

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
KAUPPATIETEIDEN OSASTO**

**Laskentatoimen ja rahoituksen laitos**

Rahoitus



## **SÄHKÖN MARKKINAHINTAA SELITTÄVÄT TEKIJÄT**

**Case: Nord Pool 2000 – 2005**

**Tekijä: Simo Kalatie**

**Tarkastajat: prof. Mika Vaihekoski**

**prof. Eero Pätäri**

Simo Kalatie

Kaksostenkatu 11

53850 Lappeenranta

## TIIVISTELMÄ

<b>Tekijä:</b>	Kalatie, Simo
<b>Tutkielman nimi:</b>	Sähkön markkinahintaa selittävät tekijät
<b>Osasto:</b>	Kauppatieteiden osasto
<b>Vuosi:</b>	2006
<b>Pro gradu -tutkielma:</b>	Lappeenrannan teknillinen yliopisto 70 sivua, 17 kuvaa ja 9 taulukkoa
<b>Tarkastajat:</b>	prof. Mika Vaihekoski prof. Eero Pätäri
<b>Hakusanat:</b>	sähkön markkinahinta, regressioanalyysi, rahoitus, Nord Pool

Sähkön markkinahinta on saanut osakseen suurta huomiota viime aikoina. Sähkömarkkinoiden vapautuminen ja päästökaupan avaaminen Euroopassa on entisestään nostanut sähkömarkkinoita näkyville lehdissä.

Tämä tutkielma tutkii erilaisten tekijöiden vaikutusta sähkön markkinahintaan regressioanalyysin avulla. Edellä mainitun päästösopimusten markkinahinnan lisäksi tutkittiin kivihiilen sekä maakaasun markkinahintojen, lämpötilojen, jokien virtaamien, vesivarantojen täyttöasteiden sekä Saksan sähkömarkkinoiden hinnan vaikutusta sähkön markkinahintaan Nord Pool -sähköpörssissä. Työssä luotiin myös sähkön markkinahintaa ennustava malli.

Kaikkien selittävien tekijöiden korrelaatiot olivat oletusten mukaiset ja regressioanalyysi onnistui selittämään yli 80 % sähkön markkinahinnan vaihteluista. Merkittävimpiä selittäviä tekijöitä olivat vesivarannot sekä jokien virtaamat. Ennustavan mallin keskimääräinen suhteellinen virhe oli noin 10 %, joten ennustetarkkuus oli melko hyvä.

## ABSTRACT

**Author:** Kalatie, Simo  
**Title:** Determinants of the market price of electricity  
**Department:** Business Administration  
**Year:** 2006  
**Master's Thesis:** Lappeenranta University of Technology  
70 pages, 17 figures and 9 tables  
**Examiners:** prof. Mika Vaihekoski  
prof. Eero Pätäri  
**Keywords:** market price of electricity, regression analysis, finance, Nord Pool

The market price of electricity has got a lot of attention lately. The deregulation of electricity markets and the opening of emission trading market in Europe has drawn even further interest in the electricity markets.

This paper researches various determinants of the market price of electricity through regression analysis. Besides the market price of emission allowances the market prices of natural gas and coal, the German spot price of electricity, water reservoir levels, river flows and temperatures are also regressed on the market price of electricity at Nord Pool, the Nordic Power Exchange. A forecasting model was also created with the help of regression analysis.

The correlations between the explanatory variables and the dependent variable were all significant and as expected on a *a priori* basis. The regression managed to explain over 80 % of the variation in the market price of electricity. The most important determinants were the water reservoir levels and river flows. The forecasting model could forecast the electricity prices with a 10 % average error.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1. JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SÄHKÖMARKKINOIDEN TOIMINTA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Sähkömarkkinoiden järjestäminen.....	3
2.2 Tuotantoteknologia ja -rakenne.....	7
2.3 Sähkön kysyntä.....	10
2.4 Johdannaistuotteet.....	11
2.5 Sähkömarkkinoiden vapautuminen.....	12
2.6 Nord Pool.....	14
2.6.1 Sähköpörssin fyysiset markkinat .....	18
2.6.2 Johdannaismarkkinat.....	22
2.6.3 OTC-markkinat .....	29
<b>3. AIEMPI SÄHKÖN MARKKINAHINNAN TUTKIMUS.....</b>	<b>31</b>
3.1 Sähkön markkinahinnan mallinnus.....	31
3.2 Tilastolliset mallit.....	33
3.3 Fundamentaaliset mallit .....	34
3.4 Hybridimallit .....	36
3.5 Sähkön markkinahinnan ennustaminen .....	38
<b>4. TUTKIMUSMETODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
4.1 Mallin rakentaminen .....	39
4.2 Lineaarinen regressiomalli.....	40
4.3.1 Satunnaismuuttujan homoskedastisuus .....	43
4.3.2 Autokorrelaatio .....	46
4.3.3 Multikollineaarisuus .....	48
4.3.4 Aikasarjan stationaarisuus.....	51
<b>5. DATA .....</b>	<b>52</b>
<b>6. TULOKSET .....</b>	<b>56</b>
6.1. Kuvaileva statistiikka.....	56
6.2 Mallin oletusten testaus .....	58
6.3 Regressiomalli .....	62

6.4 Ennustava regressiomalli.....	64
7. YHTEENVETO .....	67
LÄHDELUETTELO .....	69

## **LYHENTEET**

OTC	Over The Counter -markkinat
RJO	Riippumaton järjestelmäoperaattori, joka ylläpitää markkinajärjestelmää.
On-peak-sähkö	Kaupankäyntiajanjakso, jolla sähkön kysyntä on voimakasta.
Off-peak-sähkö	Kaupankäyntijakso, jolla sähkön kysyntä on vähäistä.

## **SUUREIDEN TUNNUKSET**

Btu	British thermal unit, energian yksikkö
CET	Central European Time
EUR	Euro
MW	Megawatti
NOK	Norjan kruunu
SEK	Ruotsin kruunu
MWh	Megawattitunti
TWh	Terawattitunti

## **KIITOKSET**

Haluan kiittää Fortumin säätiötä sekä Lappeenrannan energia OY:tä yhteistyöstä. Erityiskiitokset Marko Pollarille, joka toimi yhteyshenkilönä Lappeenrannan energia OY:n puolesta. Suuret kiitokset myös Lappeenrannan Teknilliselle Yliopistolle sekä professori Mika Vaihekoskelle.

# 1. JOHDANTO

Poliittinen innostus julkisten palveluiden uudelleenjärjestämiseen on johtanut sähkömarkkinoiden syntyyn. Erillisillä sähkömarkkinoilla pyritään kannustamaan innovaatioiden syntyä sekä parantamaan tehokkuutta. Tämä ilmiö on jatkunut maailmanlaajuisesti jo viidentoista vuoden ajan eikä se näytä hidastuvan. Perinteisesti sähkö nähtiin luonnollisena monopolina sen pääomaintensiivisen tuotteen johdosta, joka on täysin riippuvainen laajasta jakeluverkosta. Reaaliaikaiset markkinat vaativat runsaasti informaation prosessointivoimaa, jotta tällainen valtavan monimutkaisen järjestelmän hajoittaminen erillisiin yhtiöihin olisi mahdollista. 1900-luvun lopun teknologinen kehitys avasi ovet kilpailullisille sähkömarkkinoille ympäri maailmaa. Aina markkinoiden vapauduttua on ollut tarve ymmärtää sähkön hintaa selittäviä tekijöitä.

Sähkön markkinahinnan käyttäytyminen on harvinaislaatuista. Markkinahinnan volatiliteetti on aivan toisessa kokoluokassa (100 %–500 %) kuin valuuttojen (10 %–20 %), korkojen (10 %–20 %) tai osakkeiden (20 %–50 %) tuottojen volatiliteetti. (Eydeland & Wolyniec, 2003). Muita erikoisuuksia sähkön hinnan käyttäytymisessä ovat mm. suuret hintapiikit, keskiarvohakuisuus sekä stokastinen volatiliteetti. Näiden tekijöiden johdosta hinta sisältää suuren riskin markkinoilla toimijoille. Ymmärtämällä riskin synnyttäviä tekijöitä voidaan pienentää niistä syntyviä kustannuksia.

Näiden ilmiöiden taustalta löytyy joukko luonnollisia selittäjiä. Esimerkiksi suuret hintapiikit syntyvät usein poikkeavien ilmasto-olosuhteiden aikana. Tämä tutkielma tutkii erilaisten tekijöiden vaikutusta sähkön hintaan pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla, Nord Pool:ssa. Selittävinä tekijöinä tutkitaan raaka-aineiden hintoja, lämpötilaa, jokien virtaamia sekä vesialtaiden täyttöasteita.



Sähkön markkinahintaa on tutkittu laajasti aiemminkin. Suurin osa tutkimuksista on keskittynyt mallintamaan sähkön hintaa puhtaasti tilastollisin menetelmin. Esimerkiksi Malo ja Kanto (2005), Wallace ja Fleten (2002) sekä joukko muita tutkijoita ovat testanneet erilaisia stokastisia malleja sähkön markkinahinnan mallintamiseen. Fundamentaalisten muuttujien mukaan tuominen on ollut harvinaisempaa. Kuitenkin esimerkiksi Skantze ja Ilic (2001) ovat tutkineet fundamentaalisia tekijöitä sähkön markkinahinnan mallinnuksessa ja Vehviläinen ja Pyykkönen (2004) yhdistivät fundamentaaliset sekä stokastiset mallit.

Tämä tutkielma jatkuu seuraavasti. Luvussa 2 esitellään sähkömarkkinat yleisellä tasolla sekä erityisesti Nord Poolissa. Tämä luku käsittelee markkinamekanismien lisäksi myös sähkön tuotantoon sekä kulutukseen liittyviä erityispiirteitä. Luku 3 keskittyy sähkön markkinahintaan liittyvän tutkimuksen käsittelyyn ja esittelee tarkemmin aiempia tutkimuksia. Luvussa 4 käydään läpi hieman regressioanalyysin teoriaa, jonka pohjalta tämän tutkimuksen empiirinen osuus koostuu. Viidennessä luvussa käydään läpi tutkimuksessa käytetty data. Kuudennessa luvussa esitellään luodut regressiomallit sekä käydään tulokset läpi. Tässä kappaleessa esitellään sekä selittävä että ennustava malli ja testataan ennustavaa mallia. Viimeisessä luvussa 7 esitetään yhteenveto tehdystä tutkimuksesta.

## 2. SÄHKÖMARKKINOIDEN TOIMINTA

### 2.1 Sähkömarkkinoiden järjestäminen

Hyödykemarkkinat jakautuvat perinteisesti kolmeen toimintoon: tuotantoon, jakeluun sekä kulutukseen. Sähkömarkkinoiden erityinen ominaispiirre on kysynnän ja tarjonnan reaaliaikaisen tasapainon vaatimus. Koska sähköä ei voida käytännössä varastoida on kysynnän ja tarjonnan oltava aina tasapainossa. Tämän johdosta markkinoilla tarvitaan myös lisätoimintoja: tasapainotusta sekä reservejä. Sähkön tuotanto voidaan jakaa kolmeen osaan: tuotanto, siirto sekä tukitoiminnot.

Eri puolilla maailmaa nämä toiminnot on järjestetty hieman eri tavoin. Tässä tutkielmassa keskitytään vapautettuihin, kilpailullisiin markkinoihin. Yleisesti markkinoilla toimii riippumaton järjestelmäoperaattori (RJO), joka ylläpitää järjestelmää. Palvelut voidaan järjestää joko keskitetystysti RJO:n toimesta tai bilateraalisesti, jolloin RJO toimii vain joidenkin palveluiden ostajana. Yksi ratkaisu on myös sellainen, jossa RJO hoitaa kaikkien markkina-aktiiviteettien provisioita, sopimuksen tekoa sekä infrastruktuuria.

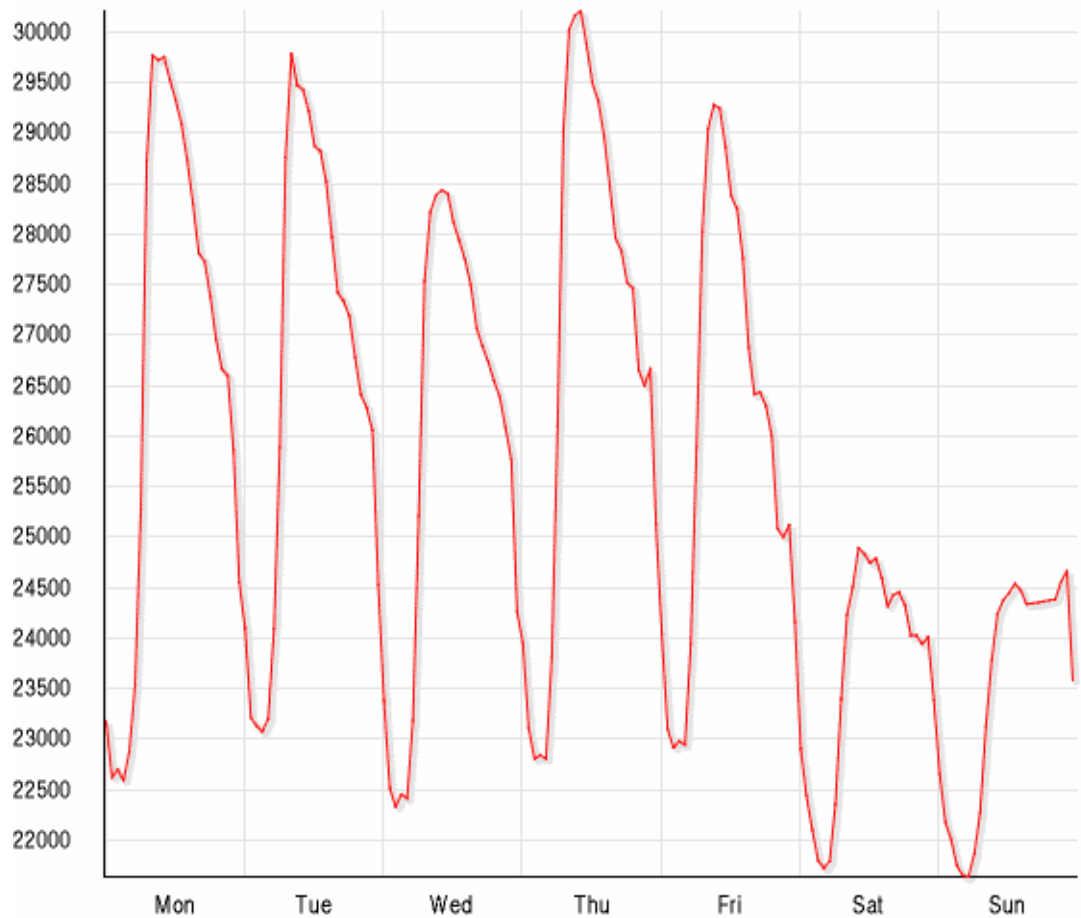
Itse markkinat voidaan järjestää pool-tyyppisesti tai bilateraalisesti. Pool-mallissa luodaan markkina- eli systeemihinta, joka toimii selvittelyhintana kaikille käteistransaktioille. Tällöin systeemihinta toimii myös esimerkiksi johdannaisten selvittelyhintana. Bilateraalilla markkinoilla kaikki transaktiot ovat kahdenvälisiä ja täysin riippumattomia muista markkinoiden transaktioista.

Markkinat voidaan jakaa toimitusajan mukaan spot-markkinoihin sekä termiini-markkinoihin. Spot-markkinoilla voidaan käydä kauppaa reaaliaikaisesti sen hetkisestä energiasta ("ex-post"), seuraavan tunnin energiasta (hour-ahead), loppupäivän energiasta (day-of) sekä seuraavan

päivän energiasta (day-ahead). Ex-post markkinoiden tehtävänä on sovittaa poikkeamat oletetusta aikataulusta.

Termiini-markkinoilla käydään kauppaa tulevaisuudessa toimitettavasta energiasta. Termiinisopimusten toimitus voi tapahtua lähitulevaisuudessa (esimerkiksi seuraavan viikon sähkö) tai kaukaisessa tulevaisuudessa (esimerkiksi kuukausisopimukset vuosien päässä). Termiinimarkkinat voidaan järjestää OTC-markkinoina, market maker -pohjaisina tai pörssipohjaisesti. OTC-markkinoilla sopimukset syntyvät joko suoraan bilateraalisesti tai välittäjän avulla. Market maker -pohjaisessa kaupankäynnissä kaupankäynti keskittyy market makeriin, joka tarjoutuu sekä ostamaan että myymään sähköä tiettyihin hintoihin. Se siis antaa molemminpuoliset tarjoukset (sekä myynti- että ostotarjous) ja toimii kaikissa transaktioissa toisena osapuolena. Pörssipohjaisilla markkinoilla kaupankäynti tapahtuu keskitetyssä pörssissä, joka yhdistää osto- ja myyntitarjoukset ja varmistaa transaktioiden tehokkuuden ottamatta itse positioita.

Sähkön varastoimattomuudesta johtuen aamulla ja illalla samassa paikassa myyty sähkö on täysin erillistä. Lisäksi sähkön kysyntä vaihtelee runsaasti eri vuorokaudenaikoina ja viikonpäivinä, kuten voidaan huomata kuvasta 1. Tästä johtuen markkinoilla on kahden tyyppistä sähköä tarjolla: on-peak- ja off-peak-sähköä. On-peak-sähkö voidaan määritellä esimerkiksi ns. 5x16-sähkönä, joka tarkoittaa arkipäivisin päiväsaikaan 16 tuntina toimitettavaa sähköä (esimerkiksi aamu kahdeksasta puoleen yöhön). Off-peak-sähkö puolestaan tarkoittaa sähköä, joka toimitetaan alhaisen kysynnän aikoina. (Eydeland & Volyniec, 2003)



**Kuva1: Esimerkki sähkön kysynnästä (MWh/h) eri kellonaikoina. Kuva esittää Nord Pool:in kysyntää viikolla 20 vuonna 2006. (Nord Pool, 2006)**

Sähkön varastoimattomuuden ja jatkuvan kysynnän ja tarjonnan tasapainovaatimuksen vuoksi markkinoilla täytyy olla myös tukipalveluita. Tukipalveluiden tarkoituksena on ylläpitää reserviä, jonka avulla voidaan tasata kysynnän ja tarjonnan hetkelliset muutokset. Tukipalvelut voidaan järjestää monin tavoin eri markkinoilla. Yksi mahdollisuus on vaatia sähkön tuottajia jättämään hieman vapaata kapasiteettia niin kutsutuksi pyörimisreserviksi. Toinen mahdollisuus tukipalveluiden järjestämiseksi on luoda erilliset markkinat tukipalveluille. Pool-rakenteisissa markkinoissa sähkön tuottajilla on usein mahdollisuus toimittaa sähköä markkinoille tai tukipalveluille.

Tukipalvelut voidaan muodostaa jopa seitsemästä eri tuotteesta:

- Spinning reserves: Järjestelmään synkronoidut resurssit, jotka on saatavilla heti ja voidaan nostaa täyteen kapasiteettiin 10 minuutissa.
- Non-spinning reserves: Ei-synkronoidut resurssit, jotka on saatavilla heti ja voidaan nostaa täyteen kapasiteettiin 10 minuutissa.
- Käyttöreservit: Resurssit, jotka voidaan saattaa täyteen kapasiteettiin 30 minuutissa.
- Energy imbalance: Resurssit, joilla korjataan kysynnän ja tarjonnan epätasapainoa.
- Säännöstely: Reaktiivinen energia, jolla voidaan säilyttää järjestelmän vaiheen suunta.
- Reaktiivinen sähkön tuotanto: Palvelut, joilla ylläpidetään siirtoverkkojen jännitettä.

Joillain markkinoilla käytetään kapasiteettimarkkinoita pitkän aikavälin luotettavuuden parantamiseksi. Tällöin lyhyen aikavälin varmuus hoidetaan tukipalveluiden avulla. Markkinoilla, joilla on kapasiteetti vaatimuksia, tuottajien saamat lisätulot houkuttelevat lisää kapasiteettiä joka johtaa korkeampiin reserveihin. Tämä vaikuttaa sekä järjestelmän luotettavuuteen että markkinahintaan. Suuremmat reservit pienentävät hintapiikkien todennäköisyyttä sekä niiden suuruutta.

Sähön hintapiikeistä on kahdenlaista hyötyä. Ne signaloivat kysyntäpuolelle vajauksesta ja kehottavat kuluttajia vähentämään kulutustaan. Toisaalta tuotantopuolelle ne signaloivat vajeista ja auttavat tuottajia nostamaan tuotantotasoa. Kapasiteettimarkkinoiden tulisi ylläpitää riittäviä reservejä ja näin ollen estää hintapiikkejä. Tällä mekanismilla ei kuitenkaan voida signaloida kysyntäpuolelle, jonka seurauksena kysyntäpuolella ei ole juurikaan aggregoitumaton mittaria.

