 Herkkyysanalyysin tulosten merkitys

Herkkyysanalyysin tuloksista nähdään miten yksittäisen tekijän muuttaminen vaikuttaa yhtiön tehokkuuteen ja kuinka mallin ominaisuuksiin ja lähtötietoihin tehtävät muutokset vaikuttavat herkkyysiin. Herkkyysanalyysin tuloksista voidaan siis päätellä hyvin tehokkuusmittauksen aiheuttamat ohjausvaikutukset. Jos esimerkiksi tuotoksen A kasvattamisella on huomattavasti suurempi vaikutus tehokkuuteen kuin tuotoksen B kasvattamisella, pyrkivät yritykset varmastikin kasvattamaan tuotosta A enemmän kuin tuotosta B.

Herkkyysanalyysien perusteella löydetään myös tekijät, jotka eivät vaikuta mitenkään yhtiön tehokkuuteen, eli tekijät, joiden herkkyys on nolla. Jos malli toimisi ohjausvaikutusten näkökulmasta ajateltuna optimaalisesti, ei tällaisia tekijöitä olisi lainkaan. Optimaalisessa tilanteessa myös eri tekijöiden sekä yhtiöiden välillä

ilmenevät herkkyyksien erot olisivat selitettävissä ja perusteltavissa. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, kuten kohdassa 4 esitetyistä tuloksista voidaan päätellä.

Kun malliin tehdään muutoksia, esimerkiksi asetetaan painokertoimille rajoituksia, nähdään näiden rajoitusten vaikutus nopeasti herkkyyksien keskiarvosta, keskihajonnasta ja nollaherkkyyksien määrästä.

6.2.1 Keskeytysten hinta

Verkoston kehittämisen kannalta keskeytysten hinta on hyvin merkittävä suure. Riittävän korkea keskeytysten hinta luo yhtiöille paineita pitää sähkönjakeluverkon luotettavuus hyvänä ja painostaa nopeaan toimintaan vikatilanteissa. Toisaalta, jos keskeytysten hinta on liian korkea, saattaa se ajaa yhtiöt yli-investointeihin. Liian matala keskeytysten hinta puolestaan saattaa aiheuttaa tilanteen, jossa yhtiö pyrkii säästöihin sähkönjakelun luotettavuuden kustannuksella.

Tämän vuoksi onkin tärkeää, että malliin tehtävien muutosten vaikutus keskeytysten hintaan nähdään järjestelmästä nopeasti ja luotettavasti. Koska keskeytysten hinta ei riipu suoraan keskeytysajan muutosherkkydestä, ei pelkän herkkyyksianalyysin perusteella voida päätellä muutosten kokonaisvaikutusta tehokkuusmittauksen ohjausvaikutuksiin.

6.3 Painokertoimien rajoittamisen vaikutukset tuloksiin

Kohdassa 4.4 on esitetty tehokkuusmittauksen ongelmiin ratkaisuksi painokertoimien rajoittamista. Painokertoimien rajoitusten tehoa on arvioitu lähinnä herkkyyksianalyysissä sekä keskeytysten hinnoissa näkyvien vaikutusten kautta. Herkkyyksianalyysissä suoritettaessa on käytetty supertehokkuus-mallia, jolloin on voitu arvioida myös tehokkaiden yhtiöiden kohdalla tapahtuvia muutoksia. Koska

tässä diplomityössä pääpainona oli kehittää analysointijärjestelmä jatkotutkimuksia silmälläpitäen, ei tässä yhteydessä ole pohdittu tulosten käytännön merkitystä kovin syvällisesti.

6.3.1 Painokertoimien suhteellinen rajoittaminen

Koska suurimpana ongelmana tehokkuusmittauksessa on nähty keskeytysajan käsittely, asetetaan rajoitukset näissä tarkasteluissa koskemaan nimenomaan keskeytysajan painokerrointa. Rajoituksia voidaan asettaa myös muille tekijöille, jolloin merkityksettömien tekijöiden määrä saadaan vähenemään. Koska mallin ainoa kontrolloitava panostekijä on operatiiviset kulut, on kulujen painokerroin v_1 kaikilla yhtiöillä nollasta poikkeava. Tällöin kulujen painokertoimesta saadaan hyvä vertailukohta keskeytysajan painokertoimelle. Käsiteltäessä keskeytysaikaa kontrolloimattomana panostekijänä, käyttäytyy se negatiivisen tuotoksen tavoin. Keskeytysajan ja kulujen painokertoimien suhteelle voidaan siis asettaa kohdassa 3.5.2 esitelty AR II –tyyppinen rajoite.

Määrätään nyt kulujen ja keskeytysajan painokertoimille yhtälön (6.1) mukainen riippuvuus.

