

**JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO**  
**Kauppakorkeakoulu**

**SUOMEN SÄHKÖNTUOTANNON TALOUDELLISET JA  
BIOFYSIKAALISET KUSTANNUKSET JA SKENAARIOITA  
FOSSIILISISTA ENERGIALÄHTEISTÄ IRTAUTUMISELLE**

Kansantaloustieteen pro gradu -tutkielma  
Lokakuu 2010  
Kauppakorkeakoulu  
Jyväskylän yliopisto

Tekijä: Tiina Häyhä  
Ohjaaja: Jaakko Pehkonen

## JYVÄSKYLÄN YLIOPISTON KAUPPAKORKEAKOULU

Tekijä Tiina Häyhä	
Työn nimi Suomen sähköntuotannon taloudelliset ja biofysikaaliset kustannukset ja skenaarioita fossiilisista energialähteistä irtautumiselle	
Oppiaine Kansantaloustiede	Työn laji Pro gradu -tutkielma
Aika lokakuu 2010	Sivumäärä 98 + 2
<p>Tiivistelmä</p> <p>Maailman energiajärjestelmä perustuu fossiilisen energialähteiden laajamittaiseen hyödyntämiseen, mikä lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta ja kiihdyttää siten globaalia ilmastonmuutosta. Energian kysynnän kasvun ennustetaan jatkuvan tulevina vuosikymmeninä, mutta samalla fossiilisten energialähteiden resurssit käyvät yhä niukemmiksi, mikä pahentaa kysynnän ja tarjonnan välistä kuilua ja nostaa polttoaineiden hintoja. Siirtyminen pois fossiilisten energialähteiden käytöstä on siten välttämätöntä sekä ympäristöllisistä että saatavuuteen liittyvistä syistä. Osa taloustieteilijöistä on käyttänyt sekä taloudellista että biofysikaalista analyysia luonnonvarojen ja ihmisen hallitsemien prosessien arvottamiseen. Biofysikaaliset menetelmät pohjautuvat energia- ja materiaalivirtojen laskentaan ja ne perustuvat taloudellisten toimijoiden preferenssien sijasta tuotannon kustannuksiin, kuten klassisen taloustieteen arvoteoriassa ajateltiin (esim. Adam Smith; Ricardon ja Marxin työnarvon teoria). Biofysikaaliset mittarit ovat hyödyllisiä etenkin luonnonvarojen kulutuksen ja kestävä tuotannon arvioimisessa. Tässä työssä pyrittiin taloudellisen ja biofysikaalisen analyysin yhdistämiseen arvioimalla Suomen sähköntuotannon suoria taloudellisia ja biofysikaalisia (fossiilinen energia ja emergentia) kustannuksia sekä hiilidioksidipäästöjä sekä laitos- että kansantalouden tasolla. Lisäksi Suomen sähköntuotannon tulevaisuudelle vuosille 2025 ja 2050 luotiin skenaarioita, joissa fossiilista energiaa korvattiin ei-fossiilisella energialla, eli uusiutuvilla energialähteillä (tuulivoimalla ja puupolttoaineilla), turpeella ja ydinvoimalla tämän hetken teknisten ja ekologisten mahdollisuuksien rajoissa. Skenaarioanalyysin pohjalta voidaan Suomelle suosittaa monipuoliseen energiantuotantoon ja paikallisten, uusiutuvien energialähteiden kestävä hyödyntämiselle perustuvaa energiapolitiikkaa. Energiaturvallisuuden kannalta mahdollisimman hajautettu energiantuotanto, energiatehokkuuden parantaminen ja kestävä energiankulutus on tärkeää. Jatkotutkimusta tarvitaan selvittämään, mikä energiantuotantoyhdistelmä minimoisi sähköntuotannon sekä kansantaloudelliset kustannukset että ympäristökuormituksen. Lisätutkimusta kaivataan myös arvioimaan eri ohjauskeinojen, kuten verotuksen ja syöttötariffien, vaikutusta tulevaisuuden energiaratkaisuihin.</p>	
Asiasanat sähköntuotanto, Suomi, energia, kustannusanalyysi, biofysikaalinen analyysi, skenaario	
Säilytyspaikka Jyväskylän yliopisto / Kauppakorkeakoulu	

**UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ  
SCHOOL OF BUSINESS AND ECONOMICS**

Author Tiina Häyhä	
Title Economic and biophysical costs of electricity production in Finland, and scenarios for reducing the use of fossil fuels	
Subject Economics	Level Master's thesis
Date October 2010	Number of pages 98 + 2
<p>Abstract</p> <p>The massive use of fossil energy by modern societies contributes to greenhouse gas emissions and affects ecological and economic systems in many different ways. Energy demand worldwide is forecast to continue growing in the next decades but the supply of fossil fuels, on which modern societies rely, is not unlimited. Such complex situation requires development of alternative energy scenarios as well as new models of human society based on the sustainable consumption of energy and natural resources. A number of economists have used economic analysis and biophysical accounting as a basis for valuing natural resources, human-dominated processes, and man-made ecosystems. As a complement to "preference-based approaches", biophysical accounting methods use a "cost of production approach" by measuring underlying physical parameters, thus resulting especially useful for valuing natural resource use and sustainable production. This thesis work aimed at integrating economic and biophysical assessments and indicators using electricity production in Finland as a case study. The main environmental and economic costs of electricity production in Finland were investigated by exploring and correlating economic features (monetary production costs), direct and indirect use of fossil fuels (GER cost), global environmental support (Emergy cost), and environmental impact (CO<sub>2</sub> emissions). In particular, the main economic and environmental costs of electricity production were evaluated by exploring the performance of different technologies at plant scale as well as their load at national level. Two alternative scenarios for Finland's energy future (year 2025 and 2050) were also drawn and compared with the reference year 2008. The scenario analysis suggests an energy policy for Finland's energy future based on a diversified energy mix oriented to the sustainable exploitation of local, renewable, and environmentally friendly energy sources. In terms of energy security, it would be important to decentralize the energy production and improve energy policies aimed to increase energy efficiency and sustainable energy consumption. Further investigations are still required to better assess the most appropriate energy mix able to minimize both environmental load and economic costs of different electricity production technologies, ensuring a future energy policy deeply rooted in the principles of sustainable development and able to cope with a post-carbon society.</p>	
<p>Keywords Electricity, Finland, Energy, Economic analysis, Biophysical accounting, Scenario</p>	
<p>Where deposited      University of Jyväskylä/ School of Business and Economics</p>	

## LYHENTEET JA KÄSITTEET

Barreli	tynnyri öljyä, 159 litraa
CHP	Compined Heat and Power (yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto)
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
CO <sub>2</sub> -ekv.	hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasupäästöjen ilmasto-vaikutus muutettuna hiilidioksidiksi, huomioi kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen vaikutukset
GER	Gross Energy Requirement. Prosessissa tai tuotteessa suorasti ja epäsuorasti hyödynnetty fossiilisen energian (öljy, hiili ja maakaasu) määrä
GWh	gigawattitunti, 1 GWh = 10 <sup>6</sup> kWh
Energia	Energialla tarkoitetaan hyödynnettävissä olevan energian (exergia) määrää, joka on käytetty suorasti ja epäsuorasti tuotteen tai palvelun aikaansaamiseksi. Energia ottaa huomioon prosessissa hyödynnetyt erilaiset energia-, materiaali- ja rahavirrat, ja muuttaa ne yhdeksi yksiköksi, aurinkoenergiaksi (solar emjoule).
Exergia	hyödynnettävissä oleva energia, energian työhön kykenevä osa. Systemin exergia on suurin mahdollinen mekaaninen tai sen kanssa ekvivalenttinen energia, joka voidaan työnä saada ulos systemistä, kun se siirtyy alkutilasta tasapainotilaan ympäristön kanssa.
EU-15	Euroopan unioni ennen laajentumista (15 jäsenmaata)
EROEI	Energy Returned on Energy Invested (nettoenergia)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency (Kansainvälinen energiajärjestö)
IFIAS	International Federation of Institutes for Advanced Studies
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (YK:n ilmastomuutoksen asiantuntijaelin, hallitustenvälinen ilmastopaneeli)
J	joule, energian ja työn yksikkö
KHK	kasvihuonekaasut, joista merkittävimmät ovat vesihöyry (H <sub>2</sub> O), joka aiheuttaa noin 36-70 % kasvihuoneilmiöstä, hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> ), joka aiheuttaa 9-26 %, metaani (CH <sub>4</sub> ), joka aiheuttaa 4-9 % ja alailmakehän otsoni (O <sub>3</sub> ), joka aiheuttaa 3-7 %. Kasvihuonekaasuja ovat lisäksi dityppioksidi (N <sub>2</sub> O) ja monet synteettiset kemikaalit, kuten kloorifluoratut hiilivedyt (CFC:t ja HCFC:t), fluoriyhdisteet (HFC:t, PFC:t ja SF <sub>6</sub> ) sekä bromiyhdisteet (halonit)).
kWh	kilowattitunti, 1 kWh = 3,6 MJ
MWh	megawattitunti, 1 MWh = 10 <sup>3</sup> kWh
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development (Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö, joka on

	kehittyneiden markkinatalousmaiden yhteistyöjärjestö, johon kuuluu 30 jäsenmaata)
PT	petajoule = 1000 TJ = $10^{15}$ J
TJ	terajoule, 1TJ = $10^{12}$ J = 0,278 GWh
Toe	ekvivalenttinen öljytonni, raakaöljyn sisältämä energiamäärä
UNEP	United Nation Environmental Program
n.a.	data not available, tietoa ei ole saatu
-	ei mitään ilmoitettavaa

#### Muuntotaulukko

	toe	MWh	GJ	Gcal
Toe	1	11,63	41,868	10
MWh	0,086	1	3,6	0,86
GJ	0,0239	0,2778	1	0,2388
Gcal	0,1	1,163	4,1868	1

Esimerkki: 1 MWh = 3,6 GJ

## KUVIOT

KUVIO 1	Maailman energiankulutus energialähteittäin vuonna 2006.....	14
KUVIO 2	Maailman primäärienergian kulutus alueittain 1965-2009.....	14
KUVIO 3	Öljyntuotanto Hubbertin käyrän mukaan .....	16
KUVIO 4	Maailman raakaöljyn tuotanto ja kulutus 1965-2009 .....	17
KUVIO 5	Raakaöljyn pitkän aikavälin hinnan kehitys 1861-2009.....	17
KUVIO 6	Kivihiilen kulutus EU:ssa ja koko maailmassa 1965-2007 .....	18
KUVIO 7	Kivihiilen hinta Koillis-Euroopassa 1987-2007 .....	19
KUVIO 8	Maakaasun kulutus EU:ssa ja koko maailmassa 1965-2007 .....	20
KUVIO 9	Maakaasun hinta EU:ssa .....	20
KUVIO 10	Ydinsähkön kulutus maailmassa 1965-2009 .....	21
KUVIO 11	Luonnonuraanin keskimääräinen hinta vuosina 1980-2009 monivuotisissa sopimuksissa.....	22
KUVIO 12	Tuulivoima Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa per capita 2000-2007 .....	24
KUVIO 13	Energian loppukäyttö sektoreittain 2008.....	32
KUVIO 14	Energialähteiden kulutuksen prosenttiosuudet Suomessa vuonna 2008.....	33
KUVIO 15	Fossiilinen ja uusiutuva energia Suomessa 1970-2008.....	34
KUVIO 16	Suomen energiankulutus 1970-2008.....	35
KUVIO 17	Sähköntuotannon- ja kulutuksen rakenne tuotantotavoittain vuonna 2008 .....	36
KUVIO 18	Sähköntuotanto ja kokonaiskulutus Suomessa 1970-2008 .....	37
KUVIO 19	Tuotannon (BKT) energiaintensiivisyys 1975-2008 .....	38
KUVIO 20	Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990-2008 ja Kioton tavoitetaso .....	40
KUVIO 21	Ympäristotaloudellinen Kuznets-käyrä.....	50
KUVIO 22	Talous on suljetun ekosysteemin avoin alajärjestelmä.....	56
KUVIO 23	Sähköntuotannon systeemiagrammi.....	66
KUVIO 24	Taloudellisten ja ympäristöindikaattoreiden vertailu eri sähköntuotantoteknologioille per MWh .....	73
KUVIO 25	Taloudellisten ja ympäristöindikaattoreiden vertailu kansantalouden tasolla.....	73
KUVIO 26	Eri voimalaitosteknologioiden sähköntuotantokustannukset (€/MWh) ilman päästökauppaa .....	75
KUVIO 27	Sähköntuotantoteknologioiden tuotantokustannukset, kun päästöoikeuden hinta on 25 €/t CO <sub>2</sub> .....	75
KUVIO 28	Investointikustannusten muutoksen vaikutus tuotantokustannuksiin .....	76
KUVIO 29	Korkotason muutosten vaikutus tuotantokustannuksiin .....	77
KUVIO 30	Polttoainekustannusten muutoksen vaikutus tuotantokustannuksiin .....	77

KUVIO 31	Päästöoikeuden hinnan vaikutus sähkön tuotantokustannuksiin .. .....	78
KUVIO 32	Eri voimalaitostyyppien tuotantokustannukset huippukäyttäjän funktiona .....	79
KUVIO 33	Suomen sähköntuotannon skenaarioiden vertailu, vuosi 2025 ....	81
KUVIO 34	Suomen sähköntuotannon skenaarioiden vertailu, vuosi 2050 ....	82
KUVIO 35	Referenssivuoden 2008 ja eri skenaarioiden tuotantokustannukset, €/MWh, perusoletuksilla.....	83

## TAULUKOT

TAULUKKO 1	Menetelmiä luonnonvarojen arvottamiseksi .....	61
TAULUKKO 2	Uusiutuvan energian ja turpeen lisäysmahdollisuudet.....	71
TAULUKKO 3	Skenaarioissa oletetut sähköntuotannon määrät eri teknologioille .....	80
TAULUKKO 4	Suomen sähköntuotannon kustannusten ja muiden indikaattoreiden laskennassa käytetyt lähtöoletukset, vuosi 2008 .....	99
TAULUKKO 5	Suomen sähköntuotannon taloudelliset ja ympäristöindikaattorit.....	99
TAULUKKO 6	Suomen sähköntuotannon taloudelliset ja ympäristöindikaattorit kansantalouden tasolla vuonna 2008 .....	100

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET JA KÄSITTEET

KUVIOT JA TAULUKOT

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	10
2	GLOBAALI JA KANSALLINEN ENERGIATALOUS.....	13
2.1	Maailman energiavarat, energiankulutus ja hintojen kehitys.....	13
2.1.1	Fossiilinen energia.....	15
2.1.2	Ydinenergia.....	20
2.1.3	Uusiutuva energia.....	23
2.1.4	Nettoenergiatase ja muut energiantuotannon kriteerit.....	26
2.2	Energiantuotannon ympäristövaikutusten hallinta: kansainvälinen ilmastopoliittikka, EU:n päästökauppa ja Suomi.....	28
2.3	Suomen energiajärjestelmän kehitys ja kansalliset tavoitteet.....	32
2.3.1	Energiantuotanto ja -kulutus.....	32
2.3.2	Sähköntuotanto ja -kulutus.....	35
2.3.3	Taloukasvu ja energiankulutus.....	37
2.3.4	Suomen kasvihuonekaasupäästöt.....	39
2.3.5	Kansalliset energia- ja ilmastopoliittiset tavoitteet.....	41
3	YMPÄRISTÖN JA LUONNONVAROJEN ARVOTTAMINEN TALOUSTIETEESSÄ.....	43
3.1	Talous ja kestävä kehitys.....	43
3.2	Uusklassisen ympäristötaloustieteen näkökulma.....	44
3.2.1	Luonnonvarojen niukkuus ja hinnat mittarina.....	44
3.2.2	Ympäristöongelmat negatiivisina ulkoisvaikutuksina.....	47
3.2.3	Taloukasvun vaikutus ympäristöongelmiin.....	49
3.3	Ilmastopoliittikan taloudellinen arvottaminen.....	51
3.3.1	Kustannus-hyötyanalyysi ilmastopoliittikassa.....	51
3.3.2	Sternin raportti ja sen kritiikkiä.....	53
3.4	Ekologinen taloustiede: kestävä kehityksen huomiointi.....	55
3.4.1	Talous rajallisessa maailmassa.....	55
3.4.2	Biofysikaalinen arvottaminen.....	60
4	ENERGIANTUOTANNON ARVIOINNIN MENETELMÄT.....	62
4.1	Tuotantokustannusanalyysi ja herkkyysanalyysi.....	62
4.2	Gross Energy Requirement.....	64
4.3	Energiasynteesi.....	65
4.4	Hiilidioksidipäästöt.....	67
4.5	Skenaariomenetelmä.....	68



5	TULOKSET.....	69
5.1	Aineisto .....	69
5.2	Sähköntuotannon taloudelliset ja biofysikaaliset kustannukset.....	71
5.3	Tuotantokustannusten tarkempi taloudellinen analyysi.....	74
5.3.1	Voimalaitosten tuotantokustannukset .....	74
5.3.2	Herkkyysanalyysi tuotantoteknologioiden kustannuksille.....	76
5.4	Sähköntuotanto tulevaisuuden Suomessa .....	79
5.5	Tulosten tarkastelu .....	83
5.5.1	Tuotantokustannukset.....	83
5.5.2	Energiaverotuksen vaikutukset .....	86
5.5.3	Biofysikaaliset kustannukset ja vaikutukset .....	87
5.5.4	Skenaariot.....	89
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	91
	LÄHTEET.....	93
	LIITE 1 .....	99

# 1 JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden, öljyn, hiilen ja maakaasun, hyödyntämiseen perustuva talousjärjestelmä on oleellisesti parantanut ihmiskunnan hyvinvointia viimeisen sadan vuoden aikana. Samalla suuri osa maapallon maista on tullut hyvin riippuvaiseksi fossiilisista energialähteistä, jotka ovat uusiutumattomia ja siten resursseiltaan rajallisia. Fossiilisten energialähteiden maailmanlaajuinen kysyntä on kasvussa, mutta samalla niiden varannot käyvät yhä niukemmiksi ja vaikeammin hyödynnettäviksi, mikä nostaa hintatasoa.

Taloudellinen kasvun ja fossiilisten polttoaineiden laajamittaisen hyödyntämisen sivuvaikutuksena on lisäksi syntynyt vakavia ympäristöongelmia, joista yksi merkittävimmistä on globaali ilmastonmuutos. YK:n alaisen hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n (2007) mukaan globaaleja päästöjä pitää vähentää vähintään 50 prosenttia vuoteen 2050 mennessä, jos ilmaston lämpeneminen halutaan pitää alle kahdessa asteessa. Teollisuusmaille tämä voisi tarkoittaa jopa 80–95 prosentin vähennyksiä. Päästöjen vähentäminen tulee maksamaan, mutta toisaalta ilmastonmuutokseen sopeutuminen voi aiheuttaa suuria kustannuksia. Sternin raportin (2007) mukaan ilmastonmuutoksen hillitseminen tulee ihmiskunnalle huomattavasti sopeutumistoimia halvemmaksi. Sternin raporttia on kuitenkin myös kritisoitu alhaisen korkotason valinnasta, mikä vaikuttaa kustannuksiin oleellisesti (Nordhaus 2007).

Kansainvälisen energiajärjestön IEA:n (2008) mukaan maailman fossiilisiin energialähteisiin perustuva energiantuotanto ja -kulutus eivät ole kestävä kehityksen mukaisia niin ympäristön, talouden kuin yhteiskunnankaan kannalta. Tämä tarkoittaa, että energian tuotanto- ja kulutustapoja on muutettava. Lähitulevaisuudessa Suomessa ja koko Euroopan unionissa tehdään tärkeitä energiapäätöksiä. Fossiilisten polttoaineiden riippuvuuden pienentäminen ja ilmastonmuutoksen hillitseminen tulevat mullistamaan nykyisen energiajärjestelmän ja pakottavat maat siirtymään uusituvan energian hyödyntämiseen ja energiansäästöön. Lisäksi energiahuollon omavaraisuuden säilyttäminen ja kasvattaminen edellyttää paikallisten energialähteiden hyödyntämistä.

Suomen energiarakenne perustuu monien eri energialähteiden ja teknologioiden hyödyntämiseen. Tällä hetkellä puolet Suomen energiasta

tuotetaan fossiilisilla energialähteillä, ja uusiutuvan energian osuus, noin 28 prosenttia, on korkeampi kuin EU:ssa keskimäärin. Energiankulutus on Suomessa asukasta kohden yksi maailman suurimpia, mutta toisaalta Suomen osuus maailman kokonaisenergiankulutuksesta on vain 0,3 prosenttia. Huolimatta siitä, että kulutamme paljon energiaa, energian käytön tehokkuus kaikilla sektoreilla on maailman huippuluokkaa (Rintala ym. 2007).

Suomen kasvihuonekaasupäästöt ovat asukasta kohden laskettuna maailman suurimpia, mihin syinä ovat etenkin energiaintensiivinen raskas teollisuus, liikenne ja rakennusten lämmittäminen. Suomi sitoutuu osana kansainvälistä yhteisöä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen, ja Kioton protokolla ja EU:n sisäinen taakanjako velvoittavat Suomen laskemaan päästönsä vuosien 2008–2012 aikana vuoden 1990 tasolle. Päästörajoitusten ohella EU pyrkii lisäämään uusiutuvan energian osuuden 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä ja kasvattamaan biopolttoaineiden osuutta liikenteen energiankulutuksessa. Suomen uusiutuvan energian osuudeksi EU on asettanut 38 prosenttia, mikä on 9,5 prosenttiyksikköä korkeampi kuin Suomen tämänhetkinen uusiutuvan energian osuus.

Koska Suomella ei ole fossiilisia energiavaroja, kotimaiset energiavarat rajoittuvat turpeeseen ja uusiutuviin energialähteisiin: vesivoimaan, biomassaan ja tuulivoimaan, joista bioenergia ja tuulivoima ovat lupaavimmat keinot lisätä uusiutuvaa energiaa Suomessa. Korvaamalla fossiilista energiaa uusiutuvilla energialähteillä Suomi paitsi vähentää osuuttaan ilmastonmuutokseen myös parantaa energijärjestelmämme omavaraisuutta ja varmuutta ja pienentää riippuvuuttaan alati kallistuvista ja niukentuvista fossiilisista energialähteistä. Myös talouden vakaus voi lisääntyä, kun riippuvuus energiapanosten maailmanmarkkinahintojen heilahteluista vähenee.

Energiavarmuuteen ja kestäväan kehitykseen pyrkivän energiapolitiikan kehittäminen ei ole helppo tehtävä, koska sekä taloudelliset että ympäristöön liittyvät aspektit ja rajoitteet tulee tutkia hyvin ennen päätösten tekoa. Osa taloustieteilijöistä, etenkin ekologisessa taloustieteessä, on alkanut täydentämään preferensseihin pohjautuvia, rahamääräisiä menetelmiä, biofysikaalisilla menetelmillä, kun tavoitteena on arvottaa luonnonvaroja ja ihmisen hallitsemia prosesseja tai ekosysteemejä. Biofysikaaliset arvottamismenetelmät perustuvat prosessin tai tuotteen energia- ja materiaalmääräisiin tuotantokustannuksiin. Myös klassisessa taloustieteessä (esimerkiksi Adam Smith ja Ricardon ja Marxin työnarvoteoria) arvon ajateltiin muodostuvan juuri tuotantokustannusten perusteella.

Tarve erilaisille arvottamismenetelmille on huomattu myös kansainvälisissä organisaatioissa: Millenium Ecosystem Assessment (2005) – tutkimusraportissa ja viimeisimpänä UNEP:n isännöimässä laajassa The Economics of Environment and Ecosystems (2010) –raportissa on painotettu biofysikaalisten mittareiden tarpeellisuutta, koska ne antavat yhdessä taloudellisen analyysin kanssa monipuolisemman kuvan tarkasteltavasta systemistä.

Tämän työn tarkoitus on edistää taloudellisen ja biofysikaalisen, eli energia- ja materiaalivirtoihin perustuvan, analyysin yhdistämistä toisiaan täydentäviksi arvottamismenetelmiksi. Tutkimuksen empiirisessä osassa analysoidaan Suomen sähköntuotannon nykyisiä ja tulevaisuuden suoria taloudellisia kustannuksia sekä arvioidaan sähköntuotannon ympäristökustannuksia ja -kuormitusta sekä laitoskohtaisesti että kansantalouden tasolla. Lisäksi Suomen sähköntuotannon tulevaisuudelle, vuosille 2025 ja 2050, luodaan skenaarioita, joissa fossiilisia energialähteitä korvataan ei-fossiilisella energialla tämän hetken teknisten ja ekologisten rajoitteiden puitteissa tavoitteena mahdollisimman hiilineutraali sähköntuotanto. Energiantuotantoa tarkasteltaessa taloudellinen kustannusanalyysi on oleellinen, koska energian pitää luonnollisesti olla kohtuuhintaista ja hinnaltaan kilpailukykyistä ollakseen hyödyllistä yhteiskunnalle. Energiakysymysten moniulotteisuuden takia taloudellista analyysia täydennetään fossiilisen energian suoraa ja epäsuoraa kulutusta mittaavalla Gross Energy Requirement -menetelmällä, energia-, materiaali- ja rahavirtoja kuvaavalla Energia-menetelmällä ja arvioimalla sähkön-tuotantoteknologioiden hiilidioksidipäästöjä.

## 2 GLOBAALI JA KANSALLINEN ENERGIATALOUS

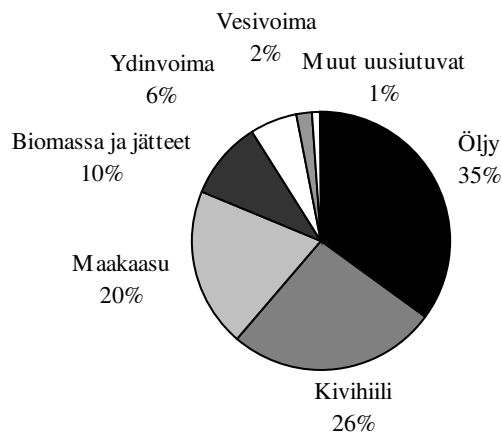
### 2.1 Maailman energiavarat, energiankulutus ja hintojen kehitys

Maailman energiasektorin kaksi suurinta haastetta ovat ilmastonmuutos ja energiankulutuksen valtava kasvu. Uhkana ovat riittävien, varmojen ja edullisten energiavarojen ehtyminen ja liiallisen energiankulutuksen aiheuttamat ympäristöhaitat (IEA 2006). IEA:n (2008) mukaan maailman energiantuotanto ja -kulutus eivät ole kestävä kehityksen mukaisia niin ympäristön, talouden kuin yhteiskunnankaan kannalta, ja järjestö arvioi, että ilman ilmastopolitiikkaa maailman primäärienergian<sup>1</sup> kulutus tulee kasvamaan vuodesta 2006 vuoteen 2030 mennessä noin 45 prosenttia, mikä vastaa keskimäärin 1,6 prosentin vuosikasvua. Kun energiankysyntä kasvaa, kilpailu niukoista resursseista kovenee, mikä nostaa energialähteiden hintoja. Öljy ja muut fossiiliset polttoaineet, kivihiili ja maakaasu, ovat pitkälti mahdollistaneet talouskasvun teollistuneissa maissa, mutta toisaalta aiheuttaneet sen, että kansantaloudet ovat suurelta osin riippuvaisia etenkin öljystä. Öljyllä katetaan tällä hetkellä 40 prosenttia maailman energiankulutuksesta, ja varsinkin teollisuus, liikenne ja maatalous käyvät suureksi osaksi öljyn voimalla. Vuonna 2006 maailman primäärienergiankulutuksesta 80 prosenttia oli fossiilisia energialähteitä (kuvio 1).

Maailman energiavarat voidaan jakaa tunnettuihin varoihin ja arvioituihin lisävaroihin, joita koskevat arviot ovat hyvin epätarkkoja. Öljyvarojen ehtyminen on lähimpänä, kun taas hiiltä riittää joidenkin arvioiden mukaan nykykäytöllä vielä satoja vuosia. Minkään maailmanlaajuisesti merkittävän polttoaineen varojen ehtyminen ei aiheuta seuraavan 20–25 vuoden aikana väistämättömiä muutoksia niiden käyttöön (VTT 2004). Huolimatta siitä, että

---

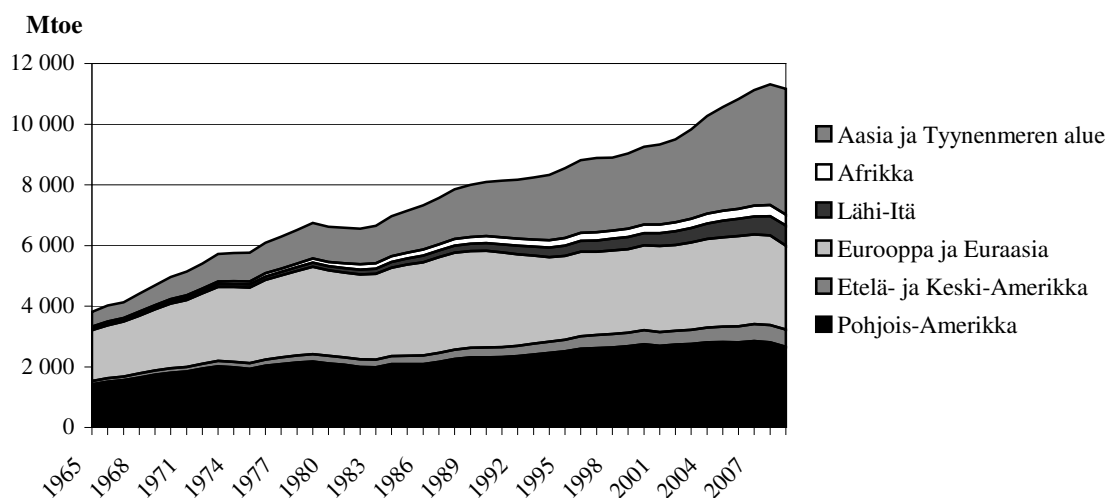
<sup>1</sup> Primäärienergialla tarkoitetaan energiantuotannossa käytettyjen energialähteiden energiasisältöjen summaa. Primäärienergia ei ole käynyt läpi muutosprosessia käyttökelpoiseksi energiaksi. Primääri- ja sekundaarienergian erotus vastaa energiantuotantoprosessiin liittyviä häviöitä.



KUVIO 1 Maailman energiankulutus energialähteittäin vuonna 2006, % (Datan lähde: BP 2010)

energiavarat ovat suuret, fossiilinen energia tulee väistämättä ehtymään tulevien vuosikymmenten aikana (Hubbert 1956 ja 1968; Campbell & Laherrere 1998; Hall & Cleveland 1981; Hall & Day 2009), mikä pakottaa yhteiskunnat kehittymään kohti vähäenergiasta taloutta (Odum & Odum 2001).

Taloukasvu ja energian kysynnän kasvu ovat perinteisesti liittyneet toisiinsa. Teollistuneissa maissa näin ei enää välttämättä ole, mutta maailmanlaajuisesti trendi pitää paikkaansa, sillä taloukasvu on suurinta kehittyvissä maissa, joissa lisääntyvä energiantarve katetaan fossiilisilla polttoaineilla. Etenkin Kiinan ja Intian merkitys energian kuluttajina ja hiilidioksidipäästöjen tuottajina tulee kasvamaan merkittävästi (IEA 2008). Kuviossa 2 on esitetty maailman energiankulutus alueittain. Aasian ja Tyynenmeren maiden kulutus on kasvanut huomattavasti viime vuosina, ja maat kattavat jo kolmanneksen globaalista energiankulutuksesta. Jos maailman



KUVIO 2 Maailman primäärienergian kulutus alueittain 1965-2009, Mtoe (Datan lähde: BP 2010)

energiankulutuksessa ja -tuotannossa jatkuu sama trendi kuin tähän asti, eli hiilidioksidipäästöjä ei merkittävästi hillitä, IEA:n skenaariossa arvioidaan, että fossiiliset energialähteet tulevat kattamaan 80 prosenttia energiankulutuksesta vuonna 2030, ja ilman politiikkatoimia globaalit päästöt tulevat kaksinkertaistumaan vuoteen 2050 mennessä (IEA 2006). Öljy pysyy hallitsevana polttoaineena, ja sen kysyntä kasvaa etenkin liikennesektorilla. IEA (2008) arvio kuitenkin, että hiilen kysyntä kasvaa eniten, ja että Kiina ja Intia tulevat vastaamaan noin puolesta energian kysynnän kasvusta vuosina 2006–2030.

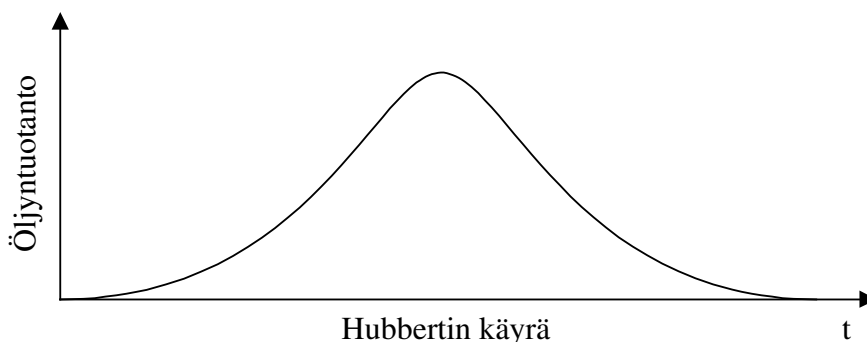
Fossiiliset polttoaineet tulevat siis olemaan hallitsevia energialähteitä myös seuraavien vuosikymmenten aikana. Siirtyminen fossiilisesta energiasta uusiutuvaan energiaan on hidasta korkeiden kustannusten, etenkin tuuli- ja aurinkoenergian kustannusten takia, vesi- ja biomassaresurssien puutteen ja jo olemassa olevan energiantuotantojärjestelmien pitkän käyttöiän vuoksi. Ydinvoiman käyttö rajoittuu vain niihin maihin, joissa se on saanut yleisen hyväksynnän, ja fuusioteknologia on vielä kaukana kaupallistamisesta. Väliaikaiset ratkaisut, kuten hiilen talteenotto, ovat tarpeellisia, jotta kasvava energiankysyntä etenkin kehitysmaissa voidaan kattaa. (VTT 2009, 145.)