Tähän mennessä olemme olettaneet keskitetyn selvittelypaikan markkinoille. Todelisuudessa kuitenkin pitkät välimatkat tuotannon ja kulutuksen välillä aiheuttavat ongelman sähkön siirtämisestä oikeaan paikkaan. Sähkön tuotannosta tietyssä paikassa ei ole hyötyä, ellei sitä pystytä siirtoverkon avulla siirtämään sinne, missä sähköä tarvitaan. Siirtoverkon rajoitteiden johdosta eri alueiden välille voi muodostua

vaihtoehtoiskustannuseroja. Näiden hallitsemisen kaksi yleisintä mallia ovat vyöhykemalli sekä solmumalli. Markkinoiden segmentoinnin huonona puolena on mahdollisuus paikalliseen markkinavoimaan. Suuri sähkön tuottaja voi pystyä hinnan manipulaatioon tietyllä alueella ja siten vähentää markkinoiden tehokkuutta. Pohjoismaissa sähköyhtiöiden paikallista markkinavoimaa ovat tutkineet esimerkiksi Kristiansen & Wangensteen, 2006. He tulivat siihen tulokseen, että alueelliset hinnat poikkeavat siirtoruuhkien sekä -tappioiden johdosta.

Vyöhykemallissa markkina-alue jaetaan erillisiin laajoihin alueisiin. Jokaisella alueella on omat sähkö- ja tukipalvelumarkkinat. Vyöhykkeiden välistä kauppaa voidaan toteuttaa monilla tavoin. Yleensä alueiden välistä virtaa hallitaan siirto-oikeuksilla. Vyöhykemallin vahvuus on sen yksinkertaisuus, jolloin markkina-osapuolilla on suhteellisen vähän alimarkkinoita ja siten hyvä likviditeetti. Mallin heikkous liittyy myös yksinkertaisuuteen. Vyöhykemallissa järjestelmän toimintatapa vääristyy ja siitä seuraa tehotonta sähkön toimitusta sekä järjestettäviä kannustimia.

Solmumallissa jokaisella paikalla on oma hintansa, josta heijastuu järjestelmän ruuhkaisuus. Siirtorajoittamattomassa tilanteessa järjestelmän eri alueiden hinnat ovat identtiset. Alueellisten hintojen eron riskiä hallitaan rahoituksellisilla siirto-oikeuksilla. Hajautetuiden markkinoiden mallissa sähkön tuottajat antavat hintatarjouksia lisä- ja vähennysmarkkinoilla. RJO säätää paikallista tuotantoa tarjoustensa perusteella hallitakseen järjestelmän ruuhkaisuutta. Tällöin energian optimointi, siirto ja järjestelmän tasapainotus tapahtuvat peräkkäin, toisin kuin keskitetyillä markkinoilla jossa kaikki tapahtuvat samanaikaisesti. (Eydeland & Wolyniec, 2003)

## **2.2 Tuotantoteknologia ja -rakenne**

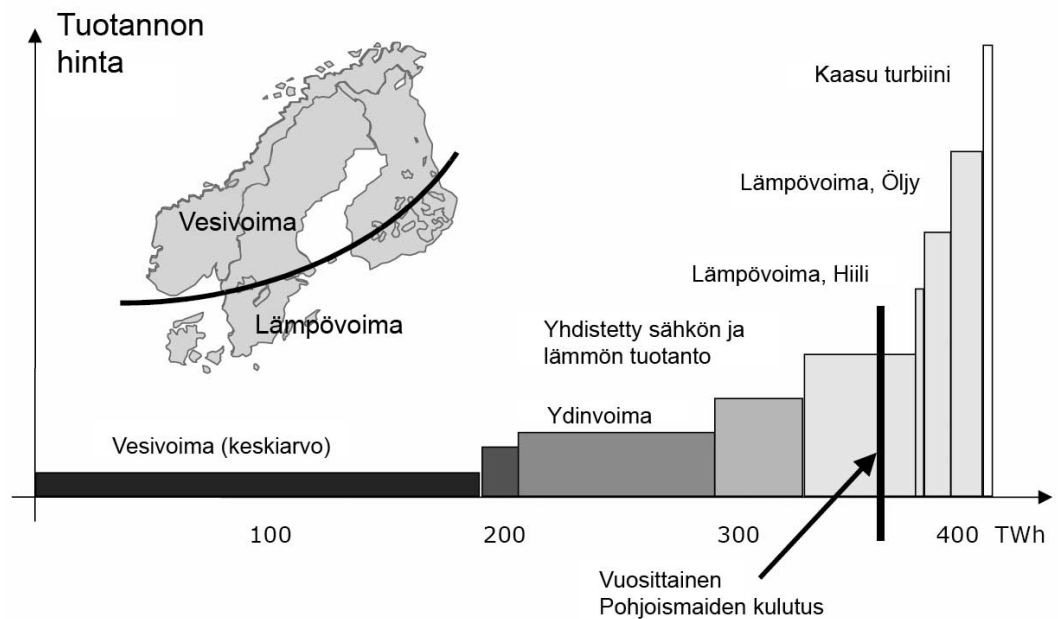
Sähkön tuotannossa käytetään useita eri teknologioita. Näiden teknologioiden ominaisuudet vaikuttavat luonnollisesti sähkön hintaan. Sähkön tuotannon yleisimmät teknologiat ovat ydinvoima, lämpövoima, vesivoima sekä muut uusiutuvat energianlähteet. Pohjoismaissa vesivoima dominoi markkinoita ja Norjassa vesivoiman osuus koko sähkön tuotannosta on lähes 100 %. Taulukko 1 esittelee sähkön tuotannon energialähteittäin eri Pohjoismaissa. Suomi ja Ruotsi käyttävät vesivoiman lisäksi paljon ydinvoimaa sekä lämpövoimaa. Tanskassa käytetään suhteellisesti enemmän uusiutuvia<sup>1</sup> energianlähteitä kuin muissa Pohjoismaissa. (Nord Pool, 2004)

**Taulukko 1: Sähkön tuotanto Pohjoismaissa vuonna 2003. (Nord Pool, 2004)**

Sähkön tuotanto (TWh / vuosi)					
Maa	Vesivoima	Lämpövoima	Ydinvoima	Uusiutuvat	Yht.
Ruotsi	53,0	13,5	65,5	0,5	132,5
Norja	106,0	1,0			107,0
Suomi	9,5	48,5	22,0		80,0
Tanska		38,0		5,5	43,5
<b>Yhteensä</b>	<b>168,5</b>	<b>100,0</b>	<b>87,5</b>	<b>6,0</b>	<b>363,0</b>

Pohjoismaiden vesivoiman tuotanto keskittyy pohjoiseen ja lämpövoiman tuotanto puolestaan etelään. Vesivoiman reservialtaiden täyttövirtaamat vaihtelevat vuositasolla noin  $\pm 20$  TWh, joka vastaa noin puolta Tanskan vuosittaisesta kulutuksesta. Näiden virtaamien vaihtelu vaikuttaa merkittävästi vesivoiman tuotantokapasiteettiin ja siten sähkön markkinahintaan.

<sup>1</sup> Uusiutuvat energialähteet eivät sisällä tässä vesivoimaa.



**Kuva 2: Sähkön tuotannon rakenne Pohjoismaissa. (Nord Pool, 2004)**

Kuten kuvasta 2 nähdään, on vesivoima edullisin energianlähde Pohjoismaissa. Aikoina jolloin reservialtaat ovat riittävän täynnä suositaan vesivoimaa sen edullisuuden vuoksi. Tällöin sähkön hinta on alhaalla ja siirtoverkkot ovat suuressa käytössä, sillä tällöin vesivoimalla pohjoisessa tuotettua sähköä siirretään etelään, jossa kulutusta on väestön maantieteellisestä jakaumasta johtuen enemmän. Toisaalta vesivarantojen ollessa alhaisella tasolla joudutaan vesivoimaa korvaamaan lämpövoimalla, jolloin sähköä tuotetaan etelässä ja siirretään pohjoiseen. Tällöin myös sähkön hinta on korkeammalla, sillä lämpövoiman tuotantokustannukset ovat vesivoimaa korkeammat.

Eydelandin & Wolyniec (2003) mukaan yleisesti sähkön tuotannon hintaan vaikuttavat:

- Kapasiteetti: maksimi tuotanto (MW)
- Hyötysuhde: tehokkuusmittari joka kertoo suhteen, jolla polttoaineyksiköitä voidaan (Btu) muuttaa sähköksi (MW)
- Muuttuvat käyttökustannukset
- Generaattorin minimi ja maksimi tuotantotasot
- Odotetut tuotantokatkokset kuten huoltotoimenpiteet
- Odottamattomat tuotantokatkokset kuten tekniset viat
- Tuotantotason muutoksen nopeus (MW/min)
- Käynnistys/alasajo kustannukset

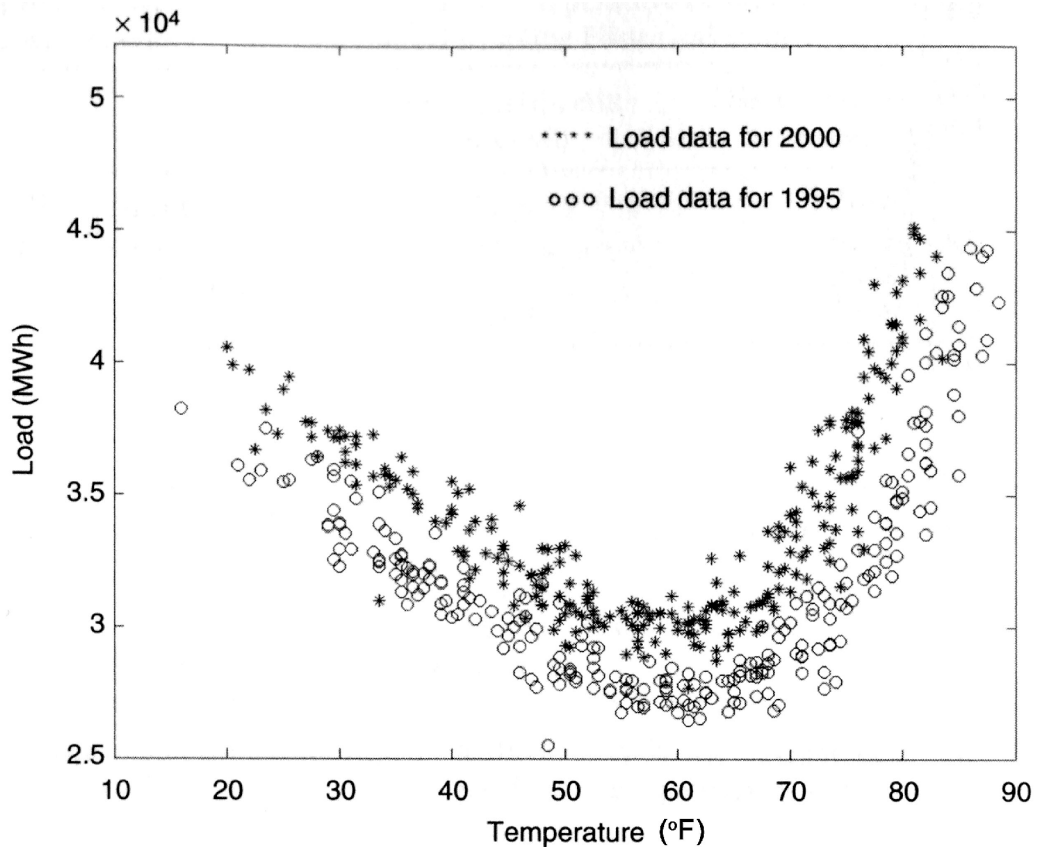


- Minimi/maksimi ajoaika, minimi/maksimi lepoaika.
- Polttoaineen hinta
- Päästökustannukset
- Siirtokustannukset

## 2.3 Sähkön kysyntä

Sähkön kysyntä voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kotitaloudet, kaupallinen kysyntä ja teollisuus. Näistä jokainen ryhmä omaa toisistaan poikkeavat piirteet. Esimerkiksi kotitalouksien kysyntä riippuu erittäin voimakkaasti lämpötilasta. Kylmällä säällä joudutaan käyttämään paljon energiaa lämmitykseen ja pimeinä aikoina valaistukseen. Toisaalta helteillä energiaa kuluu asuntojen viilentämiseen. Myös kylmälaitteiden kulutus kasvaa kuumalla kelillä. Kaikkein vakainta kysyntä on teollisuuden parissa, jonka kysyntä ei juuri muutu lämpötilan mukaan. Tuotantolaitoksilla sekä toimistoissa valaistusta käytetään lämpötilasta riippumatta. Tutkimusten mukaan sähkön kysyntä kasvaa voimakkaasti lämpötilan muuttuessa. Eydeland ja Wolyniec tutkivat lämpötilan ja sähkön kulutuksen riippuvuutta Yhdysvalloissa. Siellä kysyntä on pienintä n. 15 asteen lämpötilassa ja kasvaa lämpötilan kasvaessa tai laskiessa (Eydeland & Wolyniec, 2003).

Eydeland & Wolyniec (2003) osoittavat myös, että kulutuksen ennustamiseksi tulee tutkia sekä kulutuksen kasvua että kysyntä-lämpötila-kuvion muotoa. Kuvasta 3 näkyy, että sähkön kysyntä on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta. Täten voidaan olettaa lämpötilan pystyvän selittämään hyvin sähkön markkinahinnan muutoksia.



**Kuva 3: Lämpötilan ja kulutuksen välinen yhteys NEPOOL:n alueella kahtena eri vuotena. (Eydeland & Wolyniec, 2003)**

## 2.4 Johdannaistuotteet

Johdannaistuotteiden avulla markkinaosapuolet voivat suojautua kohtaamiltaan riskeiltä. Sähkötalukmarkkinoilla on joukko johdannaisia, joista osa on tuttuja rahoitusmaailmasta. Markkinoilla on myös paljon eksoottisia johdannaisia, jotka poikkeavat paljolti tavanomaisista rahoitusinstrumenteista. Taulukko 2 esittelee erilaisia sähkötalukmarkkinoilla käytettäviä johdannaisia. Johdannaisten tarkempi esittely jätetään Nord Pool:ia käsittelevään kappaleeseen.

**Taulukko 2: Sähköjohdannaiset (Eydeland & Volyniec, 2003)**

Fyysinen toimitus			Rahoitusinstrumentti		
Tavallinen	Eksoottinen		Omaisus	Tavallinen	Eksoottinen
	Hintaan perustuva	Volyymiin perustuva			
Futuurit Termiinit Swapit Eurooppalaiset optiot	Amerikkalaiset ja aasialaiset optiot Swaptiot Spread optiot	Swing optiot (takaisin kutsuttava, nominaaliset, jne.) Kulutusta seuraavat	Varasto inti Voimalat Siirtosopimukset	Futuurit Termiinit Swapit Eurooppalaiset optiot	Amerikkalaiset optiot Aasialaiset optiot Swaptiot Spread optiot Jne.

Johdannaisopimukset perustuvat kohde-etuuteen, jonka markkina-arvo on kaikkien sopimusosapuolien tiedossa. Sopimuksen tekohetkellä sovitaan sopimuksen määrä ja hinta, mutta toimitus tapahtuu vasta tulevaisuudessa sopimushetkellä sovittuna ajankohtana. Sopimuksen arvo riippuu kohde-etuuden arvosta ja muuttuu ajan kuluessa. Esimerkiksi option hinta riippuu kohde-etuuden hinnan lisäksi jäljellä olevasta juoksuajasta, riskittömästä korosta, kohde-etuuden volatiliteetista sekä toteutushinnasta, jolla option haltijalla on oikeus myydä tai ostaa kohde-etuutta.

## 2.5 Sähkömarkkinoiden vapautuminen

Sähkömarkkinoiden vapautuminen alkoi Iso-Britanniassa vuonna 1989, jolloin päätettiin sähköenergiasektorin uudelleen järjestelemisestä. Päätöksen seurauksena syntyi kaksi fossiilisia polttoaineita käyttävää tuotantoyhtiötä ja 12 paikallista sähköyhtiötä. Ydinvoima pysyi yhä valtion omistuksessa, mutta se yksityistettiin myöhemmin. Paikalliset sähköyhtiöt omistivat siirtoverkot. Iso-Britannian hallitus perusti PoolCo-nimisen

selvitystalon ylläpitämään sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainoa. PoolCo oli sähköyhtiöille pakollinen markkinapaikka ja siten bilateraalin kaupan oli kiellettyä. Hinnoittelussa ei toiminut kysynnän ja tarjonnan lait, koska tuottajilla ei ollut mahdollisuutta vaikuttaa hinnan asetantaan. Tällainen rakenne otettiin käyttöön myös Argentiinassa, Aasiassa, Australiassa sekä Espanjassa. (Fusaro, 2000)

Vuonna 1999 Iso-Britanniassa siirryttiin uuteen aikakauteen sähkömarkkinoilla. Uuden sopimuksen mukaan bilateraalin kaupan oli sallittua ja vuonna 2000 markkinoilta löytyi jo futuureja ja termiinejä.

Skandinaviassa energiakauppaa oli käyty maiden välillä jo 1960-luvulta lähtien. Energiakaupalla tavoiteltiin maksimaalista tehokkuutta ja kustannussäästöjä. Kaikkien kauppojen hinnat olivat kustannusperusteisia. Vuonna 1991 Norja aloitti sähkömarkkinoiden vaputtamisen Pohjoismaissa avaamalla pääsyn siirtoverkkoihin. Seuraavan vuonna Norjan kansallinen sähköyhtiö pilkottiin kansalliseen siirtoverkkoyhtiöön, Statnettiin, sekä tuotantoyhtiöön, Statkraftiin. Siirtoverkon valvonta ja käyttö sekä valtion rajat ylittävä toiminta siirtyi myös Statnettille.

Ruotsissa otettiin ensimmäinen askel niin ikään vuonna 1991 erottamalla sähkön tuotanto sähkön siirrosta. Svenska Kraftnät alkoi huolehtia siirtoverkosta. Vuonna 1995 Ruotsi aloitti irtautumisen valtio-omisteisesta tuotannosta markkinaperusteiseen rakenteeseen.

Seuraava askel markkinoiden vaputtamisen suuntaan Skandinaviassa otettiin vuonna 1996. Tällöin perustettiin Nord Pool -selvitystalo sekä fyysisen energian että futuurien ja optioiden markkinapaikaksi. Nord Pool oli tuolloin Norjan ja Ruotsin valtioiden yhteisomistuksessa ja tarjosi noin 40 erilaista futuuria ja optiota spot-markkinoiden lisäksi.

Futuureilla käydään kauppaa päiväsopimuksilla, viikkosopimuksilla neljästä seitsemään viikkoa tulevaisuuteen, neljän viikon sopimuksilla aina 52 viikkoa tulevaisuuteen sekä neljännesvuosina kolme vuotta tulevaisuuteen. Futuureiden erikoisena ominaisuutena suuremmat ajanjaksot pilkkoutuvat pienemmiksi sopimuksiksi kun lähestytään toimituspäivää. Esimerkiksi neljän viikon futuuri voi purkautua neljäksi viikottaiseksi sopimukseksi. Futuurit selvitetään rahallisesti.

Suomi avasi ovensa kansainvälisille sähkömarkkinoille vuonna 1996 sallimalla yli 500KWh määrissä sähköä. Samana vuonna Suomen Optimeklarit Oy aloitti oman spot- ja futuurimarkkinansa nimellä EL-EX Sähköpörssi Oy, joka pohjautui Nord Pool:in rakenteeseen. Vuonna 1997 kaksi siirtoverkkoyhtiötä yhdistettiin ja syntyi Fingrid, joka hallitsee Suomen kantaverkkoa. Fingrid osti EL-EX:n kokonaan 13.1.1998 ja myi toukokuussa 1998 50 % Svenska Kraftnätille. EL-EX:n ja Nord Poolin yhteistyösopimus liittii suomalaiset Nord Pooliin kesäkuussa 1998 omana hinta-alueenaan. EL-EX toimii Nord Poolissa Suomen edustajana. (Fusaro, 2000 & KTM 2004)

Tanska aloitti markkinoidensa avaamisen vuonna 1996. Vuoden 2003 tammikuussa markkinat olivat Tanskassa täysin avoimet pohjoismaiselle kilpailulle. (Fusaro, 2000)

## **2.6 Nord Pool**

Nord Pool on pohjoismainen markkinapaikka tuottajille, jakelijoille, teollisuuden yrityksille, energiayhtiöille, kaupankäynnin edustajille, suurille kuluttajille ja siirtoverkkoyhtiöille, jossa he voivat käydä kauppaa monilla erilaisilla sähkötuotteilla. Nord Pool:ssa on 335 asiakasta 13 eri maasta, jotka esitetään taulukossa 3.

Sähköpörssissä yritykset voivat käydä kauppaa kolmella eri tasolla: suorana jäsenenä, meklarijäsenenä tai selvitysasiakkaana. Suora jäsen (engl. Exchange Member) toimii itsenäisesti markkinoilla omaan lukuunsa. Kaupankäynti perustuu yrityksen omaan viitekehykseen, jossa on määritelty kaupankäyntisäännöt. Suorilta jäseniltä vaaditaan kaupankäynnille vakuudet. Meklarijäsenet (engl. Clearing Member) voivat normaalin kaupankäynnin lisäksi myös tuoda standardimuotoisia tuotteita selvitystaloon selvitettäväksi. Voi toimia omaan lukuunsa tai asiakkaidensa edustajana toteuttaen heidän toimeksiantojaan. Myös meklarijäseneltä vaaditaan vakuudet. Selvitysasiakas (engl. Clearing Client) käy kauppaa meklarin välityksellä ja voi myös viedä OTC-kauppoja selvitettäväksi selvitystaloon meklarin avustuksella. Selvitysasiakas antaa vakuudet vain omille toimeksiannoilleen.