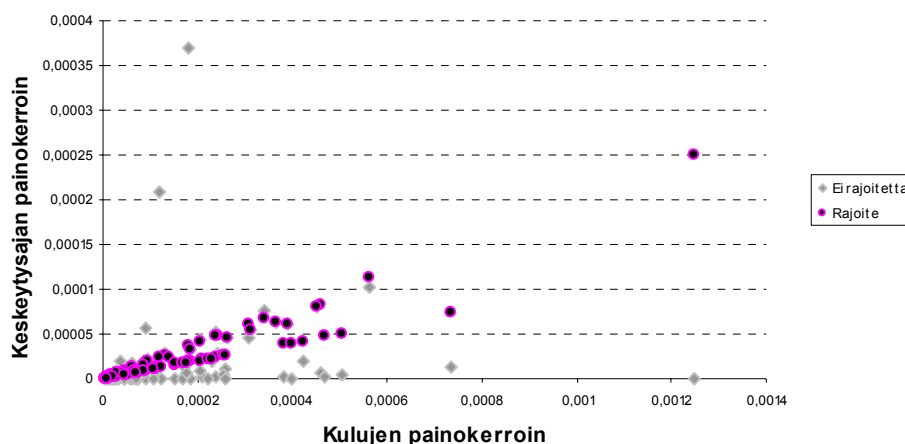
$$5 \cdot v_2 \leq v_1 \leq 10 \cdot v_2 \quad (6.1)$$

missä

v_1 = kulujen painokerroin

v_2 = keskeytysajan painokerroin

Kulujen painokerroin on siis vähintään viisi- ja enintään kymmenkertainen verrattuna keskeytysajan painokertoimeen. Kulujen ja keskeytysajan painokertoimet kyseisellä rajoitteella sekä ilman rajoitteita on esitetty kuvassa 6.1.

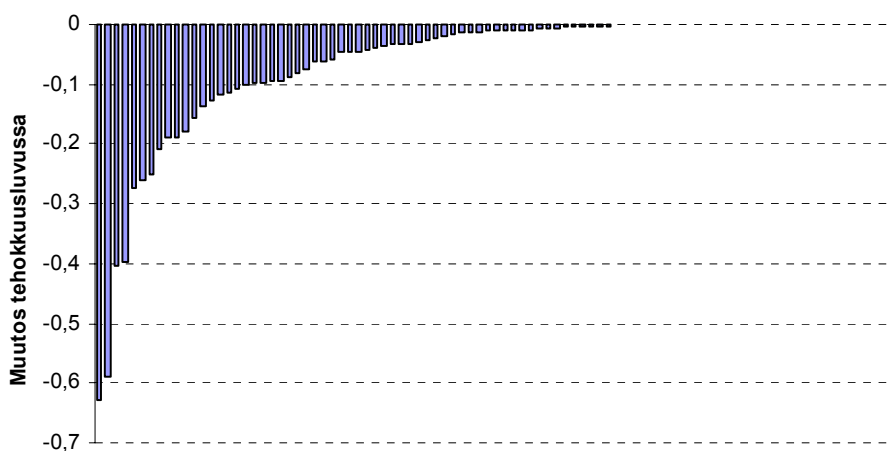


Kuva 6.1 Kulujen ja keskeytysajan painokertoimet ilman rajoituksia sekä edellä esitetyllä rajoitteella.

Kuvasta nähdään, että painokertoimet asettuvat rajoituksien johdosta tietyn sektorin sisälle. Tämän sektorin rajat määräytyvät suoraan asetetun suhteellisen rajoituksen ylä- ja alarajasta. Kuten kuvasta nähdään, on rajoite sitova suurimmalla osalla yhtiöistä. Eli ts. yhtiöiden painokertoimet muuttuvat rajoitteesta johtuen.

Kuten kohdassa 3.5 todettiin, painokertoimien rajoittamisen seurauksena yhtiöiden tehokkuusluvut joko pienenevät tai pysyvät samoina. Nyt voidaankin todeta, että mikäli yhtiö on tehoton ja painokertoimen rajoite kyseisen yhtiön kohdalla on sitova, pienenee yhtiön tehokkuusluku. Tehokkaalla yhtiöllä puolestaan voi olla useita erilaisia painokertoimien kombinaatioita, joilla kyseinen yhtiö tulee tehokkaaksi. Tällöin yhtiö voi olla edelleen tehokas, vaikka painokertoimien rajoittaminen sulkisi pois joitakin näistä optimaalisista vaihtoehdoista.

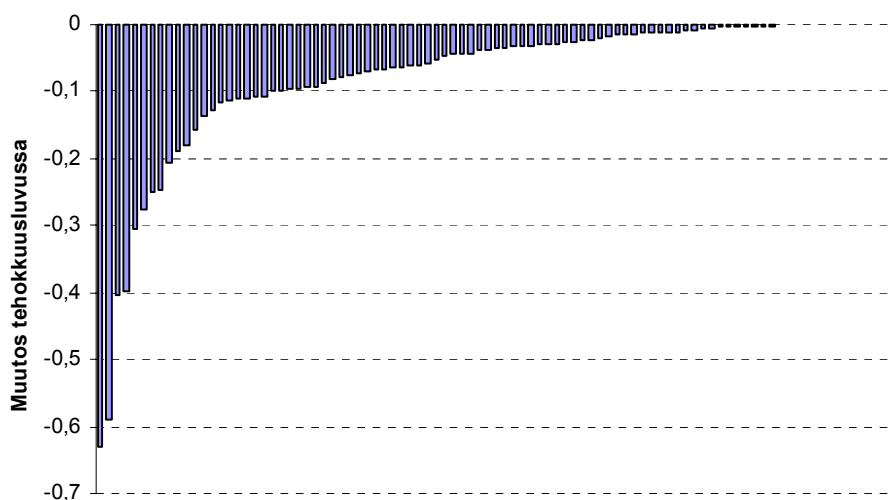
Kun tarkastellaan edellä esitetyn rajoitteen vaikutusta yhtiöiden tehokkuuteen, saadaan kuvan 6.2 mukainen jakauma.