### 2.1.1 Fossiilinen energia

Öljyn käytössä on kolme suurta riskiä: Öljy ensinnäkin uhkaa maailman taloutta, koska sille ei ole kehitetty selkeää korvaajaa. Vakavia taloudellisia ongelmia voi aiheutua, kun kuilu öljyn tarjonnan ja kysynnän välillä kasvaa. Öljyn saatavuuden heikentyminen voi myös heikentää ihmisten turvallisuutta, koska öljyn hankkiminen ja hallinta voivat olla tärkeämpää kuin yhteiskunnallinen järjestys, ihmisoikeudet ja demokratia. Lisäksi huomattava osa maailman kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu öljyn poltosta, mikä uhkaa ilmastoamme. (Prugh, Christopher & Sawin 2005.)

Öljyä tulee IEA:n (2008) mukaan riittämään nykykulutuksella yli 40 vuodeksi. Hinnat sen sijaan saattavat nousta etenkin, kun öljyn vuosituotanto kääntyy laskuun. Monet tutkijat ja asiantuntijat ovat ennustaneet, että tuotantohuippu on jo saavutettu tai saavutetaan lähivuosina. Tarkkaa öljyn tuotantohuipun ajankohtaa on kuitenkin vaikea ennakoida, sillä maailman öljyvaroista ei ole luotettavia arvioita. Öljykentän sisältämästä öljystä 50 prosenttia on edullista tuottaa, koska öljy nousee maanpinnalle omalla paineellaan. Tämän jälkeen öljyn pumppaaminen vaikeutuu jatkuvasti ja tuotantokustannukset nousevat. Hubbertin (1956) mallin (kuvio 3) mukaan tuotantohuipun ohittamisen jälkeen raakaöljyn tuotanto supistuisi neljännesosaan seuraavien 30 vuoden aikana.

Maailman raakaöljyn tuotanto ja kulutus on kehittynyt 1965-luvulta tähän vuoteen 2007 saakka kuvion 4 mukaisesti. Vuonna 1965 tuotanto oli vajaat 32 miljoonaa tynnyriä päivässä, kun vuonna 2007 se ylitti jo 81 miljoonaa tynnyriä päivässä. 80-luvun puolesta välistä alkaen kulutus on noussut keskimäärin



KUVIO 3 Öljyntuotanto Hubbertin käyrän mukaan

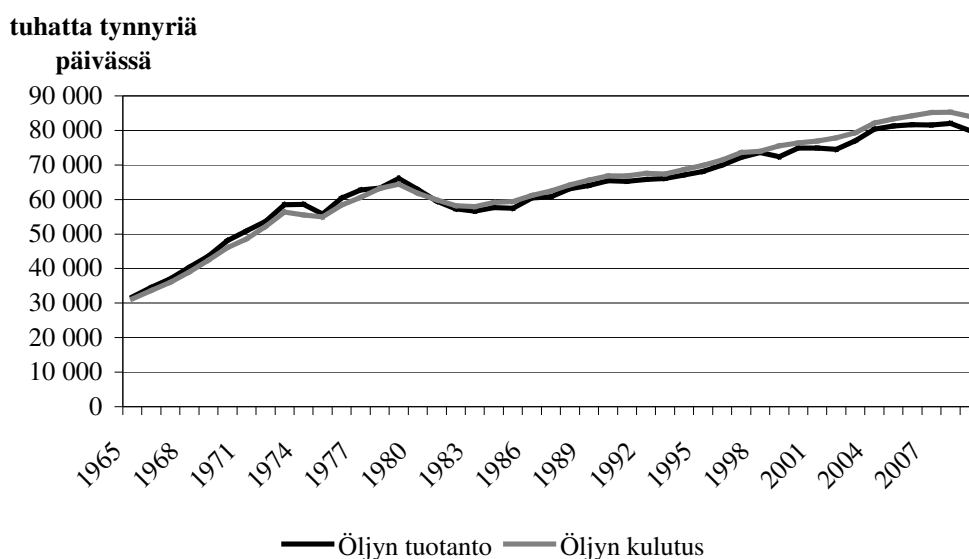
vajaat kaksi prosenttia vuodessa. Viime vuosina öljyn kysyntää on lisännyt etenkin Kiinan ja Intian nopea talouskasvu. IEA:n (2008) mukaan öljy tulee säilymään tärkeänä energialähteenä vielä vuosikausia, vaikka vaihtoehtoinen teknologia kehittyisi. Öljyn kulutukseen liittyä tulevaisuudessa paljon epävarmuutta: miten öljyntuotanto pystyy vastamaan kasvavaan kysyntään ja mitkä tuotantokustannukset ja kuluttajahinnat tulevat olemaan. Tarjonnan epävarmuus ei johdu ensisijaisesti öljyvarojen loppumisesta vaan siitä, että investointeja uuteen tuotantokapasiteettiin ei tehdä riittävästi (IEA 2008). Sillä, miten globaalinen öljy- ja kaasuteollisuuden rakenne kehittyy tulevina vuosikymmeninä, on merkittäviä vaikutuksia investointeihin, tuotantokapasiteettiin ja hintoihin. IEA:n mukaan kansalliset yritykset tulevat hallitsemaan öljy- ja kaasumarkkinoita. Kansallisten päämäärien toteuttaminen voi hidastaa resurssien käyttämistä, ja kansallisilla yrityksillä ei välttämättä ole tarpeeksi teknologiaa ja osaavaa henkilöstöä, jotta ne voisivat lisätä tuotantoa.

Polttoaineista öljyllä on selkeimmät maailmanlaajuiset markkinat. Raakaöljyn maailmanmarkkinahinta pysyi 1860-luvulta 1970-luvun alkuun asti alle kahdessa dollarissa tynnyriltä, mutta vuoden 1973 öljykriisin aikana hinta nelinkertaistui (kuvio 5). Taustalla oli Israelin ja arabimaiden välille puhjennut sota, jonka seurauksena useat arabimaat päättivät vähentää öljyntuotantoaan. Öljyn maailmanmarkkinahinta lähti voimakkaaseen nousuun ja maailmantalous ajautui taantumaa. Vuonna 1979 oli Iranissa vallankumous, jolloin maa supisti öljyntuotantoaan ja vientiään, minkä seurauksena öljyn hinta kohosi edelleen lähes 40 dollariin. Hinta vastaa vuoden 2009 rahassa lähes 100 dollarin hintaa tynnyriltä. 1970-luvun hintashokit johtuivat öljyn tarjonnan rajoittamisesta. 1990-luvulla hinta pysytteli 20 dollarin liepeillä, mutta sen jälkeen se alkoi taas kohota. Raakaöljyn hinta nousi vuoden 2008 lopulla ennätyslukemiin, lähes 140 dollariin tynnyriltä. Nykyinen hinnan nousu johtuu suurelta osin pitkään jatkuneesta talouskasvusta useissa maissa, ennen kaikkea Aasiassa, mutta taustalla on myös Irakin sota. Öljyn hinta voi nousta odotettua korkeammalle, jos talous kasvaa ennakoitua nopeammin, ja erityisesti Kiinan talouskasvu voi nostaa öljyn hintaa. Maailman talouskriisi on kuitenkin laskenut kysyntää ja hinta on tipahtanut noin 40 dollariin. Alhaiset hinnat

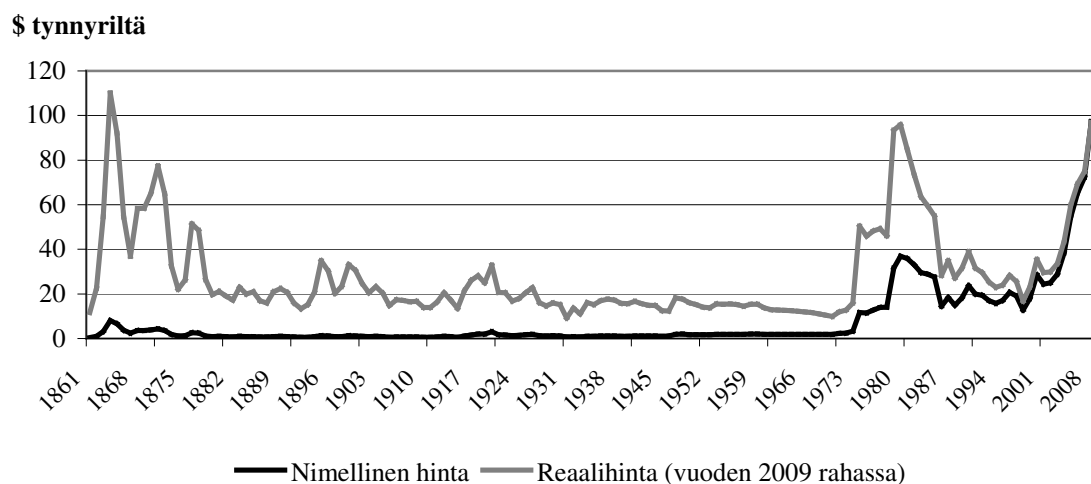


voivat auttaa taloutta lyhyellä aikavälillä toipumaan, mutta jos niiden seurauksena pitkäaikaiset investoinnit öljyn tuotantoon vähenevät, öljyn tarjonnassa voi myöhemmin tulla ongelmia. Öljyn volatiilit hinnat aiheuttavat lisäksi epävarmuutta ja jarruttavat investointeja (IEA 2006).

IEA:n (2008) mukaan vuoden 2008 hintapiikki osoittaa, miten herkkä öljyn hinta on lyhyen aikavälin epätasapainolle markkinoilla. Markkinoiden epätasapaino voi välillisesti laskea hintoja, mutta on varsin selvää, että halvan öljyn aika on ohi (Campbell & Laherrere 1998; Hall & Day 2009; Heinberg 2009; IEA 2008). Kun öljyn hinta nousee, se kannustaa kehittämään ja käyttämään



KUVIO 4 Maailman raakaöljyn tuotanto ja kulutus 1965–2009, tuhatta tynnyriä<sup>2</sup> päivässä (Datan lähde: BP 2010)



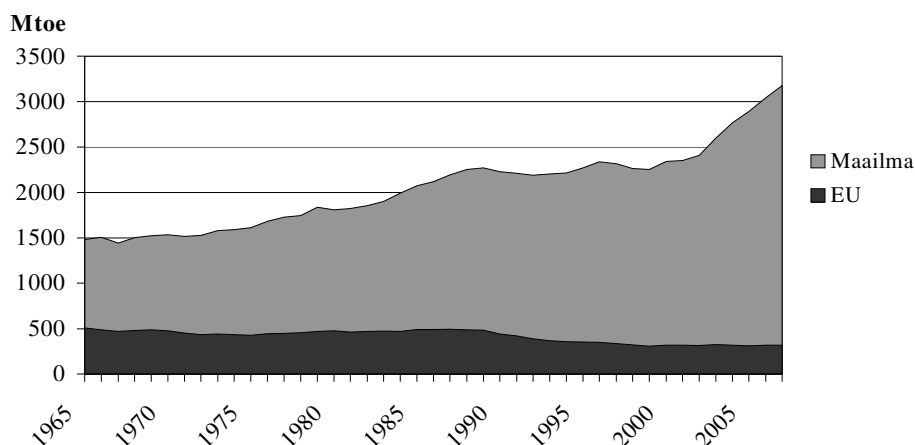
KUVIO 5 Raakaöljyn pitkän aikavälin hinnan kehitys 1861–2009, \$/tynnyri (Datan lähde: BP 2010)

<sup>2</sup> Yksi tynnyri (barreli) raakaöljyä on noin 159 litraa.

tehokkaampia teknologioita, mutta toisaalta se voi aiheuttaa siirtymisen vielä enemmän saastuttaviin tuotantomuotoihin, kuten hiilen käyttöön. Kohonneet öljyn ja muiden energialähteiden hinnat saattavat myös jo nyt heijastaa epävarmuutta siitä, miten ilmastonmuutos vaikuttaa eri energialähteiden saatavuuteen ja siihen millaisia toimia eri energialähteiden tarjontaan ja hintoihin tullaan kohdistamaan.

Koska maapallon runsaat kivihiilivarat ovat jakautuneet huomattavasti tasaisemmin kuin öljyn ja kaasun varat, kivihiilen tuotanto ei ole yhtä herkkä kriiseille. Kivihiilen käytön ongelmana olivat ennen rikkidioksidipäästöt, joiden vähentämiseksi keksittiin tehokkaita keinoja. Nykyisin ongelmana ovat hiilen polton hiilidioksidipäästöt. Hiilidioksidin erottamista savukaasuista ja sijoittamista siten, että se ei vapaudu ilmakehään, tutkitaan aktiivisesti, mutta ainakaan tällä hetkellä ei ole olemassa laajaan kaupalliseen käyttöön soveltuvaa menetelmää<sup>3</sup>. (VTT 2004.) Kuvioista 6 nähdään, että kivihiilen kulutus on vähentynyt EU:n alueella 1990- ja 2000-luvun aikana. EU:n harjoittaman päästökaupan seurauksena hiilen käytön kustannukset kasvavat suurien hiilidioksidipäästöjen takia, ja se menettää kilpailukykyään esimerkiksi maakaasulle, jonka hiilidioksidipäästöt ovat noin 40 prosenttia pienemmät.

Kivihiilen hinnan uskotaan kehittyvän maltillisesti. Hintaa nostavat lähinnä kasvavat tuotantokustannukset ja rahtimaksut. Toisaalta hinnat voivat laskea tuottavuuden parantuessa ja avattaessa edullisempia kaivoksia. Kysynnän kasvu voi nostaa hintoja, mutta toisaalta tulevat ilmastopöytäkirjat voivat heikentää hiilen kilpailukykyä. (VTT 2003.) Myös kivihiilen markkinat ovat maailmanlaajuiset, mutta kuljetuskustannusten merkitys on suurempi ja eri alueiden hinnat eroavat voimakkaammin toisistaan kuin öljyn tapauksessa

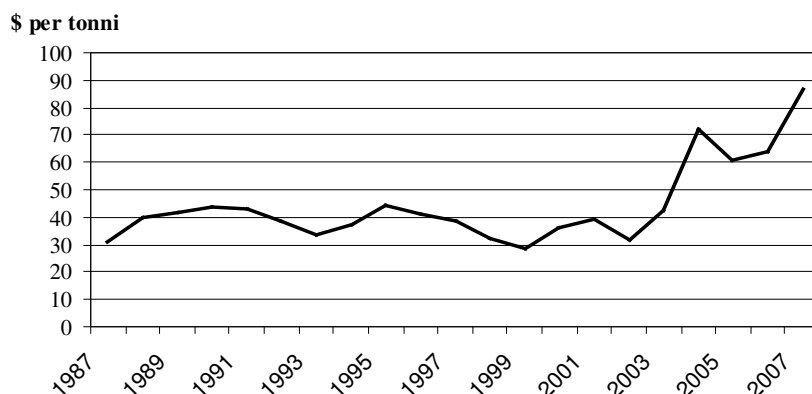


KUVIO 6 Kivihiilen kulutus EU:ssa ja koko maailmassa 1965–2007, Mtoe (Datan lähde: BP 2009)

<sup>3</sup> Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on kehitteillä oleva tekniikka, joka vähentäisi esimerkiksi suurten hiilivoimaloiden hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Tekniikassa hiilidioksidi erotetaan päästöistä ja varastoidaan maan- tai merenalaisiin varastoihin.

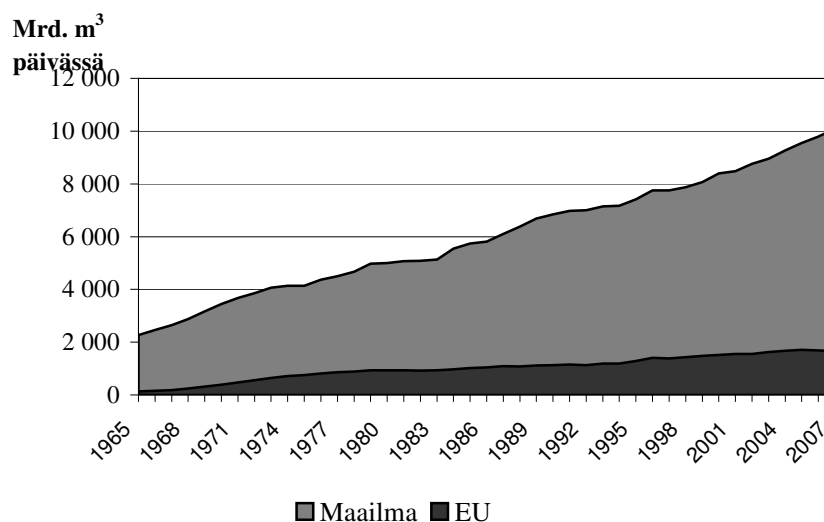
(VTT 2004, 178). Kuviossa 7 kuvataan kivihiilen hinnan kehitystä Koillis-Euroopassa vuosina 1987–2007. Vuoteen 2003 saakka kivihiilitonnin hinta vaihteli 30 ja 40 dollarin välillä, mutta sen jälkeen hinta on ollut nousussa. Vuonna 2007 se kohosi lähes 90 dollariin. Suomen kannalta tärkeimpiä toimittajia ovat Venäjä ja Puola, joiden hinnat eivät ole suoraan sidoksissa maailmanmarkkinahintoihin mutta riippuvat niistä luonnollisesti paljon.

Kivihiihtä riittää vielä ainakin 200 vuodeksi (VTT 2004). Hiilen tuotantolukuihin perustuvalla menetelmällä on kivihiilen riittävydestä esitetty myös toisenlainen tutkimustulos: Strahanin (2008) mukaan hiilivarat ehtyvät geologisia ennusteita nopeammin. Tästä kertoo muun muassa kivihiilen nopeasti kohonnut hinta maailmalla viimeisen kymmenen vuoden aikana. Lisäksi kivihiilen kysyntä on kasvanut nopeasti ja hiilen suurin tuottaja Kiina joutuu jo tuomaan hiiltä ulkomailta. Myös varantoja on yhä vähemmän tuotantoon nähden. Myös geologinen arvio varannoista laskee kolmanneksella vuosien 2000–2005 aikana.



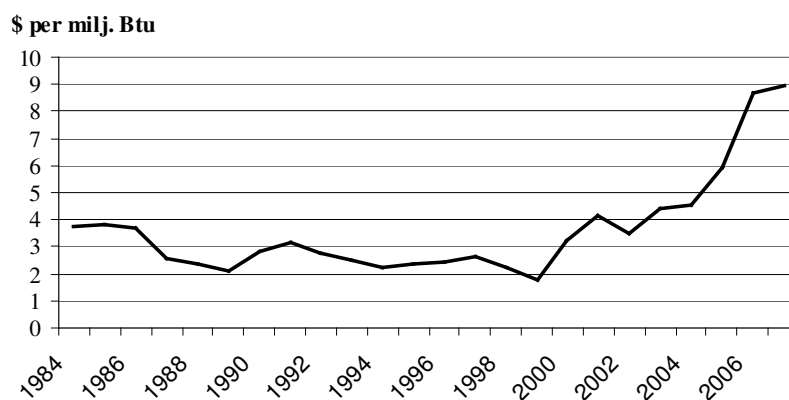
KUVIO 7 Kivihiilen hinta Koillis-Euroopassa 1987–2007, USD per tonni (Datan lähde: BP 2009)

Maakaasuvarat riittävät IEA:n (2008) mukaan nykykulutuksella noin 60 vuodeksi. Kuten öljyn, myös maakaasun varat ovat keskittyneet harvoihin maihin, joista tärkeimmät, Venäjä, Iran ja Qatar, omistavat 56 prosenttia reserveistä. Maakaasun käyttö on lisääntynyt nopeasti maailmalla (kuvio 8). Tällä hetkellä maailman energiankulutuksesta katetaan maakaasulla noin 25 prosenttia, mutta kulutus on jatkuvassa kasvussa. Maakaasun hiilidioksidipäästöt ovat noin 40 prosenttia hiilen hiilidioksidipäästöistä, eikä poltosta aiheudu lainkaan rikkidioksidipäästöjä, joten se on ilmaston kannalta hiiltä parempi polttoaine. Jos öljystä ja hiilestä siirrytään ilmastopöytäkirjan takia maakaasun käyttöön, lisääntyy maakaasun käyttö huomattavasti, mikä voi vaikuttaa sen saatavuuteen ja hintakehitykseen. Toisaalta hiilen ja öljyn käytön vähentäminen siirtäisi öljyn riittävyysongelmia myöhäisemmäksi. (VTT 2004.) Tulevaisuuden visioissa maakaasun laajamittainen käyttö toimii välivaiheena siirryttäessä öljykaudelta vetytalouteen (Asplund ym. 2005).



KUVIO 8 Maakaasun kulutus EU:ssa ja koko maailmassa 1965–2007, mrd. m<sup>3</sup> päivässä (Datan lähde: BP 2009)

Maakaasulla ei ole maailmanlaajuisia markkinahintaa kuten raakaöljyllä, vaan hinta määräytyy kussakin maassa vallitsevan energijakauman mukaisesti (Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2008). Kuvioista 7 nähdään, että maakaasun nimellishinta on vuodesta 1984 vuoteen 2007 verrattuna yli kaksinkertaistunut. Koska sen hinta on sidottu öljyn ja kivihiilen hintaan, maakaasu tulee halpenemaan kuluvan vuoden aikana.



KUVIO 9 Maakaasun hinta EU:ssa, USD per miljoonaa Btu<sup>4</sup> (Datan lähde: BP 2009)

## 2.1.2 Ydinenergia

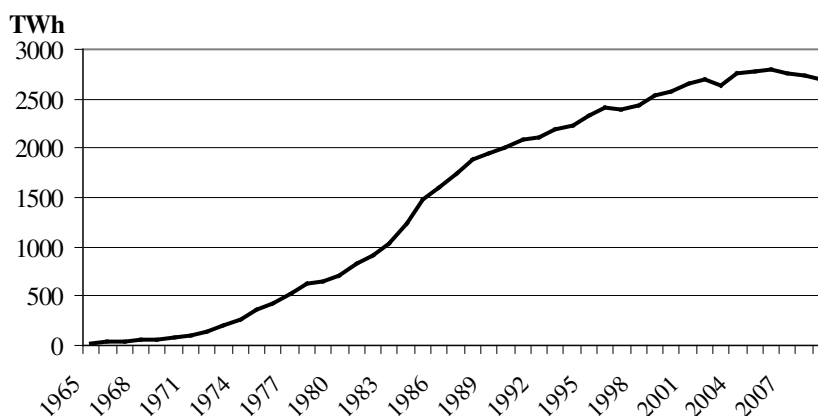
Ilmastonmuutoksen torjunta ja fossiilisten polttoaineiden kallistuminen on tehnyt ydinenergiasta houkuttelevan vaihtoehdon. Ydinvoimaloita on käytössä maailmalla yli 400, ja ne tuottavat noin 15 prosenttia maailman sähköstä ja

<sup>4</sup> 1 Btu = 1,06 kilojoulea

seitsemän prosenttia maailman primäärienergian kulutuksesta. Vuonna 2007 ydinvoimalla tuotettiin 2 608 TWh sähköä, mihin tarvittiin noin 65 500 tonnia luonnonuraania. Eniten ydinvoimaa hyödynnetään Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Kaakkois-Aasiassa. (VTT 2009.) Suurimmat tunnetut uraanivarat sijaitsevat Australiassa, Kazakstanissa, Kanadassa, Etelä-Afrikassa, Namibiassa, Brasiliassa ja Venäjällä. Vuonna 2001 kohtuullisin kustannuksin hyödynnettävät tunnetut uraanivarat olivat noin 2,2 miljoonaa tonnia, mutta uraanin kokonaisresurssien arvioidaan olevan moninkertaiset verrattuna tunnettuihin varoihin (VTT 2004). Vuoden 2006 kulutuksella uraaniresurssien arvellaan riittävän vähintään sadaksi vuodeksi (OECD 2008). Lisääntyneen uraanipolttoaineen kysynnän ja uraanin korkeamman markkinahinnan ansiosta 2000-luvulla on investoitu aktiivisesti uraanin etsintään, jolloin tunnetut uraaniresurssit ovat kasvaneet.

Uraania hankittiin 1960-luvun puoleen väliin pelkästään ydinaseohjelmien tarpeisiin. 1960-luvun loppupuolella myös siviiliydinreaktoreiden rakentaminen käynnistyi, jolloin uraanin kysyntä ja hinta nousivat nopeasti. Myös ensimmäinen öljykriisi 1970-luvulla vauhditti kehitystä. 1970-luvun lopulla huolestuneisuus ydinvoiman käytön ja ydinjätehuollon turvallisuudesta lisääntyi, mikä yhdessä sähköntarpeen kasvun alentuneiden arvioiden kanssa vähensi uusien ydinvoimaloiden rakentamista, mikä laski uraanin hintaa jyrkästi. Uraanin tuotanto pysyi kuitenkin 1980-luvun puoliväliin asti huomattavasti kulutusta suurempana, mutta huonontunut markkinatilanne vähensi kiinnostusta uraanin etsintään ja aiheutti kaivosten sulkemisia markkinatalousmaissa. (VTT 2004, 188-119.)

Kuviossa 10 on esitetty graafisesti ydinsähkön kulutuksen kehitys maailmassa vuosina 1965-2009. IEA (2006) arvioi, että ydinenergian tuotanto kasvaa 15 prosenttia vuoteen 2030 mennessä, koska jo olemassa olevien yksiköiden elinaikaa pidennetään ja toisaalta hiilidioksidipäästöjen vähentäminen, fossiilisten polttoaineiden kohoavat hinnat ja energiavarmuuden ylläpitäminen lisäävät ydinvoimainvestointeja. Kansainvälinen atomienergia järjestö IAEA sitä vastoin arvioi, että ydinenergian määrä kasvaa 17-47 prosenttia vuoteen 2020 mennessä ja 27-100 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (IAEA 2008).

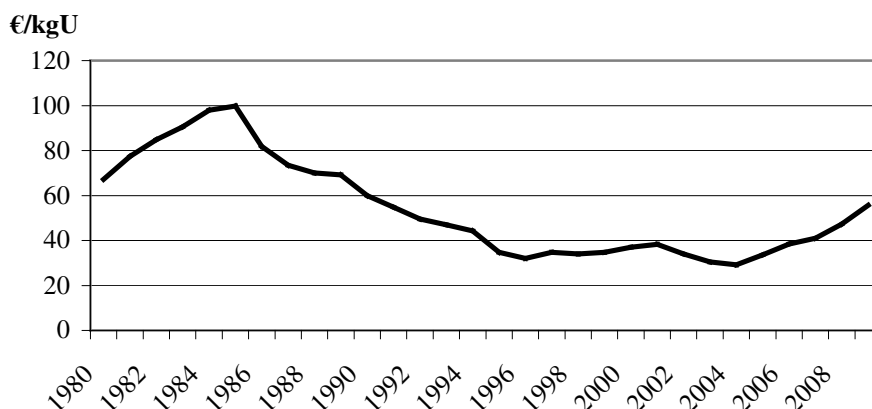


KUVIO 10 Ydinsähkön kulutus maailmassa 1965-2009, TWh (Datan lähde: BP 2010)

Kuviossa 11 on esitetty uraanin keskimääräinen hinta pitkäaikaisissa sopimuksissa. Uraanin hinta nousi 1980-luvun puoliväliin ja laski 1980-luvun lopulta lähtien, kun Neuvostoliitto alkoi myydä sitä edulliseen hintaan. Viime vuosina hinta on ollut nousussa. Nousu todennäköisesti jatkuu, jos uusia ydinvoimalainvestointeja tehdään paljon, sillä myös uraani on uusiutumaton luonnonvara. Koska polttoaineen osuus ydinvoiman kokonaiskustannuksista on alhainen, hinnan nousu ei toisaalta vaikuta kokonaiskustannuksiin läheskään yhtä paljon kuin fossiilisia polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa. Lisäksi uraanivarat ovat jakautuneet ympäri maapalloa, joten uraanin hinta ei ole altis kriiseille.

Ydinvoiman hyödyntämisessä on monia ongelmia, joita ei ole vielä ratkaistu. Ne liittyvät etenkin turvalliseen tuotantoon, kuljetukseen, jätteiden käsittelyyn ja uraaniresurssien rajallisuuteen (Heinberg 2009). Maailmanlaajuisesti ydinjätteille ei ole vielä olemassa säilytyspaikkaa, ja aiheeseen liittyy sekä teknologisia että yhteiskunnallisia kysymyksiä (VTT 2009). Lisäksi ydinvoiman nettoenergiasuhde - tuotetun energian määrä suhteessa sen tuottamiseen käytettyyn energiaan (katso luku 2.1.4) - on matala, minkä vuoksi Heinberg (2009) pitää sitä vääränä ratkaisuna päätettäessä tulevaisuuden energiantuotantotavoista.

Ydinvoiman eduksi mainitaan usein se, että se ei tuota hiilidioksidipäästöjä. Lenzenin (2008) mukaan ydinvoima ei kuitenkaan ole hiilidioksidipäästötön energiantuotantomuoto. Fossiilisten energialähteiden käytössä suurin osa päästöistä syntyy voimalaitoksessa polton aikana, kun taas ydinvoiman päästöt syntyvät uraanin louhinnan ja rikastamisen, voimalaitoksen rakentamisen sekä ydinjätteen jälkikäsittelyn aikana. Lenzenin mukaan ydinvoiman koko elinkaaren päästöt (keskimäärin 65 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh) jäävät fossiilisten energialähteiden polttamista matalammiksi (tyypillisesti 600–1200 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh), mutta ne ovat korkeammat kuin tuulivoiman ja



KUVIO 11 Luonnonuraanin keskimääräinen hinta vuosina 1980-2009 monivuotisissa sopimuksissa (€/kgU) (Datan lähde: ESA 2010)

vesivoiman päästöt (noin 15–25 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh). Ydinvoima tuottaa sitä enemmän hiilidioksidipäästöjä mitä vaikeampaa uraanin louhinta on, sillä siitä riippuu, paljonko fossiilisia polttoaineita tarvitaan, jotta uraani saadaan louhittua ja jalostettua.

### 2.1.3 Uusiutuva energia

Uusiutuvia energialähteitä ovat aurinko-, tuuli-, vesi- ja bioenergia, maalämpö sekä aalloista ja vuoroveden liikkeistä saatava energia. Biomassoilla tarkoitetaan yleisesti kaikkia eloperäistä alkuperää olevia uusiutuvia kasvimassoja, joista tuotettuja polttoaineita kutsutaan biopolttoaineiksi. Bioenergiaksi luetaan lisäksi myös maa- ja metsätalouden, yhdyskunnan ja teollisuuden orgaanista alkuperää olevat jätteet ja sivutuotteet. Turve voidaan määritellä hitaasti uusiutuvaksi biomassaksi, koska sen uudistuminen kestää 2000-3000 vuotta (VTT 2004.).

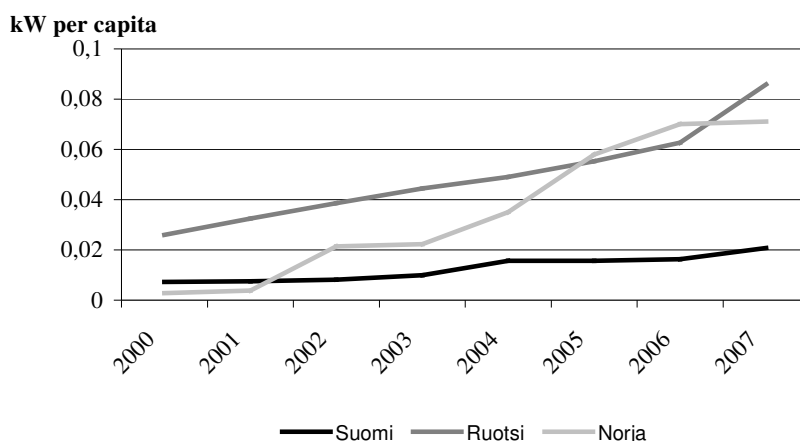
Biomassat ovat neljänneksi suurin energianlähde maailmassa öljyn, hiilen ja maakaasun jälkeen, ja bioenergian osuus maailman primäärienergiankulutuksesta noin 10 prosenttia. Pääosa biomassojen käytöstä tapahtuu kehitysmaissa, joissa se vastaa noin 30 prosenttia energian kokonaiskulutuksesta, kun taas teollisuusmaissa biomassan osuus on keskimäärin vain 3 prosenttia. Vesivoimalla tuotetaan maailmassa noin 2700 TWh sähköä, ja suurimmat käyttäjämaat ovat Kanada, Kiina, Brasilia, Yhdysvallat ja Venäjä. Suurimmat rakentamattomat vesivarat löytyvät Afrikasta, Etelä-Amerikasta, Kanadasta ja Venäjältä. Turvetta käytetään energiantuotantoon Suomen lisäksi pääasiassa Irlannissa, Ruotsissa ja entisestä Neuvostoliitosta muodostuneissa maissa. (VTT 2004.)