**Taulukko 3: Nord Poolin jäsenet (Nord Pool, 2006)**

	Jäsen ja edustaja	Selvitysasiakas	Yhteensä*
Belgia	1	0	2
Cayman Saaret	1	2	3
Espanja	1	0	3
Hollanti	3	0	3
Iso-Britannia	8	0	10
Italia	0	1	1
Norja	50	95	147
Saksa	3	0	3
Suomi	16	21	38
Sveitsi	2	1	3
Ruotsi	20	79	99
Tanska	9	10	19
USA	4	0	4

Yhteensä 118 209 335

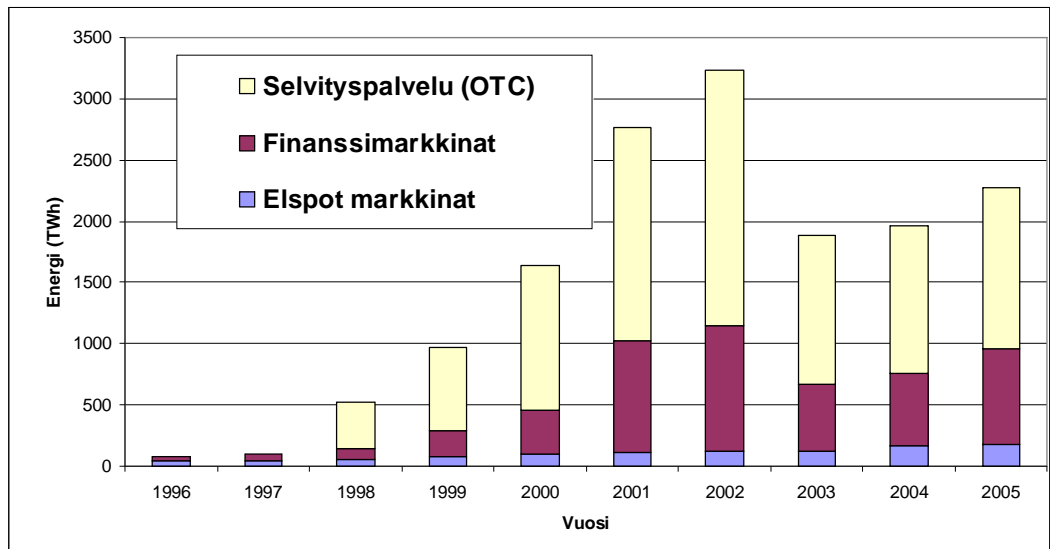
\* Yksi jäsen voi kuulua useampaan ryhmään, joten tämä summa ei välttämättä ole solujen summa.

Sähköpörssin tärkeimmät tehtävät ovat (Nord Pool, 2004) :

- Tarjota referenssihintaa sähkömarkkinoille.
- Hoitaa spot-markkinoita sekä organisoituja markkinoita finanssituotteille, kuten termiineille, futuureille ja optioille.
- Toimia neutraalina ja luotettavana vastapuolena sähkösopimuksissa.
- Käyttää spot-markkinoiden hintamekanismia lieventämään siirtoverkkojen ruuhkia käyttämällä saatavilla olevaa kapasiteettia optimaalisesti.
- Raportoida kaikki sähkökaupat siirtoverkkoyhtiöille.

Nord Pool on rakenteellisesti jaettu kolmeen erilliseen markkinapaikkaan: Nord Pool Spot AS toimii sähkön fyysisenä markkinapaikkana spot- ja elbas-kaupalle, Nord Pool Financial Markets toimii johdannaistuotteiden markkinapaikkana ja Nord Pool Clearing ASA toimii selvitystalona OTC-kaupoille. Lisäksi Nord Pool tarjoaa strategista ja hallinnollista konsultointipalvelua maailmanlaajuisesti Nord Pool Consulting AS:n kautta.

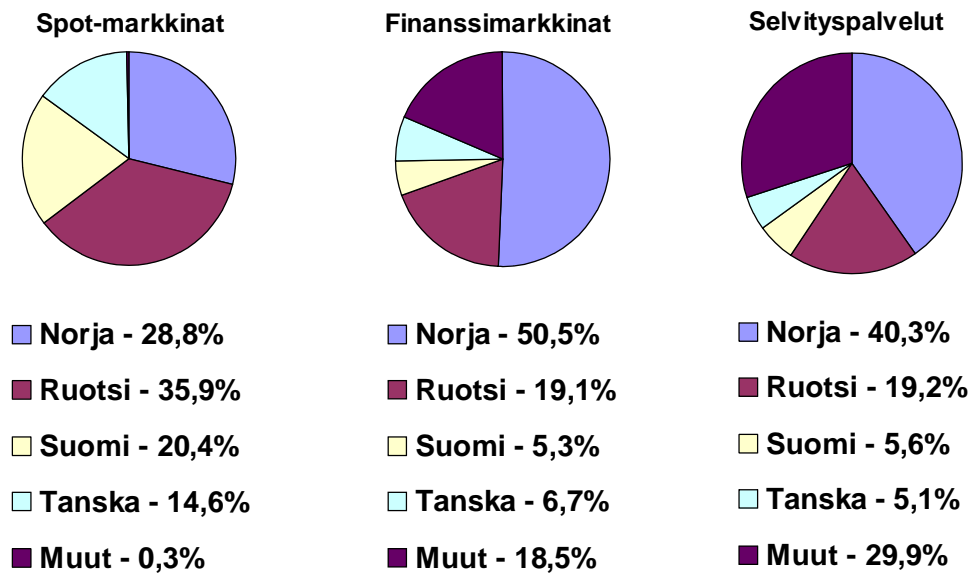
Pohjoismaiden sähkömarkkinat ovat kasvaneet vuoden 1996 jälkeen rajusti aina vuoteen 2002 asti. Kuva 4 esittää Nord Pool'in markkinakehityksen vuosina 1996–2005. Kuvasta ilmenee finanssi- ja selvityspalveluiden selvästi dominoivan markkinaosuutta energiavolyymilla mitattuna. Vuonna 2003 Pohjoismaiden vesivarannot olivat keskimääräistä pienemmät, jonka seurauksena sähkön hinta oli edellisvuosia korkeammalla. Toisaalta sähkön hinnan volatilitteetti laski rajusti ja pienensi siten markkinoiden riskiä ja suojaustarvetta.



**Kuva 4: Nord Poolin markkinakehitys. (Nord pool 2006)**

Vuonna 2005 spot-markkinoiden volyymi oli 176 Twh, joka vastaa noin 32 %:a Pohjoismaiden kokonaiskulutuksesta (Nord Pool ASA Annual Report 2005). Spot-markkinoiden suurimmasta volyymista vastasi Ruotsi lähes 36 % osuudellaan. Vuoden 2005 finanssimarkkinoiden volyymi oli 786 TWh ja selvityspalveluiden OTC-kauppojen volyymi 1316 TWh. Finanssimarkkinoilla Norja vastasi noin 50 % osuutta ja selvityspalveluiden käyttäjänä Norjan osuus oli noin 40 %, vaikka Norjan sähkön tuotannon osuus on vain suurinpiirtein neljäsnes Pohjoismaiden kokonaistuotannosta. Kuvasta 5 ilmenee Nord Pool:in markkinajakauma maittain. Huomattavaa on myös se, että muut kuin Pohjoismaat käyttävät lähes ainoastaan finanssimarkkinoiden tuotteita sekä selvityspalveluita.





**Kuva 5: Nord Pool:in markkinoiden jakautuminen maittain vuonna 2005.**

### 2.6.1 Sähköpörssin fyysiset markkinat

Sähköpörssin fyysiset markkinat koostuvat Elspot- ja Elbas-markkinoista. Spot-markkinoilla muodostuva systeemihinta toimii referenssihintana johdannaistuotteille, tase- ja säätösähkömarkkinoille sekä sähköpörssin ulkopuoliselle OTC-kaupalle. Fyysisiä sähkömarkkinoita käytetään tasapainottamaan markkinaosapuolten tilapäisiä sähkön tarpeita.

Elspot markkinoilla käydään kauppaa fyysisestä sähkötoimituksesta seuraavan päivän tunneille 00–23 CET sekä blokkituotteilla useamman tunnin jaksoille. Markkina-alueita Elspot-markkinoilla ovat Suomi, Ruotsi, Norja ja Tanska. Markkinat ovat jakautuneet myös ilmoitusalueisiin, joita ovat Suomi (FI), Ruotsi (SE), Etelä-Norja (NO1), Pohjois-Norja (NO2) ja Tanska (DK). Pienin pörssierä on 0,1 MWh. (Nord Pool, 2006)

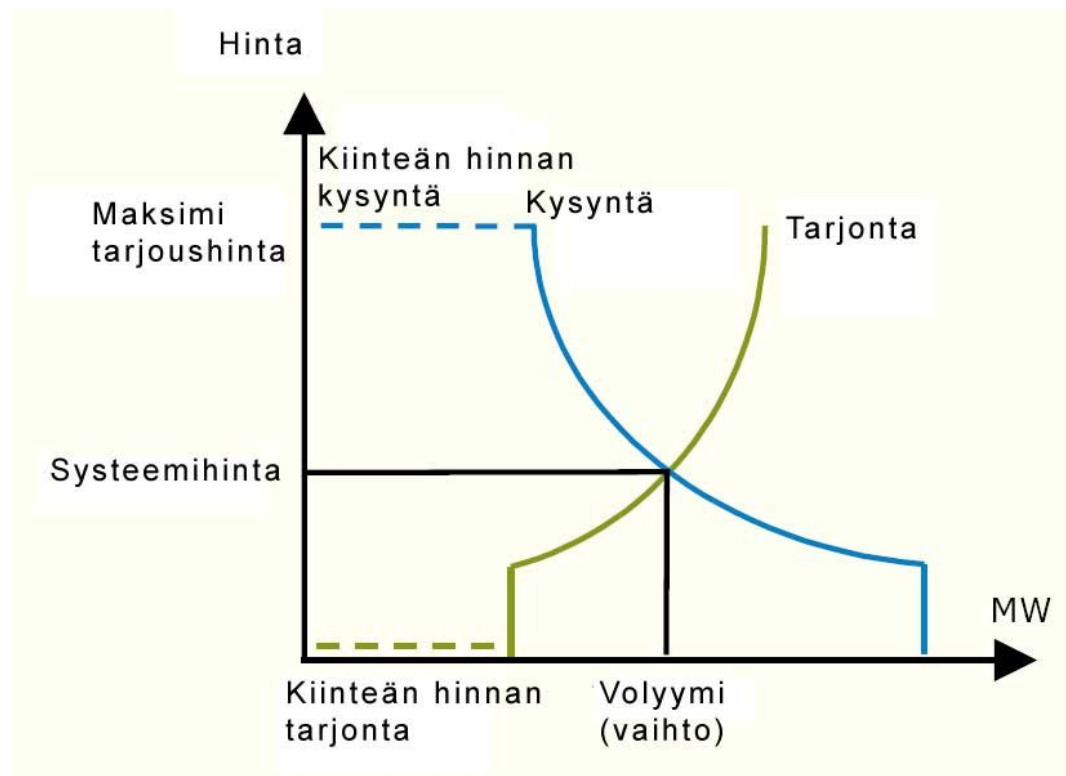
Blokkituotteita on tarjolla viidelle eri aikavälille:

- Blokki 1: Kello 00–06 (CET)
- Blokki 1: Kello 07–17 (CET)

- Blokki 1: Kello 18–23 (CET)
- Blokki 1: Kello 07–23 (CET)
- Blokki 1: Kello 00–23 (CET)

Blokkitarjousten läpimenemiselle on ehtona sekä volyymi- että hintakriteerin täytyminen kokonaisuudessaan. Blokin toteutushinta lasketaan blokin sisältämien tuntien hintojen keskiarvona.

Nord Pool on suljettu huutokauppapörssi, jossa käydään kauppaa vuoden jokaisena päivänä, myös viikonloppuisin ja pyhäpäivinä. Seuraavan päivän tarjoukset on lähetettävä viimeistään klo 12.00 mennessä. Tarjouksia voi lähettää ennakkoon aina viikoksi eteenpäin, jolloin viikonlopun tarjoukset voi lähettää jo perjantaina. Tarjoukset kuitenkin täsmäytetään vasta kyseisenä päivänä ja tulokset selviävät vasta kaupankäyntikierron jälkeen. Joka päivä kello 12.00 kaikista saaduista osto- ja myyntitarjouksista muodostetaan kokonaiskysyntä- ja kokonaistarjontakäyrät. Näiden käyrien leikkauspisteestä löytyy aina kunkin tunnin spot-hinta eli systeemi hinta. Spot-hinnan muodostamista havainnollistaa kuva 6. (Nord Pool, 2006)

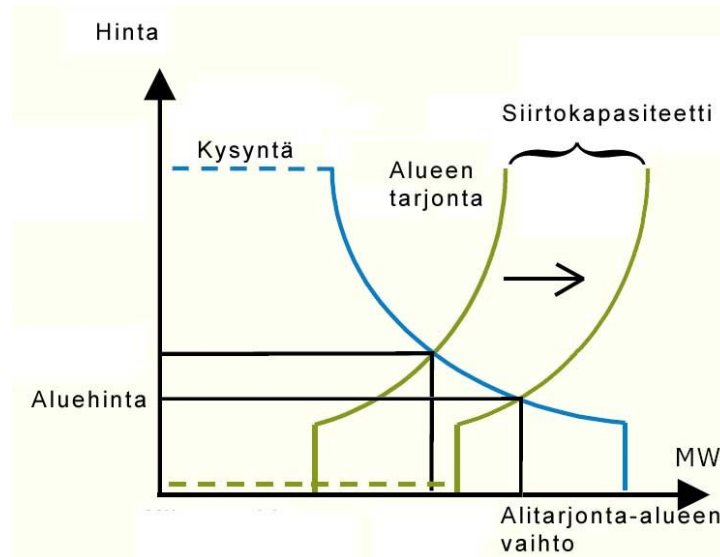


## **Kuva 6: Tarjousten perusteella muodostuva systeemihinta.**

Kaupankäyntivaluuttana Elspot-markkinoilla toimii Norjan kruunu (NOK), Ruotsin kruunu (SEK), Tanskan kruunu (DKK) sekä Euro (EUR). Markkinaosapuolet voivat itse valita haluamansa kaupankäyntivaluutan. Kaupankäyntivaluutta ilmoitetaan pörssille kaupankäyntiviikon alussa ja se on voimassa koko viikon ajan. Hintatarjoukset annetaan kahden desimaalin tarkkuudella NOK/MWh (SEK, DKK) ja kolmen desimaalin tarkkuudella EUR/MWh. Kaupankäyntijärjestelmän perusvaluutta on NOK ja muissa yksiköissä tehdyt tarjoukset pörssi muuttaa automaattisesti Norjan kruunuiksi ennen tarjousten järjestelmään syöttämistä. Tarjouskierroksen jälkeen hinnat vaihdetaan takaisin alkuperäisen tarjouksen mukaiseen rahayksikköön. Vaihtokurssina toimii laskun eräpäivälle laskettua termiinikurssia, jotta pystytään eliminoimaan kaupankäyntihetken ja laskutushetken välisestä aikaerosta johtuva valuuttariski. Pörssi pyytää päivittäin pankeilta termiinikurssit, joista se valitsee edullisimman. Viikonloppuisin ja arkipyhinä vaihtokurssi määritellään seuraavan arkipäivän kurssin mukaan.

Spot-markkinat ovat myös ensisijainen pohjoismainen markkinapaikka mahdollisten siirtoverkkorajoitteiden hallitsemisessa. Toisinsanoen Elspot on markkinapaikka, jossa energia ja kapasiteetti yhdistyy yhdeksi samanaikaiseksi huutokaupaksi. Pohjoismaiset markkinat on jaettu erillisiin tarjousalueisiin, joista voi tulla erillisiä hinta-alueita mikäli kaupankäynnin aiheuttama sähkön siirtotarve ylittää verkkoyhtiöiden spot-sopimusten kapasiteettivaraukset. Muutoin kaikkialla vallitsee sama systeemihinta. Siirtotarpeen ylittäessä siirtokapasiteetin ylitarjonta-alueilla sähkön hinta laskee ja alitarjonta-alueilla sähkön hinta nousee. Ylitarjonta-alueilla aluehinta syntyy kyseisen ilmoitusalueen osto- ja myyntitarjousten perusteella aivan kuten systeemihinta koko markkina-alueelle. Alitarjonta-alueilla ilmoitusaluekohtaisten tarjousten lisäksi hinnan muodostumiseen vaikuttaa käytössä oleva siirtokapasiteetti. Aluksi muodostetaan kysyntä- ja tarjontakäyrät kuten rajoittamattomassa tilanteessa ja sitten

tarjontakäyrää siirretään siirtokapasiteetin verran oikealle ja näin saadaan uusi tasapainopiste, josta tulee kyseisen alueen aluehinta. Aluehinnan syntymistä kuvaa kuva 7. (Nord Pool, 2004)



**Kuva 7: Aluehinnan syntyminen siirtorajoitetulla alueella.**

Nord Pool -alueella esiintyi vuonna 2001 siirtorajoituksia noin puolet vuoden tunneista ja vuonna 2002 rajoituksia esiintyi noin kolmannes vuoden tunneista. Suomen aluehinta poikkesi systeemihinnasta vuonna 2001 noin 6 % ajasta. Markkina-alueiden välisiin siirtorajoituksiin vaikuttaa mm. alueiden erilaiset vesivarantotilanteet. Siirtoverkon rajoitukset vaikeuttavat täydellistä kilpailua Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla (Kara 2004)

Elbas-markkinat tarjoavat jatkuvan kaupankäyntimahdollisuuden aina yhtä tuntia ennen sähkön toimitusta asti. Elbas-markkinoilla voi käydä kauppaa tunnin mittaisista sähkösopimuksista kaikille tunneille 00.00–23.00 CET. Kaupan-käyntivaluuttana toimii euro.

Elbas-markkinat täydentävät Elspot-markkinoita ja kansallisia markkinoita. Elspot-markkinoilla kauppaa käydään tuntisopimuksista, joiden toimitusaika on seuraavana päivänä. Tarjoukset täsmäytetään aina kello 12.00 CET. Tällöin Elspot-markkinoilla hinnan täsmäytyksen ja toimituksen

välinen aika voi olla jopa 36 tuntia. Kulutuksen ja markkinatilanteen muuttuessa markkinaosapuolilla voi olla tarvetta käydä kauppaa näiden 36 tunnin aikana. Tämän vuoksi Elbas-markkinat avattiin vuonna 1999.

Elbas-markkinoilla on kolme markkina-alueita: Suomi, Ruotsi ja Itä-Tanska. Kaikkien alueiden asiakkaat voivat käydä kauppaa vapaan siirtokapasiteetin rajoissa. Elbas huomioi vapaan siirtokapasiteetin Elspot-markkinoiden kaupankäynnin päätyttyä. Mikäli esimerkiksi Suomen ja Ruotsin välinen siirtokapasiteetti on täysin käytössä, eivät Itä-Tanskan ja Ruotsin asiakkaat näe lainkaan Suomessa tehtyjä hintatarjouksia. Mikäli kapasiteettiä on riittävästi, näkyy kaikilla markkina-alueilla yhteinen hinta, jota voi käyttää vapaasti siirtokapasiteetin salliessa. (Nord Pool WWW, 2006)

### *2.6.2 Johdannaismarkkinat*

Nord Pool tarjoaa asiakkailleen joukon johdannaistuotteita: futuureja, termiinejä, optioita, erotussopimuksia (Contract for Difference, CfD), sähkösertifikaatteja (Electricity Certificate, electrificate) sekä päästösopimuksia (European Union allowance, EUA). Kaikki Nord Pool'in johdannaistuotteet selvitetään rahasuorituksena. Johdannaisia käytetään sekä riskinhallinnan työkaluina että sijoituskohteina. Jotkut kaupankävijät pyrkivät hyötymään sähkömarkkinoiden suuresta volatiliteetista johdannaisten avulla ja samalla lisäävät huomattavasti johdannaismarkkinoiden likviditeettiä.

Nord Pool toimii johdannaiskaupassa aina toisena osapuolena ja samalla takaa kaupasta syntyneiden oikeuksien ja velvollisuuksien täyttymisen. Nord Pool vaatii kaupankävijöiltä vakuudet mahdollisia tappioita varten, jotka voisivat syntyä jos joku osapuoli ei pysty suoriutumaan velvoitteistaan.

Fuutureiden selvitys on tapahtunut rahasuorituksena vuodesta 1997 alkaen. Tätä ennen futuureiden juoksuaika ylsi vain kolmeen vuoteen. Kaupankäynti oli vilkkainta futuurin erääntymisen lähellä. Sen sijaan OTC-markkinoilla kaupankäynti oli vilkkainta johdannaisilla, joilla oli vielä reilusti juoksuaikaa jäljellä. Nord Pool vastasi tähän ottamalla käyttöön termit, jotka olivat samalla tavalla standardoituja kuin OTC-markkinoiden johdannaiset ja joiden juoksuaikat ylsivät aina neljään vuoteen asti. Samalla futuurien juoksuaikaa lyhennettiin kolmesta vuodesta 8–12 kuukauteen. Vuoden 2003 alussa Nord Pool uudisti jälleen futuurimarkkinoita lyhentämällä juoksuaikaa edelleen 6 viikkoon.