Kuva 6.2 Painokertoimen rajoittamisen vaikutus tehokkuuslukuun, kun kulujen painokerroin on 5-10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna.

Kuvasta nähdään, että painokertoimen rajoittamisen johdosta tehokkuusluvut joko pienenevät tai pysyvät samoina. Muutosta tehokkuusluvussa tapahtuu 62 yhtiöllä ja muutoksen keskiarvo on 6,2 %-yksikköä.

Kohdassa 3.5 todettiin tehokkuuden muutoksen olevan sitä suurempi, mitä tiukemmat rajoitukset painokertoimille asetetaan. Jos nyt rajoitetaan kulujen painokerroin vähintään yhdeksän- ja enintään kymmenkertaiseksi verrattuna keskeytysajan painokertoimeen, saadaan kuvan 6.3 mukainen jakauma tehokkuuden muutoksille.

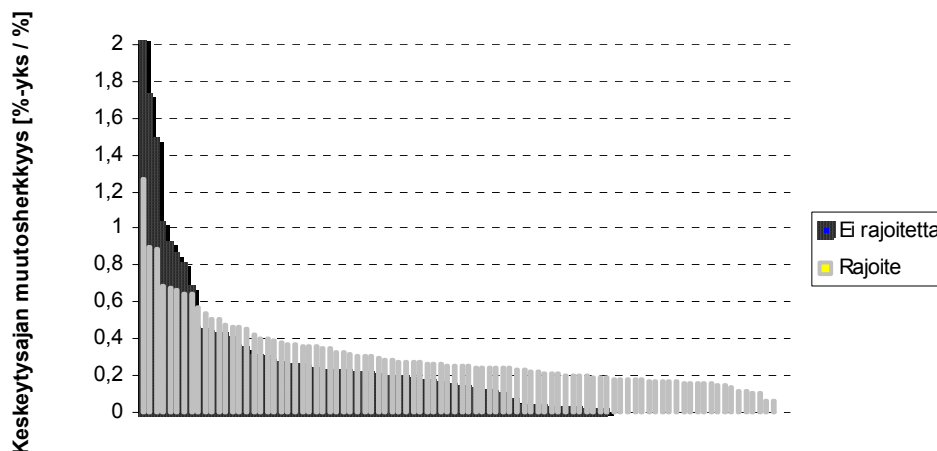


Kuva 6.3 Painokertoimen rajoittamisen vaikutus tehokkuuslukuun, kun kulujen painokerroin on 9-10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna.

Nyt muutosta tapahtuu 84 yhtiöllä keskiarvon ollessa 7,6 %-yksikköä eli tehokkuuden muutos on selvästi suurempi kuin väljemmässä rajoitteessa.

Keskeytysajan painokertoimen rajoittamisella pyritään tasoittamaan keskeytysaikojen muutosherkkyyksien sekä keskeytysten hintojen suurta vaihtelua. Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka nämä arvot muuttuvat sidottaessa keskeytysajan painokerroin riippuvaiseksi kulujen painokertoimesta edellä kuvatulla tavalla.

Kuvassa 6.4 on esitetty keskeytysajan muutosherkkyyden jakauma ilman painokertoimien rajoituksia, sekä kulujen painokertoimen ollessa 5-10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna.



Kuva 6.4 Keskeytysajan muutosherkkydet ilman rajoitteita sekä kulujen painokertoimen ollessa 5-10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna.

Kuvasta nähdään, että painokertoimen rajoittaminen pienentää selvästi muutosherkkyysien hajontaa. Koska hyvin pienet ja hyvin suuret painokertoimien arvot rajautuvat pois, rajautuvat myös hyvin pienet ja hyvin suuret muutosherkkyysien arvot pois.

Tarkastellaan seuraavaksi keskeytysten hinnan muodostumista. Keskeytysten hintahan määräytyi kohdassa 4.2.1 esitetyn yhtälön (4.1) mukaisesti.