Fossiilisten energialähteiden resurssien vähentyminen, kasvihuonekaasupäästötavoitteiden saavuttaminen ja hallitusten kannustimet ovat tärkeimpiä syitä maailmanlaajuiseen uusiutuvan energian käytön kasvuun. IEA:n (2009) mukaan uusiutuvan energian kulutus kasvaa noin kolmen prosentin vuosivauhtia, mikä on enemmän kuin muiden energialähteiden kohdalla. Bioenergian kansainvälinen kauppa on laajentunut nopeasti viime vuosina. Metsä- ja maatalouden tähteitä, puuhaketta, pellettejä, brikettejä ja nestemäisiä biopolttoaineita, kuten bio-etanolia ja biodieseliä, käytetään yhä enemmän sähköntuotantoon, asuntojen lämmittämiseen ja liikenteen polttoaineiksi. Pelletit ovat jalostettua kiinteää biomassaa, joita voidaan tehdä puuraaka-aineesta tai turpeesta. Etenkin puupellettien ja bioetanolin kansainvälinen kauppa on kehittynyt nopeasti (Junginger ym. 2008). EU:n tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä lisätä liikenteen biopolttoaineiden käyttöä 5,75 prosenttiin, mikä todennäköisesti lisää biopolttoaineiden tuontia Eurooppaan etenkin Brasiliasta. Liikenteen biopolttoaineiden tuotantoon liittyy kuitenkin monia ongelmia, jotka tekevät niiden kulutuksen kyseenalaiseksi muun muassa päästöjen vähentämisen ja kestävä kehityksen kannalta (ks. esim. Ulgiati 2001; Santa Barbara 2007).

Tärkeimmät bioenergian kauppaa edistävät tekijät ovat resurssien suuret potentiaalit, suhteellisen alhaiset tuotantokustannukset tuottajamaissa kuten Kanadassa ja Brasiliassa, fossiilisten energialähteiden korkeat hinnat ja poliittiset kannustimet biomassojen käyttöön tuontimaissa. Kuljetusinfrastruktuuria sekä viejä- että tuojamaissa tulee kehittää, jotta suurempia määriä biomassaa pystyttäisiin toimittamaan ja vastaanottamaan. (Junginger ym. 2008.) Lisäksi biomassan luotettava tarjonta sekä luotettava bioenergian kysyntä on tärkeää, jotta bioenergiamarkkinat voivat kehittyä ja tasapainottua.

Euroopan tuulivoiman tuotanto on yli nelinkertaistunut vuodesta 2000 vuoteen 2007. Vuonna 2000 Euroopan tuulivoimakapasiteetti oli 12 812 MW ja vuonna 2007 jo 57 136 MW. Kuviossa 12 on kuvattu Suomen, Ruotsin ja Norjan tuulivoimakapasiteetin kehittymistä per capita. Suomessa tuulivoimalla tuotetaan tällä hetkellä vain 0,4 prosenttia sähköstä. Ruotsissa hyödynnettiin tuulivoimaa vuonna 2007 jo yli nelinkertaisesti asukasta kohden Suomeen verrattuna. Suomen hitaalle kehitykselle ovat olleet syynä ennen kaikkea kaavoitusasiat ja investointien pitkä takaisinmaksuaika nykyjärjestelmällä (Asplund ym. 2005). Heinberg (2009) pitää tuulivoimaa lupaavimpana uusiutuvan energian muotona, koska tuulivoiman nettoenergiataso (ks. luku 2.1.4) on korkeampi kuin muilla uusiutuvilla. Tuulivoiman suurin ongelma on vaihtelevuus – aina ei tuule. Toinen ongelma on tuulivoiman sijainti ja tarve siirtää energiaa edullisesti pitkiä matkoja sähkölinjoja pitkin.

Tuotantokustannukset riippuvat merkittävästi sijoituspaikan tuuliolosuhteista. Asplundin ym. (2005) mukaan tuulivoiman investointikustannusten on ennustettu alenevan 5-15 prosenttia seuraavan 5-15 vuoden aikana. Tuulivoimateknologian hinta on ollut pitkään laskeva, mutta viime vuosina hinnat ovat nousseet kasvaneen kysynnän seurauksena



KUVIO 12 Tuulivoima Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa per capita 2000–2007 (kW) (Datan lähde: Holttinen 2008)



(GreenStream Network 2007). Pöyryn raportissa (2007) arvioidaan, että tuulivoiman investointikustannukset alenevat merkittävästi vuoteen 2020 mennessä: rannikolla investointikustannukset olisivat vuonna 2020 enää 67 prosenttia vuoden 2006 tasosta ja merituulivoiman kohdalla 59 prosenttia. Turbiinien kysyntä on kuitenkin kasvanut nopeasti, mikä on luonut tilanteen, jossa kysyntä ylittää tarjontakapasiteetin, jolloin hinnat ovat nousseet. GreenStream Networkin (2007) raportissa on päädytty käyttämään Ernst & Youngin tekemää maltillisempaa arviota kustannuskehityksestä, jossa vuoden 2020 investointikustannukset ovat maatuulivoimalla 99 prosenttia ja merituulivoimalla 93 prosenttia vuoden 2006 hintatasoon verrattuna.

Uusiutuvan energian hinta ja kulutus voivat riippua fossiilisten polttoaineiden hinnoista. Kun fossiilisen energian hinta muuttuu, on sillä kuluttajan teorian mukaisesti kaksi vaikutusta. Substituutiovaikutus muuttaa hyödykkeen suhteellista hintaa, ja tulovaikutus muuttaa kuluttajan reaalityuloja. Hinnanmuutoksen kokonaisvaikutus riippuu näiden vaikutusten summasta. Kysyntäkäyrää siirtävät siis tulojen muutos, substituutin tai komplementin hinnan muutos ja preferenssien muutos. Tarjontakäyrää taas siirtävät tuotantotekijöiden hintojen muutokset ja tuottavuuden muutokset, jotka vaikuttavat tuotantokustannuksiin. Jos hyödykkeet ovat substituutteja toisilleen, ne voidaan korvata toisillaan. Jos ne sitä vastoin ovat komplementteja, ne täydentävät toisiaan. Jos oletetaan, että uusiutuva energia ja fossiilinen energia ovat substituutteja, fossiilisen energian hinnan nousu lisää uusiutuvan energian kysyntää, jolloin myös sen hinta nousee. Jos fossiilinen ja uusiutuva energia ovat komplementteja, fossiilisen energian kallistuminen pienentää uusiutuvan energian kysyntää ja sen hinta laskee. Hyödykkeen kysyntään vaikuttaa lisäksi hintajousto, jolla tarkoitetaan prosentuaalista muutosta hyödykkeen kulutuksen määrässä, kun hinta muuttuu yhden prosentin.

Fossiilisten energialähteiden hintojen voidaan olettaa kohoavan kasvavan kysynnän ja vähentyvien resurssien takia, mikä lisää ei-fossiilisen energian kysyntää. Monet uusiutuvat energialähteet ovat aineettomia, kuten tuuli ja aurinko, minkä vuoksi niiden hyödyntämisestä ei aiheudu polttoainekustannuksia. Biomassat, kuten puu ja energiakasvit, eivät kestävästi käytettynä muutu niukemmaksi, mutta kasvava kysyntä voi nostaa niiden hintoja, etenkin jos raaka-aineesta on pulaa. Koska energiantuotantokustannukset riippuvat polttoaineen lisäksi myös investointikustannuksista, voi kasvanut kysyntä nostaa investointien hintaa. Esimerkiksi tuulivoiman kustannukset voivat nousta, jos tuulivoimaloiden kysyntä ylittää tarjonnan liian pienen tuotannon takia. Aikaisempina vuosina tuuliturbiinien kysyntä ei ylittänyt tarjontakapasiteettia, ja turbiinien toimittajilla oli paine jatkuvaan kustannusten alentamiseen, jolloin turbiinien hinnoittelu oli kustannusperusteista. Turbiinien kysyntä on kuitenkin viime vuosina kasvanut nopeasti, mikä on luonut tilanteen, jossa kysyntä ylittää tarjontakapasiteetin (GreenStream Network 2007). Ostajat joutuvat näin ollen

kilpailemaan turbiineista, jolloin hinnan asetanta ei ole niin kustannuslähtöistä kuin aiemmin.

Kolmas syy uusituvan energian hinnan nousuun fossiilisen energialähteiden hinnan kohotessa johtuu siitä, että uusituvan energian tuotantoon käytetään fossiilista energiaa. Esimerkiksi tuuliturbiinin rakentamiseen tarvitaan fossiilisia polttoaineita, mikä nostaa investointikustannuksia, ja biopolttoaineiden viljelyssä käytetään lannoitteita ja työkoneita, joiden valmistus ja käyttö vaativat fossiilista energiaa, pääasiassa öljyä. Kun fossiilisen energialähteiden hinta nousee, se vaikuttaa siten välillisesti myös uusiutuvan energian tuotantokustannuksiin. Tämän vuoksi Tässä työssä kuvataan sähköntuotantoteknologioiden GER-kustannusta (gross energy requirement), jolla tarkoitetaan prosessin elinkaareen liittyvää suoraa ja epäsuoraa fossiilisen energian kulutusta.

#### 2.1.4 Nettoenergiatase ja muut energiantuotannon kriteerit

Suorien taloudellisten kustannusten lisäksi Richard Heinbergin (2009) raportissa "Searching for a miracle" tuodaan esille yhdeksän muuta ehtoa, jotka energialähteen arvottamisessa tulee ottaa huomioon. Ne ovat energialähteen hyödyntämisen riippuvuus muista resursseista, ympäristövaikutukset, uusiutuvuus, resurssin potentiaalinen koko, resurssin sijainti, luotettavuus, energiapitoisuus, kuljetettavuus ja ehkä tärkeimpänä energialähteen nettoenergiasuhte. Heidelberg (2009) tiivistää energialähteen hyödyntämismahdollisuudet kolmeen ehtoon, joiden tulee toteutua, jotta kyseisellä energialähteellä olisi potentiaalia korvata tulevaisuudessa fossiilisia polttoaineita. Kriteerit ovat kyky tuottaa suuria määriä energiaa, taloudellisuus ja mahdollisimman pienet ympäristövaikutukset etenkin maankäyttöön, veden kulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin liittyen. Energialähteen taloudelliset mahdollisuudet riippuvat resurssin suuruudesta ja resurssin itsensä energiapitoisuudesta, mutta myös siitä, millaisia muita resursseja ja infrastruktuuria tarvitaan, jotta kyseisen energialähteen energia voidaan muuttaa käyttökelpoiseen muotoon.

Ilmastonmuutoksen hillinnän ja vähenevien fossiilisten energialähteiden lisäksi tulevaisuuden energiajärjestelmä kohtaa kolmannen, vähemmän huomiota saaneen energian käyttöön ja tuotantoon liittyvän haasteen: sekä uusiutuvien että fossiilisten energialähteiden niin kutsuttu nettoenergiatase (energy returned on energy invested, EROEI) tulee olemaan matalampi kuin mitä se on fossiilisilla polttoaineilla tähän mennessä ollut (Heinberg 2009). Charles Hallin kehittämällä nettoenergia-käsitteellä kuvataan tietystä energialähteestä saadun käyttökelpoisen energian ja sen tuottamiseen tarvittun energian suhdetta. Toisin sanoen paljonko energiaa yhteiskunnan täytyy investoida, jotta saadaan tuotettua tietty määrä energiaa. Matalampi nettoenergiasuhte tarkoittaa, että tulevaisuudessa energialähteiden hyödyntämiseen tarvitaan suurempi energianpanos suhteessa saatuun energiaan kuin mitä teollistuneiden yhteiskuntien menestyksen

mahdollistaneiden fossiilisten polttoaineiden tuotantoon on viime vuosisadalla tarvittu.

Energiasysteemin vaatimuksena on, että se tuottaa enemmän energiaa kuin mitä sen rakentamiseen ja toimintaan tarvitsee investoida. Uusiutuvan energian nettoenergiatase on alhainen, eivätkä ne siksi pysty kilpailemaan fossiilisen energian kanssa (Heinberg 2009). Koska vaihtoehtoiset energialähteet eivät voi läheskään saavuttaa nettoenergiasuhdetta, joka fossiilisilla polttoaineilla on ollut, niistä saadaan irti vähemmän energiaa nettona verrattuna fossiilisiin energialähteisiin. Toisaalta myös perinteiset energialähteet tulevat tulevaisuudessa tarvitsemaan suuremman energianpanoksen kuin ne, jotka mahdollistivat teollistuneiden yhteiskuntien menestyksen viime vuosisadalla. Tämä johtuu siitä, että laadukkaat ja helposti ja edullisesti saatavilla olevat resurssit käytetään ennen huonolaatuisia kalliita resursseja, minkä seurauksena seuraavan tuotetun barrelin energiakustannus on edellistä korkeampi.

Gagnon, Hall ja Brinkler (2009) ovat arvioineet öljyn ja maakaasun nettoenergiataseen kehittymistä maailmanlaajuisesti. Tulosten mukaan vuoden 1992 suhde oli 26:1, mikä tarkoittaa sitä, että öljyn ja kaasun tuotannosta saatiin 26-kertaisesti energiaa verrattuna siihen, mitä louhintaan, jalostamiseen ja tuotantoon oli käytetty. Vuonna 1999 suhde nousi tasoon 35:1, mutta sen jälkeen se on laskenut tasaisesti vuoden 2006 tasoon 18:1.

Energialähteen energiapitoisuus on merkittävä tekijä, kun arvioidaan sen hyödyntämismahdollisuuksia, koska energia on paitsi teollisen tuotannon myös koko taloudellisen toiminnan liikkeelle paneva voima. Douglas Reynolds (1994) kutsuu energialähteen energiatiheyttä (energy density) vapaasti suomennettuna energiatasoksi (energy grade). Tällä tarkoitetaan energian määrää, joka on mahdollista saada tietystä määrästä energiaresurssia. Jos talouden käyttämien energialähteiden energiataso on alhainen, uusi teknologia ei pysty edistämään talouskasvua läheskään yhtä hyvin kuin jos energialähteen energiataso on korkea. Korkean energiataason resurssit voivat edesauttaa uuden teknologian vaikuttavuutta talouskasvuun. Tästä johtuen Reynolds pitää tärkeänä huomioida tarkemmin resurssien ominaisuuksia talouskasvuun vaikuttavina tekijöinä.

Heinbergin (2009) mukaan on epätodennäköistä, että fossiiliset tai vaihtoehtoiset energialähteet pystyvät luotettavasti tarjoamaan tarpeeksi energiaa talouskasvun ylläpitämiseen – tai edes säilyttämään nykyisen kokoisen taloudellisen toiminnan kuluvan vuosisadan aikana. Tällä hetkellä ei ole olemassa selvää skenaariota, jolla voisimme korvata perinteisen energiantuotannon tehokkaalla energialla vaihtoehtoisista lähteistä säilyttääksemme teollisen yhteiskuntamme nykyisenkaltaisena. Sitä vastoin energiansäästö tulee olemaan tärkein tapa vastata tulevaisuuden energiahaasteisiin, kun halvan fossiilisen energian aika on ohi. Lisäksi nykyinen poliittinen keskustelu keskittyy Heinbergin (2009) mukaan lähinnä uusiutuvien energialähteiden resurssien kasvattamiseen, mutta jättää niiden ekologiset, taloudelliset ja käytännön rajoitukset vähälle huomiolle. Kustannus-

hyötyanalyysi on jättänyt nettoenergian-käsitteen varjoonsa pohdittaessa esimerkiksi tulevaisuuden talouskasvua.

## **2.2 Energiantuotannon ympäristövaikutusten hallinta: kansainvälinen ilmastopolitiikka, EU:n päästökauppa ja Suomi**

Ilmakehän kasvihuonekaasut, yleisimpänä hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), ovat lisääntyneet viimeisen sadan vuoden aikana lähinnä ihmisen toimien, fossiilisten energialähteiden polttamisen ja metsähakkuiden, seurauksena, minkä vuoksi ilmastomuutoksen hillitseminen edellyttää fossiilisten energialähteiden poltosta vapautuvien kasvihuonekaasupäästöjen huomattavaa vähentämistä. Kun ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa, lämpöenergiaa pääsee säteilemään takaisin avaruuteen aiempaa vähemmän, mikä nostaa maapallon lämpötilaa. Kasvihuoneilmiö itsessään on elintärkeä maapallolle, mutta voimistuessaan se voi muuttaa maapallon ilmastoa arvaamattomasti, mistä voi aiheutua merkittävää haittaa ihmiselle ja ympäristölle.

Ilmastomuutos-ongelmaan on pyritty vastaamaan erilaisilla lakisäätteisillä ja taloudellisilla ohjauskeinoilla. Lakisäätteisiä ohjauskeinoja ovat kansainväliset ilmastosopimukset, joissa määritellään valtioille päästörajoituksia niiden kehitystasoon, tuotantorakenteen ja muiden päästöihin vaikuttavien ominaispiirteiden perusteella. Taloudellisten ohjauskeinojen tarkoituksena on taloudellisten kannustimien avulla saada hiilidioksidipäästöt laskuun. Tällä hetkellä EU:ssa on käynnissä päästökauppa, jonka tarkoituksena on vuosien 2008–2012 aikana saada EU:n päästöt kustannustehokkaasti vuoden 1990 tasolle.

Ensimmäinen ilmastomuutosta koskeva kansainvälinen sopimus, YK:n ilmastosopimus (UN Framework Convention on Climate Change), hyväksyttiin Rio de Janeiron ympäristö- ja kehityskonferenssissa 1992. Sopimus astui voimaan vuonna 1994, ja sen on ratifioinut 188 osapuolta. Ilmastosopimuksen tarkoituksena on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuudet sellaiselle tasolle, että niillä ei ole vaarallisia vaikutuksia ilmastojärjestelmään. Kaikkien maiden tulee selvittää kasvihuonekaasujen päästömäärät omassa maassaan, raportoida niistä ja laatia kansallisia ilmastomuutosta hillitseviä ja siihen sopeuttavia ohjelmia. Kehitysmaille asetetut vaatimukset ovat teollisuusmaita kevyemmät ja aikataulut väljemmät. Teollisuusmaiden tulee lisäksi antaa rahallista ja asiantuntija-apua kehitysmaiden raportoinnin sekä hillintä- ja sopeutumishojelmien laadintaan. Teollisuusmaiden ensitavoitteena on laskea kasvihuonekaasupäästöt vuoden 1990 tasolle vuoteen 2010 mennessä. Kehitysmaille ei vielä tuossa vaiheessa asetettu velvoitteita päästörajoituksiin.

Rion ilmastosopimuksen tavoitteista sovittiin Kioton protokollassa, joka on ensimmäinen konkreettinen toimi ilmastomuutokseen liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi. Kioton protokolla asetti sitovat päästövähennysvelvoitteet

vuosille 2008–2012. Teollisuusmaat velvoitettiin vähentämään kuuden tärkeimmän kasvihuonekaasun tasoa 5,2 prosentilla vuoden 1990 määrästä vuosiin 2008–2012 mennessä. Vuonna 1997 hyväksytty pöytäkirja tuli voimaan 16.2.2005 Venäjän ratifioitua sen vuonna 2004. Suomi ratifioi muiden Euroopan unionin jäsenmaiden mukana Kioton sopimuksen vuonna 2002. Sen sijaan USA jättäytyi sopimuksen ulkopuolelle, ja Australia ratifioi sen vasta joulukuussa 2007. Protokollan on hyväksynyt yhteensä 141 maata. Ratifioineiden teollisuusmaiden yhteenlasketut päästöt ovat 61,6 prosenttia kaikkien teollisuusmaiden päästöistä, ja kehitysmailla ei asetettu päästövähennysvelvoitteita.

Kioton protokollan osapuolet voivat täydentää kansallisia päästövähennyksiään niin kutsuttujen joustomekanismien avulla, joista tärkeimpiä ovat yhteistoteutus (JI), puhtaan kehityksen mekanismi (CDM) ja kansainvälinen päästökauppa (ET). Yhteistoteutuksessa teollisuusmaa rahoittaa kasvihuonekaasujen päästöjä vähentäviä tai hiilidioksidinieluja lisääviä hankkeita toisessa teollisuusmaassa, kuten Itä- ja Keski-Euroopan siirtymätalousmaissa. Puhtaan kehityksen mekanismeissa teollisuusmaa rahoittaa päästövähennyshankkeita tai nieluja lisääviä hankkeita kehitysmaassa. Hankkeiden tulee samalla edistää kestävästä kehityksestä kohtamassa esimerkiksi rakentamalla vesi- tai tuulivoimala, vaihtamalla polttoaine fossiilisesta uusiutuvaan energialähteeseen tai ottamalla metaania talteen kaatopaikoilta. Kansainvälisessä päästökaupassa Kioton pöytäkirjan osapuolet käyvät kauppaa päästöoikeuksista, jolloin sallitun päästömääränsä ylittävä teollisuusmaa voi ostaa toiselta, sallitun päästömääränsä alittavalta teollisuusmaalta päästöoikeuksia. (YM 2006.)

Kioton protokollan sopimuskausi umpeutuu vuonna 2012. Balilla Indonesiassa käytiin vuoden 2007 joulukuussa YK:n ilmastokokous, jossa tarkoituksena oli sopia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä koskevista jatkotoimista seuraavalla kaudella. Balin kokouksessa ei pystytty sopimaan määrällistä päästövähennystavoitetta, mutta jatkoneuvotteluiden pohjaksi sovittiin, että kehittyneiden maiden tulisi vähentää päästöjään 25–40 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi hallitusten välisen ilmastopaneelin IPCC:n (2007) mukaan maapallon päästöt on vuoteen 2050 mennessä saatava alle puoleen vuoden 2000 tasosta. Ilmastokokouksessa sovittiin, että neuvottelut uusista kansainvälisistä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisvelvoitteista aloitetaan, ja asiasta sovitaan vuoden 2009 aikana, jotta sopimus voisi astua voimaan heti Kioton sopimuskauden päättyttyä vuoden 2012 jälkeen (YM 2007). Kööpenhaminassa järjestettiin joulukuussa 2009 ilmastokokous, jossa oli tarkoituksena sopia uusi kansainvälinen ilmastosopimus Kioton sopimuksen päättymisestä eteenpäin. Kööpenhaminassa ei kuitenkaan saatu aikaan poliittisia päätöksiä pitkän aikavälin yhteistyöstä ja keinoista, jolla maailman kasvihuonekaasupäästöt saataisiin kuriin.

Euroopan unionin sisäinen päästökauppa alkoi vuoden 2005 alussa. Sen tarkoituksena on auttaa Kioton pöytäkirjassa asetettujen kasvihuonekaasujen

päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Euroopan unionin yhteinen päästövähennysvelvoite vuoden 1990 tasosta on kahdeksan prosenttia, joka on jaettu maakohtaisesti EU:n sisäisen taakanjakosopimuksen mukaan. Osa maista joutuu vähentämään päästöjä, kun taas osa saa kasvattaa niitä. Suomen pitää rajoittaa päästönsä vuoden 1990 tasolle. Päästökaupassa kukin jäsenmaa jakaa päästökaupan piiriin kuuluville toiminnanharjoittajille päästöoikeuksia, joilla voidaan käydä kauppaa yhteisön alueella. EU:n alueella päästökaupan piiriin kuuluu yli 12 000 laitosta. Ensimmäisellä kaudella 2005–2007 päästöoikeudet jaettiin ilmaiseksi, ja toisella kaudella 2008–2012 ilmaiseksi jaettavien päästölupien määrä on vähintään 90 prosenttia. Loput päästöoikeudet voidaan huutokaupata. Päästökauppa koskee 20 megawattia suurempien polttolaitosten sekä metalli-, mineraali- ja metsäteollisuuden hiilidioksidipäästöjä. (YM 2007; TEM 2007.)

Kiotoon pöytäkirjan ja EU:n taakanjaon mukainen kasvihuonekaasujen päästötavoite on Suomelle 70,5 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekvivalenttia vuodessa kaudelle 2008–2012, mikä merkitsee noin 11 miljoonan tonnin päästöjen vähennystarvetta vuodessa. Valtio aikoo hankkia päästövähennyksiä Kiotoon joustomekanismeilla keskimäärin kaksi miljoonaa tonnia vuodessa, ja loppu vähennysvelvoitteesta jää päästökauppasektorin ja sen ulkopuolisten sektoreiden vastuulle. Hallitus arvioi, että päästökauppasektorin ulkopuolella päästään noin yhden miljoonan tonnin päästövähennyksen vuodessa. Ilman strategiaa Suomen kasvihuonekaasupäästöt ylittäisivät Kiotoon pöytäkirjan velvoitteet 15 prosentilla. (Lähiajan energia- ja ilmastopolitiikan linjauksia 2005.) Suomen päästöoikeuksien kokonaismäärä kaudella 2008–2012 on 37,6 miljoonaa tonnia vuodessa.

Päästökauppa perustuu siihen, että päästöoikeuksien määrä asetetaan arvioituja päästöjä pienemmäksi. Näin niukkuus luo päästöoikeuksille hinnan, joka kannustaa päästöjen vähentämiseen. Päästöoikeuksia voi vapaasti ostaa ja myydä EU:n päästöoikeusmarkkinoilla, joita varten on perustettu päästöoikeuspörssejä. Yritys, joka on saanut päästöoikeuksia vähemmän kuin se tarvitsee, voi ostaa oikeuksia yrityksiltä, joilla on ylimääräisiä oikeuksia. Päästökaupan alaisilla laitoksilla on vuosittain velvollisuus luovuttaa viranomaisille päästöjään vastaava määrä päästöoikeuksia. Päästöoikeutensa ylittänyt toiminnanharjoittaja joutuu maksamaan sakkoa, jonka määräksi on asetettu sata euroa hiilidioksiditonnilta toisella kaudella. EU:n päästökaupan myötä päästöille muodostuu hinta, ja niistä tulee yritykselle yksi kustannustekijöistä. Jatkossa yritysten kannattaa vähentää päästöjään niin kauan kuin päästöjen vähentämisen rajakustannus on pienempi kuin päästöoikeuden hinta. Päästökauppa lisää fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käytön kustannuksia, ja suosii päästötöntä tuotantoa. Tähän päästökaupan ohjaava vaikutus perustuukin: fossiilisten polttoaineiden suhteellisen kustannuksen nousu kannustaa vähentämään niiden käyttöä ja korvaamaan niitä uusiutuvilla luonnonvaroilla. Päästöoikeuksien hinta muodostuu eurooppalaisilla markkinoilla, joihin vaikuttavat monet tekijät. (Luonnonvarat

ja ympäristö 2005; Energiamarckkinavirasto, Elinkeinoelämän keskusliitto ja Ympäristöministeriö 2006.)

Ilmastopolitiikan kustannukset johtuvat päästöjen vähentämisestä, eivät päästökaupasta. Olennaista on, että valtioiden on päätettävä, kuinka kansallinen päästötavoite toteutetaan. Päästökauppa on yksi ohjauskeino, ja se voi ainakin periaatteessa auttaa valtioita saavuttamaan päästötavoitteensa kustannustehokkaammin kuin pelkin kansallisin toimin. Päästökauppa itsessään ei aseta valtioille uusia vähennysvelvoitteita. Honkatukian ym. (2002) mukaan päästökaupan kustannusvaikutukset riippuvat kaupan kattavuudesta, päästökiintiöiden alkujasta ja päästölupien hinnasta. Tiukka päästörajoitetavoite voi johtaa päästökauppatoimialoilla kilpailukyvyyn heikkenemiseen ja vientitulojen pienenemiseen. Etenkin EU:n energiaintensiivinen teollisuus voi menettää kilpailukykyään maailmanmarkkinoilla, sillä ympäristöinvestointien, päästöoikeuksien ja kohonneen sähkön hintaa ei voi sisällyttää maailmanmarkkinahintaan.

Koska suurin osa Suomen teollisuudesta, kuten metsä- ja metalliteollisuus, on energiaintensiivistä, päästökaupan piirissä on suurempi osa taloudesta kuin missään muussa EU-maassa. Päästökaupan vaikutukset esimerkiksi kilpailukykyyn voivat siten olla suurempia kuin muissa EU-maissa. Suomi tulee olemaan päästöoikeuksien ostaja, sillä päästöjen vähentäminen on Suomessa kallista. Päästökiintiöiden ostaminen muodostaa lisäkustannuksen, mutta se jää kansallisia vähennystoimia pienemmäksi, jos päästöoikeuden hinta ei ole kovin korkea (Honkatukia ym. 2002). Suomi pystyy tällöin hyötymään muiden maiden alhaisemmista päästöjä vähentämiskustannuksista. Kalliilla päästöoikeuksilla päästökauppa saattaa jopa nostaa ilmastopolitiikan kustannuksia.

Päästöoikeuksien hinnat vaihtelivat päästökauppakaudella 2005–2007 melko paljon. Vuoden 2005 alussa hinta oli vajaassa kymmenessä eurossa, mutta se nousi vuoden puolivälissä lähelle 30 euroa, jonka jälkeen hinta pysytteli 20 ja 25 euron välissä vuoden loppuun saakka. Vuonna 2006 hinta kohosi jälleen 30 euroon, mutta tipahti ennen vuoden puoliväliä reiluun kymmeneen euroon. Hinta nousi vielä reiluun 15 euroon, mutta lähti sitten laskuun saavuttaen viiden euron tason vuoden 2007 alussa. Vuoden 2007 loppuun mennessä hinta laski lähdes nolnaan, mistä voidaan päätellä että päästöoikeuksia oli markkinoilla liikaa suhteessa päästöihin. Päästöoikeuden olematon hinta heikensi oleellisesti hakkeen, kierrätyspolttoaineiden ja peltobiomassojen kilpailukykyä päästökaupan piirissä olevissa laitoksissa (Rintala ym. 2007). Vuodesta 2008 alkoi uusi päästökauppakausi, joka kestää vuoden 2012 loppuun saakka. Vuoden 2008 aikana hinta vaihteli noin 20 ja 25 euron välillä, ja vuoden 2009 elokuussa hinta oli noin 15 euroa. Forward-hintojen on arvioitu nousevan 23 eurosta 27 euroon vuosien 2009 ja 2012 aikana (TEM 2008).

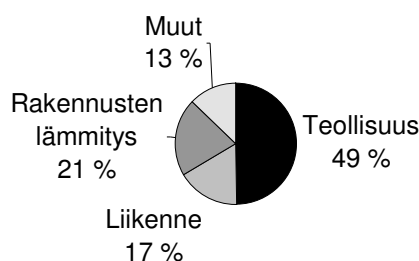
EU:n uusi ilmasto- ja energiastrategia hyväksyttiin maaliskuussa 2007. Siinä EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään 20 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Jos muut teollisuusmaat

sitoutuvat samaan ja kehitysmaat käynnistävät toimenpideohjelmansa, on EU luvannut nostaa päästövähennystavoitteensa 30 prosenttiin. EU aikoo saavuttaa 20 prosentin vähimmäistavoitteensa, paitsi päästökaupalla ja muilla jo toimivilla järjestelmillä, nostamalla energiatehokkuutta 20 prosentilla ja biopolttoaineiden käyttöä kymmenellä prosentilla. Uusiutuvien energialähteiden osuus energiantuotannossa nostetaan 20 prosenttiin. Tavoite on varsin haastava, sillä nykyinen uusiutuvan energian osuus on EU:ssa 8,5 prosenttia. Myös hiilen talteenottoa ja varastointiteknologian käyttöä uusissa voimalaitoksissa suunnitellaan. Suomen kansalliseksi tavoitteeksi on asetettu uusiutuvien energialähteiden osuuden nostaminen nykyisestä 28,5 prosentista 38 prosenttiin.

## 2.3 Suomen energiajärjestelmän kehitys ja kansalliset tavoitteet

### 2.3.1 Energiantuotanto ja -kulutus

Suomen energiajärjestelmälle on luonteenomaista primäärienergiälähteiden monipuolisuus, yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) käyttö ja vahva riippuvuus Venäjän tuontienergiasta. Myös sähkön osuus kaikesta käytetystä energiasta on korkea. Suomen energiankulutus asukasta kohden on maailman suurimpia, mutta toisaalta koko maailman energiankulutuksesta Suomen osuus on vain noin 0,3 prosenttia. Suurin energian kuluttaja on teollisuus lähes 50 prosentilla, joka on korkeampi osuus kuin muissa OECD-maissa. Pelkästään sellu- ja paperiteollisuus käyttää yli puolet teollisuuden tarvitsemasta energiasta. Sellu- ja paperiteollisuus tuottaa kuitenkin tuotantonsa sivutuotteista, eli pääasiassa mustalipeästä ja puunkuoresta, suuren osan tarvitsemastaan sähköstä ja lämmöstä. Viidesosa Suomen käyttämästä energiasta menee rakennusten lämmittämiseen ja lähes yhtä paljon liikenteeseen (kuvio 13). Suurimmissa kaupungeissa CHP-kaukolämpö kattaa 70–90 prosenttia kotitalouksien lämmityksestä. (VTT 2003.)

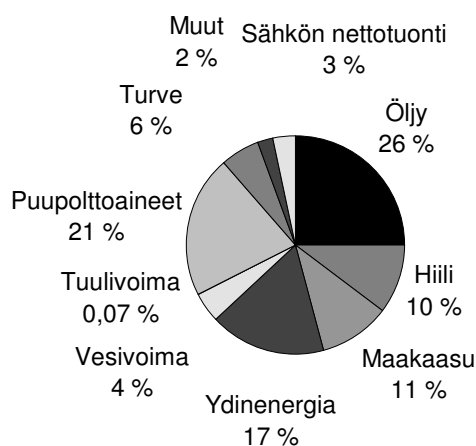


KUVIO 13 Energian loppukäyttö sektoreittain 2008 (%) (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)



Vuonna 2008 primäärienergian kulutus oli Suomessa 1400 petajoulea (PJ) eli 389 terawattituntia. Huolimatta siitä, että kulutamme paljon energiaa, energian käytön tehokkuus on kaikilla sektoreilla maailman huippuluokkaa (Rintala ym. 2007). Suomen energiankulutuksesta fossiilisen energian osuus oli vuonna 2008 46 prosenttia ja uusiutuvien energialähteiden osuus 27 prosenttia. Ydinvoima oli kolmanneksi suurin energianlähde 17 prosentin osuudella. Ydinvoiman määrä tulee kasvamaan, kun Suomen viides ydinvoimala, Olkiluoto 3, valmistuu vuonna 2012.