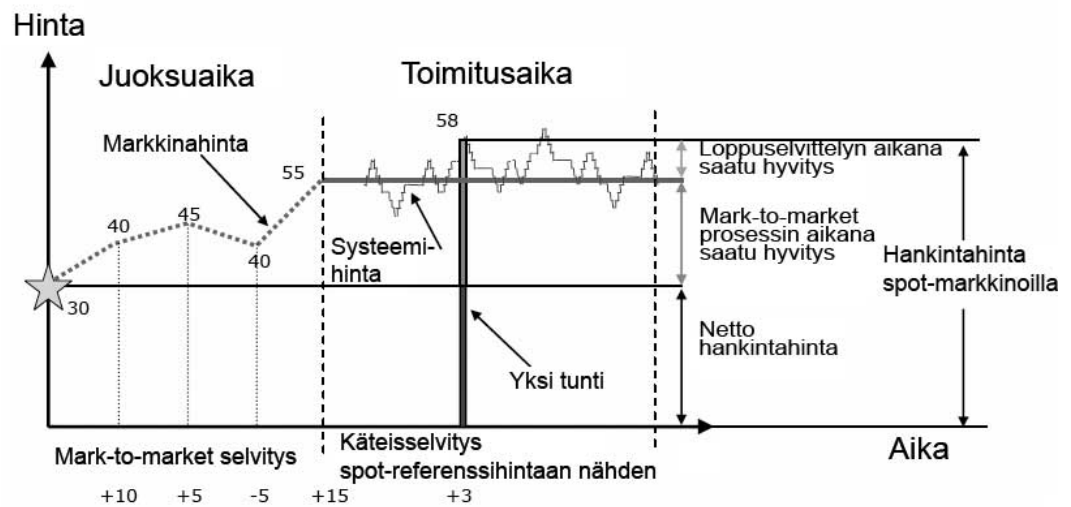
Markkinoilla siis suosittiin lyhyen juoksuajan futuureja sekä pitkän maturiteetin termiinejä. Pääsyy tähän oli futuureiden ja termiinien erilaiset vakuusmenettelyt.

## **Futuurit**

Nord Pool tarjoaa sekä päivä- että viikkofutuureita. Päiväfutuureja on seuraavalle seitsemälle päivälle ja viikkofutuureita seuraaville 6 viikolle. Fuutureiden selvittelyyn liittyy päivittäinen selvitys (mark-to-market) sekä juoksuajan kuluttua tapahtuva maturiteettipäivän spot-hintaan suhteutettava selvitys. Päivittäisessä selvityksessä selvitysyhteisö veloittaa/hyvittää sopimusosapuolten tilejä summalla, joka määräytyy futuurin markkinahinnan muutoksen mukaan. Lopullisessa selvityksessä referenssinä toimii futuurin erääntymispäivän kurssi, jota verrataan päivän spot-hintaan. (Nord Pool, 2006b)

Kuva 8 esittää tilannetta, jossa on ostettu futuurisopimus hintaan 30 EUR/MWh. Futuurin juoksuaikana sopimuksen markkinahinta kohosi 55 EUR/MWh. Päivittäisessä mark-to-market -prosessissa futuurin ostajaa on hyvitetty yhteensä 25 EUR/MWh verran. Toimitusajanjakson ajan futuurin ostajaa hyvitetään/veloitetaan päivittäisen spot-hinnan ja futuurin

eräpäivän hinnan välisen erotuksen verran. Kuvaan markatun tunnin aikana futuurisopimuksen ostajaa hyvitetään 3 EUR/MWh verran (58–55). Jos sähkö olisi ostettu spot-markkinoilta, olisi sen hinta ollut 58 EUR/MWh. Nyt kuitenkin ollaan saatu 28 EUR/MWh hyvitystä futuuriposiitiosta. Kokonaiskustannus futuurisuojausten kanssa jää siis 30:een EUR/MWh.

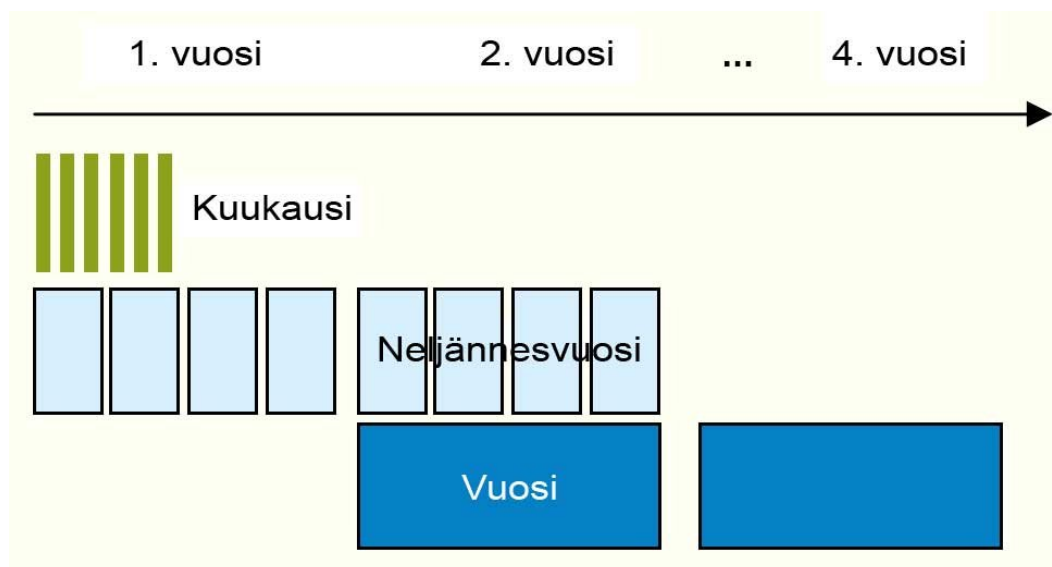


**Kuva 8: Futuurin selvitysketju. (Nord Pool, 2006b)**

## Termiinit

Aiemmin Nord Pool tarjosi termiinejä, joiden toimitusaikana toimi talvi- tai kesäkausi tai kokonainen vuosi. Nykyisin termiinien kohteena on kuukauden, neljännesvuoden tai vuoden toimitus. Kuukausitermiinejä tarjotaan rullaavasti seuraavaksi kuudeksi kuukaudeksi ja ne eivät jakaannu pienempiin maturiteetteihin. Neljännesvuosisopimukset sen sijaan jakaantuvat kuukausisopimuksiksi juoksuajan lähestyessä loppua. Vuosisopimukset voivat myös pilkkoontuvat neljännesvuosisopimuksiksi, riippuen sopimuksen ehdoista. Vuosisopimus pilkkoontuu neljännesvuosisopimuksiksi kun juoksuaikaa on jäljellä yks vuosi. Kuvasta

9 käy ilmi kootusti markkinoilla tarjolla olevat termiinit sekä niiden jakautuminen lyhyempiin juoksuaikoihin. (Nord Pool, 2006b)



**Kuva 9. Termiinien juoksuajat. (Nord Pool, 2006b)**

Termiinien yhteydessä ei suoriteta päivittäistä tilien selvittelyä, vaan mahdolliset tappiot ja voitot kumuloituvat ja erääntyvät vasta termiinien erääntymispäivänä. Termiinien erääntymispäivästä lähtien sopimusosapuolten tileillä tulee olla rahaa toimitusperiodin ajan. Termiinien selvittely toimitetaan aivan kuten futuureiden osalta.

### **Optiot**

Optio on oikeus ostaa tai myydä kohde-etuutta ennalta sovittuun hintaan ennalta sovittuna ajankohtana. Nord Pool tarjoaa markkinaosapuolille eurooppalaisia optioita, jotka voidaan toteuttaa vain eräpäivänä. Optioiden kohde-etuutena ovat neljännesvuoden sekä vuoden mittaiset termiinisopimukset. Kun optio erääntyy, lasketaan uusi sarja liikkeelle.

Optioita lasketaan liikkeelle aina viidellä eri toteutushinnalla. Toteutushinnan referenssinä toimii kohde-etuutena olevan termiinien hinta ja spreadi toteutushintojen välillä määräytyy optiosopimuksen mukaan.

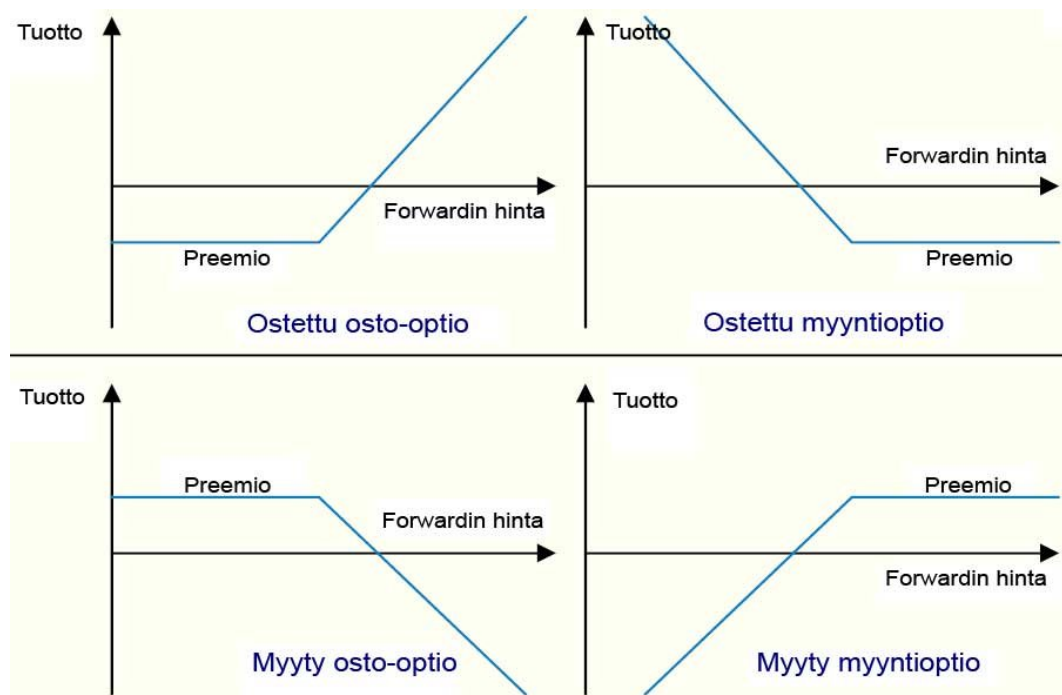


Mikäli termiin hinta laskee (nousee) toiseksi alimman (korkeimman) toteutushinnan tasolle tai sen ali (yli), lasketaan automaattisesti liikkeelle uuden toteutushinnan omaavia optioita.

Option erääntyessä optiolla on neljä erilaista voitto-tappio -käyrää, jotka on esitetty kuvassa 10. Mahdolliset voitot ja tappiot määräytyvät kohde-etutena olevan termiin hinnan, toteutushinnan sekä preemion mukaan. Ostetun option kohdalla mahdollinen tappio rajoittuu optiosta maksettuun preemioon.

Ostettu osto-optio (long call) turvaa ostajalleen suojan markkinahinnan nousua vastaan jättäen samalla avoimeksi mahdollisuuden hyötyä hintojen laskusta. Myyntioption ostamalla (long put) sähkön tuottaja voi turvata sähköstä saamansa minimihinnan. Myyntioptiolla sähkön tuottaja voi suojautua myös volyyimiriskiltä tilanteessa, jossa esimerkiksi kuivuuden vuoksi sähkön hinta nousee ja kysyntä laskee.

Optioiden avulla voidaan luoda monia erilaisia strategioita. Optioiden joustavuuden ja likvidiyden vuoksi ne ovat hyödyllisiä instrumentteja sekä suojaajille että välittäjille. Voittoa tavoitteleva suora jäsen voi suojauksen sijasta yhdistää osto- ja myyntioptioita straddle- tai strangle -positioksi, jonka avulla voi hyötyä hinnan voimakkaasta vaihtelusta.



**Kuva 10: Option tuottokäyrät. (Hull, 2004)**

### **Aluehintaerosopimukset (engl. Contract for Difference, CfD)**

Nord Poolin eri alueilla voi siirtoverkon rajoitteista johtuen olla eri aluehinnat. Tämän vuoksi termiini- tai futuuri ei toimi täydellisenä suojana hintariskiä vastaan, sillä ne eivät poista alueriskiä. Vuonna 2004 aluehinnat olivat systeemihinnan kanssa yhtäsuuret vain 25,3 % ajasta. Tämän vuoksi termiini- tai futuurisuoja on aluehinnan ja systeemihinnan välisen eron suuruinen basis-riski. Nord Pool tarjoaakin alueriskiltä suojautumiseen hintaerosopimuksia (CfD), joiden avulla voidaan luoda täydellinen suoja vaikka hinta olisikin jakautunut alueellisesti.

CfD-sopimusten avulla täydellisen suojan hintariskiä vastaan voi luoda suojaamalla tarvittavan volyymin termiineillä, sen jälkeen suojaamalla aluehintariskin saman periodin ja volyymin omaavilla CfD-sopimuksilla. Lopuksi itse sähkö ostetaan markkinoilta spot-hintaan.

Nord Pool tarjoaa CfD-sopimuksia kuuden aluehinnan ja systemihinnan erotuksesta. Aluehinnat, joita vastaan voi suojautua, ovat Norjan, Ruotsin, Suomen, Länsi- ja Itä-Tanskan sekä Saksan (Phelix) aluehinnat.

CfD-sopimus on termiinisopimus aluehinnan ja systeemihinnan erotuksesta. Sopimuksen markkinahinta heijastaa kaupankäyntiaikana markkinoiden odotuksia aluehinnan poikkeamasta systeemihinnasta toimitusjaksolla. CfD-sopimuksen hinta voi olla positiivinen, negatiivinen tai nolla. Markkinoiden odottaessa aluehinnan olevan systeemihinnan yläpuolella on CfD-sopimuksen hinta positiivinen ja päinvastoin.

### **Sähkösertifikaatit (engl. Electricity Certificate)**

Sähkösertifikaatit ovat sopimuksia, jotka johtavat fyysiseen sähkön toimitukseen. Sähkösertifikaateilla käydään kauppaa internetin välityksellä tai puhelimitse. Sopimuksen kohteena on sähkön toimitus kolme päivää kaupankäynnin jälkeen. Kaupankäyntivaluuttana toimii SEK ja kauppaa voi käydä arkipäivisin kello 10.00 – 14.00 CET.

### **Päästösopimukset**

Nord Pool aloitti päästösopimuskaupan helmikuussa 2005. Päästösopimuksilla (European Union allowance, EUA) pyritään vastaamaan ilmastonmuutosuhkaan rajoittamalla hiilidioksidin sekä muiden kasvihuonekaasujen päästöjä. Nord Pool tarjoaa sopimuksia vuodesta 2006 vuoteen 2012 asti kattaen koko Kioton ilmastopimuksen ensimmäisen aikakauden. Nord Pool oli ensimmäinen pörssi, joka tarjoaa päästösopimuksia. (Nord pool, 2006b)

Nord Pool:ssa on myös EUA -spot tuote, jonka kaupankäynti alkoi lokakuussa 2005. Tämän tuotteen toimitus tapahtuu samana päivänä kello 16.00 mennessä ja maksu tapahtuu kolmen päivän kuluessa kaupankäynnistä.

### 2.6.3 OTC-markkinat

OTC-markkinoilla (Over the Counter) tarkoitetaan yleisesti pörssin ulkopuolista kaupankäyntiä. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla ostetaan ja myydään paljon sähköä myös Nord Pool:in ulkopuolella. Sähkösopimuksia voidaan OTC-markkinoilla solmia suoraan kahden osapuolen välillä tai välitysyhteisön avulla. Välittäjät tarjoavat sekä vakioituja että räätälöityjä sopimuksia. OTC-markkinoiden etuna onkin niiden tuoma mahdollisuus erittäin tarkasti räätälöityihin sopimuksiin. Kahdenkeskeisten sopimusten pituudet ovat sidoksissa johdannaismarkkinoihin: standardimuotoisia johdannaista on tarjolla yleisesti kolmen vuoden päähän ja kahdenkeskeisetkin sopimukset yleensä loppuvat kolmeen vuoteen. OTC-markkinoihin liittyy aina vastapuoliriski. Vastapuoliriskillä tarkoitetaan riskiä, joka syntyy vastapuolen tahdosta ja mahdollisuuksista noudattaa sopimusta.

Nord Pool tarjoaa selvityspalveluita pohjoismaisille OTC-markkinoille. Pohjoismaiset sähkön OTC-markkinat ovat erittäin aktiiviset ja Nord Pool toimii vastapuolena noin 80 %:lle standardoiduista johdannaisista pohjoismaisilla OTC-markkinoilla. Nord Pool tarjoaa selvityspalveluita ainoastaan standardoiduille sopimuksille. Kun sopimus on rekisteröity Nord Pool Clearingiin, siirtyy vastapuolen velvollisuus selvityksestä ja toimituksesta Nord Poolille.

Nord Pool Clearing aloitti toimintansa vuonna 1997 ja sen sopimusten volyyymi on ollut siitä lähtien kasvussa. Selvitysyhteisö tarjoaa OTC-markkinoilla toimiville seuraavia etuja:

- Useiden vastapuolten sijasta OTC-markkinoilla toimivalla taholla onkin vain yksi vastapuoli, Nord Pool.
- Nord Pool netottaa asiakkaan sopimusten määrät, jolloin eri suuntaisista (osto vs. myynti) sopimuksista ei joudu maksamaan vakuuksia kuin erotuksen verran.
- Nord Pool pienentää vastapuoliriskiä kantamalla itse vastuun sopimusten selvittelystä ja toimituksesta.

- Nord Pool Clearing tarjoaa OTC-markkinaosapuolille helppokäyttöisen liittymän, jolla voi hallita sopimuksia.

## 3. AIEMPI SÄHKÖN MARKKINAHINNAN TUTKIMUS

### 3.1 Sähkön markkinahinnan mallinnus

Bunn (2004) kuvasi sähkömarkkinoiden käyttäytymistä ja hinnan muodostukseen vaikuttavia tekijöitä Britannian sähkömarkkinoilla. Hän toteaa, että vaikka vesi- ja ydinvoimalla tuotetaan joillekin markkinoille merkittävä osuus sähköstä, on sähkön tuotantohinta erittäin riippuvainen öljyä, maakaasua sekä kivihiiltä käyttävien generaattoreiden raaka-ainekustannuksista – eli öljyn, maakaasun sekä kivihien markkinahinnasta. Toisaalta ongelmaksi voi myös syntyä raaka-aineen markkinahinnan ja sähkön markkinahinnan välisen kausaliteetin suunta, kumpi ohjaa kumpaa? Raaka-aineiden hintojen lisäksi myös teknologinen kehitys vaikuttaa sähkön markkinahintaan. Voimalaitoksen ikä saattaa olla 40 vuotta, mutta tällä välin teknologia kehittyy ja tämän seurauksena on eri tehokkuuksilla toimivia voimaloita käytössä. Voimaloiden erilaiset tehokkuudet ja samalla kustannusrakenteet vaikuttavat myös tietynä ajankohtana tuotetun sähkön hintaan. Joskus markkinasähkön tuotannossa joudutaan turvautumaan vanhempaan teknologiaan, joka kasvattaa tuotannon kustannuksia.

Sen lisäksi, että samasta raaka-aineesta voidaan tuottaa sähköä erilaisilla kustannustehokkuuksilla, on myös eri teknologioita hyödyntävillä voimaloilla aivan erilaiset kustannusrakenteet. Pienimmän rajakustannuksen omaava voimala tuottaa sähköä lähes kokoajan, mutta kysynnän kasvaessa joudutaan turvautumaan myös muihin voimaloihin. Lyhyet kysyntäpiikit voivat olla joillekin voimaloille ainoita toiminta-aikoja, joiden aikana on myös saata kate koko vuoden kiinteille kuluille.

Siirtoverkoissa ilmenevien rajoitteiden vuoksi joskus joudutaan käynnistämään paikallisia voimaloita, joiden tuotantokustannukset ovat

korkeammalla tasolla kuin markkinoilla yleisesti. Erilaisiin kustannusraeknteisiin perustuvien tuotantoteknologioiden käyttö kasvattaa markkinahinnan volatiliteettia.

Viimeisenä sähkön hintaan vaikuttavana tekijänä Bunn mainitsee sähkömarkkinoiden epätäydellisyydet. Useilla markkinoilla toimii muutama dominoiva pelaaja, jotka voivat vaikuttaa markkinahintaan omilla toimillaan. Toisaalta myös kilpailullisilla markkinoilla voi esiintyä siirtorajoituksista johtuen paikallista markkinavoimaa.

Eydeland ja Wolyniec (2003) kuvasivat sähkön hinnan mallintaminen on vaikeaa seuraavien tekijöiden vuoksi:

1. Sähkön hinnan käyttäytymisen tärkeiden ominaisuuksien mallintaminen:
  - Hintapiikit
  - Keskiarvohakuisuus
  - Hinnan hajonnan lihavat hännät
  - Kausiluonteisuus
2. Mallin tulisi kuvata seuraavat tekijät:
  - Volatiliteettipinta
  - Eri termiinien korrelaatorakenne
  - Korrelaatorakenteet eri sähkön hinnan ja muiden hyödykkeiden, kuten maakaasun välillä.
3. Mallin muuttujien tilastolliset ominaisuudet tulisi olla stabiilit. Tulisi saavuttaa tietty varmuus siitä, etteivät mallin perusparametrit muutu merkittävästi ajan kuluessa.