Tehokkuusluku puolestaan määräytyy yhtälön (6.2) mukaisesti.

$$h = \frac{u_1 \cdot energia + u_2 \cdot verkko + u_3 \cdot asiakas - v_2 \cdot keskeytys + c_0}{v_1 \cdot kulut} \quad (6.2)$$

Tehdään nyt tarkasteltavan yhtiön keskeytysaikaan differentiaalisen pieni muutos ja pidetään kaikki muut tekijät ennallaan. Koska tehtävä muutos on hyvin pieni, voidaan olettaa, että muutoksen jälkeenkin tarkasteltavana olevaa yhtiötä verrataan samoihin

yhtiöihin. Tällöin mallin rajoitteet pysyvät samoina, joten myös optimaaliset painokertoimet pysyvät vakioina. Tehokkuuden muutos voidaan nyt määrittää yhtälöllä (6.3).

$$\Delta h = \frac{u_1 \cdot \text{energia} + u_2 \cdot \text{verkko} + u_3 \cdot \text{asiakas} - v_2 \cdot \Delta \text{keskeytys} + c_0}{v_1 \cdot \text{kulut}} \quad (6.3)$$

Tarkasteltaessa muutosta, voidaan vakiona pysyvät tekijät jättää huomioimatta. Tällöin tehokkuuden muutos on yhtälön (6.4) mukainen.

$$\Delta h = \frac{v_2 \cdot \Delta \text{keskeytys}}{v_1 \cdot \text{kulut}} \quad (6.4)$$

Sijoitetaan yhtälö (6.4) yhtälöön (4.1).

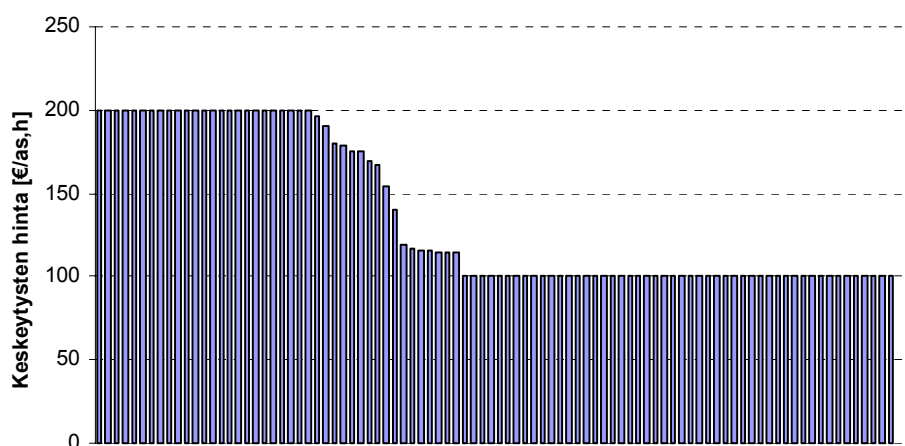
$$H_{\text{kesk}} = \frac{\text{kulut}}{\Delta \text{kesk}} \cdot \frac{v_2 \cdot \Delta \text{kesk}}{v_1 \cdot \text{kulut}} = \frac{v_2}{v_1} \quad (6.5)$$

Keskeytysten hinta määräytyy siis suoraan keskeytysajan ja kulujen painokertoimien suhteesta. Kulujen painokerroin puolestaan on kulujen käänteisarvo, jolloin kulujen absoluuttinen suuruus vaikuttaa suoraan keskeytysten hintaan ja keskeytysten hinnan yksiköksi tulee kulujen yksikkö.

Yhtälössä (6.1) esitetty keskeytysajan ja kulujen painokertoimien suhteellinen rajoite voidaan kirjoittaa myös seuraavanlaiseen muotoon:

$$\frac{1}{10} \leq \frac{v_2}{v_1} \leq \frac{1}{5} \quad (6.6)$$

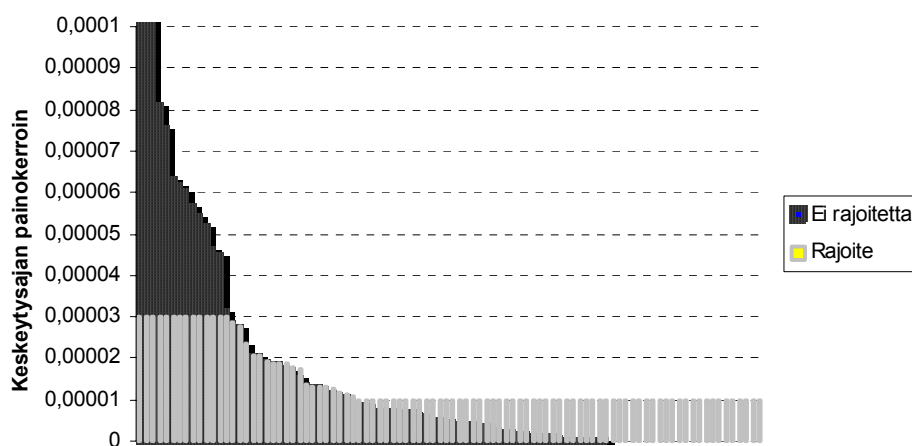
Verrattaessa yhtälöä (6.6) yhtälöön (6.5) nähdään, että keskeytysten hinta määräytyy suoraan painokertoimien suhteellisten rajoitusten perusteella. Tällöin keskeytysten hinta on riippumaton käytettävistä yksiköistä, eli esimerkiksi markkojen vaihtaminen euroiksi ei vaikuta keskeytysten hinnan absoluuttiseen arvoon. Käytettäessä yhtälön (6.6) mukaista rajoitetta, vaihtelee keskeytysten hinta välillä 100 - 200 mk/as,h, mikäli kulujen yksikkö on kmk. Jos kulujen yksikkö on k€, vaihtelee keskeytysten hinta välillä 100 - 200 €/as,h. Keskeytysten hinnan jakauma kyseisellä rajoitteella on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5 Keskeytyksen hinta, kun kulujen painokerroin on 5-10-kertainen keskeytysajan painokertoimeen verrattuna.