Öljy on tärkein primäärienergian lähde Suomessa. Vuonna 2008 sen osuus kokonaisenergiankulutuksesta oli 26 prosenttia (kuvio 14). Suurin osa öljystä käytetään tieliikenteessä, mutta osa hyödynnetään edelleen energiantuotannossa ja teollisuudessa. Sekä kivihien että maakaasun kulutus oli vuonna 2008 noin kymmenen prosenttia ja turpeen osuus kuusi prosenttia. Tällä hetkellä maakaasuverkko kattaa vain Kaakkois- ja Etelä-Suomen, ja siksi maakaasun lisäkäyttö sähköntuotantoon on rajoitettua. Venäjän tuonnin kapasiteetti voidaan kuitenkin melko helposti tuplata vuoden 2003 tasosta<sup>5</sup>. (VTT 2003.) Kivihiihtä ja maakaasua käytetään lähinnä teollisuudessa ja voimalaitoksissa lämmön ja sähkön tuotantoon, ja turpeen käyttö on 30 vuodessa noussut lähes nolosta 6-7 prosenttiin. Turvetta voidaan verrata fossiilisiin polttoaineisiin, koska energiantuotantoon sopivien turvevarojen muodostuminen on kestänyt tuhansia vuosia. Kasvihuonekaasupäästöjä laskettaessa turve luokitellaan uusiutumattomaksi energialähteeksi, minkä vuoksi sitä käsitellään kuten fossiilisia polttoaineita, eli EU:n sisäisessä päästäkaupassa turpeen poltosta aiheutuville hiilidioksidipäästöille tulee ostaa päästöoikeuksia.



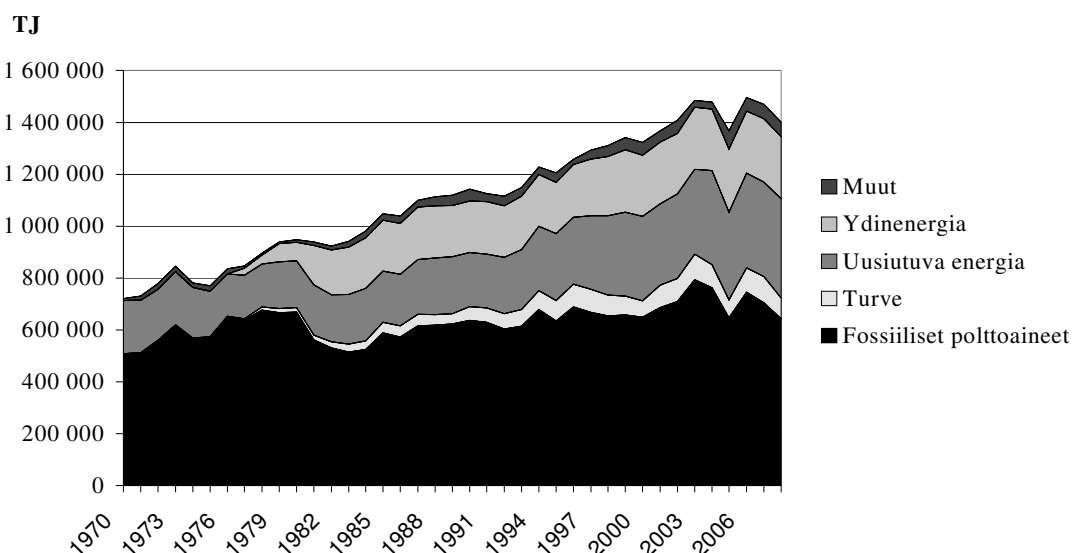
KUVIO 14 Energialähteiden kulutuksen prosenttiosuudet Suomessa vuonna 2008, % (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)

<sup>5</sup> Kaakkois- ja Etelä-Suomessa maakaasun osuus sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten käyttämistä polttoaineista on noin 30 %. Suomen maakaasumarkkinoiden kehittäminen edellyttää maakaasuverkon laajentamista, jota suunnitellaan Länsi-Suomeen. Maakaasua käytettäisiin alueella pääosin korvaamaan hiiltä kaukolämmön ja energian tuotannossa.

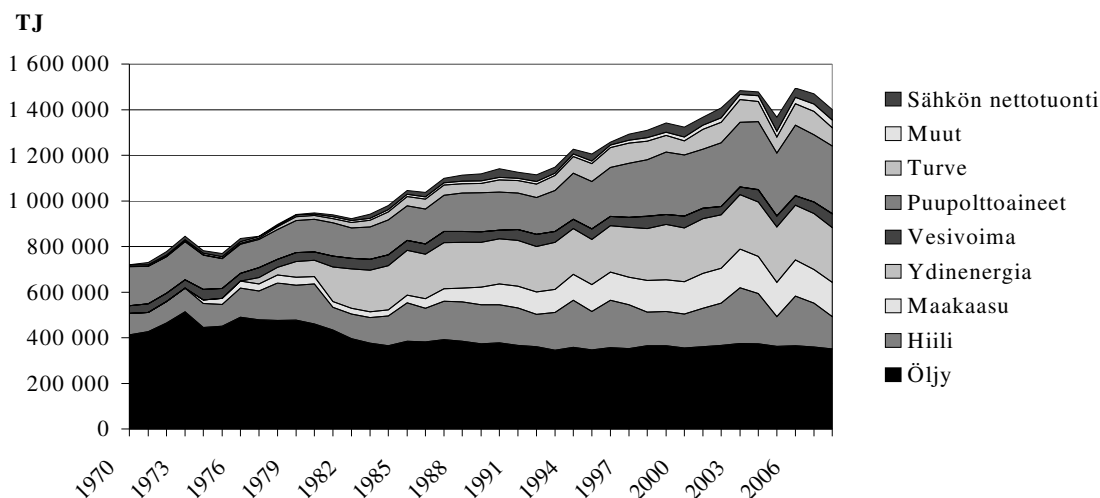
Suurin osa Suomen uusiutuvasta energiasta tuotetaan puupolttoaineilla, joiden osuus koko energiankulutuksesta on 21 prosenttia. Vesivoiman osuus on neljä prosenttia ja tuulivoiman osuus vain 0,07 prosenttia. Yli kaksi kolmasosaa puupolttoaineista kulutetaan sellu- ja paperitehtaissa, joissa enemmän kuin puolet puuraaka-aineesta päätyy käytettäväksi paikanpäällä energiantuotantoon joko jätepuun, lähinnä puunkuoren ja sahanpurun, tai mustalipeän muodossa (VTT 2003). Vuosina 1990-2004 puupolttoaineiden käyttö kaksinkertaistui metsäteollisuuden tuotannon kasvun myötä. Koska teollisuuden osuus Suomen energiankulutuksesta on suuri, muutokset teollisuuden rakenteessa ja tuotannossa vaikuttavat merkittävästi energian kysyntään ja sellu- ja paperiteollisuuden kautta myös uusiutuvan energian määrään.

Kuviossa 15 on kuvattu fossiilisen ja uusiutuvan energian kulutuksen kehitystä 1970-luvulta alkaen. Fossiilisten energialähteiden osuus Suomen energiankulutuksesta on ollut huomattava 1960-luvun alusta alkaen, eikä niiden absoluuttinen määrä ole vuosien 1970–2008 aikana juuri muuttunut. Lisääntyvä energiantarve on katettu pääosin ydinvoimalla. Uusiutuvan energian määrä on kasvanut hieman, mutta fossiilisia polttoaineita ei ole tähän mennessä korvattu uusiutuvalla energialla. Kuviossa 16 on esitetty eri energialähteiden kulutuksen kehitys tarkemmin.

Menneisyydessä Suomen energiaomavaraisuuden aste oli suuri, koska energiantuotantomme perustui vesivoimaan ja puun hyödyntämiseen. Öljyn käyttö lisääntyi Suomessa nopeasti 1960-luvulla, koska henkilöautojen määrä kasvoi ja halpaa öljyä käytettiin lämmitykseen ja sähköntuotantoon



KUVIO 15 Fossiilinen ja uusiutuva energia Suomessa 1970–2008, TJ (Lähde: Tilastokeskus 2009)

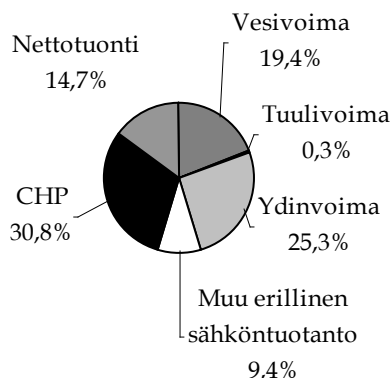


KUVIO 16 Suomen energiankulutus 1970-2008, TJ (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)

voimalaitoksissa. Omavaraisuuden aste oli alimmillaan 1970-luvun puolivälillä, jolloin öljyä ja hiiltä käytettiin paljon. Lähi-idän öljykriisi 1973 pysäytti öljynkulutuksen kasvun ja pakotti miettimään muita vaihtoehtoisia tapoja tuottaa energiaa. Maakaasun käyttö alkoi vuonna 1974, kun maakaasuputki Neuvostoliitosta avattiin, ja myös turvetta ryhdyttiin hyödyntämään 1970-luvulla. 1980-luvun alussa ydinvoima alkoi korvata kivihiilen käyttöä sähköntuotannossa, mikä paransi jälleen energiaomavaraisuuttamme. (Tilastokeskus 2007, VTT 2003.) Vuonna 2008 tuonti Venäjältä kattoi Tilastokeskuksen (2010) mukaan 78 prosenttia koko energian tuonnista.

### 2.3.2 Sähköntuotanto ja -kulutus

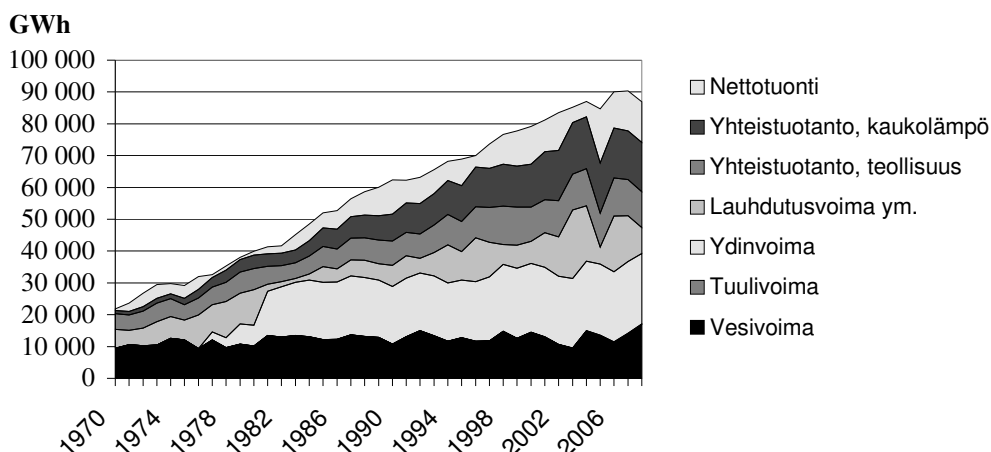
Suomen sähköntuotanto perustuu vesivoiman, ydinvoiman, lauhdutusvoiman sekä teollisuuden ja yhdyskuntien sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Lähes 15 prosenttia sähköstä tuotiin ulkomailta, lähinnä Venäjältä. Kuviossa 17 on esitetty Suomen sähköntuotannon ja -kulutuksen rakenne vuonna 2008. Lähes kolmasosa sähkönkulutuksesta tuotettiin yhdistetyissä sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksissa (CHP), jotka on joko liitetty yhdyskuntien kaukolämpöverkkoon tai ne tarjoavat prosessilämpöä ja höyryä teollisuuden tarpeisiin. Ydinvoima oli toiseksi suurin sähkönlähde 25 prosentilla, ja vesivoiman osuus oli viidennes. Tuulivoiman osuus oli vain noin 0,3 prosenttia. Kuvio 18 kuvaa Suomen sähköntuotannon ja kokonaiskulutuksen kehitystä vuodesta 1970 vuoteen 2008. Suomen sähkönkulutus on vajaassa 40 vuodessa yli nelinkertaistunut. Vuonna 2007 se oli 90 TWh, mutta seuraavana vuonna kulutus laski 87 terawattituntiin, sillä talouskriisi vähensi teollisuuden tuotantoa ja sitä kautta sähkönkulutusta.



KUVIO 17 Sähköntuotannon- ja kulutuksen rakenne tuotantotavoittain vuonna 2008, % (Datan lähde: Tilastokeskus 2010)

Energiateollisuus ry ja Elinkeinoelämän keskusliitto (2007) arvioivat, että Suomen sähkönkysyntä kasvaa vuoteen 2020 mennessä noin 107 terawattituntiin ja vuoteen 2030 mennessä 115 terawattituntiin. Vuoteen 2006 verrattuna kasvua olisi vuoteen 2020 mennessä 17 TWh ja vuoteen 2030 mennessä 25 TWh. Keskimäärin kasvu olisi vuosien 2006 ja 2020 välillä 1,2 prosenttia vuodessa ja vuosien 2020 ja 2030 välillä 0,7 prosenttia. Viimeisten kymmenen vuoden aikana sähkönkulutus on kasvanut keskimäärin 2,6 prosenttia vuodessa. Energiateollisuus ja Elinkeinoelämän keskusliitto arvioivat, että sähkön kysyntä kasvaa nopeimmin metalliteollisuudessa ja palvelusektorilla. Merkittävimmät epävarmuustekijät liittyvät teollisuuden kasvuun, johon vaikuttavat maailmanmarkkinoiden kehittyminen ja teollisen toimintaympäristön kehitys Suomessa. Valtioneuvoston Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian (2008) arvio sähkön kysynnästä on hieman maltillisempi, 103 TWh vuonna 2020 ja 108 vuonna 2030. EU- ja kansalliset tavoitteet täyttävän skenaarion mukaiset arvot olisivat 98 TWh vuonna 2020 ja 95 TWh vuonna 2030, josta eteenpäin sähkönkysyntä edelleen jatkaisi laskuaan. Tällä hetkellä teollisuuden osuus sähkönkulutuksesta on hieman yli 50 prosenttia, josta metsäteollisuus käyttää yli puolet.

Sähköntuotannossa käytetyt energialähteet koostuvat veden, tuulen ja ydinpolttoaineen lisäksi fossiilisista energialähteistä, turpeesta ja puupolttoaineista. Fossiilisista energialähteistä tärkeimmät ovat hiili ja maakaasu. Hiiltä käytettiin vuonna 2008 yhteensä 54,1 PJ (sähköä 8,0 TWh), josta lähes 38 PJ poltettiin lauhdevoimalaitoksissa ja loput sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Maakaasua hyödynnettiin 47,7 PJ (sähköä 10,9 TWh), josta suurin osa kulutettiin CHP-laitoksissa. Turvetta käytettiin sekä lauhde- että CHP-voimaloissa, yhteensä 31,8 PJ (sähköä 4,9 TWh). Puupolttoaineista ja muista uusiutuvista, kuten biokaasusta, 16,0 PJ käytettiin sähkön erillistuotantoon ja 37,4 PJ yhteistuotantoon.



KUVIO 18 Sähköntuotanto ja kokonaiskulutus Suomessa 1970–2008, GWh (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)

### 2.3.3 Talouskasvu ja energiankulutus

Suomen talous on vuosikymmenet perustunut energiantensiiviseen teollisuuteen, kuten metsäteollisuuteen, kemianteollisuuteen, metallien jalostukseen ja kone- ja metallituoteteollisuuteen, ja siksi bruttokansantuotteen ja primäärienergian kulutuksen kasvuasteet ovat olleet varsin samanlaisia. Sähkönkulutus on monien vuosikymmenten aikana kasvanut jopa BKT:tä nopeammin. 1990-luvun laman seurauksena kyseinen trendi kuitenkin muuttui. Laman jälkeen bruttokansantuote kasvoi Suomessa nopeasti, keskimäärin 4,8 prosenttia vuodessa vuosien 1993–2000 aikana, kun taas sähkön kysyntä kasvoi vain keskimäärin 2,8 prosenttia vuodessa. (VTT 2003.)

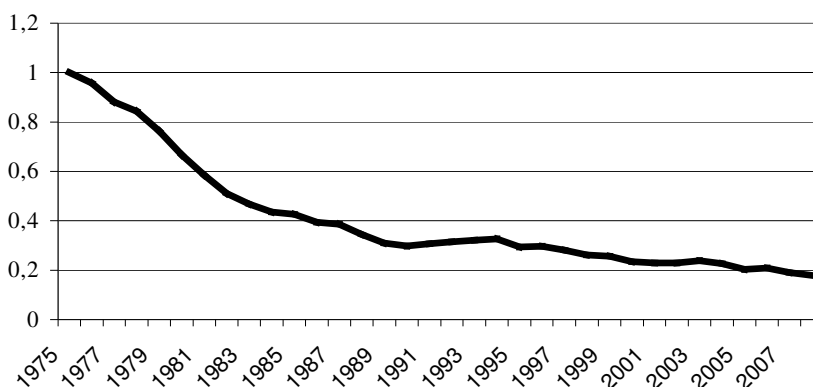
1970-luvulta tähän päivään Suomen energiankokonaiskulutus on kaksinkertaistunut. Toisin kuin monissa muissa EU-maissa Suomessa energiankulutuksen ennustetaan kasvavan edelleen, vaikka useimpien energian käyttökohteiden ominaiskulutus sekä teollisuudessa että yksityistalouksissa on laskenut ja energian tuotannon hyötysuhteet ovat kasvaneet (Rintala ym. 2007). Suurin osa energiankulutuksen kasvusta johtuu sähkön kysynnän lisääntymisestä. Väkilukuun verrattuna Suomen energiankulutus on kasvanut vuosien 1975 ja 2008 välillä keskimäärin 1,7 prosenttia vuodessa. Jos taas Suomen energiankulutusta verrataan bruttokansantuotteeseen, nähdään että suhde on jatkuvassa laskussa (kuvio 19). BKT on siis kasvanut nopeammin kuin energiankulutus, mikä tarkoittaa sitä, että Suomen energiantensiivisyys on laskenut ja tuottavuus kasvanut. Tarkasteluaikana lasku on ollut jyrkintä vuosien 1975 ja 1985 välillä. Kehitystä on voinut tapahtua energiatehokkuudessa, jolloin samalla energiamäärällä saadaan tuotettua enemmän, tai paljon energiaa kuluttavan teollisuuden osuus BKT:n muodostumisessa on pienentynyt. Tämä voi liittyä siihen, että Suomi on

siirtymässä kauteen, jossa talouskasvu tuotetaan yhä enemmän informaatio- ja viestintäteknologian ja palveluiden kautta.

Suomen energian kysyntään vaikuttavat energiatehokkuuden ja talouskasvun asteen lisäksi toimialarakenne. Teollisuuden osuus Suomen sähkönkulutuksesta on yli 50 prosenttia, mikä on korkea osuus verrattuna muihin Euroopan maihin. Sellu- ja paperiteollisuus kuten myös metalliteollisuus ovat eniten energiaa kuluttavia teollisuuden haaroja. Kuukauden kestänyt sellu- ja paperiteollisuuden lakko vuonna 2005 näkyy selkeästi pudotuksena sähkönkysynnän käyrässä. Suomen kuten myös muun Euroopan sellu- ja paperiteollisuus on viime vuosina tehnyt vähennyksiä tuotantoon ja työvoimaan. Ylikapasiteetti, korkeat puun ja sähkön hinnat, alhaiset sellun ja paperin hinnat ja raaka-ainepula Venäjän korkeiden vientimaksujen takia ovat rasittaneet teollisuutta, minkä seurauksena monia tehtaita on suljettu. Tästä johtuen Suomen sähkönkulutus on pysynyt varsin tasaisena muutamien viime vuosien aikana.

On vaikea ennustaa, mikä energiaintensiivisen teollisuuden tulevaisuus on Euroopassa. Euroopan energiapolitiikka, mukaan lukien päästökauppa ja sitä kautta nousevat sähkön hinnat, kuten myös muut kasvavat tuotantokustannukset uhkaavat EU:n raskasta teollisuutta. EU:n tavoitteena ei kuitenkaan ole antaa teollisuuden siirtyä maihin, jossa ei ole tiukkoja päästörajoituksia. Lisäksi tarjonnan varmistamiseksi osa tuotannosta pysyy EU:ssa. Esimerkiksi paperi on enemmän paikallinen kuin globaali hyödyke, koska paperi tuotetaan yleensä lähellä sen markkinoita, joten Euroopan paperin kysyntään tullaan vastaamaan eurooppalaisella paperintuotannolla. (VTT 2009, 272–274.)

Metsäteollisuuden tuotannon määrä vaikuttaa myös Suomen bioenergian prosenttiosuuteen. Metsäteollisuuden tuotannon nopea kasvu viimeisen 12 vuoden aikana lisäsi uusiutuvien energioiden käyttöä, mutta vuoden 2009 aikana metsäteollisuuden tuotanto on kuitenkin supistunut noin 20 prosenttia.



KUVIO 19 Tuotannon (BKT) energiaintensiivisyys 1975–2008 (1975=1) (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)

Jos metsäteollisuuden tuotanto vähenee samassa suhteessa kaikissa tuotteissa, bioenergian käyttö vähenee, mutta prosenttiosuus loppukulutuksesta kasvaa, sillä metsäteollisuus ei ole energiaomavarainen. Jos kemiallisen massan tuotanto ja sahaus vähenevät, bioenergian prosenttiosuus pienenee. Tilanne on sama, jos tuontisellulla korvataan Suomen tuotantoa. (Helynen 2008.)

Teollisuustuotannon osuus Suomen bruttokansantuotteesta oli 1970-luvulla lähes 30 prosenttia, ja 2000-luvun alussa se on vaihdellut reilun 25 prosentin ja 28 prosentin välillä, mikä on suurempi kuin muissa OECD-maissa. (Tilastokeskus 2008.) Teollisuuden osuus BKT:stä on siis pysynyt lähellä 30 prosenttia, mutta sen sisäinen rakenne on muuttunut viimeisen 30 vuoden aikana merkittävästi. 1970-luvun lopulla puu- ja paperiteollisuuden osuus tehdasteollisuuden jalostusarvosta oli lähes 30 ja metalliteollisuuden osuus runsaat 30 prosenttia. Viimeisten 30 vuoden aikana puu- ja paperiteollisuuden osuus on puolittunut, runsaaseen 15 prosenttiin tehdasteollisuuden jalostusarvosta, kun taas metalliteollisuuden osuus on lähes kaksinkertaistunut noin 54 prosenttiin. Sähkötekniisten tuotteiden osuus oli vielä 30 vuotta sitten vajaat 6 prosenttia, mutta vuonna 2006 se oli jo 24 prosenttia. VTT:n (2003) arvioiden mukaan informaatioteknologia on tulevaisuudessa Suomen lupaavin toimiala<sup>6</sup>. Energiaintensiivisessä teollisuudessa sellu- ja paperiteollisuudelle ja kemian teollisuudelle odotetaan vain vaatimatonta kasvua kun taas metalliteollisuudelle suhteellisen korkeaa kasvua. Kehitys johtaisi Suomen energiaintensiivisyyden laskuun.

Suomen bruttokansantuote on viimeisen runsaan 30 vuoden aikana kasvanut keskimäärin kolme prosenttia vuodessa. Väliin mahtuu myös kolme vuotta, jolloin BKT on pienentynyt. Tilastokeskuksen (2008) mukaan Suomessa koettiin vuonna 1979 teollisuustuotannon vetämänä lähihistorian suurin bruttokansantuotteen kasvu, seitsemän prosenttia. Myös vuosina 2006 ja 2007 BKT kasvoi poikkeuksellisen paljon, lähes viisi prosenttia molempina vuosina. Vuonna 2008 kasvua oli enää 1,0 prosenttia. Tilastokeskuksen julkaiseman Teollisuuden toimialakatsauksen (2009) mukaan tuotanto supistui alkuvuonna 2009 kaikilla päätoimialoilla. Metsäteollisuudessa laskua on ollut jo pitkään, mutta viime vuoden lopulla myös muut teollisuuden päätoimialat kääntyivät laskuun. Vuoden ensimmäisellä neljänneksellä metsäteollisuuden tuotanto laski runsaat 30 prosenttia ja metalliteollisuus sekä sähkö- ja elektroniikkateollisuus 26 prosenttia. (Tilastokeskus 2008.)

### 2.3.4 Suomen kasvihuonekaasupäästöt

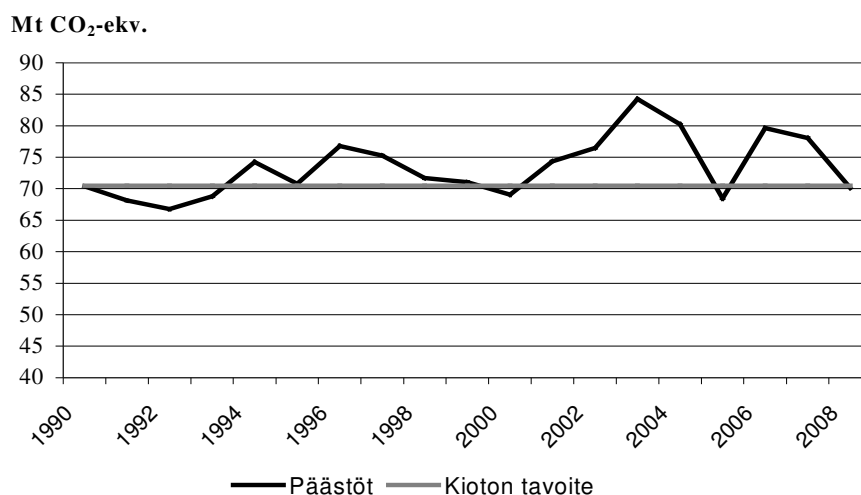
Suomen kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat vuosittain. Tähän vaikuttavat talouden suhdanteet ja etenkin vesivoiman saatavuus, sillä runsassateisina vuosina pohjoismainen tuontisähkö korvaa Suomen omaa

---

<sup>6</sup> Converging Technologies for Improving Human Performance (2002) -raportin mukaan tulevaisuuden kasvun ajatellaan tulevan NBIC:stä (Nano-, Bio- ja Information technology sekä Cognitive science).

lähinnä hiililauhdevoimaloiden sähköntuotantoa. (Savolainen ym. 2003.) Suomen kasvihuonekaasupäästöistä noin 80 prosenttia aiheutuu energiantuotannosta, minkä vuoksi energia- ja ilmastoasiat liittyvät tiiviisti toisiinsa. Sekä teollisuuden että maatalouden osuus päästöistä on hieman alle kymmenen prosenttia. Kuviossa 20 on esitetty Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys ja Kioton tavoitetaso. Suomen energiasektorin kasvihuonekaasupäästöt lisääntyivät nopeasti 1960-luvulla talouskasvun ja lisääntyneen öljyn kulutuksen takia, mutta kasvu kuitenkin hiipui ensimmäisen öljykriisin seurauksena. 1980-luvulla ydinvoiman käyttöönotto alensi kasvihuonekaasupäästöjä selvästi, koska ydinvoiman hyödyntäminen vähensi kivihiilen polttamista. 1990-luvulla päästöt kasvoivat maakaasun ja turpeen käytön lisäämisen takia. Merkittävin yksittäinen päästöjen lähde on öljy. Sähköntuotannosta syntyvät päästöt ovat melko pienet, noin neljännes kokonaispäästöistä, mikä johtuu siitä, että Suomen sähköntuotanto on paitsi tehokasta (CHP), se myös perustuu suurelta osin vesi- ja ydinvoimaan. (VTT 2003.)

Suomen vuoden 2007 kasvihuonekaasupäästöt ylittivät Kioton asettaman tason noin kymmenellä prosentilla, mutta vuoden 2008 päästöt olivat yli kymmenen prosenttia edellistä vuotta pienemmät, ja noin 1,2 prosenttia Kioton tason alapuolella. Energiateollisuuden päästöt vähenivät peräti 21 prosenttia vuoden 2007 tasosta. (Tilastokeskus 2009.) Energian kysynnän laskuun on syynä maailmanlaajuinen taantuma, jonka seurauksena etenkin teollisuuden sähkönkulutus on pienentynyt. Kioton protokollan tavoitteiden lisäksi Euroopan unioni on päättänyt vähentää kasvihuonekaasupäästöjään vähintään 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä.



KUVIO 20 Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2008 ja Kioton tavoitetaso (Datan lähde: Tilastokeskus 2009)



Energiasektorin päästöjä voidaan kuvata myös hiilidioksidintensiivisyydellä, joka ilmaistaan hiilidioksiditonneina käytettyjä terajouleja primäärienergiaa kohden. Suomen CO<sub>2</sub>-intensiivisyys on selvästi alempi kuin EU:ssa ja OECD-maissa keskimäärin. 1990-luvun puolen välin jälkeen turvetta on korvattu puulla, mikä on laskenut Suomen primäärienergian kulutuksen CO<sub>2</sub>-intensiivisyyttä. (VTT 2003.) Kaivo-oja ja Haukiojan (2002) mukaan BKT per capita ja hiilidioksidipäästöt fossiilisista polttoaineista ja turpeesta ovat selvästi korreloineet keskenään Suomessa vuosien 1960 ja 2000 aikana, vaikka hiilidioksidipäästöjen ajalliset vaihtelut ovat olleet suuria. Näin ollen hiilidioksidipäästöjen osalta ympäristötaloudellinen Kuznets-käyrähypoteesi (ks. luku 3.2.3) ei ole ainakaan vuoteen 2000 mennessä täysin toteutunut Suomessa. Myöskään Kunnaksen (2001) tutkimuksessa hypoteesi ei hiilidioksidipäästöjen kohdalla saa tukea. Muutokset toimialarakenteessa tulevat kuitenkin vähentämään taloutemme energiaintensiivisyyttä, mikä vähentää päästöjä ilmastopoliitikasta riippumatta.

### 2.3.5 Kansalliset energia- ja ilmastopoliittiset tavoitteet

Suomen Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa (2008) esitetään uusia ilmasto- ja energiapoliittisia toimenpiteitä yksityiskohtaisesti vuoteen 2020 ja suuntaa-antavasti vuoteen 2050 asti. Strategiassa esitellään kaksi skenaariota, joista toinen on nykytoimien ja -kehityksen mukainen perusura ja toinen EU- ja kansalliset tavoitteet täyttävä tavoiteura. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa arvioidaan, että Suomen primäärienergian kulutus kasvaisi ilman uusia energiapoliittisia toimenpiteitä vuoden 2005 380 TWh:sta noin 480 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä. Samana ajanjaksona energian loppukulutus kasvaisi noin 300 TWh:sta noin 350 TWh:iin. Uusiutuvien energialähteiden loppukulutus oli 86 TWh vuonna 2005. Niiden käyttö loppukulutuksessa kasvaisi 106 TWh:iin. Perusurassa uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta nousisi vuoden 2005 28,5 prosentista vain noin 31 prosenttiin vuonna 2020, kun komission Suomelle esittämä velvoite on 38 prosenttia. Sähkön kulutus kasvaa perusurassa noin prosentin vuodessa vuoteen 2020, jolloin se olisi 103 TWh. Vuoden 2007 kulutus oli hieman yli 90 TWh.

Pitkän aikavälin ilmastostrategian mukaan ilman uusia ilmastopoliittisia toimenpiteitä Suomen kasvihuonekaasupäästöt nousisivat 90 miljoonaan ekvivalenttiseen hiilidioksiditonniin vuonna 2020, mikä olisi noin 20 prosenttia vuoden 1990 tasoa korkeammalla. Päästöjen kasvu aiheutuisi lähes yksinomaan päästökauppa-sektorin eli lähinnä energiantuotannon ja teollisuusprosessien päästöjen kasvusta. Vuoteen 2050 mennessä energian kokonaiskulutus ja sähköenergian kulutus kasvaisivat edelleen, jolloin ne olisivat noin neljänneksen nykyistä korkeammat, ja kasvihuonekaasupäästöt kasvaisivat 30 prosenttia.

Tavoiteurassa energian loppukulutus pyritään pysäyttämään ja kääntämään laskuun niin, että se olisi vuonna 2020 310 TWh, ja sähkönkulutus

olisi 98 TWh, kun se nyt on noin 90 TWh. Toimenpiteiden ansiosta energiankulutus tulisi olemaan noin kymmenen prosenttia pienempi kuin miltä kehitys muutoin näyttäisi. Myös sähkönkulutus tulisi ilman toimenpiteitä olemaan huomattavasti suurempi. Strategian mukaan Suomen energiajärjestelmä tulisi siis tulevaisuudessa nojaamaan enenevässä määrin sähkön hyödyntämiseen. Energiansäästö tavoitteiden saavuttaminen edellyttää strategian mukaan energiankäytön tehostamista etenkin asumisessa, rakentamisessa ja liikenteessä. Lisäksi strategian mukaan liikenteen, talokohtaisen lämmityksen ja maatalouden päästöjä pitää kansallisin toimin vähentää vuoteen 2020 mennessä noin 16 prosenttia vuoden 2005 tasosta.