Sähkön hintaa on aiemmin pyritty mallintamaan matemaattisin ja tilastollisin keinoin paljolti. Tutkimukset voidaan jakaa karkeasti tilastollisiin malleihin sekä fundamentaalisiin malleihin. Tilastolliset mallit keskittyvät aikasarjan tilastollisten ominaisuuksien kuvaamiseen ja niiden mallintamiseen. Usein käytetään satunnaisia, stokastisia prosesseja kuvaamaan sähkön hinnan liikettä. Näistä yleisimpiä ovat Brownin liike, jump-diffusion-prosessit sekä keskiarvoon hakeutuvat prosessit. Esimerkiksi Wallace ja Fleten (2002) tutkivat stokastisten mallien käyttöä sähkömarkkinoilla. Yhteistä tilastollisille tutkimuksille on se, etteivät ne

huomioi mahdollisia reaali maailman selittäjiä mallissa. Ne eivät huomioi tekijöitä, jotka vaikuttavat suoraan tai välillisesti sähkön hintaan, kuten oljyn markkinahinta tai lämpötila kulutuksen selittäjänä. Fundamentaalisia malleja ovat tutkineet esimerkiksi Skantze ja Ilic (2001).

Perinteisillä rahoitusmarkkinoilla käytetään usein myös malleja, jotka yhdistävät termiinihinnat sekä spot-hinnat. Nämä mallit perustuvat arbitraasimahdollisuuksien automaattiseen poistumiseen markkinoilta. Termiinin hinnan tulisi olla tasapainossa riskittömän koron kanssa, sillä ostajalla on mahdollisuus joko ostaa kohde-etuus heti tai sijoittaa rahansa riskittömällä korolla ja ostaa tuote myöhemmin termiinin avulla sovitulla hinnalla. Tällaista mahdollisuutta ei kuitenkaan ole sähkömarkkinoilla koska sähköä ei voida varastoida. Yleinen käsitys on, kuten Skantze ja Ilic (2000) myös asian ilmaisivat, että spot-hinta kuvaa ainoastaan kysynnän ja tarjonnan nykyistä tilaa ja on siis riippumaton termiinihinnoista.

### **3.2 Tilastolliset mallit**

Tilastolliset mallit mallintavat markkinahinnan prosessia suoraan. Ne hyödyntävät parametrien estimoinnissa historiallista markkinadataa. Viimeaikoina esimerkiksi Lucia ja Schwartz (2002), Davidson (2002), Vehviläinen ja Keppo (2003) sekä Deng (2000) ovat tutkineet sähkön markkinahinnan tilastollista mallintamista. Kaikki tilastolliset mallit, lukuun ottamatta aivan ensimmäisiä malleja, lähtevät liikkeelle rahoitusmaailman perustyökalusta, geometrisesta Brownin liikkeestä. Rahoitusmarkkinoilla tilastolliset mallit toimivat erittäin hyvin, sillä saatavilla on runsaasti markkinadataa pitkältä aikaväliltä. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sen sijaan ei ole pitkää historiaa, jonka avulla voitaisiin tehdä luotettavia tilastollisia malleja. Lyhyen historiansa johdosta tilastolliset mallit soveltuvat paremmin lyhyemmän aikavälin mallintamiseen, sillä ne eivät pysty historian puutteen vuoksi löytämään pidemmän aikavälin ominaisuuksia.



### 3.3 Fundamentaaliset mallit

Fundamentaaliset mallit perustuvat yleisesti tuotantokustannusten ja sähkön kulutuksen mallintamiseen. Voidaan esimerkiksi laskea markkinoille tasapainohinta, kuten Fleten & Wallace (1998) tekivät. Toinen mahdollisuus on mallintaa tarjontafunktio suoraan. Tällaista lähestymistä ovat käyttäneet esimerkiksi Skantze (2000) sekä Eydeland ja Geman (1999). Fundamentaaliset mallit vaativat yleensä kattavan lähtödatan, jonka kerääminen ja ylläpito on työlästä.

Tuotantokustannuksiin perustuvia malleja voidaan kuvata optimointiongelmiksi, joiden tavoitteena on minimoida tuotantokustannukset ja samalla tyydyttää tuotantotarpeet tietyllä alueella ottaen huomioon operatiiviset ja ympäristölliset rajoitteet. Tämän johdosta mallin tulisi huomioida alueen tuotantomahdollisuudet eli olemassa oleva ja suunniteltu kapasiteetti, raaka-aineiden kustannukset sekä niiden lämpöarvot. Lisäksi tulee huomioida kysyntään vaikuttavat taloudelliset, demografiset sekä tilastolliset piirteet. Rajoitteita tuotannolle luovat esimerkiksi siirtoverkkojen kapasiteettirajoitteet, kustannukset sekä hävikit, ympäristörajoitteet kuten päästömaksut sekä päästöjen määrä ja tuotantorajoitteet kuten tuotannon maksimi ja minimitasot, katkot, reservit sekä ylös- ja alasajokustannukset.

Tuotantokustannusmalleilla voidaan ennustaa sekä lyhyen että pitkän aikavälin spot-hintoja. Ne keskittyvät tiettyjen ensisijaisten faktorien löytämiseen, joiden avulla sähkön markkinahintaa voidaan selittää. Mallintamisen haasteet tulevat esiin sovitettaessa mallia markkinadataan, sillä tuotantokustannusmallit eivät yleensä käsittele markkinadataa. Nämä mallit eivät yleensä pysty esittämään hintaprosessin erityispiirteitä, kuten volatilitteettia tai markkinahinnan hajonnan suurempia momenteja.

Fundamentaalisten menetelmien tavoitteena on mallintaa kysyntä-tarjonta suhteita ja löytää markkinahinta ratkaisuna tiettyyn optimointiongelmaan eli toisin sanoen tasapaino-ongelmaan. Fundamentaalisten ja tuotantokustannusmallien erona on se, että fundamentaaliset mallit sisältävät markkinainformaatiota. Ne eivät rajoitu ainoastaan tuotantokustannusten minimointiongelman ratkaisuun. Esimerkiksi Bessembinder ja Lemmon (2001) ehdottavat mallia, jossa termiinihintaa pyritään löytämään termiinien kysynnän tasapainoehdolla. Supatgiat, Zhang ja Birge (2001) määrittivät markkinoiden selvityshintoja markkinaosapuolten tarjousstrategioiden Nash-tasapaino-ongelman avulla. Näiden mallien heikkoutena on niiden huono kyky mallintaa markkinahinnan dynamiikkaa kvantitatiivisesti. Sen sijaan ne sopivat erittäin hyvin markkinahinnan käyttäytymisen kvalitatiiviseen analyysiin.

Kun ymmärretään miten markkinahinnan prosessi määräytyy, on seuraavana askeleena tämän prosessin syötteet. Eydeland ja Wolyniec (2003) lähtevät liikkeelle sähkön tuottajien lähtökohdista. On luonnollista olettaa, että sähkön tuottajat miettivät tarjoushintoja määrittäessään jokaisen tuotantoyksikön tuotantokustannuksia. Heidän tuotantokustannukset riippuvat lähinnä polttoaineiden hinnoista sekä voimalaitoksen muuttuvista kustannuksista. Muuttuvat kustannukset voidaan jakaa esimerkiksi päästökustannuksiin sekä muihin muuttuviin kustannuksiin.

Kustannusten lisäksi Eydeland ja Wolyniec (2003) esittävät tuotantokustannuksiin merkittävästi vaikuttavina tekijöinä käytössä olevan kapasiteetin määrän. Huoltotöiden vuoksi generaattoreita joudutaan pysäyttämään säännöllisin välein. Nämä prosessit ovat yleensä ennalta tiedossa. Suurempi vaikutus sähkön tuotantokustannuksiin onkin laitevioista johtuvat pakotetut alasajot, joiden aikana generaattoreita ei voida käyttää lainkaan. Alasajojen lisäksi myös kysynnästä johtuva generaattoreiden käyttöaste vaikuttaa tuotantokustannuksiin. Sähkön kysynnällä ja sen hinnalla onkin todettu olevan merkittävä

riippuvuussuhde. Kysynnän ollessa korkea, markkinahinnan hajonta on myös suurempaa kuin kysynnän ollessa normaalilla tasolla. Tämä johtunee pakotettujen alasajojen suuremmasta vaikutuksesta hintaan tuotannon ollessa huipussaan. Sähkön kysyntä onkin yksi merkittävimmistä sähkön hintaan vaikuttavista tekijöistä. Usein sähkön kysyntää on hyödyllistä esittää lämpötilan funktiona.

Lämpötilan käyttäminen kysynnän mallintamisessa on luontevaa, sillä lämpötilasta on käytettävissä valtavasti historiallista dataa ja lämpötilan tilastolliset ominaisuudet ovat stabiilit. Lämpötilamuuttujana käytetään yleensä päivän keskilämpötiloja, päivän alimpia lämpötiloja tai päivän ylimpiä lämpötiloja.

### **3.4 Hybridimallit**

Kolmas lähestymistapa on yhdistää tilastolliset ja fundamentaaliset mallit. Hybridit mallit yhdistävät fundamentaaliset tekijät sekä stokastisen prosessin. Fundamentaalisesta mallista saadaan tehokas informaation käyttö ja stokastisesta mallista hyvä yhteensopivuus markkinadatan kanssa. Fundamentaaliset komponentit pyrkivät selittämään kysyntä-tarjonta-riippuvuuksia ja stokastisilla tekniikoilla pyritään kuvaamaan prosessin evoluutiota. Poiketen rahoituksen malleista, sähkön markkinahintaa tutkittaessa pyritään selittämään hinnan muutosten lisäksi myös muutosten taustalla piilevät syyt. Toisaalta samanaikaisesti pyritään myös saavuttamaan rahoituksellisten mallien tärkein piirre, markkinahintojen sovitus malliin. Hybridien mallien etu tilastollisiin malleihin on siinä, että ne käyttävät selitettävän markkinahinnan historian lisäksi myös muita selittäviä tekijöitä. Täten yhdistetyt mallit sisältävät paljon enemmän informaatiota hintaan vaikuttavista tekijöistä. Huonona puolena toisaalta joudutaan ottamaan malliin mukaan lisää parametreja.

Vehviläinen ja Pyykkönen (2004) loivat mallin, jossa fundamentaalisia ajureita on mallinnettu stokastisten prosessien avulla. Fundamentaalisia tekijöitä, kuten ilmastoa, on tutkittu kauan ja niiden mallintamiseen on kehitetty hyvin toimivia stabiileja malleja. Näitä voidaan hyödyntää markkinatasapainomallin avulla mallinnettaessa sähkön markkinahintaa. Tutkimuksessaan he käyttivät fundamentaalisina ajureina lämpötilaa, sademääriä, lumikuormaa ja sen sulamista, jokien virtaamia sekä reserveinä käytettävien vesialtaiden täyttöasteita. Lumikuorman syntymistä mallinnettiin lämpötilan avulla. Sateet kasvattivat luomikuormaa lämpötilan ollessa negatiivinen. Lumikuorman sulamisvirta puolestaan syntyy lämpötilan noustessa positiiviseksi. Lumikuorman sulamisnopeus suhteutettiin sen massaansa. Tämän jälkeen virtaamat saatiin yhdistämällä sademäärä sekä lumikuorman muutokset.

Osa virtaamasta siirretään vesivarantoihin ja osa hyödynnetään suoraan sähkön tuotannossa. Koska reservialtaiden koko on rajallinen, osa virtaamasta joudutaan laskemaan suoraan läpi. Näiden avulla voidaan laskea vesivarannon taso lisäämällä vesivarannon lähtötasoon virtaama ja vähentämällä siitä veden käyttö voimaloissa sekä hyödyntämättä jätetty virtaama.

Vehviläisen ja Pyykkösen (2004) vertasivat omaa markkinahintamalliaan staattiseen, termiiniikäyrän avulla estimoituun malliin. Staattisen mallin ennusteet perustuivat vuoden alun arvoihin ja tällaisen mallin keskivirhe (RMSE) oli 7,4 EUR/MWh, kun heidän luomansa mallin keskivirhe oli ainoastaan 4,4 EUR/MWh. Toisaalta heidän mallinsa sisälsi enemmän informaatiota, sillä sen arvot laskettiin kuukausittain. Mikäli staattiseen malliin tuotiin kuukausittaiset päivitykset, sen keskivirhe pieneni 2,6 EUR/MWh:iin. Toisin sanoen markkinat ennustivat samalla informaatiolla sähkön markkinahinnan paremmin kuin heidän mallinsa.

### 3.5 Sähkön markkinahinnan ennustaminen

Sähkön markkinahinnan ennustaminen on tullut sähkömarkkinoiden avauduttua tärkeämmäksi sekä tuottajien että kuluttajien parissa. Hintaennusteita tarvitaan sekä spot-markkinoiden että pidemmän aikavälin instrumenttien tarjousstrategoiden luomisessa sekä tukemassa neuvotteluja. Ennustavia malleja on luotu esimerkiksi ARIMA- ja GARCH-mallien avulla. Conteras et al. (2003) loivat ARIMA-mallin, jolla he ennustivat seuraavan päivän markkinahintaa sekä Espanjan että Kalifornian markkinoilla. Heidän mallinsa virhe Espanjan markkinoilla oli noin 10 % ja noin 5 % Kalifornian markkinoilla. Garcia et al. (2003) puolestaan testasivat GARCH-mallia Espanjan ja Kalifornian markkinoilla. Heidän GARCH-mallinsa keskivirhe Espanjan markkinoilla oli viikkotasolla noin 7 % ja Kalifornian markkinoilla noin 4 %.

ARIMA- ja GARCH-mallien lisäksi on käytetty neuraaliverkkoihin perustuvia ennustemalleja (Artificial Neural Networks, ANN). Niiden avulla on ennustettu erityisesti sähkön kysyntää, mutta esimerkiksi Ramsay et al. (1998) käyttivät neuraaliverkkoihin sekä sumeaa logiikkaan perustuvaa hybridimallia Englannin ja Walesin markkinoilla ja heidän mallinsa keskivirhe oli noin 10 %. Szkuta et al. (1999) testasivat puolestaan kolmitasoista neuraaliverkkoihin perustuvaa mallia Victorian markkinoilla Australiassa ja heidän mallinsa keskivirhe oli noi 15 %. Neuraaliverkkoihin perustuvaa mallia tutkivat myös Nicolaisen et al. (2000), mutta he hyödynsivät mallissaan Fourier-Hartley muunnosta ANN malliin syötettävän hintadatan suodattimena. Stokastiset mallit kilpailevat myös perinteisten mallien kanssa päivittäisen tai viikottaisen sähkön hinnan ennustamisessa. Esimerkiksi Valenzuela ja Mazumdar (2001) ovat tutkineet stokastisia ennustemalleja.

## 4. TUTKIMUSMETODOLOGIA

### 4.1 Mallin rakentaminen

Käytännössä on kaksi tapaa luoda ekonometrisia malleja. Parempana näistä voidaan pitää Koytsoyianniksen (1977) mukaan lähestymistapaa, jossa ensin luodaan matemaattinen malli taloustieteen teorian pohjalta. Teoria antaa tutkijalle hypoteesin, jota voidaan testata ekonometrisin tekniikoin. Teorian testaaminen alkaa matemaattisen mallin luomisella. Tämän jälkeen mallia testataan havainnoidulla datalla. Tämän vaiheen tarkoituksena on selvittää, pystyykö teoria selittämään reaali maailman käyttäytymistä. Mikäli malli toimii havainnoidulla datalla hyvin, voidaan se hyväksyä. Mikäli empiria osoittaa mallin olevan sopimaton reaali maailmasta havainnoituun dataan, voidaan malli joko hylätä tai sitä voidaan muokata empiirisen datan tuoman tiedon perusteella. Toisaalta on pystytty myös osoittamaan, että tuomalla malliin lisää muuttujia ja muokkaamalla mallia, voidaan päästä hyviin tuloksiin (Koytsoyiannis, 1977). Yhtenä tällaisen menetelmän merkittävimmistä saavutuksista voidaan pitää Evansin (1969) tutkimaa investointifunktiota.

Toinen lähestymistapa on lähteä liikkeelle observoidusta datasta ja johtaa siitä käyttäytymistä kuvaava teoria. Tämä menetelmä sisältää kuitenkin paljon heikkouksia. Se näyttää absurdilta jo sen perusteella, että taloustiede antaa jo nykyisellään lukuisia erilaisia hypoteeseja, joita voidaan testata empiirisesti. Taloudesta on valtavan paljon mitattua dataa saatavilla. Teorian avulla voidaan tehdä oletuksia, mitä tästä datan valtamerestä kannattaa ottaa mukaan tutkimukseen. Lisäksi tutkimalla sattumanvaraisesti dataa, voidaan päätyä löytämään merkityksettömiä riippuvuuksia. On pystytty löytämään esimerkiksi voimakasta korrelaatiota listattujen osakkiden lukumäärän ja New Yorkissa syntyneiden vauvojen välillä. Viekas tutkija voikin aina luoda jonkin mallin datan pohjalta ja

kutsua sitä teoriaksi. Tällöin ei kuitenkaan voidan väittää teorian olevan testattu empiirisellä datalla, sillä tätä dataa on käytetty testaamisen sijasta mallin luomiseen. Tuleekin siis eriyttää toisistaan teorian testaus sekä uuden mallin luominen. (Koytsoyiannis, 1977)

## 4.2 Lineaarinen regressiomalli

Tässä tutkimuksessa muodostetaan lineaarinen regressiomalli, jossa selitetään sähkön markkinahintaa useilla selittävillä tekijöillä. Selittävät tekijät valitaan ennen testien suorittamista. Muuttujiksi valitaan tekijöitä, jotka ovat teorian tai käytännön kannalta oletettavasti sähkön markkinahintaan vaikuttavia tekijöitä.

Tässä työssä luodaan kaksi erilaista mallia. Ensimmäisellä mallilla pyritään selittämään sähkön markkinahintaa Nord Poolissa erilaisin fundamentaalisin muuttujin. Tämän mallin osalta on tärkeää, että regressioanalyysin oletukset ovat voimassa. Toinen malli puolestaan pyrkii ennustamaan sähkön markkinahintaa Nord Poolissa. Tällöin tärkeämpää on mallin ennustekyky, kuin menetelmien vaatimat oletukset. Mikäli aikasarja on epästationaarinen ja sisältää esimerkiksi tietyn trendin, voidaan tämän olettaa jatkuvan myös ennustekaudella.

Selittävän mallin regressio suoritetaan ns.  $ARIMA(p,d,q)$  (autoregressive integrated moving average) -mallin avulla. Mallin muuttujat  $p,d$  ja  $q$  ovat suurempia tai yhtäsuuria kuin nolla ja ne liittyvät autoregressiivisuuden, integroituneisuuden sekä liukuvan keskiarvon asteisiin. Esimerkiksi  $ARIMA(0,1,0)$  on ns. random walk -prosessi, jolloin periodin  $t$  hinta riippuu periodin  $t-1$  hinnasta sekä stokastisen muuttujan saamasta arvosta. Tässä työssä käytetään  $ARIMA(1,1,0)$ -mallia. Mallin parametrien valintaan vaikuttaa käsiteltävän aikasarjan ominaisuudet, joten kyseisten parametrien käyttö perustellaan testitulosten esittelyn yhteydessä kappaleessa kuusi.

Selittävän mallin regressioyhtälö saa muodon:

$$\begin{aligned} \Delta Y_t = & b_0 + b_1 OIL_t + b_2 COAL_t + b_3 NGAS_t + b_4 GER_t \\ & + b_5 RES_t + b_6 DCG_t + b_7 TEMP_t + b_8 CO2 + b_9 Y_{t-1} + u_t \end{aligned} \quad (1)$$

Yhtälössä  $OIL_t$  on öljyn markkinahinta hetkellä  $t$ ,  $COAL_t$  on kivihiilen markkinahinta hetkellä  $t$ ,  $NGAS_t$  on maakaasun markkinahinta hetkellä  $t$ ,  $GER_t$  on Saksan sähköpörssin markkinahinta hetkellä  $t$ ,  $RES_t$  on vesivarantojen täyttöasteen poikkeama keskiarvosta hetkellä  $t$ ,  $DCG_t$  on jokien virtaama hetkellä  $t$ ,  $TEMP_t$  on Pohjoismaiden lämpötila hetkellä  $t$  sekä  $CO_2$  päästösopimuksen markkinahinta hetkellä  $t$ .  $b_0$  on yhtälön vakiotermi,  $u_t$  on regressioyhtälön satunnaismuuttuja ja muuttujat  $b_i$  ovat yhtälön parametrit.  $Y$  on selitettävä muuttuja eli Nord Poolin markkinahinta ja  $\Delta Y$  on markkinahinnan muutos. *A priori* oletuksina raaka-aineiden hintojen sekä Saksan sähkömarkkinoiden hinnan parametrien oletetaan olevan positiivisia ja vesivarantojen täyttöasteen poikkeaman sekä virtaaman parametrien oletetaan olevan negatiivisia. Raaka-aineiden markkinahintojen oletetaan korreloivan positiivisesti sähkön markkinahinnan kanssa, sillä raaka-aineiden markkinahinnan nousu nostaa sähkön tuotantokustannuksia käytettäessä kyseistä raaka-ainetta sähkön tuotannossa. Saksan markkinahinnan voidaan ajatella olevan vaihtoehtoisen tuotteen hinta, jolloin Saksan markkinahinnan nousu kasvattaa Nord Pool:n sähkön kysyntää ja näinollen nostaa sen hintaa. Vesivarantoja mitataan usein suoraan sen energiantuotantokapasiteetin määrässä (GWh), joten niiden kasvu parantaa vesivoiman tuotantomahdollisuuksia ja tekee siitä edullisempaa. Tässä työssä käytetään muuttujana poikkeamaa historiaan perustuvasta maksimaalisesta täyttöasteesta, jolloin muuttujan oletetaan korreloivan negatiivisesti sähkön markkinahinnan kanssa. Jokien virtaamien kasvu parantaa vesivoiman tuotantomahdollisuuksia, joten sen oletetaan korreloivan negatiivisesti sähkön markkinahinnan kanssa.