6.3.2 Painokertoimien absoluuttinen rajoittaminen

Kun haetaan sopivia raja-arvoja painokertoimien absoluuttiselle rajoitukselle, on lähtökohtana aina rajoittamattoman tilanteen painokertoimet. Pyrkimyksenä on rajoittaa hyvin suuret ja hyvin pienet painokertoimien arvot pois. Kuvassa 6.6 on esitetty jakauma keskeytysajan painokertoimista ilman rajoitetta sekä rajoitettuna välille $1 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-5}$.

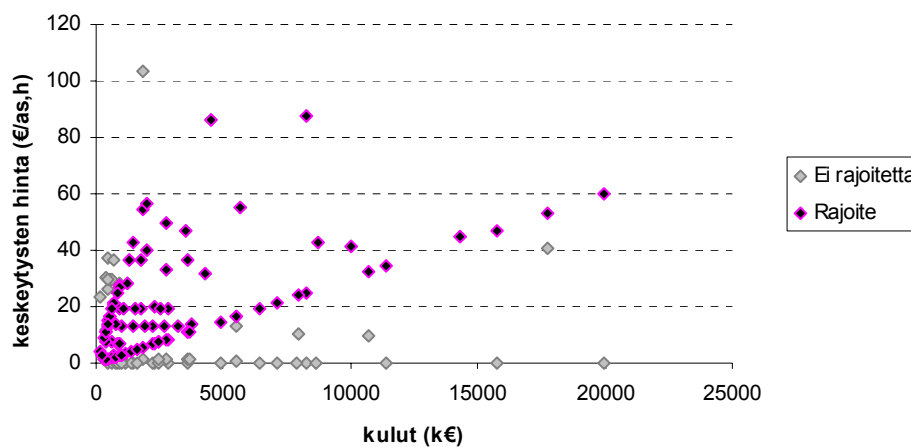


Kuva 6.6 Keskeytysajan painokertoimet ilman rajoitetta sekä rajoitettuna välille $1 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-5}$.

Tarkasteltaessa keskeytyksen hinnan muodostumista painokertoimen absoluuttisen rajoituksen ollessa voimassa voidaan todeta, että hinta muodostuu edelleen yhtälön (6.5) perusteella painokertoimien suhteena. Kun otetaan vielä huomioon, että kulujen painokerroin on kulujen käänteisluku, saadaan keskeytyksen hinnaksi

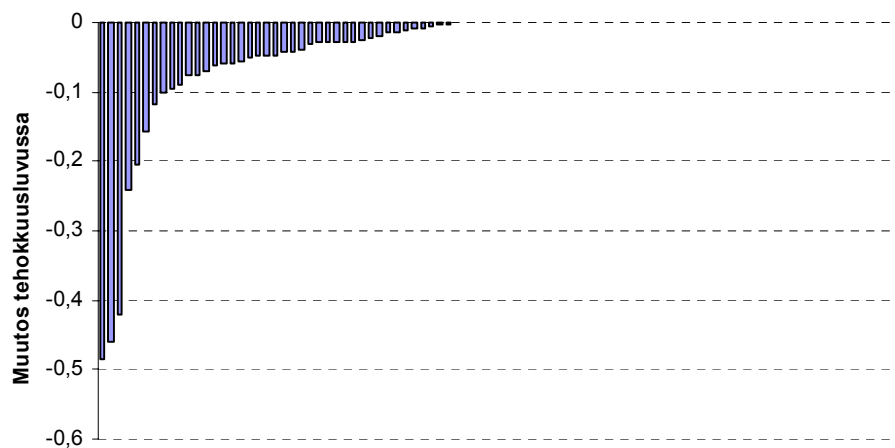
$$H_{kesk} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{\frac{1}{kulut}} = v_2 \cdot kulut \quad (6.7)$$

Kun v_2 :lle asetetaan absoluuttiset rajoitukset, riippuu keskeytysten hinta suoraan kuluista näiden rajoitusten puitteissa. Kuvassa 6.7 on esitetty keskeytysten hinnan ja kulujen välinen yhteys keskeytysajan painokertoimen ollessa rajoittamaton sekä sen ollessa rajoitettu edellä esitetyllä tavalla.



Kuva 6.7 Keskeytysten hinnan ja kulujen välinen yhteys, kun keskeytysajan painokerroin on rajoittamaton sekä sen ollessa rajoitettu välille $1 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-5}$.