Euroopan unioni velvoittaa Suomen nostamaan uusiutuvan energian osuuden 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Ilmasto- ja energiastrategian mukaan tavoitteen saavuttaminen on mahdollista vain, jos energian loppukulutuksen kasvu saadaan taittumaan. Uusiutuvan energian osuutta yritetään kasvattaa tehostamalla tuki- ja ohjausjärjestelmiä ja muuttamalla niiden rakenteita. Puuperäisen energian, jätepolttoaineiden, lämpöpumppujen, biokaasun ja tuulivoiman käyttöä halutaan lisätä. Strategiassa kaavaillaan esimerkiksi metsähakkeen käytön 2-3-kertaistamista ja tuulivoiman hyödyntämistä kuuden terawattitunnin verran, mikä tarkoittaisi vähintään 700 kappaletta kolmen megawatin tuulivoimalaa. Uusiutuvan energian edistämiseksi otetaan käyttöön syöttötariffijärjestelmä, koska sitä pidetään markkinaehtoisena ja kustannustehokkaana keinona.

Ilmasto- ja energiastrategiassa pidetään tärkeänä turvata sähkön riittävyys ja kohtuullinen hinta, mutta samaan aikaan edistää muita ilmasto- ja energiapoliittisia tavoitteita. Oman tuotantokapasiteetin tulee kattaa kulutushuiput ja mahdolliset häiriöt tuonnissa. Kun uutta tuotantokapasiteettia rakennetaan, päästöttömät ja vähäpäästöiset laitokset, kuten uusiutuvaa polttoainetta käyttävät yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon laitokset, asetetaan etusijalle. Ydinvoiman lisärakentamisesta on tehty hyväksyvä periaatepäätös. Ydinvoimalla voitaisiin korvata lauhdutusvoimakapasiteettia ja parantaa sähkön tuotannon omavaraisuutta.

## 3 YMPÄRISTÖN JA LUONNONVAROJEN ARVOTTAMINEN TALOUSTIETEESSÄ

### 3.1 Talous ja kestävä kehitys

Taloukasvun jatkamiseksi on tuotannossa tähän asti käytetty yhä enemmän energiaa ja materiaaleja. Tuotannon kasvun seurauksena taloudellinen hyvinvointi on parantunut, mutta samalla hyvinvoinnin tuottamisen kustannukset ovat kasvaneet. Millenium Ecosystem Assessment (2005) -raportin mukaan maailman luonnonpääoman jatkuva ehtyminen ja huonontuminen on luonnut huolta ja epäilystä, pystyykö talousjärjestelmä korvaamaan nämä menetykset ihmisen luomalla pääomalla ja mitkä ovat olosuhteet kestäväälle kehitykselle ja sukupolvilta toisille säilyvän hyvinvoinnille.

Ympäristökysymykset ja -ongelmat nostettiin ensimmäistä kertaa yleiseen tietoisuuteen Rooman klubin raportissa Kasvun rajat (Meadows ym. 1972), jossa todetaan, että rajaton kasvu rajallisessa maailmassa on mahdotonta. Raportissa arvioidaan maapallon kantokykyä ja luonnonvarojen riittävyyttä, ja kiinnitetään huomiota etenkin nopeaan väestön- ja talouden kasvuun, hyvinvoinnin epäoikeudenmukaiseen jakautumiseen ja saastumiseen. Raportin mukaan teollistuneet yhteiskunnat haaskaavat raaka-aineita ja energiaa, koska monet luonnonvarat ovat poliittisista syistä johtuen alihinnoiteltuja. Rooman klubin mukaan maiden tulisikin tavoitella taloukasvua ennen kaikkea parantamalla tuotantomenetelmiä, ei lisäämällä luonnonvarojen ja energian kulutusta.

YK asetti 1983 Ympäristön ja kehityksen maailmankomitean kehittämään ratkaisumalleja maailmanlaajuisiin ympäristöongelmiin. Tämä niin kutsuttu Bruntlandin komitea esitti raportissaan Yhteinen tulevaisuutemme (Bruntland 1987) ympäristöongelmien ratkaisuksi kestävä kehityksen politiikkaa. Kestävä kehitys määritellään kehitykseksi, joka tyydyttää nykyhetken tarpeet ja säilyttää tulevien sukupolvien mahdollisuudet omien tarpeidensa tyydyttämiseen. Raportissa todetaan, että luonnon suojeleminen on ensisijaisen tärkeää myös talouden toimintakyvyn kannalta. Rio de Janeirossa 1992 järjestetty YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssissa (United Nations Conference on

Environmental and Development, UNCED) kestävä kehitys määriteltiin taloudellisen ja yhteiskunnallisen kehityksen sovittamiseksi luonnonvarojen rajaamiin puitteisiin siten, että luonto ja mahdollisuudet inhimilliseen kehitykseen säilyvät myös tuleville sukupolville. Konferenssiin osallistui 178 valtiota, ja kansainvälinen sopimus velvoittaa kaikkia osapuolia huolehtimaan kestävä kehityksen edellytysten säilymisestä maapallolla.

Kestävä kehitys voidaan jakaa kolmeen ulottuvuuteen: yhteiskunnalliseen, ekologiseen ja taloudelliseen kestävyys, jotka kaikki tulisi huomioida samanaikaisesti. Yhteiskunnallinen kestävyys keskittyy yksilöiden tarpeiden tyydyttämiseen ja hyvinvointiin, ja ekologinen kestävyys turvaa luonnon biologisten prosessien ja ekosysteemien tuottavuuden ja toiminnan. Taloudellinen kestävyys korostaa talouden toimintaedellytysten turvaamista maapallon kantokyvyn rajoissa, mikä tarkoittaa sitä, että luonnon pääomaa on jätettävä myös tuleville sukupolville. Talousjärjestelmä on usein ristiriidassa kestävä kehityksen kanssa, sillä taloudessa tulosta mitataan lyhyellä aikavälillä, kun taas kestävä kehityksen tarkasteleminen vaatii vuosikymmeniä. Aineiden ja energian kestävä kiertäminen voidaan asettaa kolme ehtoa (Daly 1977): Uusiutuvien luonnonvarojen käyttö ei saa ylittää sitä vauhtia, jolla niitä luonnossa syntyy. Toiseksi uusiutumattomien luonnonvarojen käyttö ei saa ylittää sitä vauhtia, jolla korvaavia uusiutuvia luonnonvaroja kehitetään. Kolmanneksi saasteiden ja päästöjen määrä ei saa ylittää ympäristön kykyä ottaa niitä vastaan.

Kestävä kehitys voidaan jakaa myös heikkoon ja vahvaan kestävyys: Heikko kestävyys perustuu taloudellisen pääoman ja luonnon pääoman täydelliseen vaihtokelpoisuuteen ja korvattavuuteen keskenään, jolloin kestävyys riittää, että kokonaispääoman arvo ei laske. Luonnon pääomaa voidaan siis korvata taloudellisella pääomalla, eli teknologialla voidaan kompensoida luonnonvarojen hupenemista. Vahvan kestävyys määritelmän mukaan ihmisen ja luonnon pääomaa ei ole mahdollista korvata täysin ja rajattomasti. Luonnon kokonaispääoma ei tällöin saa vähentyä ja tiettyjä kriittisiä varantoja tulee suojella, koska ne eivät ole korvattavissa muilla varannoilla. Tämä vuoksi nykyisen sukupolvi veloitetaan säilyttämään ne resurssit, jotka turvaavat tulevien sukupolvien samantasoiset elinolot kuin omamme. (van den Bergh 2000.)

## **3.2 Uusklassisen ympäristötaloustieteen näkökulma**

### **3.2.1 Luonnonvarojen niukkuus ja hinnat mittarina**

Resurssien niukkuuden ja tarpeiden runsauden välinen ristiriita on taustalla monissa taloudellisissa ilmiöissä. Useimpia hyödykkeitä haluttaisiin kuluttaa ilmaiseksi enemmän kuin niitä on tarjolla, jolloin kysynnän ja tarjonnan tasapaino saavutetaan hintojen sopeutumisen kautta. Teollistumisen alussa luonto ja luonnonvarat näyttivät ilmaishyödykkeiltä, joita voitiin

hyödyntää rajattomasti. Maapallon väkiluku oli noin miljardi ja alkeellinen tuotantoteknologia rasitti luontoa huomattavasti vähemmän kuin nykyään. (Gardner & Prugh 2008, 25–26.)

Thomas Malthus oli ensimmäinen taloustieteilijä, joka ilmaisi huolensa luonnon rajallisista resursseista, talouskasvusta ja väestönkasvusta. Malthusin (1798) mukaan ihmiskunta tulisi törmäämään suoraan luonnon rajoihin, koska monilla ympäristö- ja julkishyödykkeillä, kuten puhtaalla vedellä ja ilmalla, ei ole markkinahintaa, ja hintajärjestelmä toimisi siksi vasta, kun luonnonvara olisi kokonaan lopussa. David Ricardon (1817) määrittelemän suhteellisen niukkuuden mukaan hintamekanismi kuitenkin estää hyödykkeen kuluttamisen loppuun asti. Suhteellinen niukkuus tarkoittaa, että hyödyke on niukka suhteessa muihin hyödykkeisiin. Suhteellinen niukkuus perustuu implisiittiseen oletukseen korvattavuudesta sekä tuotannon että preferenssien puolella. Jos hyödyke on absoluuttisesti niukka, sillä ei ole substituutteja, eli se ei ole korvattavissa. John Stuart Mill hyväksyi sekä Malthusin että Ricardon kannat: sekä suhteellinen että absoluuttinen niukkuus ovat olemassa, mutta suhteellinen niukkuus edeltää absoluuttista niukkuutta. Millin mukaan hinnan muutokset kertovat niukkuudesta, ja tekninen kehitys vähentää resurssien taloudellista niukkuutta. Hintamekanismi ei kuitenkaan toimi, jos hyödykkeellä ei ole markkinahintaa.

Hotelling (1931) pohti, paljonko uusiutumattomia eli niukkoja luonnonvaroja tulisi milläkin ajan hetkellä hyödyntää, ja lähestyi ongelmaa tarkastelemalla kilpailullista kaivosteollisuutta. Hotellingin mallin mukaan uusiutumattomien luonnonvarojen niukkuushinnat ja sitä kautta markkinahinnat kasvavat loushinnan seurauksena, koska resurssien niukkuus kasvaa. Hinta toimii siis indikaattorina luonnonvarojen niukkuudelle. Hotellingin mallissa markkinat ovat täydelliset, mikä sisältää oletuksen täydellisestä kilpailusta ja informaatiosta sekä ulkoisvaikutusten ja julkishyödykkeiden puuttumisesta. Lisäksi uusiutumattoman luonnonvaran yksikkölouhintakustannus eli rajakustannus on vakio, luonnonvaraesiintymä on tasalaatuinen, eikä kierrätystä tapahdu. Oletetaan myös, että teollisuus toimii kahden periodin ajan ja sitten se suljetaan. Myöskään niin kutsuttuja backstop-teknikoita eli raaka-aineita korvaavia tekniikoita ei ole.

Hotellingin säännön mukaan luonnonvaran ei-diskontattu niukkuushinta,  $\mu_t = p_t - c$ , kasvaa diskonttokoron nopeudella, eli toisin sanoin niukkuushinnan suhteellinen muutos, eli kasvu, kunakin ajankohtana on reaalikoron suuruinen, eli yleisesti

$$\frac{(p_{t+1} - c) - (p_t - c)}{p_t - c} = r,$$

missä

$c$  = yksikkölouhintakustannus,  
 $p$  = luonnonvaran markkinahinta,

$r = \text{reaalikorko.}$

Niukkuushinta voidaan ajatella uusien esiintymien etsintäkustannuksena, tai vaihtoehtoisesti kustannuksena sille, että jos kaivoksen omistaja louhii yhden yksikön resurssia nyt, hän voi tulevaisuudessa louhia yhden yksikön vähemmän, jolloin nykyinen louhintaa aiheuttaa kustannuksen tulevaisuudessa menetettävän tulon muodossa. Vaihtoehtoisesti kustannus on silloin se tulo, joka saataisiin, jos resurssiyksikkö jätettäisiin louhittavaksi myöhemmin tulevaisuudessa.

Jos luonnonvarojen markkinoilla oletetaan täydelliset markkinat, varojen hinta nousee korkokannan mukaan. Jos hinta nousee nopeammin kuin korko, uusia yrityksiä tulee markkinoille, jolloin tarjonta lisääntyy ja hinta laskee pitkän ajan trendin tasolle. Jos taas hinta nousee hitaammin kuin korkotasoa, osa firmoista poistuu markkinoilta, jolloin tarjonta supistuu ja hinta nousee pitkän ajan trendin tasolle. Kun kaivoksen omistaja valitsee kullakin periodilla louhitun määrän kyseisen ehdon mukaan, omistaja maksimoi voittonsa yli kaikkien periodien. Tällöin ensimmäisen hyvinvointiteoreeman perusteella myös koko yhteiskunnan hyöty maksimoituu, koska teoreeman mukaan markkinatasapaino on yhteiskunnallisesti optimaalinen, jos kilpailulliset markkinat ovat täydelliset. Todellisuudessa hyvinvointiteoreeman ehdot eivät kuitenkaan täyty, koska ulkoisvaikutuksia esiintyy, on epätäydellistä informaatiota, transaktiokustannuksia ja julkishyödykkeitä. Epätäydellisten markkinoiden tilanteessa kaivoksen louhintaohjelma ei ole enää pareto-tehokas.

Hotellingin mallin ehdot eivät useinkaan täyty reaali maailmassa. Ensinnäkin uusia esiintymiä löytyy, jolloin resurssin niukkuus pienenee, mikä asettaa paineita markkinahinnan laskemiselle. Toiseksi kun louhintateknologia kehittyy, kustannustermi  $c$  pienenee, mikä laskee niukkuushintaa. Kolmantena syynä ovat backstop-teknologiat, joita mallissa ei oleteta olevan. William Nordhausin (1973) esittelemän ajatuksen mukaan backstop-teknologiat ovat uusiutuviin tai konventionaalisiiin resursseihin perustuvia tekniikoita, kuten tuulivoima tai aurinkoenergia, joilla ei ole ehtymisongelmaa, ja jotka voivat toimia ehtyvän luonnonvaran, kuten öljyn substituutteina. Backstop-teknologia luo siten hintakaton uusiutumattoman luonnonvaran hinnan nousulle. Jos backstop-teknologian hinta on vakio, kaivoksen omistaja valitsee louhinnan siten, että resurssi on kulutettu loppuun, kun sen hinta on yhtä suuri kuin backstop-teknologian hinta. Niukkuushinta ei silloin enää kasva ajan myötä, vaan se laskee ja on nolla, kun siirrytään backstop-teknologian käyttämiseen.

Kun Hotellingin mallia on testattu empiirisesti, markkinahintojen pysyvää nousua ei ole voitu todistaa (ks. esim. Barnett & Morse 1963; Halvorsen & Smith 1991; Krautkraemer 1998). Cleveland (1991) näytti kuitenkin, että Barnettin ja Morsen (1963) analyysi oli vakavasti puutteellinen. Syy sille, että resurssien niukkenemisestä huolimatta hinnat eivät nousseet, oli samanaikainen energian hinnan alentuminen ja energian käytön lisääntyminen ehtyvien resurssien louhinnassa.

### 3.2.2 Ympäristöongelmat negatiivisina ulkoisvaikutuksina

Taloudellisen toiminnan seurauksena syntyy ulkoisvaikutuksia, jos toiminnan hyödyt tai haitat eivät rajoitu toimijoihin, vaan koskevat myös kolmansia osapuolia. Ulkoisvaikutukset voivat olla positiivisia tai negatiivisia, ja ne voivat liittyä tuotanto- tai kulutusmahdollisuuksiin tai hyvinvointiin. Talousteorian mukaan ulkoisvaikutukset johtuvat markkinamekanismin epätäydellisestä toiminnasta, ja ne eivät näy markkinahinnoissa. Yhteiskunnan kannalta ulkoisvaikutusten poistaminen on hyödyllistä, koska silloin resurssit allokoituvat tehokkaasti. Koska ympäristöhyödykkeillä ja ympäristöhaitoilla ei ole markkinahintaa, markkinamekanismi ei ota niitä huomioon. Haitallisten ulkoisvaikutusten, kuten saastumisen, ongelma voidaan uusklassisen talousteorian mukaan poistaa määrittelemällä ulkoisvaikutuksille keinotekoiset hinnat eli luomalla niille markkinat. Esimerkiksi ilmastonmuutos voidaan ajatella markkinoiden epätäydellisestä toiminnasta johtuvana ulkoishaitana, jossa tuotannossa syntyneet haitalliset kasvihuonekaasut ovat jääneet markkinamekanismin ulkopuolelle.

Ympäristön pilaamiselle voidaan antaa arvo verotuksella, ympäristölainsäädännöllä ja omistusoikeuksilla, jotka lisäävät saastuttajan kustannuksia. Saasteveron tai -rajoitusten seurauksena tuotanto vähenee tai muuttuu ympäristöä vähemmän kuormittavaksi. Arthur Pigou (1938) esitti saasteiden aiheuttamien ulkoisvaikutusten korjaamiseksi ympäristöveroa, jota on perinteisesti kutsuttu myös Pigou veroksi. Veron avulla ulkoishaitat voidaan sisäistää, jolloin yritysten on otettava saasteen määrä huomioon taloudellisissa päätöksissään. Esimerkiksi energiantuotannossa tuotantolaitoksen kustannukset  $c(e,x)$  riippuvat tuotetusta energian määrästä  $e$  ja päästöistä  $x$ . Energiantuotannon rajakustannukset ovat positiiviset,  $\partial c(e,x)/\partial e > 0$ , mutta päästöjen rajakustannukset ovat negatiiviset,  $\partial c(e,x)/\partial x < 0$ . Päästöjen rajoittaminen siis kasvattaa laitoksen tuotantokustannuksia. Energiantuotantolaitos maksimoi voittoaan valitsemalla optimaalisen tuotantomäärän energiaa  $e$  ja päästöjä  $x$ , jolloin  $\max \pi = p_e - c(e,x)$ . Optimaalisesti Pigou vero asetetaan tasolle, jossa maksu päästöyksikköä kohden on sama kuin päästöistä aiheutuva marginaalinen yhteiskunnallinen haitta.

Jos tarkastellaan, miten hintoihin sisäistetyt ulkoisvaikutukset vaikuttavat saastuttavan luonnonvaran kulutukseen, voidaan havaita kaksi eri tapaa. Ensinnäkin luonnonvaran louhimisen rajakustannukset kasvavat, mikä tarkoittaa korkeampia hintoja ja siten alempaa kysyntää. Resurssin kulutus pienenee ja sitä riittää pidemmäksi aikaa. Toisaalta korkeammat rajakustannukset edistävät substituuttien etsintää ja nopeuttavat backstop-tekniikan käyttöönottoa. Louhinnan kustannusfunktioista riippuu, kumpi vaikutus on voimakkaampi.

Ympäristötaloustieteessä pyritään siis optimaaliseen allokaatioon ja siten niukkojen resurssien tehokkaaseen hyödyntämiseen. Koska ympäristöongelmat nähdään negatiivisina ulkoisvaikutuksina, tavoitteena on löytää ulkoishaitalle optimaalinen taso, jolloin maksimoidaan yhteiskunnan hyvinvointi tai

saavutetaan pareto-tehokas tila. (van den Bergh 2000.) Jos optimaalinen saasteen määrä määritellään siten, että kuluttajien hyvinvointi riippuu positiivisesti tuotannosta ja negatiivisesti saasteen määrästä, on optimaalinen saasteen määrä positiivinen, mikäli tuotantoteknologia ei ole saasteetonta. Lähtökohtana on Kanniaisen (2007) mukaan antroposentrinen eli ihmiskeskeinen ajattelumalli, jossa luonnon arvoa ja merkitystä selitetään viittaamalla ihmisiin ja heidän arvostuksiinsa. Jos ajatellaan, että luonnolla on ihmisestä ja hänen preferensseistään riippumaton itseisarvo, sosiaaliseen hyötyfunktioon tulisi Kanniaisen (2007) mukaan liittää luonnon itseisarvoa kuvaava tappiofunktio, jonka seurauksena optimaalisen saastuttamisen aste olisi pienempi.

Ronald Coase (1960) kritisoi sitä, että julkisen vallan olisi puututtava saastuttavaan toimintaan. Coase esitti, että kun kaikki omistusoikeudet on määriteltä kattavasti ja täydellisesti, yhteiskunnan kaikki resurssit kohdentuvat pareto-tehokkaasti ilman julkisen vallan väliintuloa. Talouden tila on pareto-tehokas, jos ei ole olemassa toista sellaista tilaa, joka parantaisi jonkun yksilön hyvinvointia, mutta ei huonontaisi kenenkään muun hyvinvointia. Pareto-tehokkuus ei määritä yksittäistä tilaa, vaan tehokkaan joukon, josta valinta pitää tehdä muiden kriteerien perusteella. Ympäristön kannalta omistusoikeuksien kattava määrittely tarkoittaa, että haitalliset ulkoisvaikutukset tulevat sisäistetyiksi. Oletuksena on, että ihmiset toimivat rationaalisesti ja että transaktiokustannuksia esimerkiksi sopimusten aikaansaamista ei ole. On kuitenkin syytä huomata, että omistusoikeuden määrittely ei tarkoita luonnon yksityistämistä.

Coasen teoreema voidaan jakaa kahteen tapaukseen: oikeus puhtaaseen ympäristöön on kuluttajilla, jolloin saastuttaja voi ostaa oikeuden saastuttaa, tai saastuttamisen oikeus on saastuttajalla, jolloin kuluttajien täytyy maksaa saastuttajalle päästöjen puhdistuksesta. Oletetaan, että kuluttajat maksimoivat hyötyään ja yritykset voittoa. Jos kuluttajalla on oikeus puhtaaseen ympäristöön, saastuttava yritys joutuu joko maksamaan kuluttajille korvausta tuottamastaan saasteesta tai kasvattamaan puhdistuskustannuksiaan. Kuluttajat hyväksyvät yrityksen tarjoaman korvauksen niin kauan kuin korjaus ylittää saasteen rajahaitan. Rahavirtojen suunta on siis saastuttajalta kuluttajalle. Kumpikin osapuoli hyötyy kaupankäynnistä, joten kyseessä on pareto-parannus. Kummankaan asemaa ei toisaalta ole kaupankäynnin jälkeen enää mahdollista parantaa, joten ratkaisu on pareto-tehokas. Tilanteessa, jossa saastuttajalla on oikeus saastuttaa, rahavirtojen suunta on kuluttajilta saastuttajalle. Kuluttajien rajahaitat ovat alkutilanteessa suuret, joten he ovat valmiit maksamaan saastuttajalle korvausta päästöjen vähentämisestä. Yritys hyväksyy tarjouksen niin kauan kuin korvaus ylittää rajapuhdistuskustannukset. Tilanne on jälleen pareto-tehokas.

Coasen teoreeman mukaan ympäristön tilan kannalta ei siis ole väliä, kenelle omistusoikeus alun perin annetaan. Optimaalinen puhdistusarvo saavutetaan jaosta riippumatta. Yksi seuraus Coasen tuloksesta on, että saastuttaja maksaa -periaate ei läheskään aina päde. Coasen teoreema olettaa



transaktiokustannukset eli neuvotteluihin ja sopimuksen tekoon liittyvät kustannukset nollassa. Kun transaktiokustannukset ovat positiiviset, optimitasoa ei enää saavuteta. Saastehaitoista kärsiviä on yleensä monta, mikä kasvattaa transaktiokustannuksia. Epätäydellinen kilpailu ja informaatio voivat myös estää pareto-tehokkaan allokaation saavuttamisen. (Tuomala 2003.)

Maailmanlaajuisten ympäristöongelmien kohdalla omistusoikeuksia on kuitenkin mahdotonta määritellä. Garrett Hardinin (1968) esittelemän tragedy of the commons -käsitteen mukaan yhteiseen resurssiin perustuvan tuotantopanoksen käyttö ylittää sen kestävänsä kulutuksen. Hardin käyttää esimerkkinä karjankasvatusta yhteisellä laidunmaalla, jossa jokainen karjanomistaja pyrkii maksimoimaan oman hyötynsä kasvattamalla oman karjansa määrän mahdollisimman suureksi. Koska yksityisessä optimoinnissa ei oteta huomioon toisen osapuolen tappiota, yhteinen laidunmaa muuttuu käyttökelvottomaksi. Tragedy of the commons voidaan liittää myös ilmastonmuutosta aiheuttaviin päästöihin: kasvihuonekaasut ovat globaaleja saasteita, jotka aiheutuvat yksittäisten yritysten ja liikenteen päästöistä, mutta vaikuttavat kaikkiin maailman yksilöihin. Toisin sanoen ilmasto on julkishyödyke, jonka omistusoikeutta ei voida määritellä, jolloin yksittäiset yritykset ja maat voivat laskea päästöjään välittämättä toisten ja koko maailman päästöistä. Vartiainen (2008) kuvaa ilmastomuutosongelmaa vapaamatkustajaongelmaksi, joka syntyy, kun rationaalinen yksilö tavoittelee omaa etuaan, joka on ristiriidassa yhteisen edun kanssa. Vapaamatkustajaongelma aiheuttaa hyvinvointitappiota ja johtaa markkinoiden epätäydelliseen toimintaan. Ilmastonsuojeluun tarvitaan siis kansainvälinen sopimus. Esimerkiksi päästökauppaa harjoittamalla voidaan hiilidioksidipäästöille luoda hinta ja markkinat, jolloin negatiiviset ulkoisvaikutukset saadaan sisäistettyä osaksi taloudellista toimintaa.

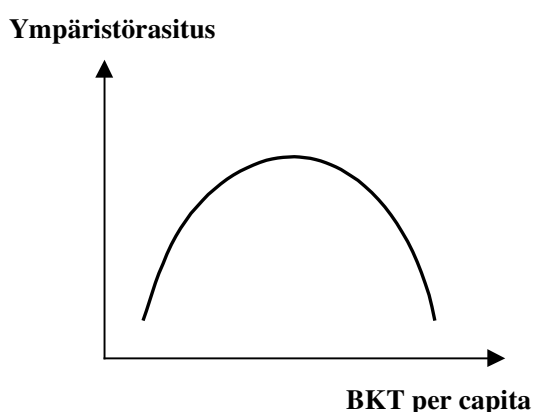
Päästökaupan kaltaista järjestelmää kehitettiin jo 1960-luvulla. Coase (1960) osoitti, että saastuminen johtuu huonosti määritellyistä varallisuusoikeuksista ympäristöön, ja tähän nojaten Crocker (1966) ja Dales (1968a ja 1968b) ehdottivat, että oikeus puhtaaseen ympäristöön kuuluu yhteiskunnalle, joka voi myöntää yrityksille oikeuksia ympäristön kuormittamiseen. Dalesin mielestä paras tapa olisi huutokaupata kuormittamiseen oikeuttavia kiintiöitä, joista saastuttajat voisivat tämän jälkeen käydä keskenään kauppaa. Tasapainossa kukin kuormittaja olisi, markkinahinnan ja puhdistuskustannukset huomioon ottaen, hankkinut itselleen haluamansa määrän kiintiöitä. Montgomery (1972) osoitti teoreettisesti, että kaupattavien päästökiintiöiden järjestelmät ovat kustannustehokkaita riippumatta tavasta, jolla kiintiöt on alun perin jaettu. Päästökauppaneukanismia kuvataan tarkemmin luvussa 2.2.

### 3.2.3 Talouskasvun vaikutus ympäristöongelmiin

Avoin kysymys on, tuottaako jatkuva talouskasvu yhä enemmän ongelmia ympäristölle vai parantaako lisääntynyt vauraus ja hyvinvointi myös

ympäristön tilaa. Kaivo-ojan ja Haukiojan (2002) mukaan yksi edellytys kestäväälle tietoyhteiskunnalle on niin sanottu delinking- eli erkanemisilmiö, jolla tarkoitetaan sitä, että talouskasvusta huolimatta tuotannon ja kulutuksen ympäristövaikutukset, kuten energiankulutus, päästöt ja saasteet, vähenevät. Ympäristötaloudellisen Kuznets-käyrän (kuvio 21) hypoteesin mukaan ympäristönkuormitus kasvaa taloudellisen kehityksen alkuvaiheessa. Se saavuttaa sitten huippunsa, ja alkaa laskea talouden yhä kasvaessa. Kehitys johtuu siitä, että aluksi talouskasvua luodaan hyödyntämällä luonnonvaroja voimakkaasti. Kun varallisuus nousee, myös ympäristön laatuun kiinnitetään enemmän huomiota. Ympäristöä säästävä teknologia kehittyy, ja talouden rakenne muuttuu korkean teknologian suuntaan. Tällöin myös tuotanto muuttuu vähemmän ympäristöä kuormittavaksi, jolloin ympäristöhaitat pienenevät.

Luzzati ja Orsini (2009) ovat tutkineet absoluuttisen energiankulutuksen ja BKT per capita suhdetta 113 maassa vuosien 1971-2004 aikana. Absoluuttinen energiankulutus on otettu tutkimuksessa indikaattoriksi kuvamaan ympäristöön kohdistuvaa rasiusta. Luzzatin ja Orsinin (2009) mukaan Kuznets-käyrän hypoteesi ei saa tukea, kun kaikkia maita tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena, vaan päinvastoin energiankulutuksen ja BKT:n suhde on positiivinen tarkasteluvälillä. Myöskään maittain tehdyt tarkastelut eivät juuri tue hypoteesia. Koska hiilidioksidipäästöt ja energiankulutus korreloivat keskenään, tulokset voidaan yleistää koskemaan hiilidioksidipäästöjä. Luzzatin ja Orsinin tutkimus eroaa aikaisemmista tutkimuksista siten, että energiankulutus on otettu absoluuttisena eikä väkilukuun suhteutettuna. Tällä on haluttu korostaa sitä, miten ympäristöön kohdistuva rasiutus on muuttunut jokaisen henkilön tulotasoon verrattuna. Tutkimuksessa on myös haluttu tuoda esille, että yhteiskunnat käyttävät yhä enemmän energiaa huolimatta siitä, että sen niukkuus lisääntyy.



KUVIO 21 Ympäristötaloudellinen Kuznets-käyrä

Kunnas (2001) on tutkinut Kuznets-käyrä -hypoteesin paikkansapitävyyttä Suomen energiantuotannosta aiheutuvien hiilidioksidi-, rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjen suhteen. Rikkidioksidipäästöjen kohdalla tutkimus tukee hypoteesia, mutta hiilidioksidipäästöjen osalta sen sijaan ei löydy tukea. Myöskään typenoksidipäästöjen ja BKT:n välillä ei havaittu selvää yhteyttä. Haukioja (2007) on testannut Kuznets-käyrän hypoteesia Yhdysvaltojen ja EU-15-maiden hiilidioksidipäästöille. Hypoteesi saa tukea keskeisissä Euroopan unionin maissa, mutta ei Yhdysvalloissa. Haukiojan mukaan globaaleja kasvihuonekaasupäästöjä voisi olla mahdollista hallita, jos suurimmat kasvihuonekaasujen tuottajat sitoutuisivat yhteiseen vähennyspolitiikkaan.

### **3.3 Ilmastopolitiikan taloudellinen arvottaminen**

#### **3.3.1 Kustannus-hyötyanalyysi ilmastopolitiikassa**

Kustannus-hyötyanalyysi on apuväline yhteiskunnallisen päätöksentekoon, koska sen avulla voidaan määritellä annetun projektin tai toimenpiteen kannattavuus ja toteuttamiskelpoisuus. Kustannus-hyötyanalyysissä tulisi arvioida kaikenlaiset hankkeeseen liittyvät vaikutukset, kuten rahoitukselliset, taloudelliset, sosiaaliset ja ympäristöön liittyvät vaikutukset. Analyysin tavoitteena on antaa mahdollisille vaikutuksille rahallinen arvo, jotta hankkeen kustannukset ja hyödyt voidaan määritellä ja tehdä päätelmät siitä, onko hanke toteuttamisen arvoinen. Esimerkiksi saastumisen tapauksessa tuotannon aito yhteiskunnallinen kustannus olisi tuotannon tavanomainen rajakustannus lisättynä saastumisen aiheuttama ulkoiskustannus.

Matti Liski (2004) on arvioinut kustannus-hyötyanalyysin käyttöä ilmastopolitiikan arvottamisessa. Ilmastopolitiikka on Liskin mukaan julkinen investointi, joka voi muuttaa talouden tuotanto- ja kysyntärakenteita, vaikuttaa sukupolvien väliseen tulojakoon, aiheuttaa vaikeasti mitattavia kustannuksia ja edellyttää kansainvälistä yhteistyötä toteutuakseen. Poliitiikan hyötyjen pitää ylittää kustannukset, jotta se olisi tehokasta. Liski on tutkinut ilmastopolitiikan hyötyjen ja kustannusten arviointia eri aikaväleillä: ilmastotoimien kustannukset syntyvät pääsääntöisesti lyhyellä (0-5 vuotta) ja keskipitkällä aikavälillä (6-25 vuotta) ja hyödyt vasta pitkällä aikavälillä. Ilmastopolitiikan taloudelliset vaikutukset ovat maailmanlaajuisia ja aikaperspektiivi on pitkä, mikä tekee kustannuslaskelmien teosta vaikeaa. Ilmastotoimien oletetut hyödyt taas saadaan pääasiassa vasta pitkällä aikavälillä, jolloin kustannus-hyötyanalyysin käyttö ei ole mahdollista, sillä rahoitusmarkkinat eivät tarjoa näin pitkälle aikavälille hyötyvertailuun tarvittavaa korkokantaa. Tarkimmat arviot kustannuksista saadaan lyhyellä aikavälillä, ja tulosten luotettavuus kärsii aikavälin kasvaessa, sillä ilmastopolitiikan aiheuttamaa talouden rakennemuutosta on vaikea arvioida ja lisäksi laskelmat perustuvat moniin subjektiivisiin oletuksiin.