Satunnaismuuttuja sisältää regressioyhtälön sen osan, jota muut muuttujat eivät pysty selittämään.

Regressioyhtälön kertoimet valitaan pienimmän neliösumman menetelmällä. Tämä menetelmä sovittaa regressioyhtälön käyrän havaintoparveen siten, että havaintojen ja regressiokäyrän poikkeamien neliöiden summa on mahdollisimman pieni. Menetelmässä käytetään neliöityjä poikkeamia, sillä oletusten mukaan poikkeamien yhteenlaskettu summa on nolla. Poikkeamien neliöimisen jälkeen negatiiviset poikkeamat eivät enää kumoa positiivisia poikkeamia, joten nyt poikkeamat voidaan minimoida.

Regressiomallin hyvyttä voidaan tutkia kolmella tavalla: teoreettisten *a priori* kriteerien valossa, tilastollisten kriteerien valossa sekä ekonometristen kriteerien valossa. Teoreettiset kriteerit määräytyvät talousteorian pohjalta ja ne liittyvät kertoimien merkkiin (+/-) sekä suuruuteen. Teoreettiset kriteerit asetetaan mallin määrittelyn yhteydessä. Regressiosuoran sopivuutta havaintoihin mitataan  $R^2$ -luvulla, joka mittaa havaintojen hajontaa regressiosuoran ympärillä. Mitä lähempänä havainnot ovat suoraa, sitä parempi selitysaste, eli sitä paremmin selittävien tekijöiden muutokset selittävät selitettävän muuttujan muutoksia.  $R^2$ , korrelaatiokertoimen neliö, kertoo kuinka suuren prosentuaalisen osan selitettävän muuttujan varianssista selittävä muuttuja selittää.  $R^2$ -arvo lasketaan useamman muuttujan tapauksessa seuraavalla kaavalla:

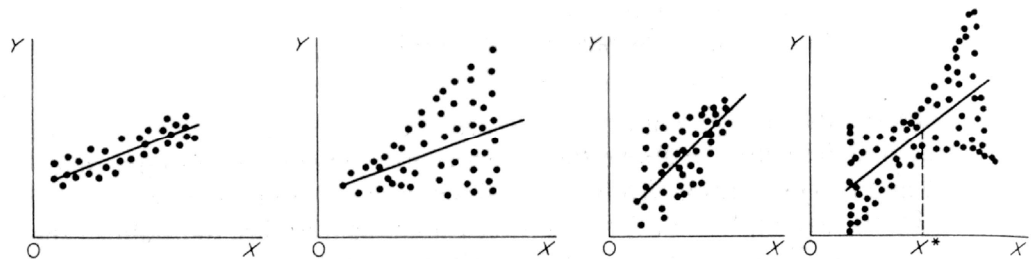
$$R_{Y.X_1 \dots X_k}^2 = \frac{\hat{b}_1 \sum yx_1 + \hat{b}_2 \sum yx_2 + \dots + \hat{b}_k \sum yx_k}{\sum y^2} \quad (2)$$

Kun regressioon lisätään uusi selittävä tekijä,  $R^2$ -arvo ei voi pienentyä. Kaavasta 2 nähdään, että yhtälön osoittaja kasvaa nimittäjän pysyessä vakiona, kun lisätään selittäviä tekijöitä. Tämän korjaamiseksi usein käytetäänkin sovitettua  $R^2$ -arvoa (adjusted  $R^2$ ), joka huomioi

vapausasteet. Tällöin  $\bar{R}^2$  kasvaa vain, jos malliin tuotu uusi selittävä tekijä pystyy selittämään enemmän kuin voidaan olettaa sattumaksi.

#### 4.3.1 Satunnaismuuttujan homoskedastisuus

Linearisessa regressiossa satunnaismuuttujan  $u$  oletetaan olevan homoskedastinen. Muuttujan todennäköisyysjakauman oletetaan pysyvän vakiona kaikille selittävien muuttujien havainnoille sekä että jokaisen  $u_i$ :n varianssi on sama kaikille selittävien muuttujien havainnoille. Toisinsanoen  $u_i$ :n varianssi ei riipu selittävien muuttujien arvoista.



**Kuva 11: Hetero- ja homoskedastisuutta kuvaavia sirontakuviaita.**

Kuva 11 esittää erilaisia tilanteita hetero- ja homoskedastisuuden suhteen. Ensimmäinen kuvaaja vasemmalta kuvaa tilannetta, jossa virhetermien varianssi on vakio. Tällöin virhetermit asettuvat tasaisesti regressiosuoran ympärille. Seuraavassa kuvassa on kyseessä positiivinen heteroskedastisuus, kolmannessa negatiivinen ja oikealla on kuva jossa varianssi aluksi laskee tiettyyn  $X$ :n arvoon asti, jonka jälkeen se lähtee kasvuun.

Taloudellisissa malleissa heteroskedastisuus on yleensä positiivista, eli satunnaismuuttujan varianssi kasvaa selittävän muuttujan arvojen kasvaessa. Koska  $u_i$ :n arvoja ei voida havainnoida, emme voi tietää oikeata heteroskedastisuuden tyyppiä. Tutkimuksissa usein oletetaan heteroskedastisuuden olevan seuraavaa tyyppiä:

$$\sigma_{u_i}^2 = k^2 X^2 \quad (3)$$

Kaavassa (3)  $k$  on vakio, joka estimoidaan mallin perusteella.

Monissa talostieteellisissä malleissa satunnaismuuttujan homoskedastisuuden oletuksen voidaan odottaa pitämättömäksi. Tämä on helppo ymmärtää, kun mietitään millaisten tekijöiden vaikutusta satunnaismuuttuja pitää sisällään. Satunnaismuuttuja sisältää selitettävään muuttujaan vaikuttavia mittausvirheitä sekä poisjätettyjä muuttujia. Molemmissa tapauksissa on syytä olettaa satunnaismuuttujan varianssin muuttuvan ajan myötä tai systemaattisesti selittävien muuttujien kanssa.  $Y$ :n kasvaessa mittausvirheet yleensä kasvavat, koska tällöin datan kerääminen ja sen reliabiliteetin tarkastaminen vaikeutuu. Lisäksi mittausvirheet yleensä kumuloituvat ajan kuluessa, jolloin niiden koko kasvaa. Toisaalta mittaustekniikka kehittyy jatkuvasti, joka voi johtaa virheiden pienenemiseen ajan kuluessa. Tärkein syy kuitenkin on se, että pois jätettyjen muuttujien arvot muuttuvat yleensä samaan suuntaan selittävien muuttujien kanssa.

Usein voidaan olettaa jo etukäteen homoskedastisuus oletuksen olevan pitämätön, jolloin tulee pohtia seurauksia joita heteroskedastisuus aiheuttaa. Mikäli homoskedastisuus oletus ei päde, seuraa neljä johtopäätöstä. Ensinnäkin ei voida laskea merkitsevyytasoja ja luottamusvälejä regressiokertoimien varianssien perusteella. Mikäli varianssi ei ole vakio, tulisi jokaiselle havainnolle laskea erikseen oma varianssi.

Toiseksi satunnaismuuttujan ollessa heteroskedastinen OLS-estimaateilla ei ole minimivarianssi ominaisuutta systemaattisesti virheettömien estimaattorien luokassa. Estimaatit ovat siis tehottomia pienissä otoksissa sekä asympotoottisesti tehottomia suurissa otoksissa. Kolmanneksi regressioyhtälön kertoimet eivät kuitenkaan tilastollisesti sisällä systemaattista virhettä, vaikka satunnaismuuttuja olisikin heteroskedastinen. Niiden odotettu arvo olisi yhä oikean parametrin

suuruinen eli  $E(\hat{b}_i) = b_i$ . Neljänneksi mallin ennustuksilla olisi suuri varianssi, eli ennusteet olisivat tehottomia. Ennusteen varianssi sisältää sekä  $u$ :n että parametriestimaattien varianssit, jotka eivät ole minimi heteroskedastisuuden vuoksi.

Heteroskedastisuutta voidaan testata useilla eri testeillä. Glejserin (1969) testi sopii monen muuttujan regressioon hyvin. Testissä suoritetaan regressio  $Y$ :lle kaikilla selittävillä muuttujilla ja lasketaan residuaalit. Seuraavaksi suoritetaan regressio residuaalien itseisarvoille käyttäen sitä selittävää muuttujaa, jonka oletetaan aiheuttavan heteroskedastisuutta. Regression muotoa ei usein tiedetä etukäteen, joten tulee kokeilla erilaisia malleja, kuten erilaisia eksponentiaalisia malleja. Tämän jälkeen valitaan parhaiten sopiva malli korrelaatiokertoimen ( $a_1$ ) sekä niiden keskivirheen ( $a_2$ ) perusteella. Heteroskedastisuus todetaan testaamalla korrelaatiokertoimen ja sen keskivirheen tilastollinen merkitsevyys. Mikäli ne poikkeavat merkittävästi nolasta, on satunnaismuuttuja heteroskedastinen. Glejserin testi antaa näin ollen myös informaatiota heteroskedastisuuden luonteesta, jonka avulla satunnaismuuttujan heteroskedastisuus voidaan poistaa. Löydetyin riippuvuussuhteen perusteella voidaan alkuperäistä dataa muokata, jotta satunnaismuuttujasta saadaan homoskedastinen. Jos esimerkiksi satunnaismuuttujan varianssin ja selittävän tekijän välinen suhde on muotoa  $E(u_i)^2 = \sigma_{ui}^2 = k^2 X^2$ , voidaan heteroskedastisuudesta päästä eroon jakamalla regressioyhtälö termillä  $\sqrt{X^2}$ . Tällöin satunnaismuuttujan varianssista tulee homoskedastinen eli  $E(u_i/X_i)^2 = 1/X_i^2 E(u_i^2) = 1/X_i^2 \sigma_{ui}^2 = 1/X_i^2 k^2 X_i^2 = k^2$ . Näin ollen satunnaismuuttujan varianssi on  $k^2$ .

Satunnaismuuttujan jakauman oletetaan olevan normaali. Symbolisesti tämä voidaan ilmaista seuraavasti:  $u \sim N(0, \sigma_u^2)$  eli  $u$  on normaalijakautunut keskiarvolla nolla sekä vakiovarianssilla  $\sigma_u^2$ . Jokaiselle

$u_i$ :lle on normaalijakauma eli  $u$ :lle on todennäköisempää saada pienempiä arvoja kuin suuria. Ääriarvot ovat sitä epätodennäköisempiä, mitä kauempana nolasta ne ovat. Normaaliusoletus on olennainen parametrien tilastollisten merkitsevyydestien tekemiselle sekä luottamusvälien laskemiselle. Vaikka normaaliusoletusta rikottaisiin, on parametrit yhä oikeita ja parhaita, mutta niiden tilastollisesta reliabiliteetista ei voida sanoa mitään merkitsevyydesteillä. Vaikka populaatio ei olisikaan normaalijakautunut, voidaan silti suurille otoksille CLT:n (Central Limit Theorem) valossa olettaa normaalijakauma (Thomas, 1964).

#### 4.3.2 Autokorrelaatio

Lineaarisen regression neljäs oletus olettaa satunnaismuuttujan  $u$  arvojen olevan riippumattomia ajallisesti. Tämä tarkoittaa sitä, ettei  $u$ :n sama arvo riipu sen edellisellä ajanjaksolla saamasta arvosta. Tällöin  $\text{cov}(u_i, u_j) = E\{[u_i - E(u_i)][u_j - E(u_j)]\} = E(u_i u_j) = 0$  kaikilla  $i \neq j$ . Mikäli  $u$ :n arvo tietyllä jaksolla on korreloitunut sen edeltävän arvon kanssa, sanotaan muuttujan sisältävän autokorrelaatiota eli sarjakorrelaatiota. Ensimmäisen asteen autokorrelaatiolla tarkoitetaan kahden perättäisen arvon välistä korrelaatiota. Toisen asteen autokorrelaatiolla puolestaan tarkoitetaan  $u$ :n arvon riippuvan kahdella edellisellä ajanjaksolla  $u$ :n saamista arvoista.

Teoriassa autokorrelaatio voi olla positiivista tai negatiivista, mutta taloudellisissa riippuvuussuhteissa se on yleensä positiivista. Tähän ovat syynä taloudellinen kasvu sekä talouden sykliset liikkeet. Useimmat taloudelliset muuttujat kasvavat yleensä kasvukausina tai ne näyttävät tyypillisiä syklisiä kuvioita.

Satunnaismuuttujan autokorrelaation syntymisen taustalla voi olla useita eri tekijöitä. Taloudelliset muuttujat ovat yleensä autokorreloituvia, jolloin merkitsevän muuttujan jättäminen pois regressiosta voi siirtää selittävän

muuttujan autokorrelaation satunnaismuuttujaan. Mikäli useita muuttujia on jätetty huomioimatta, niiden autokorrelaatiot voivat kuitenkin kumota toisensa.

Mikäli satunnaismuuttuja on autokorrelloitunut, ovat OLS-estimaatit yhä tilastollisesti virheettömiä. Sen sijaan parametrien varianssit ovat todennäköisesti suurempia. Satunnaismuuttujan ollessa autokorrelloitunut, sen varianssi voi olla suuresti aliarvioitu.

Autokorrelaatiota voidaan testata Durbin-Watson-testillä. Testin nollahypoteesi on, ettei autokorrelaatiota ole olemassa. Durbin-Watson-testisuure lasketaan kaavalla:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (4)$$

Kaavassa  $e_t$  on satunnaismuuttujan arvo hetkellä  $t$  ja  $n$  on tutkittavan aineiston havaintojen lukumäärä. Durbin-Watson-testisuureen arvo on nollan ja kahden välillä, mikäli muuttujalla on positiivista autokorrelaatiota ja kahden ja neljän välillä, mikäli muuttujalla on negatiivista autokorrelaatiota. Testin nollahypoteesia testataan testaamalla testisuureen yhtäsuuruutta arvon 2 kanssa. Durbin ja Watson ovat laskeneet merkitsevyytasoille ylä- ja alarajat ( $d_y$  ja  $d_a$ ), joihin ensimmäisen asteen positiivisen autokorrelaation arvoja voi verrata 5 % sekä 1 % merkitsevyytasoilla. Testin tuloksia tulkitaan seuraavasti:

1. Jos  $d^* < d_y$ , nollahypoteesi kumotaan ja todetaan ensimmäisen asteen positiivisen autokorrelaation olemassaolo.
2. Jos  $d^* > (4 - d_a)$ , nollahypoteesi kumotaan ja todetaan ensimmäisen asteen negatiivisen autokorrelaation olemassaolo.
3. Jos  $d_y < d^* < (4 - d_y)$ , nollahypoteesi hyväksytään.
4. Jos  $d_a < d^* < d_u$  tai  $(4 - d_y) < d^* < (4 - d_a)$ , niin testi ei ole pätevä.

Durbin-Watson–testillä on omat huonot puolensa. Testisuure ei ole pätevä autokorrelaation mittari, mikäli jokin selittävistä muuttujista on viivästetty. Toinen heikkous liittyy mittarin arvoväleihin, joilla mittari ei toimi (4). Testin kolmantena heikkoutena testiä ei voi soveltaa kuin ensimmäisen asteen autokorrelaatioon.

Autokorrelaatiota voidaan korjata tapauskohtaisilla ratkaisulla. Mikäli autokorrelaatiota syntyy muuttujien poisjättämisen vuoksi, ratkaisu on ottaa muuttujat mukaan regressioon. Jos autokorrelaatio johtuu matemaattisen mallin väärästä spesifioinnista, voidaan spesifiointia muuttamalla saada autokorrelaatio häviämään. Tällöin voidaan esimerkiksi lineaarinen riippuvuus korvata jollain epälineaarilla riippuvuudella. Tätä voidaan testata regressioimalla residuaaleja korkeampaan asteeseen korotettuja selittäviä muuttujia vastaan. Vasta näiden testien jälkeen voidaan todeta todellisen  $u$ :n olevan ajasta riippuva. Tällöin ratkaisuna voi olla datan muuttaminen siten, että saadaan malli jossa satunnaismuuttuja tyydyttää pienimmän neliösumman menetelmän oletukset jolloin parametrit voidaan estimoida oikein tällä menetelmällä.

#### 4.3.3 Multikollineaarisuus

Pienimmän neliösumman menetelmää käytettäessä on tärkeää, etteivät selittävät muuttujat ole lineaarisesti täysin korreloituneita ( $r_{x_i, x_j} \neq 1$ ). Multikollineaarisuus tarkoittaa regressioyhtälön selittävien muuttujien välistä lineaarista riippuvuutta. Mikäli selittävät muuttujat ovat täysin lineaarisesti korreloituneet, parametreista tulee epämääräisiä ja parametreille on mahdotonta saada erillisiä numeerisia arvoja. Tällöin pienimmän neliösumman menetelmä ei enää toimi. Multikollineaarisuus voi heikentää parametriestimaattien tarkkuutta sekä stabiliteettia.

Multikollineaarisuudelle ei kuitenkaan ole määritelty tarkkoja raja-arvoja, joiden perusteella voitaisiin tuomita selittävien muuttujien olevan liian

korreloituneita keskenään. Intuitiivisesti voidaan kuitenkin sanoa, että kun kaksi selittävää muuttujaa vaihtelevat lähes identtisesti, niiden vaikutuksen arvioiminen selitettävään muuttujaan käy erittäin hankalaksi. Tällöin ei voida sanoa, mikä osa selitettävän muuttujan vaihtelusta johtuu mistäkin selittävästä muuttujasta.

Mikäli muuttujien välinen multikollineaarisuus ei ole täydellistä, sen vaikutukset vaihtelevat. Teoreettisissa sekä sovelletuissa tutkimuksissa tulokset ovat olleet ristiriitaisia. Osassa tutkimuksista kertoimista tulee epästabiileja, kun uusia korreloituneita muuttujia lisätään yhtälöön tai kun otoksen koko kasvaa. Toisissa tutkimuksissa taas ei ole huomattu merkittäviä muutoksia estimaateissa. Sama pätee myös estimaattien keskivirheille: osassa tutkimuksista multikollineaarisuus kasvattaa keskivirheitä merkittävästi ja osassa tutkimuksista keskivirheet pysyvät samoina.

Yleisesti tuotaessa regressioanalyysiin uusia selittäviä muuttujia, jotka korreloivat vanhojen selittävien muuttujien kanssa, estimaattien keskivirheet kasvavat. Multikollineaarisuuden johdosta voidaan väärin perustein hylätä muuttujia, joiden keskivirheet ovat suuret, vaikka ne olisivatkin tärkeitä selittäviä tekijöitä regressioyhtälössä. (Hill, Griffiths & Judge, 2001)

Keskenään korreloivien muuttujien ottaminen mukaan regressioon tai niiden hylkääminen riippuu käyttötarkoituksesta. Yleensä regressioanalyysin käyttötarkoitus on joko teorian testaaminen tarkalla kertoimien määrityksellä tai tulevaisuuden ennustaminen. Mikäli tarkoitus on estimoida yksittäisiä kertoimia, korreloivien muuttujien huomioiminen tai huomioimatta jättäminen ovat molemmat hyödyttömiä, sillä molemmissa tapauksissa estimaatit ovat luultavasti epätarkkoja. Tässä tapauksessa hyödyllisintä olisi hankkia lisää informaatiota esimerkiksi suuremman otoskoon avulla. Mikäli regressioyhtälöä käytetään ennustamiseen, voidaan korreloituneet muuttujat pitää yhtälössä ja jättää



multikollinearisuus huomioimatta. Tällöin oletuksena on, että sama multikollinearisuus muuttujien välillä säilyy myös ennustettaessa tulevaa. Tällaisella regressioyhtälöllä voidaan saada hyviä ennusteita, jos muuttujien välinen korrelaatio pysyy samanlaisena.

Brooks (2002) ehdottaa edellä mainittujen multikollinearisuuden käsittelytapojen lisäksi vielä yhden multikollineaarisen muuttujan jättämistä pois regressiosta sekä multikollineaaristen muuttujien muuntamista suhteeksi. Mikäli regressiosta jätetään pois multikollinearisuuden vuoksi jokin muuttuja, voi mallin teoriaan perustuvat *a priori*-oletukset kärsiä. Teorian mukaan molemmat multikollineaariset muuttujat voivat olla olennaisia havainnon selittämisen kannalta ja sen mukaan molemmat tulisi ottaa regressioanalyysiin mukaan. Toisaalta muuttujan pois jättäminen voi johtaa relevantin datan karsimiseen, jolloin selitettävän muuttujan vaihtelusta pystytään selittämään vähemmän. Multikollineaaristen muuttujien muuntaminen suhdeluvuksi voi myös olla teorian vastaista, mikäli rahoitusteoria esimerkiksi esittää selitettävän muuttujan vaihteluiden johtuvan selittävien muuttujien muutoksista, eikä niiden suhteesta.