Kuten aikaisemmin on todettu, tehokkuusluvut joko pienenevät tai pysyvät samoina asetettaessa painokertoimille rajoituksia. Kuvassa 6.8 on esitetty tehokkuusluvuissa tapahtuvat muutokset asetettaessa edellä kuvattu rajoite keskeytysajan painokertoimelle.



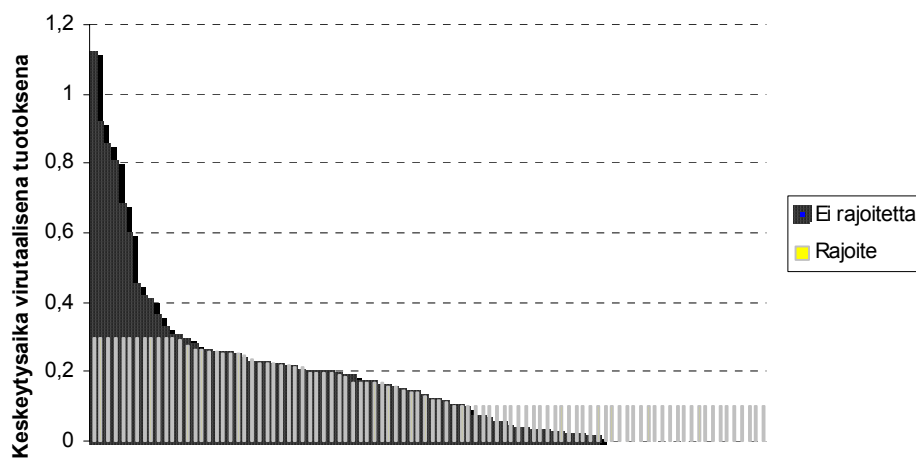
Kuva 6.8 Keskeytysajan painokertoimen rajoittamisen vaikutus tehokkuuteen. Painokerroin on rajoitettu välille $1 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-5}$.

Tehokkuusluku pienenee rajoitteen johdosta 45 yhtiöllä muutoksen keskiarvon ollessa 3,68 %-yksikköä. Tässäkin tapauksessa tehokkuusluvut pienenevät sitä enemmän, mitä tiukempi rajoite on.

6.3.3 Virtuaalisten tuotosten rajoittaminen

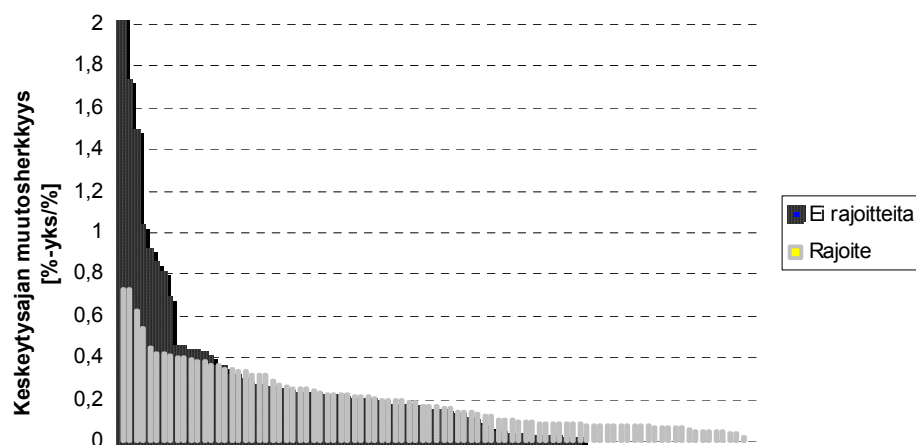
Virtuaalisen tuotoksen, eli tekijän ja sitä vastaavan painokertoimen rajoittamista voidaan ajatella siten, että siinä rajoitetaan tietyn tekijän osuutta kokonaistehokkuudesta. Tällöin raja-arvoja asetettaessa on pohdittava, minkälainen vaikutus kyseiselle tekijälle sallitaan. Käytettäessä muuttuvien skaalatuottojen mallia, ei asiaa tosin voida ajatella aivan näin yksinkertaisesti, koska mallissa on mukana vapaa muuttuja c_0 . Tällöinhän tehokkuusluku muodostuu virtuaalisten tuotosten sekä vapaan muuttujan summana yhtälön (3.15) mukaisesti. Lisäksi tilannetta sekoittaa se, että nyt halutaan asettaa rajoituksia keskeytysajalle, joka on kontrolloimaton panostekijä eli se esiintyy virtuaalisten tuotosten summassa negatiivisena.

Kuvassa 6.9 on esitetty keskeytysajan virtuaalisen tuotoksen jakauma ilman rajoitteita ja rajoitettuna välille 0,1 - 0,3. Samoin, kuin painokertoimen absoluuttisen rajoittamisen tapauksessa, myös tässä on rajoitteella pyritty rajaamaan pois hyvin suuret ja hyvin pienet virtuaalisen tuotoksen arvot.



Kuva 6.9 Keskeytysaika virtuaalisena tuotoksena ilman rajoitteita sekä rajoitettuna välille 0,1 - 0,3.