Kyllönen (2004, 5) kuvaa ilmastopolitiikan hyväksyttävyyttä vaa'alla, jonka toisella puolella ovat pitkän aikavälin vaikutukset eli ilmastoriskin pieneneminen ja päästöjen vähentäminen. Toisella puolella painavat lyhyen ja keskipitkän aikavälin vaikutukset, joita ovat taloudelliset ja sosiaaliset vaikutukset ja kilpailukyky. Ilmastopolitiikan kannattavuus riippuu siitä, kumpaa puolta painotetaan ja arvostetaan enemmän: tämän hetken ja lähitulevaisuuden kulutusta vai pitkän aikavälin ja tulevaisuuden hyötyjä. Ilmastopolitiikan taloudellisia vaikutuksia tulisi siis pystyä mittaamaan, jotta voitaisiin arvioida, kannattaako ilmastopolitiikka ja millä aikajänteellä sitä tulisi harjoittaa.

Lyhyellä aikavälillä tarkoitetaan välitöntä tulevaisuutta, jonka aikana talouden perusrakenne ei juuri voi muuttua. Energian tuotanto- ja kysyntärakenne on kiinteä, vaikka energiapanosten suhteellisten hintojen muutokset aiheuttavatkin muutospaineita. Myöskään teollisuuden tuotantorakenne ei muutu, vaikka panos- ja lopputuotehintoissa on muutosta. Lyhyellä aikavälillä ilmastopolitiikan arvioinnissa käytettävät laskennalliset mallit antavat Liskin (2004) mukaan staattisen poikkileikkauksen maailmantaloudesta, jossa energiapanosten hinnat nousevat, mutta niiden kulutus- ja tuotantorakenteet pysyvät ennallaan. Tärkeä osa lyhyen aikavälin määritelmää on myös se, että talouden tuotannon ja tuottavuuden kasvu on huomattavasti pienempää kuin pitkällä aikavälillä.

Keskipitkällä aikavälillä talous ja sen tuottavuus kasvavat, mutta kulutus- ja tuotantorakenteet pysyvät karkeasti ottaen ennallaan. Arvioitaessa ilmastopolitiikan kustannuksia tarvitaan ennusteita bruttokansantuotteen, tuottavuuden ja päästöjen kehityksestä. Kun kaksi kolmesta tunnetaan, voidaan kolmatta arvioida, kun oletetaan että talouden rakenne pysyy nykyisen kaltaisena. Arviot eivät Liskin (2004) mukaan ole kovin luotettavia, koska ensinnäkin tutkijat joutuvat tekemään hyvin subjektiivisia arvioita talouden kehityksestä ja toiseksi talous kasvaa, koska ilmastopolitiikan seurauksena investoinnit pyrkivät aktiviteetteihin, jotka tukevat kasvua ja minivoivat politiikan kustannuksia. Tämän seurauksena talouden rakenne pyrkii muuttumaan.

Ilmastopolitiikan hyötyjen arvottaminen kustannus-hyötyanalyysin keinoin on ongelmallista, koska useimmat hyödyt tulevat esille vasta pitkällä viiveellä. Rahoitusmarkkinat eivät kuitenkaan tarjoa rahoitusinstrumentteja yli 25 vuoden periodille, jolloin emme voi verrata, onko ilmastohankkeen tuotto riittävä verrattuna hypoteettiseen markkinatuottoon. Kustannus-hyötyanalyysin mukaan julkisten hankkeiden tulisi toteuttaa samat tuottovaatimukset kuin yksityisten hankkeiden. (Liski 2004.) Ilmastohankkeen minimituottovaatimuksen selvittämiseen ainoa keino on Liskin mukaan koron ennustaminen sadan vuoden päähän. Weitzmanin (2001) mukaan pitkäaikavälin kustannus-hyötyanalyysissä tulisi käyttää korkoa, jonka katsotaan olevan alin mahdollinen.

Kun Suomen tulevaisuuden taloudellista elintaso arvioidaan tuottavuuden kasvun perusteella, on Liskin (2004) mukaan selvää, että elintaso

tulee nousemaan. Tämä puolestaan tarkoittaa sitä, että ilmastopolitiikan harjoittaminen tällä hetkellä on tulojen siirtoa nykyiseltä köyhemmältä sukupolvelta tulevaisuuden rikkaammalle sukupolvelle. Hyvinvointivaikutus lisää paineita diskontata tulevien sukupolvien hyötyä. Diskonttokoron valintaa vaikeuttaa kuitenkin riski tulevasta kasvusta, sillä ennustettu kasvu ei välttämättä toteudukaan. Diskonttokorkoa on syytä pienentää, jos tuleva elintaso vaikuttaa epävarmalta. Hyvinvointivaikutus siis nostaa diskonttokorkoa ja kasvuriski pienentää sitä. (Liski 2004.)

Toinen diskonttaukseen vaikuttava tekijä, aikapreferenssi, on Liskin mukaan ilmastopolitiikan arvioinnissa syytä unohtaa. Aikapreferenssi tarkoittaa sitä, että yksilöt usein preferoivat tämän hetken hyötyä tulevaisuuden hyötyyn verrattuna. Ilmastopolitiikan pitkän aikajänteen vuoksi sukupolvia ei ole syytä asettaa eriarvoiseen asemaan pelkän ajallisen sijoittumisen vuoksi. Jos aikapreferenssi asetetaan nolnaan, kaikkia tulevaisuuden sukupolvia kohdellaan samanarvoisesti kuin nykyisiä sukupolvia. Positiivinen aikapreferenssi taas tarkoittaa sitä, että tulevien sukupolvien hyvinvointia alennetaan eli diskontataan verrattuna lähempiin sukupolviin. Aikapreferenssin käytöstä on väitelty kiivaasti ilmastonmuutoksen hillitsemisen lisäksi myös esimerkiksi ydinvoimaan liittyen. Ydinjätteen hautaamisen kustannukset riippuvat merkittävästi käytetystä diskonttokorosta (Nordhaus 2007).

Ilmastonmuutoksen kustannusten rahallinen arvottaminen on ongelmallista myös silloin, kun pyritään arvioimaan kuinka suuri hyvinvointitappio ilmastonmuutoksesta aiheutuu. On lähes mahdotonta sanoa kuinka arvokas asia on, jos ilmasto lämpenee yhden asteen verrattuna siihen että se lämpenee kaksi astetta. Ongelmallista on myös mitata ihmisen itsensä kokema ympäristön laadun arvostus puhumattakaan siitä, mikä on ilmastonmuutoksen vuoksi menetettyjen ihmishenkien arvo. Ympäristöfilosofinen näkökulma kyseenalaistaa ympäristön taloudellisen arvottamisen. Straniuksen (2000) mukaan ympäristötaloustieteen ongelmana on, että se antaa ihmiselle oikeuden arvottaa luontoa määrittelemillään menetelmillä, mikä ei kokonaisuuden kannalta voi olla kestävä eikä eettisesti oikea tapa määritellä, mitä hankkeita toteutetaan tai jätetään toteuttamatta.

### 3.3.2 Sternin raportti ja sen kritiikkiä

Kustannus-hyötyanalyysia on hyödynnetty myös Sternin raportissa (2007), joka on Iso-Britannian valtiovarainministeriön julkaisema laaja aiempiin tieteellisiin tutkimuksiin perustuva analyysi ilmastonmuutoksesta ja sen taloudellisista vaikutuksista. Raportin keskeisenä kysymyksenä on, millainen ilmastopolitiikka taloudellisesti järkevää. Sternin mukaan voimakkaat, jopa 80 prosentin päästövähennykset ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on aloitettava välittömästi jo puhtaasti taloudellisin perustein, sillä ilmastonmuutoksen hillitsemisen kustannukset tulevat olemaan vain noin yksi prosentti globaalista bruttokansantuotteesta vuodessa, kun taas sopeutumiskustannukset voivat

kohota viidestä jopa kahteenkymmeneen prosenttiin kokonaistuotannosta. Ilmastonmuutos nähdään negatiivisena ulkoisvaikutuksena, jossa päästöille on saatava läpinäkyvä globaali hinta verotuksen tai päästökaupan avulla tai yhdistelemällä eri ohjauskeinoja.

William Nordhausin (2007) mukaan Sternin vaatimat nopeat ja radikaalit päästövähennykset eroavat perinteisistä taloudellisista malleista, joissa suositellaan asteittaisia vähennyksiä. Sternin raportin eriävät tulokset eivät johdu uudesta tiedosta tai tutkimustavasta, vaan lähes yksinomaan tavasta arvottaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia kaukana tulevaisuudessa. Nordhausin mukaan markkinakorkoon vaikuttavat parametrit, aikapreferenssi ja kulutuksen rajahyödyn jousto, on valittu kyseenalaisesti. Sternin raportissa aikapreferenssin aste eli diskonttokorko on asetettu lähelle nolaa, koska eri sukupolvien hyödyt on haluttu asettaa samanarvoiseen asemaan. Diskonttokorko määrittää nykyisen ja tulevan kulutuksen välistä vaihtosuhdetta. Alhainen diskonttauskorko lisää tulevaisuuden arvotusta ja sitä kautta säästämistä. Investoinnit ilmastoon ovat kannattavampia kuin korkean diskonttauksen tapauksessa. Koska ilmastonmuutoksen hillitsemisen kustannukset ovat nykyhetkessä ja hyödyt kaukana tulevaisuudessa, on Honkatukian (2008) mukaan selvää, että diskonttaus vaikuttaa siihen, miten optimaalista ilmastopolitiikkaa tulisi harjoittaa. Liski (2008) nimittää kulutuksen rajahyödyn joustoja kerrottuna kulutuksen kasvuvauhdilla lyhyesti varallisuusvaikutukseksi. Varallisuusvaikutus kuvaa halua välttää suuria ajallisia kulutuseroja. Sternin raportissa varallisuusvaikutus on asetettu pieneksi, jolloin se tarkoittaa suurta halukkuutta tehdä uhrauksia tulevaisuuden hyväksi.

Nordhausin (2007) mukaan Sternin raportissa oletetaan, että diskonttokorko on matala ja että yhteiskunta kiinnittää vain vähän huomiota siihen, onko tulevaisuus köyhempi vai rikkaampi kuin nykyhetki. Tämän seurauksena yhteiskunta tulee säästämään paljon tulevaisuutta varten, ja reaalin tuotto tulee olemaan matala. Sternin käyttämät oletukset ovat Nordhausin (2007) mukaan ristiriidassa todellista markkinakorkoa ja säästämistä kuvaavan datan kanssa. Nordhaus (2007) suosittelee asteittain kiristyviä päästövähennyksiä, koska tällä hetkellä on kannattavampaa investoida fyysiseen ja henkiseen pääomaan, esimerkiksi puhtaan teknologian kehittämiseen. Kun ilmastonmuutosongelma tulevaisuudessa pahenee, maailma on taloudellisesti vauraampi ja kykenee paremmin investoimaan ongelman ratkaisuun. Kasvu, kustannukset ja ilmastonmuutoksen haitat sekä haittojen epälineaarisuus ja peruuttamattomuus määrittävät päästöjen rajoittamisen aikataulun.

Liski (2008) kyseenalaistaa sen, voimmeko tarkastella ilmasto-ongelmaa vain kulutuksen, investointien ja hyötyjen optimointina yli ajan. Voidaanko luottaa, että ilmastonmuutoksen fysikaalinen luonne on esimerkiksi Nordhausin taloudellisen kasvun mallissa kuvattu riittävän tarkasti, jotta kasvihuonekaasupäästöjen määrää uskalletaan lisätä ja toimiin ryhtyä vasta myöhemmin. Liskin mukaan Nordhausin malli on kulutuksen tasauksen malli,

eikä se välttämättä sovi suuria epävarmuuksia sisältävän ilmasto-ongelman tarkasteluun. Martin Weitzmanin (2007) mukaan on hyvin epävarmaa, millaista diskonttokorkoa ilmastonmuutoksen yhteydessä tulisi käyttää. Koska ilmastonmuutokseen liittyy paljon pitkän aikavälin epävarmuuksia, tulisi tutkimuksessa Weitzmanin mukaan pohtia, kuinka suuren vakuutuksen ihmiskunta haluaisi ottaa välttääkseen ilmastokatastrofin, jonka todennäköisyys on pieni, mutta jonka vaikutukset olisivat vaikeita kompensoida tavanomaisilla säästöillä. Varovaisuusperiaatteen mukaan tulevaan epävarmuuteen tulee varautua. Mitä suurempia ilmastonmuutoksen haittojen epävarmuudet ovat, sitä enemmän tulevaisuudesta välitetään ja sitä alemmas diskonttokorko voidaan haittojen taloudellisessa arvottamisessa asettaa. Weitzman (2007) toteaaakin, että Stern on saattanut päätyä oikeanlaisiin tuloksiin, mutta vääristä syistä. Diskonttokorko tulisi Sternin käyttämien oletusten sijasta asettaa pieneksi siksi, että ilmastonmuutoksen epävarmuudet ja niiden pysyvyys lisäävät tulevien hyötyjen arvostusta.

### 3.4 Ekologinen taloustiede: kestävän kehityksen huomiointi

#### 3.4.1 Talous rajallisessa maailmassa

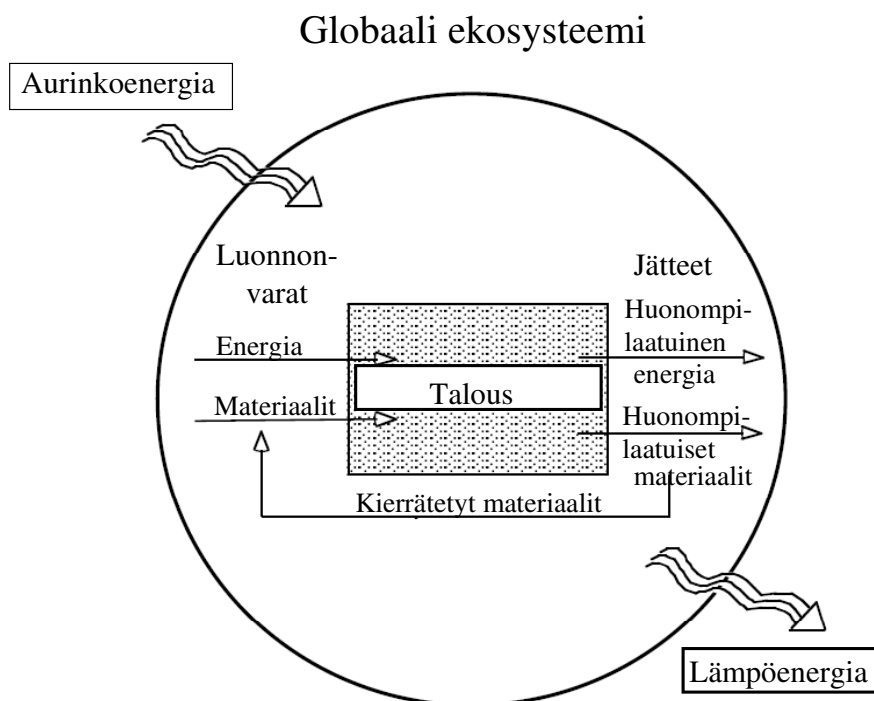
Uusklassisessa ympäristötaloustieteessä ympäristöongelmat esitetään taloudellisten toimijoiden välisenä vuorovaikutussuhteena, jossa luonto ja ympäristö kuvataan vain implisiittisesti. Ekologisessa<sup>7</sup> taloustieteessä sitä vastoin ollaan kiinnostuneita mallintamaan ihmisen ja ympäristön, tai talouden ja ekosysteemin<sup>8</sup>, välistä suhdetta (van den Bergh 2000). Ekologinen taloustieteen ydin on kestävän kehityksen tavoittelu, jossa keskeisenä lähtökohtana on näkemys siitä, että talous on paikallisen ja globaalin ekosysteemin alajärjestelmä (kuvio 22). Talous on osa luontoa ja siitä täysin riippuvainen, koska luonto tarjoaa taloudelle paitsi raaka-aineita ja energiaa myös välttämättömiä palveluita kuten puhdasta ilmaa, hedelmällistä multaa ja jätteiden kaatopaikan (Gardner & Prugh 2008). Näin ollen ekosysteemi ja luonnon pääoma asettavat rajat talouden fyysiselle kasvulle. Ekologinen taloustiede kritisoi sitä, että useimmat taloudelliset mallit eivät perustu biofysikaalisiin lakeihin ja periaatteisiin ja jättävät ne huomioimatta (Georgescu-Roegen 1971; Daly 1977; Hall ym. 1986; Hall ym. 2001).

Talouden prosessit voidaan käsittää luonnon prosesseina kuvaamalla niitä energia- ja materiaalivirtoina. Taloudellinen toiminta synnyttää yhteiskunnan ja luonnon välille aineen ja energian kierron, jossa luonnosta otetaan raaka-aineita ja energiaa talouteen, jossa niitä hyödynnetään taloudellisissa prosesseissa, minkä jälkeen energia- ja materiaalivirrat palaavat takaisin luontoon

<sup>7</sup> Ekologia on tiede, joka tutkii eliöiden vuorovaikutusta toistensa ja elottoman ympäristön kanssa.

<sup>8</sup> Ekosysteemi muodostuu tietyn alueen eliöyhteisöstä ja elottomasta luonnosta. Eliöyhteisöön kuuluvat kyseisen alueen eri lajien populaatiot.

huonompilaatuisina (kuvio 22). Georgescu-Roegen (1971) laajensi termodynamiikan peruslainalaisuudet koskemaan luonnon lisäksi myös taloutta ja yhteiskuntaa. Termodynamiikan mukaan maapallo on energian suhteen avoin mutta materiaan suhteen suljettu systeemi. Maapallo siis vastaanottaa aurinkoenergiaa ja vapauttaa lämpöenergiaa avaruuteen, mutta materiaan määrä on vakio. Termodynamiikan lakien mukaan energian ja materiaan määrä maailmankaikkeudessa pysyy vakiona, mikä tarkoittaa yhteiskunnallisen termodynamiikassa sitä, että materia ja energia eivät häviä tuotantoprosesseissa, vaan ne ainoastaan muuttuvat hyödykkeiksi, jätteiksi ja saasteiksi. Entropialain mukaan fysikaalinen systeemi pyrkii itsestään aina kohti suurempaa epäjärjestystä eli termodynaamista tasapainoa, jolloin energia ja materia jakautuvat yhä tasaisemmin. Tästä johtuen tuotantoprosessit eivät voi olla täysin tehokkaita, vaan jätteitä ja saasteita syntyy väistämättä. Yhteiskunnassa tämä tarkoittaa sitä, että ihmisen toiminta lisää epäjärjestystä ja luonnosta tuleva materiaalivirta päättyy entisen suuruisena mutta huonolaatuisempana takaisin luontoon. Nykyistä teollista talousjärjestelmää voidaan kuvata läpivirtaustaloudeksi (Daly, Ayres & Simonis, 1994), jossa teollisuus ottaa luonnosta materiaaleja ja muuttaa ne energian avulla käyttökelpoisiksi hyödykkeiksi, jätteiksi ja saasteiksi. Lopulta myös hyödykkeet muuttuvat jätteiksi ja saasteiksi.



KUVIO 22

Talous on suljetun ekosysteemin avoin alajärjestelmä (muunneltu lähteestä Cleveland 1999)



H.T. Odumin (1971) mukaan energia on taloudellisen arvon lähde. Odum osoitti, että aina kun taloudessa esiintyi rahavirta, tarvittiin energiavirta vastakkaiseen suuntaan. Rahaa käytetään ostamaan hyödykkeitä ja palveluita, joiden tuottamiseen on tarvittu energiaa. Jokainen taloudessa tapahtuva ostotapahtuma lisää tuotteiden ja palveluiden tuotantoa, mikä lisää talouden energiantarvetta. Raha kulkee taloudessa suljetussa kierrossa, kun taas matalaentropinen energia tulee taloudelliseen järjestelmään sen ulkopuolelta. Sitä käytetään taloudellisiin prosesseihin, jonka jälkeen se poistuu taloudellisesta systeemistä huonompilaatuisena energiana eli lämpönä, jonka kyky tehdä työtä on alhainen. Odum myös huomioi, että luonnon suuret uusiutuvat energiavirrat, kuten auringonsäteily, vesi, tuuli, ovat oleellisia elämälle, mutta niiden käyttöön ei liity rahavirtoja. Näiden ollen energiavirtojen käytön kustannukset eivät siksi ole suoranaisesti osana taloudellisia transaktioita, mikä usein johtaa niiden väärinkäyttöön tai elämää ylläpitävien ekosysteemipalveluiden<sup>9</sup> huonoon hallitsemiseen.

Boulding (1966) kuvasi osuvasti luonnonvarojen käyttöä metaforalla karjapaimentaloudesta ja avaruusalustaloudesta. Karjapaimentaloudessa ihmiset eivät juuri ole huolissaan luonnosta ja ympäristötilasta, ja he havainnoivat vain paikalliset ympäristöongelmat. Jos luonnonvarat käyvät vähiin tai ympäristötila heikkenee muuten, ihmiset muuttavat uuteen paikkaan. Avaruusalustaloudessa materian ja ruoan määrä päinvastoin on rajoitettu. Selviytyäkseen ihmisen tulee käyttää raaka-aineita ja energiaa mahdollisimman taloudellisesti ja maksimoida materiaalien ja tuotteiden kierrätys. Karjapaimentalous voidaan nähdä paikallisena tai kansallisena avoimena taloutena ja avaruusalustalous koko maapallona, jossa luonnonvaroja on käytettävä säästeliäästi. Dalyn (1977) mukaan suhteellisen niukkuuden ja absoluuttisen niukkuuden arvottaminen eroaa ympäristö- ja ekologisessa taloustieteessä siten, että ympäristötaloustieteessä keskitytään suhteelliseen niukkuuteen, kun ekologinen taloustiede on lähinnä kiinnostunut absoluuttisesta niukkuudesta.

Ympäristötaloustieteessä talouden absoluuttisia fysikaalisia rajoja ei oteta yhtä vakavasti kuin ekologisessa taloustieteessä (van den Bergh 2000). Dalyn (1992) mukaan taloustieteessä on keskitytty liikaa vain allokaatiokysymyksiin ja unohdettu talouden optimaalisen fyysisen koon tarkastelu. Mitä suurempi talouden fyysinen mittakaava on, sitä suuremmat ovat riskit tuhota ihmisen elinolosuhteet pitkällä aikavälillä. Dalyn (1977) mukaan materiaalien ja

---

<sup>9</sup> Ekosysteemit tuottavat niin kutsuttuja ekosysteemipalveluita, joilla tarkoitetaan ekosysteemeissä käynnissä olevia prosesseja ja niistä saatavia hyödykkeitä, jotka ovat edellytyksenä ihmisten hyvinvoinnille. Ekosysteemipalvelut jaetaan neljään luokkaan: tuotannollisiin, sääteleviin, kulttuurisiin ja tukeviin palveluihin. Tuotannollisia palveluita ovat esimerkiksi ruoka, bioenergia ja puhdas vesi, mutta mineraaleja ja fossiilisia polttoaineita ei lueta mukaan. Sääteleviin palveluihin kuuluu esimerkiksi ilmaston ja vedenkierron säätely. Kulttuuripalveluihin voidaan lukea maisemaan ja luonnon monimuotoisuuteen liittyvät arvot, luonnon virkistyskäyttö ja ekoturismi. Ekosysteemien tukeviin palveluihin kuuluvat esimerkiksi fotosynteesi, hiilen sidonta ja ravinteiden kierrätys. (Vihervaara & Kamppinen 2009.)

energian käyttö taloudessa tulisi siis minimoida. Koska ekologisessa taloustieteessä käytetään pidempää aikahorisonttia kuin perinteisessä ympäristötaloustieteessä, siinä kiinnitetään enemmän huomiota luonnon ja taloudellisen toiminnan vuorovaikutukseen ja syy-seurausketjuihin.

Flavinin (2008) mukaan talous on oman menestymisensä seurauksena alkanut syödä itseään toisesta päästä: kun luonnonvarat vähenevät, materiaan perustuva kasvu ei voi jatkua loputtomiin. Kun talous on saavuttanut tietty rajat, lisäkasvu aiheuttaa ongelmia sekä luonnolle että taloudelle, jolloin Dalyn (1977) sanoin ilmaistuna kasvusta tulee epätaloudellista. Nykyinen talousjärjestelmä on viimeisen sadan vuoden aikana edistänyt ihmisten hyvinvointia ja vaurautta, mutta talouskasvun kielteiset sivuvaikutukset, kuten ilmastonmuutos ja biodiversiteetin heikkeneminen, uhkaavat nyt myös maailman taloudellista vakautta (Gardner & Prugh 2008). Kestävä taloudellinen kasvu tarkoittaa kulutusmahdollisuuksien jatkuvaa ylläpitoa tai parantamista ja sitä kautta yleisen hyvinvoinnin säilyttämistä pitkällä aikavälillä. Talouskasvu on kestävä, kun henkeä kohden lasketun bruttokansantuotteen kasvu ei vaaranna pitkällä aikavälillä biofysikaalisten tai sosiaalisten takaisinkytkentävaikutusten takia. Kaivo-ojan ja Haukiojan (2002) mukaan voidaan olettaa, että on olemassa tietty kriittinen määrä luonnon pääomaa, jonka rapautuminen vaarantaa luonnon uudistumiskyvyn. Tämä asettaa taloudellisen rajoitteen kulutukselle ja luonnon pääoman käytölle. Luonnon resurssien käyttöä voidaan rajoittaa vähentämällä kulutuksen tai tuotannon materiaalista intensiteettiä tai vähentämällä tuotannon saastuttavuutta.

Uusklassinen ympäristötaloustiede pyrkii tehokkuuteen, kun taas ekologisessa taloustieteessä tehokkuutta tärkeämpää on kestävyys tavoittelu. Ekologisessa taloustieteessä tuotannon tehokkuutta mitataan ekotehokkuuskäsitteellä, joka kuvaa tuotteen tai palvelun tuotantoon tarvittavan materiaalin tai energian suhdetta tuotettuun määrään. Kun ekotehokkuus paranee, luonnonvarojen tuottavuus kasvaa. Tuotannon tehostuminen on parantanut ekotehokkuutta teollisuusmaissa, mutta talouden kiivas kasvu ja laajentuminen ovat kumonneet aikaansaadut parannukset. Parannus ekotehokkuudessa kertoo siitä, että suhteellinen ympäristövaikutus tuotannon määrään verrattuna on pienentynyt, mutta kokonaisvaikutus voi silti jatkaa kasvamistaan, jolloin talouskasvu aiheuttaa yhä lisää ympäristövaurioita ja heikentää ympäristön laatua. Näin ollen ekotehokkuus on välttämätön mutta ei riittävä ehto kestäville kehitykselle. (Hoffrén 2001.)

Tuotannon tehostuminen saattaa kuitenkin vaikuttaa luonnonvaran kulutusta lisäävästi. Jevonsin paradoksin (1865) mukaan teknologinen kehitys, joka parantaa jonkin raaka-aineen käytön tehokkuutta, voi lisätä kyseisen hyödykkeen kulutusta kuin vähentää sitä. Jos jonkin raaka-aineen käyttö tuotannossa tehostuu, tuotteen tai palvelun hinta laskee. Hinnan lasku saa aikaan kysynnän kasvun, joka taas luonnollisesti lisää kyseisen raaka-aineen kulutusta, mikä voi joko osittain tai kokonaan syrjäyttää säästöt raaka-aineen käytössä.

Maier-Rigaudin (1991) mukaan voidaan olettaa, että sekä luonnolla että taloudella on rajalliset mahdollisuudet sopeutua, mutta emme koskaan voi tarkasti tietää näiden systeemien sopeutumiskapasiteettia. Koska monet luonnon sopeutumis- tai kantokyvyn ylittävät tilanteet eivät ole peruutettavissa, on ainoa kestävyYTEEN johtava strategia se, että luonnon toimintaan puututaan mahdollisimman vähän. Näin ajateltuna kaikki sopeutuminen kohdistuu ainoastaan taloudelliseen toimintaan. Varovaisuusperiaatetta pidetään ekologisessa taloustieteessä tärkeänä, koska ekosysteemin epätasapainosta ja biodiversiteetin heikkenemisestä ollaan huolissaan (van den Bergh 2000). Varovaisuusperiaatteen mukaan varmistettujen tieteellisten todisteiden puuttumista ei tulisi käyttää syynä lykätä toimia, jotka torjuvat tai vähentävät merkittävän biologisen monimuotoisuuden vähenemisen tai häviön uhkaa (UN 1982). Pienen todennäköisyyden tapahtumilla saattaa olla suuret vaikutukset. Van der Bergh (2000) kuitenkin toteaa, että myös ympäristötaloustieteessä on tehty tutkimusta ympäristöasioiden epävarmuuksiin liittyen, joista merkittävimpiä ovat ilmastonmuutokseen liittyvät mallit.

Ekologinen taloustiede painottaa näkemystä siitä, että ihminen on riippuvainen hyvinvoivista ekosysteemeistä, jotka ovat välttämätön ehto myös talouden toiminnalle (Røpke 2005). Ekosysteemipalvelu-käsite levisi nopeasti YK:n vuosituhaten ekosysteemi-arvion (Millenium Ecosystem Assessment 2005) jälkeen, mutta Gardnerin ja Prughin (2008) mukaan uusimmatkaan taloustieteen oppikirjat eivät kiinnitä käytännössä mitään huomiota ekosysteemipalveluihin tai luonnon kykyyn käsitellä ihmiskunnan jätteitä. Ekosysteemipalvelujen arvottamisen tarpeeseen on kuitenkin kiinnitetty huomiota viimeisimpänä UNEP:n isännöimässä laajassa tutkimushankkeessa "The Economics of Environment and Ecosystems" (TEEB 2010), jossa pyrittiin taloustieteen menetelmin arvioimaan ekosysteemien ja biodiversiteetin arvoa ja toisaalta biodiversiteetin heikkenemisen kustannuksia.

Ekosysteemipalvelu-käsite on ihmiskeskeinen ja se kytkeytyy ekosysteemien tarjoamien palveluiden taloudellisen arvon arviointiin. Sitä kautta se on myös työkalu yhteiskunnallisessa päätöksenteossa, kun halutaan parantaa mahdollisuuksia ekosysteemien suojeluun. Vatn (2008) pitää tärkeänä, että ekosysteemipalveluiden suojeluun kehitettäisiin perinteisten ohjauskeinojen, kuten verotuksen ja ympäristötukien, lisäksi rahallisia maksujärjestelmiä. Tällainen on esimerkiksi hiilidioksidin päästökauppa. Vihervaaran ja Kamppisen (2009) mukaan luonnonarvokauppa on keino ekosysteemipalveluiden suojeluun, mutta se kuitenkin yksipuolinen ratkaisu ihmisen aiheuttamiin vaaroihin, jotka uhkaavat ekosysteemien toimintaa. Lisäksi luonnon tarjoamien palveluiden rahallisen arvon määrittäminen ei ole yksinkertaista, ja monille ekosysteemipalveluille, kuten esimerkiksi happea tuottavalle fotosynteesille, on lähes mahdotonta määrittää rahallista arvoa.

### 3.4.2 Biofysikaalinen arvottaminen

Hinta ei aina heijasta luonnonvarojen todellista niukkuutta ja taloudellista tärkeyttä (Hall ym. 2001), ja rahallinen arviointi usein merkittävästi aliarvio luonnonvarojen, kuten puun, turpeen, hiilen, öljyn, kaasun, vesivoiman ja uraanin arvon (Hall, Cleveland & Kaufmann, 1986; Odum, 1996). Ulgiatin ja Brownin (2003) mukaan luonnonvarojen todellista arvoa ei voi määrittellä pelkästään sen perusteella, mitä niistä ollaan valmiita maksamaan.

Odumin (1996, 60) mukaan koska rahaa maksetaan vain ihmisille heidän panoksestaan muttei koskaan luonnolle sen antamasta panoksesta, rahaa ja markkinahintaa ei voida käyttää arvottamaan luonnon tarjoamaa vaurautta. Kun luonnonvarat ovat yltäkyläiset, talouden ei tarvitse nähdä paljon vaivaa hyödyntääkseen niitä, kustannukset ovat matalat ja hinnat alhaiset. Tästä huolimatta juuri tällöin todellista vaurautta eli luonnonvaroja käytetään eniten. Kun resurssit ovat niukat, hyödyntämiskustannukset ovat korkeammat, kysynnän ja tarjonnan laki nostaa hintoja ja markkinat asettavat resursseille korkean arvon. Tällöin kuitenkin luonnonvarojen kontribuutio taloudelle on pieni. Myös Hall ym. (1986, 35) painottavat sitä, että hyödykkeet ja palvelut ovat alunperin peräisin luonnosta ja luonnonvaroista, jotka ovat todellinen vaurauden lähde, ei raha, joka edustaa niitä markkinatransaktioissa. Hallin ym. (1986, 39-40) mukaan usklassinen taloustiede pitää polttoaineita samanlaisina tuotantotehtäjinä kuin pääomaa tai työvoimaa, mutta on selvää että energia on tuotannon ainoa primääritekijä, koska sitä ei voi tuottaa tai kierrättää mistään muusta tekijästä - se pitää tarjota taloudellisen systeemin ulkopuolelta.