Multikollinearisuutta voidaan testata esimerkiksi VIF-testillä (variance inflation). VIF arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (5)$$

Kaavassa 5  $R_j^2$  on selittävän muuttujan  $j$  ja muiden selittävien muuttujien välinen monimuuttuja korrelaatio, joka voidaan laskea kaavalla 6. Mikäli muuttujan  $j$  ja muiden muuttujien välillä ei ole korrelaatiota, saa  $R_j^2$  arvon 0 ja  $VIF_j$  saa arvon 1, joka on tämän suureen pienin mahdollinen arvo. Nesser, Wasserman ja Kutner (1990) suosittelevat tarkastelemaan aineistosta saatua suurinta VIF-arvoa. Mikäli tämä on suurempi kuin kymmenen, löytyy muuttujien väliltä multikollinearisuutta.

#### 4.3.4 Aikasarjan stationaarisuus

Aikasarjamallien yksi perusoletuksista on aikasarjan stationaarisuus. Aikasarja on stationaarinen, jos sen keskiarvo sekä varianssi ovat vakioita ajan suhteen ja kahden perättäisen arvon kovarianssi riippuu vain niitä erottavan ajan pituudesta, eikä todellisesta havainnoidusta ajasta. Epästationaarista aikasarjaa, jonka keskiarvo kasvaa ja/tai vähenee, kutsutaan random walk-prosessiksi. Mikäli aikasarjan keskiarvo kasvaa tai laskee koko tarkasteluvälin, sanotaan siinä olevan trendi. Monet taloudelliset aikasarjat ovat epästationaarisia, joka voi johtaa regressiomuuttujien epäluotettaviin estimaattoreihin, testisuureisiin sekä luottamusväleihin. Epästationaarisilla aikasarjoilla voidaan saada erittäin merkittäviä tuloksia, vaikka tutkittavien sarjojen välillä ei olisi todellista riippuvuutta.

Aikasarjan stationaarisuutta voidaan tutkia autokorrelaatiofunktion avulla. Stationaarisen aikasarjan autokorrelaatiot katoavat asteittain kasvatettaessa viiveiden etäisyyttä. Sen sijaan epästationaarisen aikasarjan autokorrelaatio ei katoa pidemmälläkään viiveillä. Suurilla otoksilla autokorrelaation ollessa nolla on estimoidut autokorrelaatiot lähes normaalijakautuneet keskiarvolla nolla ja varianssilla  $1/T$ , missä  $T$  on otoskoko. Tässä työssä käytetyn otoksen koko on 289 havaintoa, jolle 95 % luottamusvälit ovat  $\pm 1,96 \cdot \sqrt{1/289} = \pm 0,115$ .

## 5. DATA

Tässä tutkimuksessa käytetään sähkön hintatietona Nord Pool -sähköpörssin viikottaista spot-hintaa (EUR/MWh) ajalta 19.6.2000–31.12.2005. Datan lähteenä on DataStream-palvelu. Viikottaisina arvoina on käytetty keskiviikon arvoja.

Sähkön hintaa selittäviksi tekijöiksi valittiin Saksan sähkömarkkinoiden spot-hinta (EUR/MWh), öljyn (EUR/BBL), kivihiilen (€/MT) sekä maakaasun (Index P/Therm) markkinahinnat, jokien virtaamat ( $m^3/s$ ), vesivarantoina käytettävien altainen täyttöasteet (%), vuorokauden keskilämpötilat ( $^{\circ}C$ ) Suomessa, Ruotsissa sekä Norjassa ja hiilidioksidipäästösopimusten hinta.

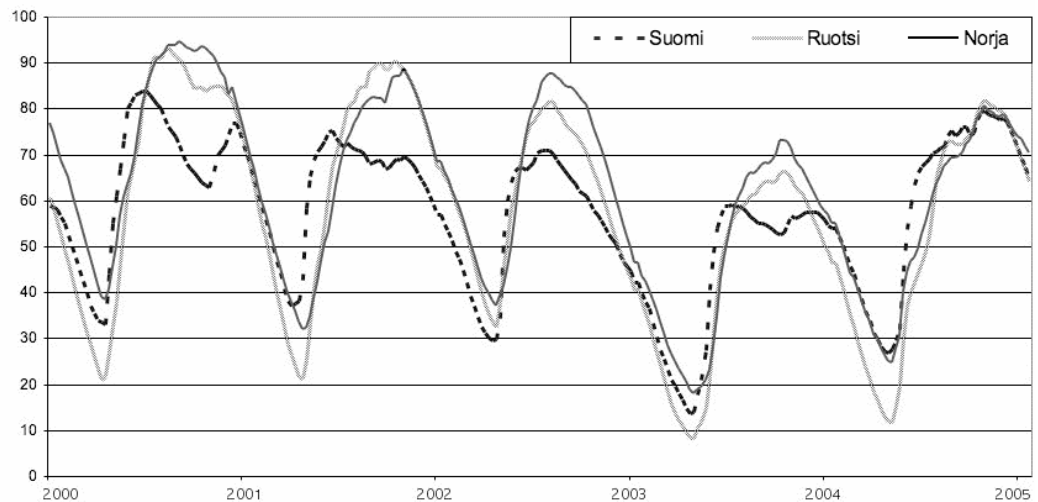
Saksan sähkömarkkinoiden hintana toimii EEX Phelix Base, josta DataStream-palvelussa on dataa saatavilla 19.6.2000 lähtien ja tämän vuoksi testattava aikasarja alkaa kyseisestä päivästä. Maakaasun hintaa kuvaa Lontoon maakaasu-indeksi. Öljyn hintana toimii Brentin spot hinta. Brent crude hinta muodostuu 15 eri öljyn hinnasta Brentin sekä Ninian alueilta. Brent crude toimii Euroopan ja Afrikan tuottaman öljyn viitehintana. Kivihiilen hintaa kuvaa DRI-WEFA:n kivihiili-indeksi. Global Insightin DRI-WEFA-kivihiili-indeksin kohteena on lämpövoimaloissa raaka-aineena käytettävä kivihiili. Näiden kaikkien osalta data on hankittu myös DataStream-palvelusta päivädatana ja muutettu viikkodataksi käyttämällä keskiviikkojen arvoja. Hiilidioksidipäästöjen kurssit on haettu DataStream-palvelusta euromääräisinä päivittäisinä havaintoina ja viikottaisina arvoina on käytetty keskiviikkojen hintoja. Päästösopimukset tulivat kaupankäynnin kohteeksi vasta 9.3.2005 ja tätä edeltävältä ajalta sopimusten arvona on käytetty nollaa euroa. Lyhyestä aikajänteestä huolimatta päästösopimuksilla on ollut merkittävä vaikutus sähkön markkinahintaan.

Virtaamadatan lähteenä toimii Norjan osalta Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Ruotsin osalta Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) sekä Suomen osalta Valtion ympäristöhallinto. Vesivarantojen datan lähteenä on Nordel-verkkopalvelu ([www.nordel.org](http://www.nordel.org)). Ilman lämpötiladatat on hankittu Suomen osalta Ilmatieteenlaitokselta, Ruotsin osalta Sveriges meteorologiska och hydrologiska institutilta ja Norjan osalta eKilma.no-verkkopalvelusta. Virtaamat sekä lämpötilat on muutettu päivittäisistä arvoista viikottaisiksi käyttämällä keskiviikkojen arvoja. Vesivarannoista kerätään dataa vain viikkotasolla, joten data oli valmiiksi viikottaista.

Lämpötilan osalta mittauspisteitä oli yhteensä 7. Norjasta mittauspisteiksi valittiin Kristianstad, Finnmark sekä Oslo. Ruotsista mittauspisteiksi valittiin Tukholma sekä Gunnar ja Suomesta Helsinki sekä Rovaniemi. Näistä mittauspisteistä laskettiin keskiarvot kullekin maalle ja sitten kaikkien kolmen maan keskiarvo. Regressioanalyysissä käytettiin näiden maiden keskiarvoa lämpötilaa kuvaavana muuttujana.

Sähkön ja raaka-aineiden markkinahinnat ovat eri valuutoissa. Tämän vuoksi DataStream-palvelusta on myös noudettu valuuttakurssit Norjan kruunun, Euron, Iso-Britannian punnan sekä USA:n dollarin väliset valuuttakurssit. Näiden avulla kaikki markkinahinnat on muutettu euromääräisiksi.

Vesivarantoja kuvaava data on saatu Nordel-verkkopalvelusta maakohtaisesti. Regressioanalyysiä varten laskettiin Ruotsin, Norjan sekä Suomen vesivarantojen keskiarvo sekä pitkän aikavälin keskiarvosarja. Koska vesivarantojen täyttöasteet vaihtelevat kausiluontoisesti, otettiin regressioanalyysiin muuttujaksi vesivarantojen havaintojen poikkeama kuuden vuoden keskiarvosta. Vesivarantojen kausiluonteisuus näkyy kuvasta 12.



**Kuva 12: Vesivarantojen kausiluonteisuus.**

Virtaamadatan mittauspisteinä toimi Suomesta Vuoksi Tainionkoskella sekä Taivalkoski, Ruotsista Norrström Tukholmassa sekä Umeälven Storumanissa ja Norjasta Junkerdalselv sekä Bulken. Virtaaman suuruutta mitattiin  $m^3/s$ -yksikössä. Sarjoista laskettiin aritmeettinen keskiarvo ja saatua sarjaa käytettiin regressioanalyysissä. Regressioanalyysissä ei ole mukana muuttujaa, josta ilmenisi aikainen talvi. Pelkkä alhainen lämpötila ei sinänsä kerro talven olevan aikaisessa, ainoastaan lämpötilan olevan alhainen. Poikkeavien havaintojen vuoksi tutkimuksessa käytettiin robustia lineaarista regressiota. Robusti regressio suorittaa iteratiivisesti painotetun pienimmän neliösumman regression. Paino lasketaan painofunktiolla, jonka parametrinä on residuaalin itseisarvo. Funktio antaa yhtä lähellä olevan arvon pienille residuaaleille ja pienemmän painon suurille residuaaleille. Näin heikennetään poikkeavien arvojen vaikutusta (Laininen 2000).

Nord Pool-sähköpörssin markkinahinnan kuvaaja aikavälillä 19.6.2000 – 31.12.2005 on esitetty kuvassa 13. Kuvaajassa esiintyy kaksi selkeää hintapiikkiä. Ensimmäinen esiintyy 5.2.2001 ja toinen on pidempijaksoinen ja ajoittuu 22.11.2002 – 7.3.2003 väliselle ajalle. Sonresenin (2003) mukaan jälkimmäinen pidempikestoinen hintapiikki selittyi kuivalla syksyllä sekä aikaisella talvella.



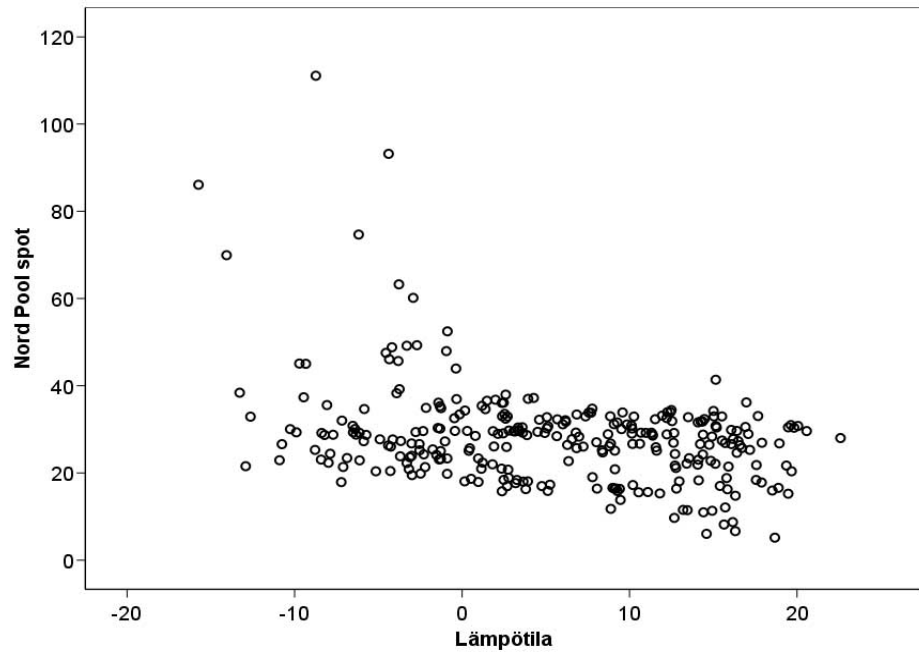
**Kuva 13: Sähkön markkinahinta Nord Poolissa 19.6.2000 – 31.12.2005**

## 6. TULOKSET

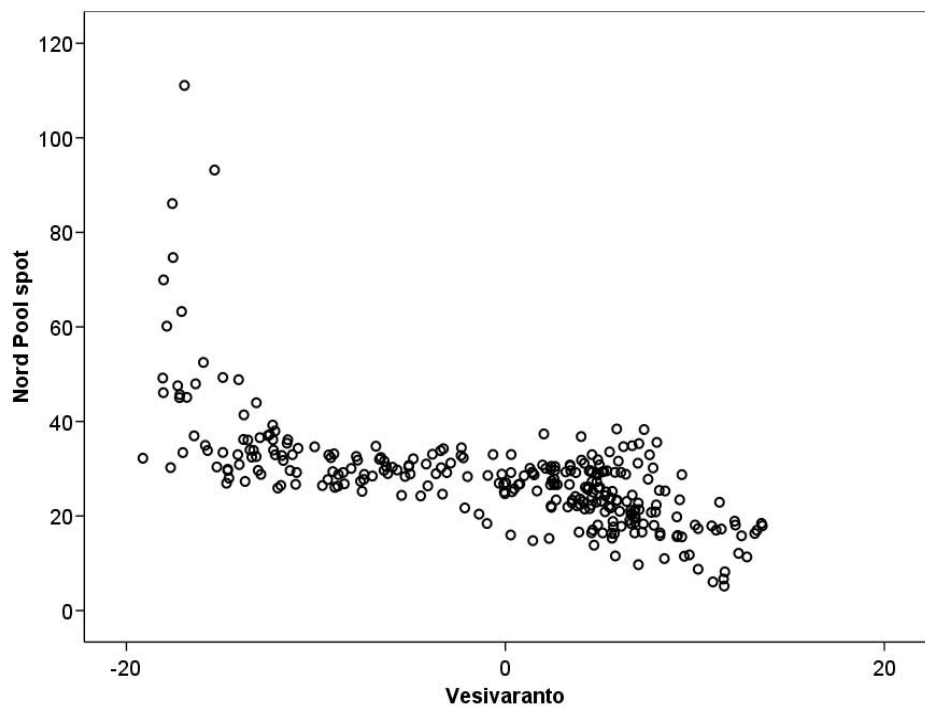
### 6.1. Kuvaileva statistiikka

Aineiston kuvailevat tunnusluvut on esitetty taulukossa 5. Selittävät muuttujat korreloivat merkittävästi selitettävän muuttujan kanssa lukuunottamatta kivihiili-indeksiä sekä päästösopimuksia. Päästösopimusten korreloimattomuus selittyy niiden lyhyellä historialla. Päästösopimusten hinta oli asetettu nolaksi ajanjaksolle, jolloin niillä ei käyty kauppaa, joten tältä aikaväliltä ei muuttujien väliltä voitu olettaa korrelaatiota. Selittävien muuttujien korrelaatioiden etumerkit olivat *a priori*-oletusten mukaiset. Raaka-aineiden, päästösopimusten sekä Saksan SPOT-hinnan korrelaatio Nord Pool:n markkinahinnan kanssa olivat positiivisia ja vesivarantojen, virtaamien ja lämpötilojen korrelaatiot Nord Pool:n markkinahinnan kanssa olivat negatiivisia. Lisäksi selittävien muuttujien välillä oli voimakasta korrelaatiota. Muuttujien väliset korrelaatiot on esitetty taulukossa 6.

Merkittäviä tuloksia löytyi verrattaessa vesivarantoja sekä lämpötiloja Nord Poolin markkinahinnan kanssa. Tutkimusajanjaksolla Nord Poolin markkinahinta ei noussut kertaakaan yli 50 euron, ellei vesivarantojen täyttöaste ollut 20 prosenttiyksikköä keskimääräistä pienempi. Toisaalta Nord Poolin markkinahinta ei myöskään noussut koskaan yli 50 euron, ellei Pohjoismaiden lämpötila ollut nollan celsiusasteen alapuolella. Sirontakuviot lämpötilan sekä vesivarantojen sirontakuviot Nord Poolin markkinahinnan kanssa on esitetty kuvissa 14 ja 15.



**Kuva 14: Sirontakuvio Nord Poolin markkinahinnasta sekä lämpötilasta.**



**Kuva 15: Sirontakuvio Nord Poolin markkinahinnasta sekä vesivarannoista.**



## 6.2 Mallin oletusten testaus

Selittävien muuttujien välisestä korrelaatiosta johtuen tarkasteltiin syvemmin mahdollista multikollineaarisuutta. Multikollineaarisuutta tutkittiin VIF-arvolla (variation inflation) ja saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4: Selittävien muuttujien VIF-arvot**

Selittävä muuttuja	VIF-arvo	VIF-arvo ilman öljyä sekä virtaamaa
Kivihiili	3,242	1,138
Öljy	10,390	
Saksan SPOT	6,769	2,327
Maakaasu	10,026	2,955
Vesivaranto	15,241	1,264
Lämpötila	1,380	1,361
Virtaama	76,708	
CO2 päästösopimus	5,576	2,127

\*\* Muuttuja jätetty pois multikollineaarisuuden vuoksi.

Öljyn, maakaasun, vesivarantojen sekä virtaamien VIF arvot ylittävät multikollineaarisuuden raja-arvon (10). Kun testistä jätetään pois virtaamat sekä öljyn markkinahinta, multikollineaarisuus katoaa.

**Taulukko 5: Muuttujien kuvaileva statistiikka.**

Muuttuja	N	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Keskihajonta	Vinous	Huipukkuus*
Nord Pool Spot (€/MWh)	289	28,205	5,185	111,090	11,591	2,772	14,779
Kivihilli-indeksi	289	45,590	26,392	68,865	10,509	0,262	-0,693
Brent öljy (€/BBL)	289	35,297	18,932	69,879	12,135	1,110	0,209
Phelix Base, Saksa (€/MWh)	289	32,950	6,860	132,910	14,845	2,710	12,825
Maakaasuindeksi	289	38,440	18,431	157,731	19,124	3,574	17,332
Vesivaranto	289	-0,769	-19,130	13,560	8,765	-0,508	-1,000
Lämpötila (°C)	289	5,355	-15,744	22,594	8,577	-0,154	-0,953
Virtaama	289	263,028	102,908	691,037	86,553	1,416	4,536
CO2	289	3,010	0,000	29,000	7,383	2,148	2,890

\* Huipukkuudesta vähennetty normaalijakauman huipukkuus 3.

**Taulukko 6: Muuttujien väliset korrelaatiot**

	Nord Pool Spot	Kivihiili- indeksi	Brent öljy	EEX Phelix Base	Maakaasu indeksi	Vesivara nto	Lämpötil a	Virtaama	Päästös opimus
Nord Pool Spot	1,000								
Kivihiili-indeksi	0,026	1,000							
Brent öljy	0,151*	0,551*	1,000						
EEX Phelix Base	0,246*	0,194*	0,590*	1,000					
Maakaasuindeksi	0,145*	0,334*	0,584*	0,657*	1,000				
Vesivaranto	-0,658*	0,184*	0,160*	-0,024	0,277*	1,000			
Lämpötila	-0,361*	-0,062	0,102	-0,059	-0,296*	0,069	1,000		
Virtaama	-0,371*	0,379*	0,237*	-0,029*	0,127*	0,522*	0,102	1,000	
Päästösopimus	0,106	0,221*	0,823*	0,624*	0,598*	0,196*	0,134*	0,187*	1,000

\* Korrelaatio on merkittävä 0,05 merkitsevyystasolla (kaksi suuntainen *t*-testi).

Sähkön markkinahinnan aikasarjan autokorrelaatiota tutkittiin autokorrelaatiofunktion avulla. Autokorrelaatiotestien tulokset löytyvät taulukosta 7. Markkinahinta osoittautui voimakkaasti autokorreloituneeksi ja samalla todettiin sarjan olevan epästationaarinen. Tämän johdosta selittävää mallia rakennettaessa aikasarjaa differoitiin yhden kerran. Tämän jälkeen autokorrelaatiota esiintyi yhä toisen, neljännen sekä viidennen viiveen kohdalla ja sekin oli pientä.