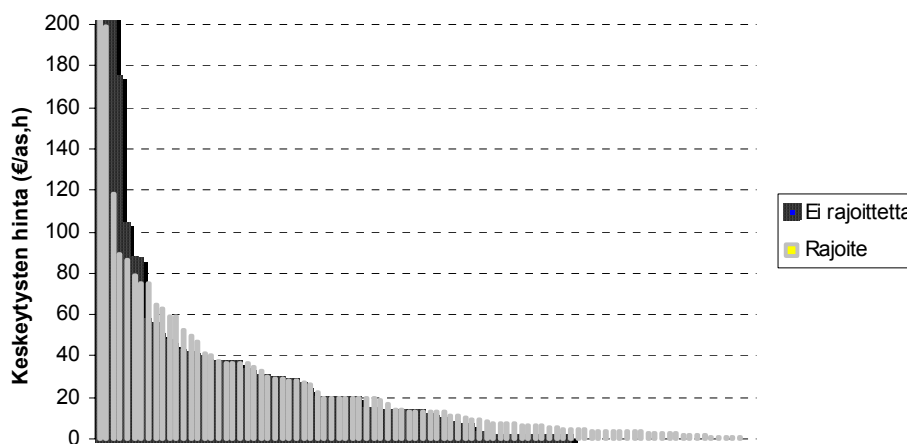
Tavoitteena rajoitteen asettamisella on ollut pienentää keskeytysajan muutosherkkyyden sekä keskeytysten hintojen hajontaa. Kuvassa 6.10 on esitetty keskeytysajan muutosherkkyys ilman rajoitteita sekä edellä esitellyllä virtuaalisen tuotoksen rajoituksella.



Kuva 6.10 Keskeytysajan muutosherkkyys ilman rajoitteita sekä edellä esitetyllä rajoitteella.

Kuten kuvasta 6.10 nähdään, tasoittaa asetettu rajoite hieman keskeytysajan muutosherkkyyksien jakaumaa sekä poistaa nollaherkkyudet. Kuten aikaisemmin on

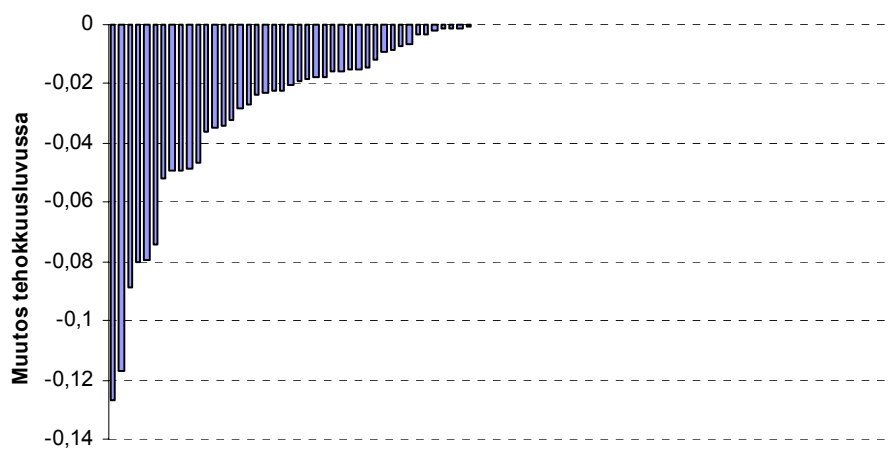
todettu, keskeytysten hinta ei kuitenkaan määräydy suoraviivaisesti keskeytysajan muutosherkkyyden perusteella. Tämä voidaan havaita myös, kun tarkastellaan kuvaa 6.11, jossa on esitetty keskeytysten hinta ilman rajoitetta sekä edellä esitellyllä virtuaalisen tuotoksen rajoitteella.



Kuva 6.11 Keskeytysten hinta ilman rajoitetta sekä edellä esitellyllä virtuaalisen tuotoksen rajoitteella.

Kuten kuvasta 6.11 nähdään, poistaa asetettu rajoite kylläkin keskeytysten hintojen nolla-arvot, mutta hintojen hajonta on vielä erittäin suuri.

Kuten muidenkin rajoitteiden kohdalla, myös virtuaalisten tuotosten rajoittamisen johdosta tehokkuusluvut joko pienenevät tai pysyvät vakioina. Kuvassa 6.12 on esitetty tehokkuuslukujen muutosten jakauma rajoitettaessa keskeytysajan virtuaalista tuotosta edellä esitetyllä rajoitteella.



Kuva 6.12 Tehokkuuslukujen muutosten jakauma, kun keskeytysajan virtuaalinen tuotos rajoitetaan välille 0,1...0,3.