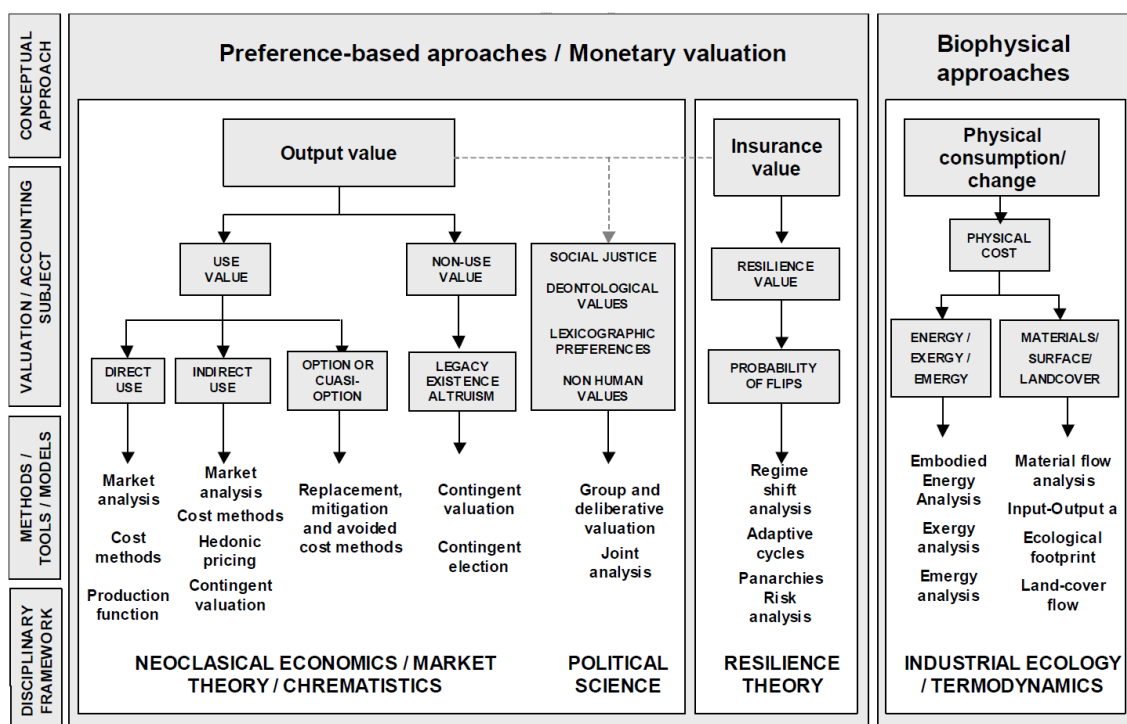
Ekologinen taloustieteessä arvoteoria on jaettu kahdeksi osaan: luovuttajan (donor-side) ja vastaanottajan (receiver- tai user-side) näkökulmaan. Luovuttajan näkökulma perustuu biofysikaalisiin eli energia- ja materiaalmääräisiin tuotantokustannuksiin, jotka on pitänyt investoida, jotta tuote tai palvelu on saatu mahdolliseksi. Myös klassisen taloustieteen arvoteoriassa (esim. Adam Smith; Ricardon ja Marxin työnarvon teoria) arvo määriteltiin tuotannon kustannusten perusteella. Preferensseihin perustuvan marginaalisen arvoteorian, joka loi pohjaa usklassiselle taloustieteelle, mukaan hyödykkeiden arvo sitä vastoin määräytyy niiden tuottaman hyödyn perusteella, mistä teorian kehitys eteni kysynnän ja tarjonnan merkityksen tarkasteluun hinnanmuodostuksessa. Usklassisessa taloustieteessä arvo perustuu siis käyttäjän näkökulmaan, jossa tuotteen tai palvelun arvo määräytyy preferenssien perusteella.

TEEB (2010) -raportista poimitussa taulukossa (taulukko 1) on esitetty rahallisten ja biofysikaalisten tarkastelu- ja arviointikantojen ominaisuuksia ja eroja. Raportissa todetaan, että myös ei-rahallisia arvottamismenetelmiä tarvitaan. Biofysikaaliset, termodynaamikaan perustuvat menetelmät arvioivat prosesseja energia- ja materiaalivirtojen avulla. Ne mittaavat ennen kaikkea resurssien kulutusta, eivät suoraa ympäristövaikutuksia. Teollisten tuotteiden ja prosessien arviointia termodynaamisilla menetelmillä tukee se, että kaikki teolliset prosessit ovat riippuvaisia energiasta ja sen muuntautumisesta tuotteiksi ja palveluiksi. (Heino ja Nordlund 2010.) Biofysikaaliset mittarit ovat

hyödyllisiä luonnon pääoman arvottamisessa, etenkin vahvan kestävän kehityksen puitteissa, jossa oletetaan että substituoitio ihmisen luoman taloudellinen pääoman ja luonnon pääoman välillä on mahdotonta (TEEB 2010).

Tässä tutkimuksessa hyödynnetään rahallisten kustannusanalyysin lisäksi biofysikaalisia menetelmiä. Valitut menetelmät ovat Gross energy requirement (GER) -menetelmä (IFIAS 1974) ja emergiasynteesi (Odum 1996), koska niiden avulla saadaan kuvattua sähköntuotannon muita kuin rahallisia kustannuksia. Odumin (1996) kehittämässä emergia-menetelmässä (ks. luku 3.3) arvioidaan kaikki prosessiin vaaditut energia-, materiaali- ja rahavirrat, jotka määrittävät valmiin tuotteen tai palvelun arvon tai tuotantokustannukset energiassa ilmaistuna. Brown ja Ulgiati (2002) ovat käyttäneet emergia-menetelmää sähköntuotantotapojen arvioimiseksi Italiassa. Emergiasynteesin hyödyntäminen, eli ympäristön antaman panoksen arvioiminen, tarjoaa sähköntuotannossa tärkeää tietoa, jota voidaan hyödyntää ympäristöseikat huomioivassa politiikassa ja päätöksenteossa (Brown & Ulgiati 2002). Menetelmien tarkempi selostus on luvussa kolme. Muita esimerkkejä biofysikaalisista arvottamis- tai laskentameteodeista ovat "embodied energy analysis", exergia-analyysi, ekologinen jalanjälki ja materiaalivirta-analyysi (TEEB 2010).

TAULUKKO 1 Menetelmiä luonnonvarojen arvottamiseksi (Lähde: TEEB 2010)



Source: Gómez-Baggethun, deGroot, et al. in progress

## 4 ENERGIANTUOTANNON ARVIOINNIN MENETELMÄT

### 4.1 Tuotantokustannusanalyysi ja herkkyysanalyysi

Yksityiskohtainen sähkövoimalaitoksen kustannusten tarkastelu on moniulotteinen ongelma. Koska tässä tutkimuksessa arvioidaan sähköntuotannon tämän hetken ja tulevaisuuden kustannuksia kansantalouden tasolla, laskelmissa käytetyt arvot pohjautuvat kirjallisuudesta poimittuihin keskimääräisiin hintoihin ja kustannuksiin. Kaikki kustannukset esitetään valitun ajankohdan rahassa. Sähköntuotannon kustannukset koostuvat kiinteistä kustannuksista, joita ovat pääomakustannukset ja muuttuvista kustannuksista, joita ovat polttoaineen hinta, päästöoikeuden hinta ja käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Fossiilisia polttoaineita ja turvetta käyttävät laitokset tuottavat hiilidioksidia, joka voidaan ajatella negatiiviseksi ulkoisvaikutukseksi ja jonka vaikutus ilmastoon huomioidaan laskelmissa käytettävän päästöoikeuden hinnan kautta. Hiilidioksidin päästöoikeuksilla kuvataan tällöin tuotannon aitoa yhteiskunnallista kustannusta, joka on tuotannon perinteinen kustannus lisättynä päästöjen aiheuttamalla ulkoiskustannuksella. Eri polttoaineiden CO<sub>2</sub>-ominaispäästökertoimet ovat erilaisia, minkä vuoksi päästökauppa lisää eri tuotantotapojen kustannuksia eri määrän. Sähkön tuotantokustannukset voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\begin{aligned} \text{tuotantokustannukset} &= \text{pääomakustannukset} + \text{käyttö- ja} \\ \text{kunnossapitokustannukset} &+ \text{polttoainekustannukset} + \text{päästökaupan} \\ &\text{kustannukset,} \end{aligned}$$

missä

$$\text{sähköntuotannon polttoainekustannus (€/MWh sähköä)} = \text{polttoaineen hinta (€/MWh) / laitoksen tehokkuus}$$

ja

*pääomakustannukset (€/MWh) = annuiteettitekijä \* investointikustannus vuosituotantoa kohden (€/MWh/vuosi),*

missä

*investointikustannus vuosituotantoa kohden (€/MWh) = investointikustannus (€/kW) / huippukäyttöaika (tuntia/vuosi).*

Voimalaitosinvestointien kustannukset lasketaan annuiteettimenetelmää käyttäen. Lähtötiedoiksi tarvitaan alkukustannus, investoinnin pitoaika sekä laskentakorkokanta. Annuiteetti saadaan lasketuksi, kun annuiteettitekijä kerrotaan investointikustannuksella, missä

*annuiteettitekijä =  $i(1+i)^n / (i+1)^n - 1$ , missä*

*i = laskentakorko*

*n = jaksot.*

Pääomakustannusten laskennassa siis oletetaan, että investointeihin tarvittava pääoma olisi hankittu kokonaan lainoituksella ja laina-aika vastaisi laitoksen taloudellista käyttöikä, jolloin pääomakustannukset ovat lainojen lyhennysten ja korkojen suuruiset. Vuotuiset pääomakustannukset lasketaan siten, että ne pysyvät samoina koko tarkastelukauden eli laitoksen taloudellisen eliniän ajan. Näin saadaan vuotuinen pääomakulu eli annuiteetti, joka riippuu laskentakorosta  $i$  ja laskennallisesta eliniästä  $n$ . Energiainvestointien vertailussa käytetään viiden prosentin korkotasoa, joka VTT:n (2004) mukaan sopii kansantaloudelliseen edullisuustarkasteluun. Jos tavoitteena olisi tarkastella energiantuotantoinvestointeja sijoitusmielessä, korkotasoksi voitaisiin valita 10 prosenttia tai jopa enemmän. Tässä tutkimuksessa lasketut sähköntuotantokustannukset ovat niin kutsuttuja omakustannushintoja (Tarjanne ja Kivistö 2008), mikä tarkoittaa sitä, että niiden ja sähkön toteutuneen markkinahinnan erotus laitoksen taloudellisen eliniän aikana määrittää tuotannon liiketaloudellisen kannattavuuden.

Sähköä ja lämpöä tuottavien CHP-laitosten sähköntuotantokustannusten laskennalle ei ole yksikäsitteistä tapaa. Yhteistuotanto on tehokas tapa parantaa polttoaineiden käytön tehokkuutta, ja se johtaa olennaisesti erillistuotantoa parempaan exergiahyötysuhteeseen. Koska hyöty on saatavissa vain tuotantojen yhdistämisen kautta, etu tulisi jakaa jossain suhteessa sähkön ja lämmön tuotannolle. Tässä tutkimuksessa käytetään OECD:n (2005) käyttämää tapaa:

*Sähkön tuotantokustannukset (€/MWh) = laitoksen  
kokonaistuotantokustannukset (€/MWh) – (kauko)lämmön  
markkinahinta(€/MWh)*

CPH-laitoksia koskevilla laskelmissa oletetaan, että sähkön ja lämmön tuotannon suhde on yksi, mikä tarkoittaa sitä, että kun laitos tuottaa yhden megawattitunnin sähköä, samalla se tuottaa yhden megawattitunnin lämpöä, joka myydään kaukolämpönä yhdyskunnan asukkaille. Sähköntuotantokustannuksia laskettaessa kokonaiskustannuksista vähennetään siten kaukolämmön keskimääräinen myyntihinta.

Koska kustannuslaskelmat riippuvat lähtöoletuksista, joihin sisältyy epävarmuuksia, suoritetaan myös herkkyysanalyysi, jolla tarkoitetaan laskelmia, joissa yhtä tai useampaa laskelman lähtöoletusta muutetaan. Herkkyysanalyysin tavoitteena on tutkia, miten epävarmoille muuttujille valittujen arvojen muuttaminen vaikuttaa laskelmiin, ja mitkä muuttujat vaikuttavat eniten lopputulokseen, eli minkä muuttujien suhteen tulokset muuttuvat herkimmin. Herkkyysanalyysin avulla voidaan tarkastella esimerkiksi, miten polttoaineen tai päästöoikeuden hinnan muutokset tai reaalikoron valinta vaikuttavat eri teknologioiden sähköntuotantokustannuksiin.

Tutkimuksessa arvioidaan ensin eri tuotantoteknologioiden vuoden 2008 tuotantokustannuksia, jolloin niitä voidaan verrata keskenään. Kun tuotantokustannukset kerrotaan tuotetuilla sähkön määrillä, saadaan arvio kansallisen tason sähköntuotantokustannuksista. Työssä toteutetaan skenaarioita sähköntuotannon tulevaisuudesta muuttamalla eri tuotantoteknologioiden ja polttoaineiden osuuksia sähköntuotantokombinaatiossa, jolloin voidaan vertailla eri tuotantoyhdistelmien kokonaistaloudellisia kustannuksia. Kustannuslaskelmissa huomioidaan vain suorat taloudelliset kustannukset, jolloin rajauksen ulkopuolelle jäävät epäsuorat kustannukset tai hyödyt, jotka liittyvät esimerkiksi alueellisiin vaikutuksiin, työpaikkojen määrään tai kilpailukykyyn. Energiajärjestelmän muutokset voivat lisäksi aiheuttaa vaikutuksia sekundaarimarkkinoille, koska hintojen ja määrien muuttuessa primaarimarkkinoilla, voi komplementti- ja substituuttihyödykkeiden kysyntä muuttua (Lombardini-Riipinen & Ollikainen, 2009).

## 4.2 Gross Energy Requirement

Energiantuotannossa hyödynnetään fossiilisia energialähteitä paitsi polttoaineina myös epäsuorasti tuotantoprosessin eri vaiheissa. Esimerkiksi öljyn pumppaamiseen, jalostamiseen ja kuljetukseen tarvitaan öljyä. Tällöin tynnyrillinen öljyä sisältyy todellisuudessa enemmän kuin tynnyrillisen öljyä, kun epäsuorat virrat otetaan huomioon. Energia-analyysi on prosessi, jossa arvioidaan fossiilisen energian suora ja epäsuora tarve, jotta systeemi voisi tuottaa tietyn hyödykkeen tai palvelun. Tähän asti energia-analyysia on toteutettu IFIAS:n (1974) määrittelemällä tavalla, jossa pääasiallisena tavoitteena on ollut pyrkimys kvantifioida fossiilisten energialähteiden, joita joskus kutsutaan myös kaupalliseksi energiaksi, varantojen saatavuutta ja



käyttöä prosessissa. Tässä yhteydessä Gross Energy Requirement (GER) – menetelmä mittaa kaupallisen energian määrää, joka on tarvittu suorasti ja epäsuorasti hyödykkeen tai palvelun tuottamiseen. Tarkemmin sanottuna se keskittyy polttoaineisiin ja sähköön, lannoitteisiin ja muihin kemikaaleihin sekä koneisiin ja muuhun omaisuuteen, joita on tarvittu prosessin eri vaiheissa. Käytetyt panokset ilmaistaan öljyekvivalentteina. GER ilmaistaan muodossa energiayksikkö per fysikaalinen yksikkö hyödykettä tai palvelua toimitettuna, esimerkiksi MJ per kilogramma terästä.

GER-menetelmä perustuu ajatukseen, että vain fossiilinen energia voi olla niukkaa, ja siksi sen käyttöä prosessissa on tärkeää tarkastella. Uusiutuvat energialähteet ovat rajoittamattomasti saatavilla, ja siksi niitä ei oteta huomioon energiataaseissa (Biondi ym. 1989.) Menetelmä ei siis huomioi ilmaisten luonnonvarojen, kuten pintamaan tai puhtaan veden käyttöä. Myös työvoima ja taloudelliset palvelut jäävät analyysin ulkopuolelle. Uusiutuvat luonnonvarat huomioidaan vain siltä osalta, kun niiden prosessoinnissa on hyödynnetty fossiilisia polttoaineita. Esimerkiksi metsäteollisuudessa puun energia-arvoksi lasketaan sen kaatamiseen, kuljetukseen ja jalostamiseen kulutettu suora ja epäsuora fossiilinen energia. Uusiutumattomien luonnonvarojen, kuten öljyn tai hiilen, energiaintensiteetti lasketaan summana niiden sisältämästä lämpöenergiasta ja niiden prosessoimiseen epäsuorasti käytetystä fossiilisesta energiasta. Energiaintensiteetti siis kuvaa tuotteen tai palvelun elinkaarista fossiilisten energialähteiden kulutusta. GER lasketaan kertomalla panoksen määrä sen energiaintensiteetikertoimella. (Franzese ym. 2009.)

Tässä tutkimuksessa GER-menetelmää on käytetään arvioimaan eri sähköntuotantoteknologioiden ja niiden käyttämien polttoaineiden GER-arvot, jotka kuvaavat sähköntuotannon ja polttoaineisiin sisältyvän suoran ja epäsuoran fossiilisen energian määrää. Tämä on tärkeää, koska myös uusiutuva energia voi epäsuorasti elinkaarensa aikana hyödyntää merkittäviä määriä fossiilisia polttoaineita, jolloin uusiutuvaan energiaan siirtyminen ei välttämättä edistä kestävästä kehitystä halutulla tavalla, jos tavoitteena on vähentää fossiilisten käyttöä.

### 4.3 Emergiasynteesi

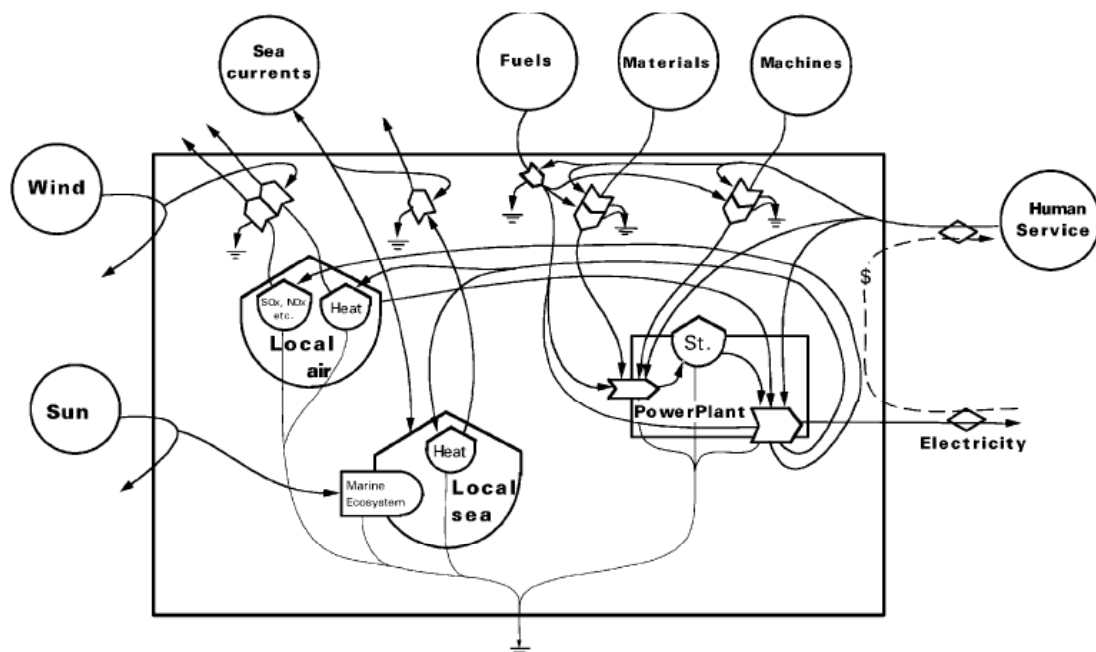
Emergiasynteesi<sup>10</sup> (Odum 1988 ja 1996) on energia-arviointimenetelmä, joka tähtää ympäristöindikaattoreiden laskentaan huomioiden sekä luonnon että talouden resurssit, joita on käytetty ekosysteemeissä ja ihmisen hallinnoimissa prosesseissa (Brown & Ulgiati 1999; Franzese ym. 2009). Emergia (emergy) voidaan ajatella tietyn prosessin tai tuotteen ”energiamuistina”, ja se lasketaan muuttamalla kaikki systeemiä tukevat virrat (energia-, materiaali-, raha- ja

<sup>10</sup> Kattavampi kuvaus emergiateoriasta ja laskentametodista on löydettävissä lähteistä Odum (1988 ja 1996) ja Franzese ym. (2009).

työvoimavirrat) yhteiseksi yksiköksi, aurinkoenergiaksi (seJ). Emergia on siis tarvittava aurinkoenergian määrä, joka vaaditaan tiettyyn energia- tai ainevirtaan tai -varastoon (Odum 1996). Menetelmä huomioi sekä kaupalliset virrat että ei-kaupalliset virrat, kuten sateen, tuulen ja auringonsäteilyn, ja sen avulla voidaan ilmaista resurssien luomiseen tarvittavat "tuotantokustannukset".

Useimmat arvottamismenetelmät perustuvat hyötyyn. Esimerkiksi fossiilisia polttoaineita voidaan arvottaa sen perusteella, paljonko energiaa niistä saadaan poltettaessa, tai paljonko saadusta hyödystä, eli vapautuvasta energiasta, ollaan valmiita maksamaan. Päinvastainen näkökulma arvon antamiseen perustuu siihen, että tarkastellaan, mitä johonkin on tarvinnut investoida ja panostaa ennemmin kuin mitä siitä saadaan. Emergiamenetelmän mukaan arvo on sitä suurempi, mitä enemmän energiaa, aikaa ja materiaaleja on investoitu kyseiseen prosessiin tai tuotteeseen. Tätä voidaan kutsua lahjoittajan (donor-side) näkökulmaksi, kun taas energia- tai taloudellista arvottamista voidaan kuvata käyttäjän tai vastaanottajan (user-side) näkökulmaksi. (Ulgiati&Brown 2003.)

Emergiasynteetin keskeisiä käsitteitä on transformity eli "muuntautuminen" (Heino & Nordlund, 2010), jolla tarkoitetaan tuotteeseen tai prosessiin sitoutuneen energian ja siitä saatavan energian (exergian) suhdetta. Transformity-arvo voidaan määrittellä siten, paljonko aurinkoenergiaa tarvitaan, jotta saadaan tuotettua yksi yksikkö jotain muuta. Samanlaisella tuotteella voi olla hyvinkin erilaiset emergia-arvot riippuen sen läpikäymästä prosessipolusta. Mitä suurempi tuotteen transformity on, sitä enemmän sen tuottamiseen on käytetty ekosysteemin resursseja. Emergiasynteetissä otetaan



KUVIO 23 Sähköntuotannon systemidiagrammi (Lähde: Brown & Ulgiati 2002)

siis huomioon kaikki prosessia tukevat virrat, ja ne muutetaan vertailukelpoisiksi transformity-kertoimien avulla. Biosfäärin prosessien yleisille muuntautumislle löytyy kirjallisuudesta laskettuja arvoja (Odum 1996).

Kuviossa 23 on esitetty sähköntuotannon systeemiagrammi, joka kuvaa sähköntuottamiseen tarvittavia energia-, materiaali- ja rahavirtoja. (Brown&Ulgiati 2002). Kuvioista nähdään, että esimerkiksi sähköntuotannossa yhteiskunta käyttää ympäristön energioita suoraan ja epäsuoraan sekä uusiutuvista energiavirroista että materiaali- ja energiavarastoista, jotka biosfääri on aiemmin tuottanut. Energia-, materiaali- ja rahavirtojen tarkasteleminen voi auttaa ymmärtämään yhteiskunnan ja biosfäärin monimutkaista suhdetta. (Ulgiati&Brown 2003.)

#### 4.4 Hiilidioksidipäästöt

Sähkön tuotantoon käytettävien orgaanisten polttoaineiden, kuten kivihien, öljyn, maakaasun ja turpeen, polttaminen synnyttää päästöjä, joista merkittävimpiä ovat rikin ja typen oksidit, erilaiset hiukkaspäästöt ja metallit, hiilivedyt, radioaktiiviset aineet sekä hiilimonoksidi ja hiilidioksidi. Hiilidioksidipäästöt ovat yksi kasvihuonekaasupäästöistä, jotka edistävät ilmastonmuutosta, minkä vuoksi hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ympäristön kannalta erittäin tärkeää. Tässä tutkimuksessa sähköntuotannon suorat hiilidioksidipäästöt on laskettu kertomalla käytetyn polttoaineen määrä kyseisen polttoaineen ominaispäästökertoimella, joka on ilmaisee CO<sub>2</sub>-päästöt tonneina per megajoule polttoainetta.

$$\text{Suorat CO}_2\text{-päästöt} = \text{polttoaineen ominaispäästökerroin} \left( \text{g CO}_2 / \text{MJ} \right) * \text{polttoaineen määrä (MJ)}$$

Suorat CO<sub>2</sub>-päästöt per MWh sähköä voidaan laskea huomioimalla sähköntuotannon tehokkuus, mikä tarkoittaa sitä, että jotta voidaan tuottaa yksi megawattitunti sähköä, tarvitaan enemmän kuin yksi megawattitunti polttoainetta. Jos tuotantolaitoksen tehokkuus on esimerkiksi 40 prosenttia, polttoainetta tarvitaan yhden megawattitunnin tuottamiseksi 2,5-kertainen määrä. Suorien hiilidioksidipäästöjen lisäksi on kirjallisuudesta (mm. Brown & Ulgiati 2002) otettu arviot sähköntuotantoteknologioiden elinkaaren sekä suorista että epäsuorista hiilidioksidipäästöistä, jotka voivat myös olla merkittäviä.

Tässä tutkimuksessa hiilidioksidipäästöt on arvioitu kahdesta syystä: ensinnäkin halutaan tuoda esille taloudellisen analyysin lisäksi energiantuotannon ympäristönäkökulma, ja toiseksi CO<sub>2</sub>-päästöt lisäävät fossiilisia polttoaineita hyödyntävien tuotantoteknologioiden taloudellisia kustannuksia, kun oletetaan että päästökaupan avulla kompensoidaan päästöjen aiheuttamia haittoja. Päästöt ovat siten yksi tuotannontekijöistä, joita yritys pyrkii optimoimaan. Kaikki orgaaniset polttoaineet tuottavat

hiilidioksidipäästöjä, mutta uusiutuvien energialähteiden, kuten puun ja muiden biomassojen, hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon laskettaessa kansallisia kasvihuonekaasupäästöjä, sillä kyseisten päästöjen oletetaan absorboituvan takaisin luontoon biomassojen kasvaessa uudelleen. Näille päästöille ei myöskään tarvitse ostaa päästöoikeuksia. Tässä työssä myös biomassojen kasvihuonekaasupäästöt on kuitenkin huomioitu.

#### 4.5 Skenaariomenetelmä

Skenaariot ovat ajallisesti peräkkäisten, loogisesti etenevien ja perusteltavissa olevien, mahdollisten tulevaisuudenkuvien sarjoja, joiden avulla voidaan kuvata erilaisia vaihtoehtoisia ja oletettavia tulevaisuuden kehityssuuntauksia (Kamppinen, Kuusi, & Söderlund 2002). Yleisesti skenaarioiden tavoitteena on selvittää eri vaihtoehtojen toteutumismahdollisuuksia ja analysoida kunkin vaihtoehdon vaikutuksia ja syy-yhteyksiä, mutta ne eivät kuitenkaan ole suoranaisia ennusteita siitä, mitä tulee tapahtumaan. Eri skenaarioissa tämän hetkiset havainnot yhdistetään oletuksiin, ideoihin ja näkökulmiin, joiden pohjalta ne rakennetaan. Skenaariot ovat erityisen käyttökelpoisia silloin, kun tulevaisuus on hyvin epävarma tai kun voidaan odottaa, että vallitsevat kehityssuunnat tulevat aiheuttamaan suuria muutoksia tulevaisuudessa. Tulevaisuuden tutkimuksella pyritäänkin usein vaikuttamaan nykyiseen toimintatapaan ja politiikkaan esittämällä jokin parempi vaihtoehto, kuvaamalla todennäköistä kehitystä ja ennakoimalla epäsuotuista kehitystä. (Hoffrén 2006.)

Tässä työssä luotiin skenaarioita Suomen sähköntuotannon tulevaisuudelle. Skenaarioissa eri sähköntuotantotapojen osuuksia kokonaistuotannosta muutettiin, ja oletukset perustuivat tutkimuksiin ja raportteihin, joissa Suomen uusiutuvan energian lisäämispotentiaalia on arvioitu. Kaikkien tuotantoteknologioiden indikaattoreiden arvot laskettiin yhteen, jolloin saatiin samat indikaattorit kansantalouden tasolla. Koska eri skenaarioissa sähkönkokonaistuotannon määrä vaihteli hieman, indikaattoreiden arvot jaettiin kyseisen skenaarion sähköntuotannon määrällä, jolloin indikaattoreista saatiin tuotettua megawattituntia kohden lasketut ja siten vertailukelpoiset arvot. Havainnollistavaa kuviota varten indikaattoreiden arvot normalisoitiin jakamalla jokaisen skenaarion kyseisen indikaattorin arvo skenaarioiden yhteenlasketulla indikaattorin arvolla.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Aineisto

Tutkimusta varten kerättiin kirjallisuudesta (mm. Tarjanne & Kivistö 2008) aineistoa eri sähköntuotantolaitosten kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista vuonna 2008, joiden perusteella tehtiin laskelmia eri sähköntuotantoteknologioiden tuotantokustannuksista. Taloudellisten arvojen lisäksi eri teknologioiden ja polttoaineiden ympäristöllisiä ominaisuuksista kerättiin tietoa hiilidioksidipäästöjen, suoran ja epäsuoran fossiilisen energian kulutuksen sekä emergian (ks. luku 4.3) osalta. Myös biofysikaalisia muuttujia koskevat arviot perustuvat kirjallisuuteen (esim. Odum 1996; Brown & Ulgiati 2002, Buonocore ym. 2010) sekä kirjallisuuden pohjalta tehtyihin omiin laskelmiin. Suomen sähköntuotannon ja -kulutuksen tiedot saatiin Tilastokeskuksen Energiatilastoista (Tilastokeskus 2010). Liitteessä 1 on esitetty työssä käytetty aineisto ja suoritettujen laskelmien tulokset (taulukot 4, 5 ja 6).

Tässä työssä tarkasteltiin seuraavia sähköntuotantolaitoksia: tuuli-, hiili-, turve-, kaasukombi-, ydin-, vesi- ja CHP-voimalaa. Koska kokonaan uuden vesivoiman merkittävä lisärakentaminen on epätodennäköistä ympäristönsuojelullisista syiden takia, tässä työssä ei arvioitu uuden vesivoiman tuotantokustannuksia. Maakaasun kohdalla oletettiin voimalaitokseksi kaasukombilaitos, joka koostui kaasuturbiinista, jätelämpökattilasta ja höyryturbiinista, jotka mahdollistavat korkean sähköntuotannon hyötysuhteen (Tarjanne & Kivistö 2008). Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon (CHP) kohdalla tarkasteltiin yhdyskuntien laitosta, joka tuottaa kaukolämpöä yhdyskunnan käyttöön. Teollisuuden sähkön ja lämmön yhteistuotanto jätettiin analyysin ulkopuolelle, koska teollisuus tuottaa energiaa vain omaan käyttöönsä, ja tuotanto perustuu pitkälti teollisen tuotannon sivutuotteina syntyvän puuperäisen uusiutuvan energian hyödyntämiseen. Sähköntuotannon polttoaineiden osalta öljyä ei huomioitu, koska sen käyttö sähköntuotannossa on vähäistä. Myös erillisessä sähköntuotannossa käytettävät puupolttoaineet ja muut uusiutuvat (biokaasu ja kierrätyspolttoaineiden biohajoava osuus, 16 PJ) jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden allokoinnista eri tuotantoteknologioille ei ollut tietoa.

Polttoaineiden hintatiedot kerättiin monista lähteistä (Tarjanne & Kivistö 2008; Tilastokeskus 2010; Rintala ym. 2007; Pöyry 2007; GreenStream Network 2007). Kuviossa 23 on esitetty raskaan polttoöljyn, kivihiilen, maakaasun ja jyrshinturpeen hintojen kehittymistä. Maakaasun hinta oli talouden taantumaa asti nousussa. Öljyn hintapiikki näkyi hiilen hinnan äkillisenä väliaikaisena nousuna, kun taas kotimaisen turpeen hinta on pysytellyt melko vakaana, noin 10 euron tasossa. Kotimaisen metsähakkeen hinta oli vuonna 2007 vajaassa 13 eurossa per MWh käyttöpaikalle toimitettuja, ja vuoteen 2010 mennessä hinta on noussut yli 18 euroon megawattitunnilta.

Fossiilisten energialähteiden hintojen tulevaa kehitystä voidaan arvioida hintojen aikasarjojen perusteella. Energialähteen hinta sisältää tyypillisesti louhinnan, jalostamisen ja kuljetuksen kustannukset. Reaalihinnat ovat taloudellisen niukkuuden mittari, jolloin lisääntyvä niukkuus nostaa reaalihintoja. Hinnat sisältävät lisäksi odotuksia tulevaisuuden kysynnästä, tarjonnasta, teknologisesta kehityksestä ja kustannuksista. Toisaalta verot, tukiaiset, säännöt ja markkinavoimat vääristävät hintoja, eivätkä hinnat välttämättä huomioi hyödykkeen ulkoishaittoja, kuten vakavia ympäristövaikutuksia, jotka vaativat myöhemmin korjaamista. Hinnat myös perustuvat epätäydelliseen informaatioon.

Skenaarioiden luomisessa hyödynnettiin tutkimuksia ja raportteja, joissa Suomen uusiutuvan energian potentiaalia on arvioitu. Näitä olivat esimerkiksi Savolaisen, Similän ja Syrin (2008) Teknologiapolut 2050 -raportti, jossa esitellään teknologisia mahdollisuuksia kasvihuonekaasupäästöjen voimakkaiden rajoitustavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa, Rintalan työryhmän (2007) raportti, jossa arvioidaan biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa, Holttisen (2008) arviot tuulivoiman potentiaalista Suomessa ja Pöyryn (2007) selvitys tuulivoimatavoitteiden toteutumisenäkymistä Suomessa. Lisäksi GreenStream Networkin (2007) raportissa on koottu aiemmista tutkimuksista uusiutuvan energian mahdollisuuksia ja kustannuksia.