**Taulukko 7: Autokorrelaatiotestien tulokset.**

Viive	Autokorrelaatio	Box-Ljung	Autokorrelaatio <sup>1</sup>	Box-Ljung <sup>1</sup>
1	0,900*	236,66	-0,094	2,59
2	0,819*	433,17	-0,253*	21,30
3	0,784*	613,95	-0,003	21,30
4	0,749*	779,50	0,287*	45,49
5	0,658*	907,71	-0,197*	56,90
6	0,606*	1016,75	-0,055	57,79
7	0,566*	1112,15	-0,010	57,81
8	0,529*	1195,89	0,063	58,99
9	0,479*	1264,91	-0,013	59,05
10	0,431*	1320,99	0,022	59,19
11	0,379*	1364,49	-0,020	59,32
12	0,333*	1398,15	-0,038	59,75
13	0,295*	1424,76	0,039	60,22
14	0,250*	1443,94	-0,025	60,40
15	0,210*	1457,49	-0,018	60,50

<sup>1</sup> *Differoidun aikasarjan autokorrelaatio sekä Box-Ljung arvo.*

\* *Autokorrelaatio on merkitsevää 5 % merkitsevyystasolla.*

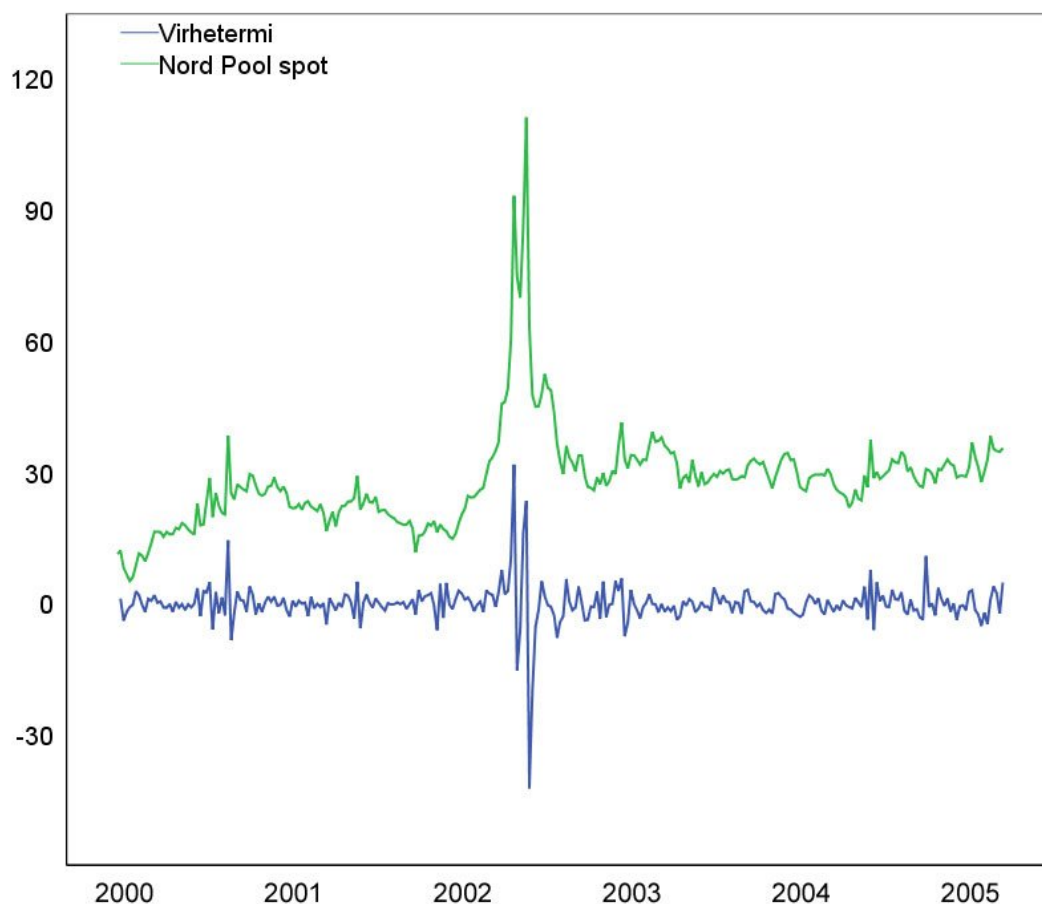
### 6.3 Regressiomalli

Selittävästä mallista jätettiin pois multikollinearisuuden vuoksi öljyn markkinahinta sekä virtaamat. Tämän jälkeen suoritettiin lineaarinen regressio käyttäen muita selittäviä tekijöitä. Selitettävänä tekijänä oli differentoitu aikasarja Nord Poolin spot-hinnasta. Malliin otettiin markkinahinnan autokorrelaation vuoksi selittäväksi tekijäksi myös viivästetty Nord Poolin markkinahinta viiveellä 1. Testi suoritettiin ARIMA(1,1,0)-mallin avulla, joka tuo viivästetyn Nord Poolin markkinahinnan malliin sekä differoi selitettävän muuttujan. Saadut regressioyhtälön kertoimet on esitetty taulukossa 8. Mallin neliöity keskivirhe (MSE) on 22,714 ja sen neliöjuuri (RMSE) 4,766 EUR/MWh. Tämä keskivirhe oli vain hieman suurempi kuin Vehviläisen ja Pyykkösen (2004) mallin keskivirhe, joka oli 4,4 EUR/MWh. Mallin  $R^2$ -arvoksi saatiin 0,834.

**Taulukko 8: ARIMA(1,1,0)-malli**

	Parametriestimaatti (keskivirhe)	T-arvo
Nord Pool SPOT <sub>(t-1)</sub>	-0,072 (0,006)	-1,223*
Kivihiili	0,305 (0,200)	1,522
Saksan SPOT-hinta	0,142 (0,028)	5,063*
Maakaasu	0,033 (0,066)	0,495
Vesivaranto	-0,082 (0,246)	0,335*
Lämpötila	-0,304 (0,083)	-3,673*
Päästösopimus	-0,009 (0,314)	-0,030
Vakio	0,022 (0,265)	0,083

Mallin kertoimista merkittäviä ovat viivästetty Nord Poolin spot-hinta, Saksan markkinahinta, vesivaranto sekä lämpötila. Muiden muuttujien kertoimet eivät olleet merkittäviä. Residuaaleilla oli merkittävä negatiivinen korrelaatio toisella viiveellä sekä merkittävä positiivinen autokorrelaatio neljännellä viiveellä. Autokorrelaatio on kuitenkin suhteellisen pientä (-0,217 ja 0,260). Virhetermien autokorrelaatiota kuvaava Durbin-Watson–arvo on 2,027 eli tämän testin mukaan autokorrelaatiosta ei kannata huolestua.



**Kuva 16: Nord Poolin markkinahinta ja selittävän mallin virhe.**

Kuva 16 esittää Nord Poolin markkinahinnan sekä selittävän mallin virheen tutkitulla ajanjaksolla. Kuten kuvasta huomataan, mallin virhe kasvaa

hintapiikin kohdalla voimakkaasti. Voidaankin todeta, ettei mallilla pystytä selittämään hintapiikkien syntymistä. Muutoin mallin virhe säilyy kohtuullisissa rajoissa.

## 6.4 Ennustava regressiomalli

Selittävän mallin lisäksi luotiin ennustava malli. Ennustavaan malliin otettiin mukaan kaikki muuttujat multikollinearisuudesta huolimatta. Multikollinearisuus ei vaikuta mallin ennusteisiin, vaan pelkästään selittävien muuttujien kertoimiin. Täten multikollinearisuus ei ole ongelma käytettäessä regressioanalyysiä, mikäli sen odotetaan jatkuvan ennustekaudella. Tässä työssä oletetaan multikollinearisuuden pysyvän samana myös ennustekaudella. Ennusteen luomisessa käytettiin parametreina kivihilen, öljyn sekä maakaasun markkinahintoja, Saksan sähkömarkkinoiden spot-hintaa, Pohjoismaiden keskilämpötilaa, Pohjoismaiden jokien virtaamia, Pohjoismaiden vesivarantojen täyttöasteita sekä Nord Poolin spot-hintaa. Hiildioksidipäästösopimusten markkinahinta jätettiin pois ennustemallista, sillä mallin kalibrointikaudella päästösopimuksilla ei vielä käyty kauppaa. Sähkön hintaa ennustamisessa selittävien muuttujien arvoja viivästettiin yhdellä viikolla. Malli kalibroitettiin aikavälillä 28.6.2000–29.12.2004 ja mallin ennustuskykyä testattiin vuotena 2005. Ennustava malli luotiin OLS-mentelmällä. Regressioyhtälön kertoimet on esitetty taulukossa 9.

Mallin  $R^2$ -arvoksi 0,853 ja sovitetuksi  $R^2$ -arvoksi 0,847. Residuaalit eivät ole autokorrelloituneet Durbin-Watson–testisuureen ollessa 1,861. Keskeisimmät viivästetyt ennustavat muuttujat olivat  $t$ -testin perusteella Saksan sähköpörssin markkinahinta, maakaasun markkinahinta, vesivarantojen täyttöaste sekä Nord Poolin markkinahinta.

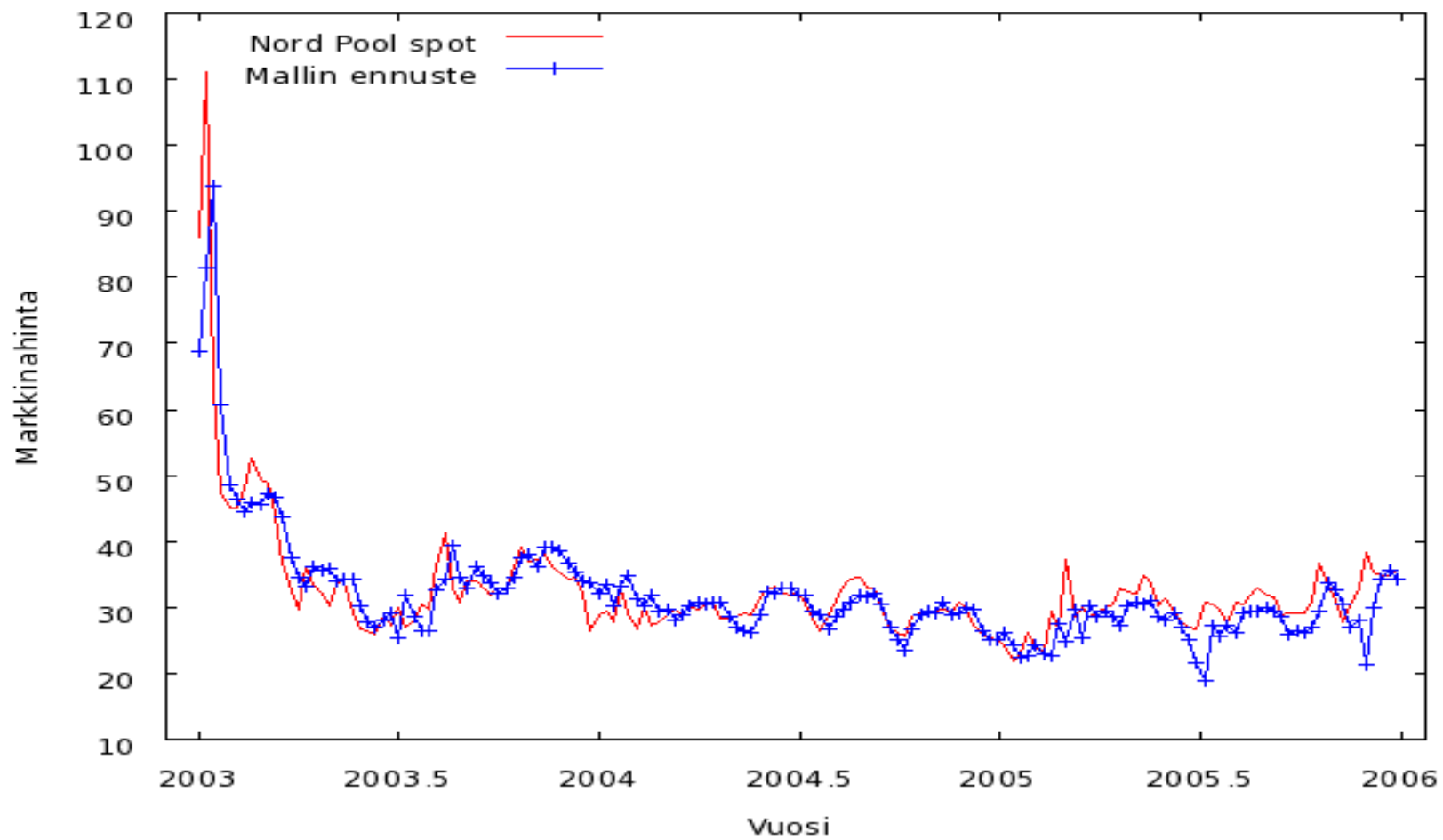
**Taulukko 9: Ennustavan regressiomalli.**

Muuttuja	Parametriestimaatti (keskivirhe)	T-arvo
Vakio <sub>t-1</sub>	9,608 (2,347)	4,094*
Kivihiili <sub>t-1</sub>	-0,016 (0,049)	-0,321
Öljy <sub>t-1</sub>	0,055 (0,074)	0,739
Saksan spot <sub>t-1</sub>	-0,165 (0,041)	-4,058*
Maakaasu <sub>t-1</sub>	0,098 (0,054)	1,805*
Vesivaranto <sub>t-1</sub>	-0,289 (0,063)	-4,606*
Lämpötila <sub>t-1</sub>	-0,059 (0,053)	-1,111
Virtaama <sub>t-1</sub>	-0,008 (0,005)	-1,422
Nord Pool spot <sub>t-1</sub>	0,737 (0,042)	17,503*

Mallin suhteellinen keskivirhe estimointi aikaväliltä on 9,135 %. Ennustetulla jaksolla mallin suhteellinen keskivirhe on 9,798 %, joka on samaa luokkaa kuin esimerkiksi Conterasín ARIMA-mallin (10 % Espanjan markkinoilla, 7 % Kalifornian markkinoilla), Garcian GARCH-mallin (7 % Espanjan markkinoilla, 4 % Kalifornian markkinoilla) sekä Ramsayn neuraaliverkkomallin (10 % Englannin ja Walesin markkinoilla) suhteellinen virhe.

Kuva 17 esittää ennustavan mallin ennustekykä. Kuvaan on otettu mukaan kaksi vuotta parametrien estimointiajanjaksolta ja viimeinen vuosi (2005) on ennustettu mallin avulla. Kuvaajasta voidaan huomata, että ennustejaksolla ennuste on lähes kokoajan oikean markkinahinnan alapuolella. Tämän voidaan olettaa johtuvan hiilidioksidipäästösopimuskaupan alkamisesta.





Kuva 17: Nord Pool spot-hinta sekä mallin ennuste.

## 7. YHTEENVETO

Tässä työssä on tutkittu sähkön markkinahintaa selittäviä tekijöitä pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla Nord Pool:ssa sekä luotu sähkön markkinahintaa ennustava malli. Tutkimuksessa käytiin läpi sähkön tuotannon sekä kulutuksen rakenteet ja niiden perusteella valittiin tutkimuksen kohteeksi seitsemän selittävää tekijää. Selittävinä tekijöinä tutkittiin sähkön tuotannossa käytettävien raaka-aineiden (öljy, kivihiili sekä maakaasu) markkinahintoja, Saksan sähköpörssin markkinahintaa, Pohjoismaiden lämpötilaa, jokien virtaamia, vesivarantojen täyttöasteita sekä päästösopimusten markkinahintaa. Edellä mainituilla tekijöillä selitettiin sähkön markkinahintaa Nord Pool-sähköpörssissä regressioanalyysin avulla.

Selittävistä tekijöistä öljy, maakaasu, Saksan markkinahinta, vesivarannot, virtaamat sekä lämpötilat korreloivat merkittävästi Nord Poolin markkinahinnan kanssa. Selittävästä mallista jouduttiin jättämään multikollineaarisuuden vuoksi pois öljyn markkinahinta sekä jokien virtaamat. Regressioanalyysi suoritettiin ARIMA(1,1,0)-mallin avulla. ARIMA-mallin keskimääräinen virhe oli 4,77 EUR/MWh. Mallilla pystyttiin selittämään noin 83 % Nord Poolin markkinahinnan vaihteluista.

Sähkön markkinahintaa ennustava malli luotiin lineaarisen regression avulla. Ennustamiseen käytettiin raaka-aineiden (öljy, kivihiili sekä maakaasu) markkinahintoja, Saksan sähköpörssin markkinahintaa, Pohjoismaiden lämpötilaa, jokien virtaamia, vesivarantojen täyttöasteita sekä Nord Poolin markkinahintaa. Markkinahintaa ennustettiin yhdellä viikolla viivästetyillä arvoilla. Ennusteen virhe oli keskimäärin noin 10 %.

Sähkön hintaa selittäviä tekijöitä ja saatua regressiyhtälöä voidaan hyödyntää markkinahinnan vaihteluilta suojautumiseen. Lämpötiloja ja sateita ennustamalla voidaan varautua ilmastotekijöiden vaikutuksilta

sähkön markkinahintaan. Raaka-aineiden hinnanmuutoksilta suojautumalla voidaan saada suojaa myös sähkön markkinahinnalle. Nord Pool sähköpörssi tarjoaa lukuisia johdannaisinstrumentteja, joiden avulla voidaan suojautua markkinahinnan muutoksilta.

## LÄHDELUETTELO

- Brooks, C. 2002. *Introductory Econometrics for Finance*. UK, Cambridge University Press.
- Bunn, D. W. 2004. *Modelling Prices in Competitive Electricity Markets*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Conteras, J., Espínola, R., Nogales, F. J. & Conejo, A. J. 2003. ARIMA Models to Predict Next-Day Electricity Prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 18, No. 3.
- Eydeland, A. & Geman, H. 1999. *Fundamentals of Electricity Derivative Pricing*.
- Eydeland, A. & Wolyniec, K. 2003. *Energy and Power Risk Management: New Developments in Modeling, Pricing and Hedging*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Evans, M.K. 1969. *Macroeconomic Activity*, Harper & Row.
- Fleten, S. E. & Wallace, S. W. 1998. *Power Scheduling with Forward Contracts*, Proceedings of the Nordic MPS. Norja, Molde.
- Fusaro, C. & Wilcox, J. 2000. *Electricity Trading: Europe and North America*. *Energy Derivatives: Trading Emerging Markets*. Energy Publishing Enterprises.
- Garcia, R. C., Conteras, J., Akkeren, M. & Garcia J. B. C. 2003. *Workshop of Applied Infrastructure*. Berlin, Germany.

- Glejser, H. 1969. A New Test for Heteroscedasticity. Journal of the American Statistical Association, No. 64.
- Hill R, Griffiths E. & Judge G. 2001. Undergraduate Econometrics. USA, John Wiley & Sons.
- Hull, J. 2004. Options, Futures and Other Derivatives. Fifth ed. Pearson Education.
- Kara, Mikko, 2005. Päästökaupan vaikutus pohjoismaiseen sähkökauppaan -Ehdotus Suomen strategiaksi. VTT tiedotteita 2280. Espoo 2004. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2280.pdf>.  
[Viitattu 23.5.2006]
- KTM (Kauppa ja Teollisuusministeriö), 2004. Sähköpörssin valvonta, työryhmän raportti. KTM julkaisuja 19/2004 ISSN 1459-9376.
- Laininen, P 2000. Tilastollisen analyysin perusteet. Helsinki, Otatieto.
- Malo, P. & Kanto, A. 2005. Evaluating Multivariate GARCH Models in the Nordic Electricity Markets. Quantitative Methods in Economics and Management Science. Helsinki.
- Neter, Wasserman & Kunter, 1990. Applied Linear Statistical Models, 3rd ed., Irwin.
- Nicolaisen, J. D., Richter, C. W. & Sheblé, G. B. 2000. Price Signal Analysis for Competitive Electric Generation Companies. Conf. Elect. Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London, U.K.

Nord Pool 2004. Electricity Power Exchange across National Borders.  
The Nordic Power Market. [<http://www.nordpool.com>]

Nord Pool 2004.2. Trade at the Nordic Spot Market.

Saatavissa:

<http://www.nordpool.com/information/reports/Report%20Spot%20Market.pdf>. [Viitattu 13.4.2005]

Nord Pool, 2006. The Physical Power Market - Elspot and Elbas.  
[<http://www.nordpool.com/nordpool/spot/index.html>]

Nord Pool, 2006b. Trade at Nord Pool's Financial Market.

[<http://www.nordpool.com/information/reports/Report%20Financial%20Market.pdf>]

Ramasay, B. & Wang, A. J. 1998. A Neural Network Based Estimator for Electricity Spot-pricing with Particular Reference to Weekend and Public Holidays. Neurocomputing Vol. 23.

Skantze, P. L. & Ilic, M. D. 2001. Valuation, Hedging and Speculation in Competitive Electricity Markets: a Fundamental Approach. Kluwer Academic Publishers.

Sonrensen, M. 2003. EU Emission Trading and Its Possible Impacts on Investment Decisions in the Power Sector. IEA information paper. Paris: International energy agency.

Szkuta, B. R., Sanabria, L. A. & Dillon, T. S. 1999. Electricity Price Short-term Forecasting Using Artificial Neural Networks. IEEE Transactions on Power Systems Vol 14.

Thomas, J. 1964. Notes on the Theory of Regression Analysis, Athens, Center of Planning and Economic Research.

- Valenzula, J & Mazumdar, M. 2001. On the Computation of the Propability Distribution of the Spot Market Price in a Deregulated Electricity Market. 22<sup>nd</sup> Power Industry Computational Applications International Conference. Sydney, Australia.
- Vehviläinen I. & Pyykkönen, T. 2004. Stochastic Factor Model for Electricity Spot Price – The Case of The Nordic Market. Energy Economics, Vol 27.
- Wallace, S. & Fleten, S. E. 2002. *Stochastic Programming in Energy*, Hand-books in Operations Research and Management Science, Vol 11. North-Holland.