Asetettu rajoite aiheuttaa tehokkuusluvun pienenemistä 44 yhtiöllä ja muutoksen keskiarvo on 1,41 %-yksikköä.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli toteuttaa järjestelmä, jolla voidaan analysoida verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittaukseen tehtävien muutosten vaikutusta tehokkuusmittauksen ohjausvaikutuksiin. Aluksi tuli selvittää tehokkuusmittauksessa havaitut ongelmat sekä käytettävän DEA-mallin ominaisuudet. Lisäksi tuli tutustua markkinoilla oleviin DEA-ohjelmistoihin, jotta varmistutaan, ettei tarvittavaa järjestelmää ole saatavilla valmiina.

Tärkeimmiksi järjestelmän ominaisuuksiksi osoittautuivat herkkyysanalyysi ja etenkin sitä kautta suoritettava keskeytysten hinnan laskeminen sekä mahdollisuudet asettaa painokertoimille rajoituksia. Järjestelmään haluttiin myös mahdollisuus saada visuaalista informaatiota mallin käyttäytymisestä tehokkuuskäyrien muodossa.

Järjestelmän käytännön toteutusta suunniteltaessa kävi selväksi, että tarvittava lineaarinen optimointi kannattaa suorittaa erityisesti kyseiseen toimintoon kehitetyillä valmiilla funktioilla. Tällöin laskenta on mahdollisimman tehokasta, koska siitä huolehtii juuri tarvittavan kaltaiseen laskentaan optimoitu proseduuri. Järjestelmän toteuttamisessa päätettiin käyttää Visual Basic –ohjelmointikieltä, koska sitä käyttäen saatiin lähtötiedot luettua kohtuullisen helposti Excel-taulukosta. Käytännössä järjestelmä toimii tehokkaasti ja laskenta on hyvinkin nopeaa. Lakennasta saatavia tuloksia voidaan pitää myös hyvin luotettavina, koska ne täyttävät kohdassa 5.3 esitetyt kriteerit.

Työn loppupuolella esitetyt järjestelmästä saatavat tulokset havainnollistavat hyvin järjestelmän käyttömahdollisuuksia. Tulosten perusteella havaitaan, minkälaisia vaikutuksia erilaiset malliin tehtävät muutokset aiheuttavat tehokkuusmittaukselle. Tätä kautta pystytään etsimään ja kokeilemaan erilaisia ratkaisukeinoja verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksessa havaittuihin ongelmiin.

Lähdeluettelo

- /1/ Sähkömarkkinalaki (386/1995).
- /2/ Hallituksen esitys Eduskunnalle sähkömarkkinalaiksi (138/1994 vp.).
- /3/ Korhonen, P., Syrjänen, M.. Sähkönjakeluverkkotoiminnan kustannustehokkuuden mittaaminen DEA-menetelmällä. Helsingin kauppakorkeakoulu, 2000. 135 s.
- /4/ Partanen, J., Lassila, J., Viljainen, S.. Investoinnit sähkönsiirron hinnoittelussa. Tutkimusraportti, LTKK, 2002. 69 s.
- /5/ Energiamarkkinaviraston päätös, Dnro 221/421/98. 27.2.2002.
- /6/ Suomen pankki. Rahoitusmarkkinat – tilastokatsaus 8/2002.
- /7/ Lavaste, K.. Tehokkuuden huomioiminen siirtohinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnissa. Muistio, Dnro 325/421/2000, Energiamarkkinavirasto. 20.9.2001.
- /8/ Charnes, A., Cooper, W.W., Lewin, A.Y., Seiford, L.M.. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995. 528 s. ISBN 0-7923-9479-8.
- /9/ Bowlin, W. F. Measuring Performance: An Introduction to Data Envelopment Analysis (DEA). The Journal of Cost Analysis, Fall 1998 Issue.

- /10/ Holvad, T.. An Analysis of Efficiency Patterns for a Sample of Norwegian Bus Companies, Conference Proceedings from the 8th Transport Days Conference at Aalborg University. 2001, Aalborg, Denmark.
- /11/ Andersen, P., Petersen, N.C. A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis. Management Science, 1993, Vol. 39, No. 10, s. 1261-1264. ISSN 0025-1909.
- /12/ Roll, Y., Cook, W.D., Golany, B., Controlling Factor Weights in Data Envelopment Analysis. IIE Transactions, Vol 23, No 1, 1991. ISSN 0740-817X.
- /13/ Allen, R., Athanassopoulos, A., Dyson, R.G., Thanassoulis, E. Weight restrictions and value judgements in Data Envelopment Analysis: Evolution, development and future directions. Annals of Operations Research, 1997. vol. 73, s. 13-34. ISSN 0254-5330.
- /14/ Joro, T., Viitala, E-J.. The Efficiency of Public Forestry Organisations: A Comparison of Different Weight Restriction Approaches. Interim Report IR-99-059, 1999.
- /15/ Parviainen Sirkku. Lineaarinen optimointi. Luentomoniste, LTKK, 2002.
- /16/ Partanen, J., Lassila, J., Viljainen, S., Honkapuro, S.. Verkkoliiketoiminnan tehokkuusmittauksen kehittäminen. Väliraportti, LTKK, 2002.
- /17/ www.lindo.com, viitattu 4.11.2002.
- /18/ Lindo Api User's Manual. Lindo Systems Inc. 2001.