Rintalan ym. (2007) mukaan uusiutuvan energian suurimmat teknistaloudelliset mahdollisuudet lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä ovat bioenergiassa. Vesivoiman lisäysmahdollisuudet ovat hyvin rajalliset, tuulivoiman rakentaminen on tähän asti edellyttänyt tukea ja aurinkolämpö ja -sähkö ovat kannattavia vain tietyissä käyttökohteissa. Holttisen (2008) mukaan tuulivoiman käytön laajamittainen lisääminen on Suomessa teknisesti ja maankäytöllisesti mahdollista. Suomen sähköntarpeesta voitaisiin vuonna 2020 tuottaa tuulivoimalla jopa 10 prosenttia, kun vuoden 2009 osuus oli vain 0,3 prosenttia. Vajaa kymmenen prosenttia Suomen nykyisestä sähkön kulutuksesta, eli noin 8 TWh, voitaisiin tuottaa rakentamalla noin 3500 MW tuulivoimakapasiteettia. Tämä merkitsisi laitoskokojen kehityksestä riippuen 1500–2500 tuulivoimalaitosta.

Taulukossa 1 on esitetty eräät arviot uusiutuvan energian ja turpeen lisäysmahdollisuudet Suomessa. Tässä työssä oletetaan, että metsähakkeen, eli hakkuutähteiden, rankojen ja kantojen, käyttöä voidaan lisätä maksimissaan 10

TWh päätehakkuilta ja 5 TWh harvennuksilta, ja jyrshinturpeen hyödyntämistä voidaan lisätä 10 TWh (Rintala ym. 2007). Tuulivoiman enimmäismääräksi oletetaan 20 TWh (Teknologiapolut 2050, 2008). Edellä mainittuja oletuksia ja ydinvoiman lisärakentamisen mahdollisuutta hyödyntäen luotiin kolme skenaariota Suomen sähköntuotannon tulevaisuudelle vuosille 2025 ja 2050 (taulukko 2).

TAULUKKO 2 Uusiutuvan energian ja turpeen lisäysmahdollisuudet, TWh

	Maksimi lisäysmahdollisuus	Lähde
Metsähake	10 TWh (päätehakkuilta)	Rintala ym. 2007
	5 TWh (harvennuksilta)	Rintala ym. 2007
Jyrshinturpe	10 TWh	Rintala ym. 2007
Tuulivoima	8 TWh (vuosi 2020)	Holtinen 2008
	20 TWh (vuosi 2050)	Teknologiapolut 2050, 2008

## 5.2 Sähköntuotannon taloudelliset ja biofysikaaliset kustannukset

Tässä tutkimuksessa laskettiin taloudellisia ja ympäristöindikaattoreita seuraaville sähköntuotantoteknologioille: tuuli-, hiili-, kaasukombi-, turve-, ydin- ja vesivoimalle sekä yhdyskuntien yhdistetylle sähkön ja lämmöntuotannolle (CHP). Liitteessä 1 olevassa taulukossa 3 on esitetty eri voimalaitosteknologioihin liittyvät vuoden 2008 lähdetiedot ja oletukset, joita käytettiin indikaattoreiden laskentaan. Laskelmissa tarkasteltiin keskimääräisiä sähköntuotantolaitoksia, joille investoinnin reaalikorko oli 5 prosenttia ja päästöoikeuden hinta 25 €/t CO<sub>2</sub>. Sähköteho kuvaa laitoksen kokoa ja tehokkuus ilmaisee energiapanoksen ja -tuotoksen suhteen. Vertailtavuuden takia tarkastelluille tuotantoteknologioille, lukuun ottamatta tuulivoimaa, oletettiin 8000 tunnin huippukäyttöaika vuodessa. Tuulivoiman huippukäyttöajaksi oletettiin 2000 tuntia vuodessa. (taulukko 4)

Liitteen 1 taulukossa 5 on esitetty sähköntuotantoteknologioiden taloudelliset ja ympäristölliset indikaattorit tuotettua megawattituntia kohden. Lasketut indikaattorit kuvaavat eri tuotantoteknologioiden taloudellisia ominaisuuksia (pääomakustannukset, käyttö- ja kunnossapitokustannukset ja päästöoikeuden kustannukset), fossiilisten energialähteiden suoraa ja epäsuoraa kulutusta (GER-kustannus), ympäristövaikutuksia (CO<sub>2</sub>-päästöt) ja luonnon antamaa panosta (emergiakustannus). Eri teknologioiden tuotantokustannuksia on eritelty tarkemmin luvussa 5.3.

Voimalaitostyyppien ominaisuuksia on vertailtu valittujen indikaattoreiden osalta kuviossa 24, jossa arvot on lisäksi normalisoitu. Turve- ja hiilivoiman GER-kustannus oli korkein (noin 4,18 and 4,00 J/J<sub>e</sub>) kuten myös kyseisten sähköntuotantotapojen hiilidioksidipäästöt (1.08 ja 1.11 t CO<sub>2</sub>/MWh),

mikä myös teki niiden päästökauppaan liittyvistä kustannuksista (24 ja 20 €/MWh päästöoikeuden hinnalla 25 €/t CO<sub>2</sub>) ja siten koko tuotantokustannuksista (74 ja 68 €/MWh) korkeat.

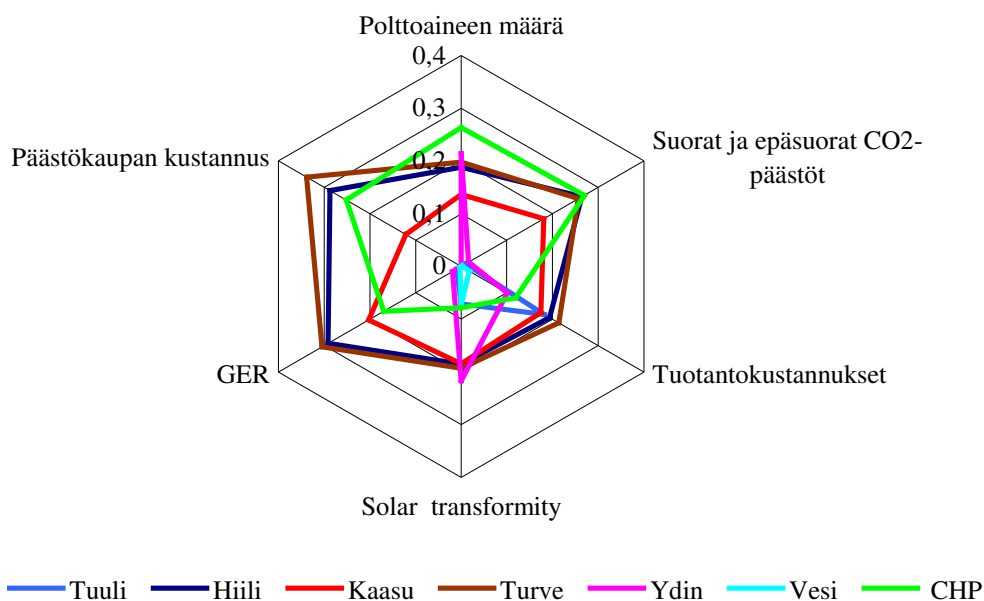
Vesi- ja tuulisähkön alueet ovat kuviossa 24 pienet, koska tuotantoon ei käytetä fossiilisia polttoaineita, mikä näkyi pienenä GER-kustannuksena ja matalina hiilidioksidipäästöinä. Vesivoiman tuotantokustannukset olivat erittäin matalat, 6 €/MWh, koska vanhojen vesivoimalaitosten pääomakustannukset on jo kuoletettu, ja enää maksetaan vain käyttö- ja huoltokuluja. Tuulivoimalla suuret pääomakustannukset per MWh nostivat kokonaistuotantokustannukset noin 63 euroon megawattitunnilta.

Kun kaukolämmön hinta, 51 €/MWh, huomioitiin, CHP-laitosten tuotantokustannukset olivat matalat, noin 41 €/MWh. CHP-tuotannon hiilidioksidipäästöt olivat kuitenkin korkeat, sillä yhdyskuntien CHP-laitoksissa oletettiin käytettävän polttoaineina kaasua 37 %, puupolttoaineita 24 %, turvetta 20 % ja hiiltä 19 %. Koska päästökaupassa huomioidaan kuitenkin vain fossiilisten polttoaineiden ja turpeen suorat päästöt, puun päästöille ei tullut lisäkustannuksia.

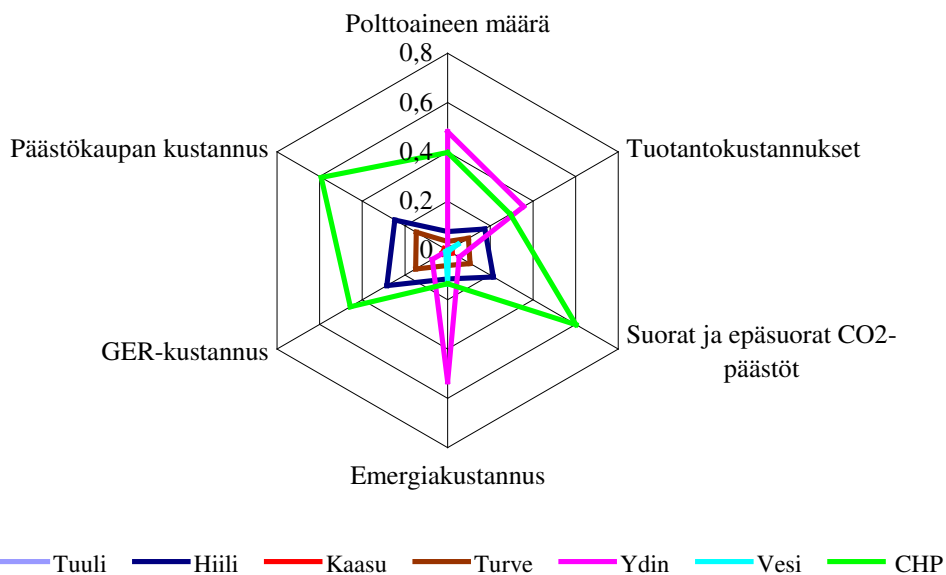
Modernin 1500 megawatin ydinvoimalaitoksen tuotantokustannuksiksi oletettiin 35 €/MWh (Tarjanne & Kivistö 2008), joka oli erittäin kilpailukykyinen kustannus verrattuna muihin voimalaitostyyppeihin. Ydinvoiman hiilidioksidipäästöt ja GER-kustannus olivat myös matalat, mutta solar transformity -arvo (energia per yksikkö energiaa) oli tarkastelluista teknologioista korkein ( $3,36 \cdot 10^5$  seJ/J). Myös turve-, hiili- ja kaasuvoimalaitosten solar transformity -arvot (noin  $2,99 \cdot 10^5$  seJ/J,  $2,87 \cdot 10^5$  seJ/J ja  $2,86 \cdot 10^5$  seJ/J) olivat korkeat verrattuina tuuli- ja vesivoimaan. Buonocoren ym. (2010) mukaan myös CHP-laitos, joka käyttää pääosin puupolttoaineita, erityisesti pajua, ja johon on liitetty jätevesien käsittely, voi tuottaa sähköä suhteellisen alhaisella solar transformity -arvolla  $1,22 \cdot 10^5$  seJ/J.

Kuviossa 25 havainnollistetaan eri voimalaitosten osuutta tarkasteltuihin indikaattoreihin kansantalouden tasolla. Alueen kokoon vaikuttivat sekä tuotettu sähkön määrä että teknologioille ominaiset indikaattoreiden arvot. Kansantalouden tasolla yhdyskuntien CHP-laitokset ja ydinvoimalaitokset muodostivat suurimman taloudellisen ja ympäristöllisen kuormituksen (kuvio 25). Sitä vastoin esimerkiksi vesivoiman osuus kansantalouden sähkön kustannuksista ja ympäristökuormituksesta oli erittäin pieni.





KUVIO 24 Taloudellisten ja ympäristöindikaattoreiden vertailu eri sähköntuotantoteknologioille per MWh



KUVIO 25 Taloudellisten ja ympäristöindikaattoreiden vertailu kansantalouden tasolla. Eri tuotantoteknologioiden alueet kuvaavat kyseisen teknologian aiheuttamaa kuormitusta koko sähköntuotannossa.

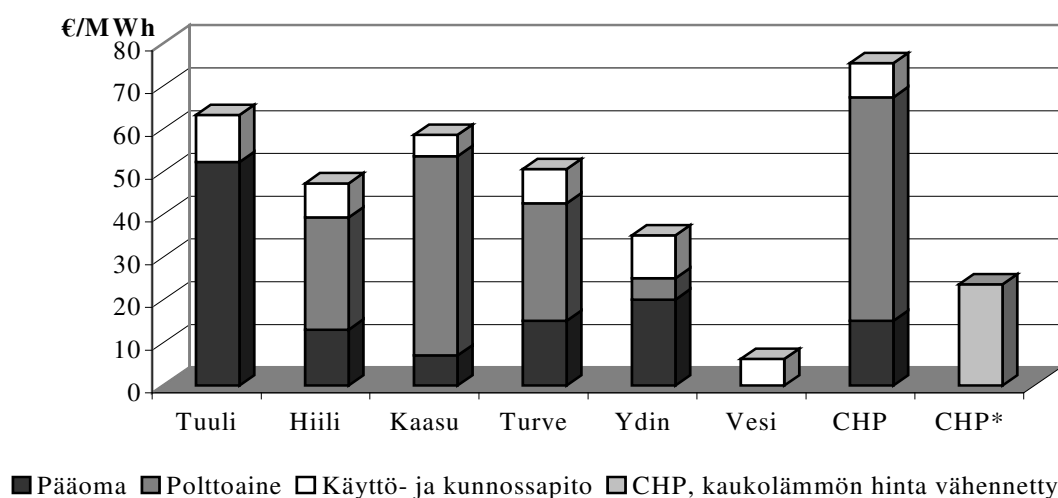
## 5.3 Tuotantokustannusten tarkempi taloudellinen analyysi

### 5.3.1 Voimalaitosten tuotantokustannukset

Tässä työssä tarkasteltiin hiili-, kaasu-, turve-, tuuli-, vesi-, ydin- ja CHP-voimalan sähköntuotantokustannuksia vuonna 2008. Tavoitteena oli estimoida kansallisen tason tämän hetken ja tulevaisuuden kustannuksia, ja siksi lähtötiedoissa pyrittiin käyttämään keskimääräisten voimalaitosten arvoja. CHP-voimalan kohdalla tarkasteltiin yhdyskuntien laitosta, joka voi käyttää polttoaineenaan puupolttoaineita, turvetta, kivihiiltä ja maakaasua. Perustapauksessa CHP-voimalaitoksen polttoaineyhdistelmä oli seuraava: kaasua 37 prosenttia, kiinteitä puupolttoaineita 24 prosenttia, turvetta 20 prosenttia ja hiiltä 19 prosenttia, mikä on arvio koko Suomen yhdyskuntien CHP-laitoksissa käytettyjen polttoaineiden suhteesta vuonna 2008. Todellisuudessa CHP-laitokset käyttävät joko yhtä tai useampaa kyseisistä polttoaineista ja eri suhteissa.

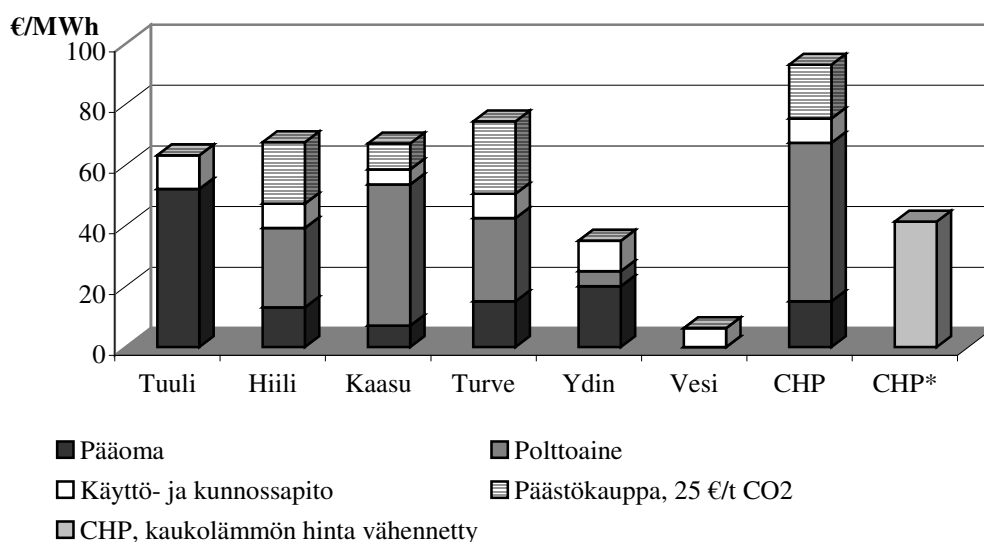
Sähköntuotantoteknologioiden tuotantokustannukset riippuivat pääoma-, polttoaine- ja käyttö- ja kunnossapitokustannuksista sekä mahdollisen päästökaupan tuomista lisäkustannuksista hiilidioksidipäästöille. Pääomakustannuksiin vaikuttivat voimalaitoksen reaalikorko, taloudellinen käyttöikä ja investointikustannus vuosituotantoa kohden. Polttoainekustannukset riippuivat polttoaineen hinnasta ja laitoksen tehokkuudesta, sillä mitä tehokkaampi laitos on, sitä vähemmän se kuluttaa polttoainetta suhteessa tuotettuun sähkön määrään. Päästökaupan kustannukset muuttuivat päästöoikeuden hinnan ja tuotantotavan ominaispäästöjen mukaan.

Kuviossa 26 on esitetty eri voimalaitostyyppien sähköntuotantokustannukset ilman päästökauppaa. Vanhan vesivoiman tuotantokustannukset olivat erittäin matalat, noin kuusi euroa megawattituntia kohden, koska kyseisten vesivoimalaitosten pääomakustannukset on jo kuoletettu ja enää maksetaan vain käyttö- ja huoltokuluja. Vesivoiman lisärakentamisen oletettiin olevan epätodennäköistä ympäristönsuojelun takia. Ilman päästökauppaa ydinvoiman tuotantokustannukset olivat 35 €/MWh, hiilivoiman 47 €/MWh, turvevoiman 51 €/MWh, kaasukombivoiman 59 €/MWh, tuulivoiman 63 €/MWh ja CHP-voimalan 75 €/MWh. Koska CHP-voimalaitos tuottaa myös lämpöä, kaikkia tuotantokustannuksia ei tule allokoida sähköntuotannolle. Kun CHP-laitoksen kohdalla huomioitiin kaukolämmön markkinahinta (51 €/MWh), tuotantokustannukset laskivat 24 euroon per MWh, jolloin CHP-sähköstä tuli erittäin kilpailukykyistä. Edullisen vastapainesähkön (CHP) tuotantoa rajoittaa kuitenkin kaukolämmön kysyntä (Neittaanmäki & Schroderus 2010).



KUVIO 26 Eri voimalaitosteknologioiden sähköntuotantokustannukset (€/MWh) ilman päästökauppaa (\*kaukolämmön hinta on vähennetty CHP:n tuotantokustannuksista)

Kuviossa 30 havainnollistetaan eri tuotantoteknologioiden sähköntuotantokustannuksia päästöoikeuden hinnalla 25 €/t CO<sub>2</sub>. Eniten päästökauppa vaikutti turvevoimalan kustannuksiin, sillä turpeen hiilidioksidin ominaispäästöt ovat korkeimmat. Tuulivoimasta tuli tuotantokustannuksiltaan kilpailukykyistä verrattuna lauhdetuotantoon, mutta ydinvoima ja CHP olivat silti edullisempia tapoja tuottaa sähköä. Päästökaupan vaikutus CHP-laitoksen kustannuksiin muuttuu kuitenkin sen mukaan, mitä polttoainetta ne käyttävät.



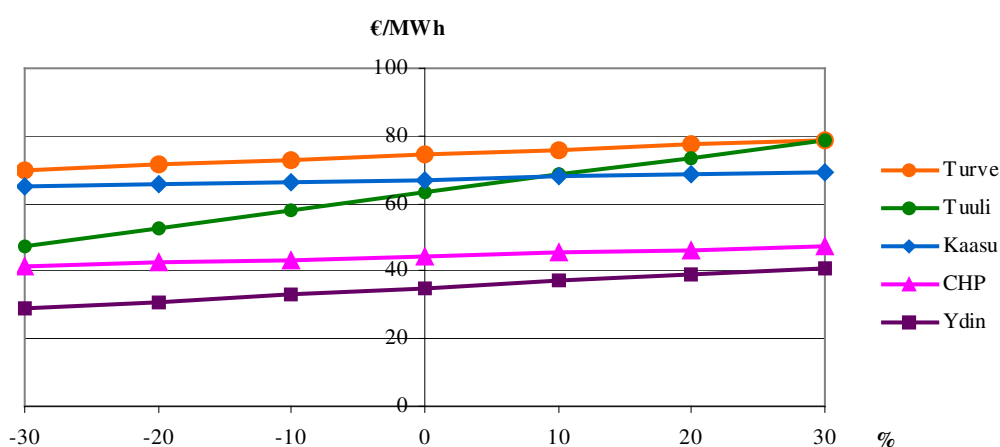
KUVIO 27 Sähköntuotantoteknologioiden tuotantokustannukset, kun päästöoikeuden hinta on 25 €/t CO<sub>2</sub> (\*kaukolämmön hinta on vähennetty CHP:n sähköntuotantokustannuksista)

Kun käytettiin taulukoissa 4 ja 5 ja 6 (liite 1) esitettyjä lähtöarvoja, Suomen sähköntuotannon vuoden 2008 suorat kokonaistaloudelliset kustannukset olivat noin 3,0 miljardia euroa. Kyseinen luku on todellisuutta pienempi, koska tarkastelun ulkopuolelle jätettiin teollisuuden CHP-tuotanto (11 TWh) ja erillinen sähköntuotanto, jossa polttoaineina käytettiin puupolttoaineita ja muita uusiutuvia (9,8 TWh). Ilman päästökauppaa kokonaiskustannukset olivat 2,5 mrd. euroa, joten voidaan ajatella että päästöoikeuden hinnalla 25 euroa ja vuoden 2008 energiantuotantoyhdistelmällä, ilmastonmuutoksen hillitsemisen suorat taloudelliset kustannukset olisivat olleet noin 0,5 miljardia euroa vuodessa.

### 5.3.2 Herkkyysanalyysi tuotantoteknologioiden kustannuksille

Kustannuslaskelmat perustuvat likimääräisiin ja aina jossain määrin epävarmoinhin oletuksiin, minkä vuoksi tuotantokustannusten eri muuttujille, investointikustannuksille, korkotasolle, polttoaineen hinnalle, päästöoikeuden hinnalle ja huippukäyttöajalle, tehtiin herkkyysanalyysi. Perustapauksena käytettiin tuotantokustannuksia, joissa päästöoikeuden hinta oli 25 euroa/t CO<sub>2</sub>. CHP-laitoksen kokonaistuotantokustannuksista vähennettiin kaukolämmön hinta, jolloin saatiin arvio pelkälle sähköntuotannolle koituvista kustannuksista.

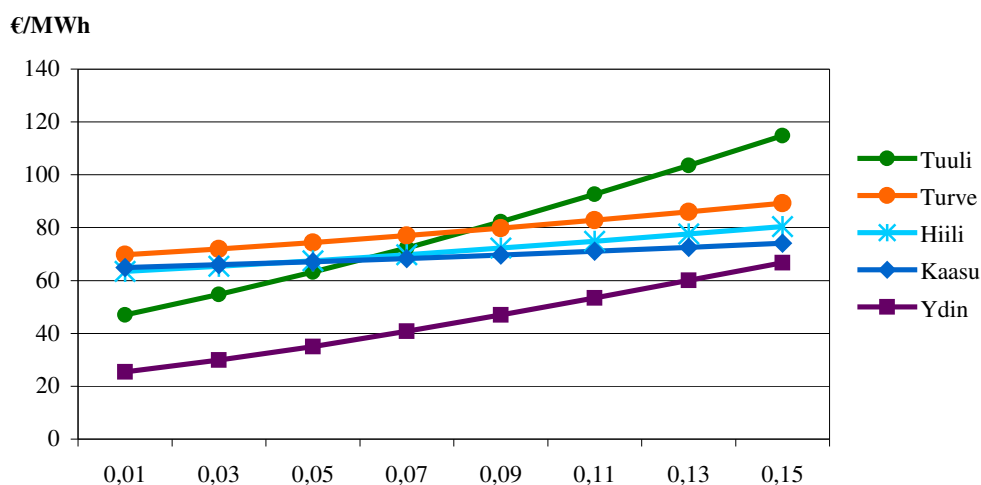
Kuviossa 28 on esitetty graafisesti investointikustannusten muutoksen vaikutus turve-, tuuli-, kaasu-, CHP- ja ydinsähkön tuotantokustannuksiin. Investointikustannusten muutos vaikutti eniten tuulivoiman kustannuksiin, mikä johtuu siitä, että tuulivoiman kustannukset muodostuvat lähinnä investointi- ja huoltokustannuksista. Esimerkiksi 20 prosentin lasku



KUVIO 28 Investointikustannusten muutoksen vaikutus tuotantokustannuksiin, €/MWh

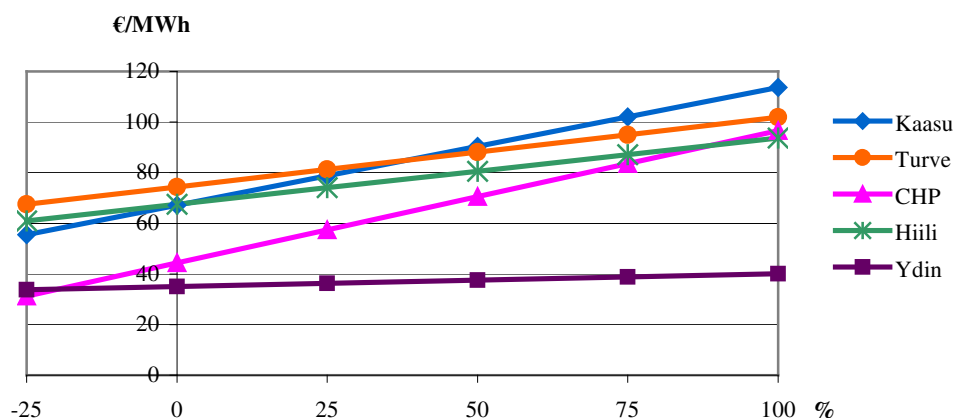
investointikustannuksissa alensi tuulivoiman tuotantokustannuksia peräti noin 17 prosenttia. Investointikustannusten muutos vaikutti merkittävästi myös ydinvoiman kustannuksiin, koska ydinvoima on pääomavaltainen tuotantomuoto. Huolimatta siitä että ydinvoiman investointikustannukset kasvaisivat jopa 30 prosenttia, sen tuotantokustannukset jäisivät silti muita alhaisemmiksi.

Korkotason muutosten vaikutusta tuuli-, turve-, hiili-, kaasu- ja ydinvoiman tuotantokustannuksiin on kuvattu kuviossa 29. Korkotason muutokset vaikuttivat eniten pääomavaltaisiin tuotantotapoihin eli tuulivoimaan ja ydinvoimaan. Lauhdevoiman tuotannossa vaikutukset eivät olleet kovin suuria.



KUVIO 29 Korkotason muutosten vaikutus tuotantokustannuksiin, €/MWh

Kuviossa 30 on esitetty graafisesti polttoaineen hinnan muutosten vaikutus kaasu-, turve-, hiili-, CHP- ja ydinvoiman tuotantokustannuksiin. Ydinvoiman kohdalla polttoaine muodostaa vain pienen osan kokonaiskustannuksista, joten

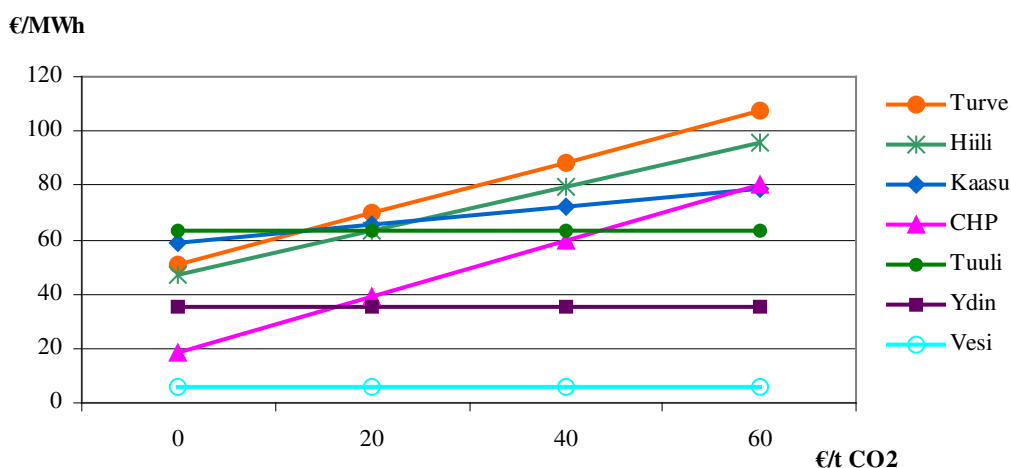


KUVIO 30 Polttoainekustannusten muutoksen vaikutus tuotantokustannuksiin, €/MWh

polttoaineen hinnan nousu ei nostanut tuotantokustannuksia paljoakaan. Lauhdevoiman kohdalla polttoainekustannukset muodostivat merkittävän osan kokonaiskustannuksista, mistä johtuen hinnan nousulla voi olla merkittävä vaikutus kilpailukykyyn. CHP-laitoksen kohdalla vaikutukset riippuvat luonnollisesti siitä, mitä polttoaineita siinä käytetään ja minkä polttoaineen hinta nousee.

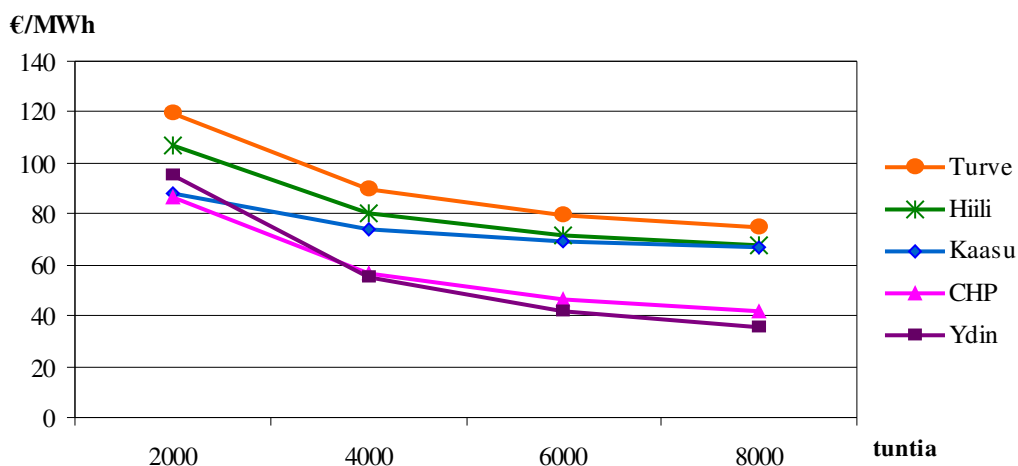
Kuviossa 31 on kuvattu päästöoikeuden hinnan vaikutusta sähköntuotantoteknologioiden kustannuksiin. Koska vesivoimalla, tuulella ja ydinvoimalla ei ole suoria hiilidioksidipäästöjä, päästökauppa ei nostanut niiden tuotantokustannuksia. Myöskään uusiutuvan energian, kuten puun, hiilidioksidipäästöjä ei päästökaupassa huomioida, joten päästökauppa lisäsi vain hiilellä, öljyllä, maakaasulla ja turpeella tuotetun sähkön tuotantokustannuksia.

Ilman päästökauppaa tuulivoima oli kallein ja vanha vesivoima edullisin tuotantotapa. Jo 20 euron päästöoikeuksilla turvevoimala muuttui kalleimmaksi tuotantoteknologiaksi. CHP-laitoksen kustannusvaikutus riippui sen käyttämästä polttoaineesta. Jos CHP-laitos polttaisi vain uusiutuvaa energiaa, sen tuotantokustannukset eivät nousisi ollenkaan. Päästöoikeuden hinnalla 60 euroa turpeella tuotettu sähkö oli kalleinta, yli sata euroa per MWh, kun se ilman päästökauppaa oli vain 47 euroa. Hiilellä tuotettu sähkö oli toiseksi kalleinta, hieman alle 100 euroa per MWh, ja kaasu ja CHP-tuotanto olivat noin 80 euroa per MWh. Tuulivoima oli päästöoikeuden hinnan ollessa 60 euroa jo hyvin kilpailukykyistä. Ydinvoiman kustannukset ovat kuitenkin huomattavasti matalammat, 35 €/MWh.



KUVIO 31 Päästöoikeuden hinnan vaikutus sähkön tuotantokustannuksiin, €/MWh  
Huom. CHP:n kustannuksista on vähennetty kaukolämmön hinta

Huippukäyttöajan muutosten vaikutuksia on kuvattu kuviossa 32. Alle 2000 tunnin huippukäyttöajalla kaasukombilaitos oli edullisin vaihtoehto sähköntuotantoon. Jos tehoa tarvittaisiin yli 6000 tuntia, olisi ydinvoima edullisin, sillä pääomavaltaisen ydinvoiman kustannukset alenivat jyrkimmin käyttöajan pidentyessä.



KUVIO 32 Eri voimalaitostyyppien tuotantokustannukset huippukäyttöajan funktiona

## 5.4 Sähköntuotanto tulevaisuuden Suomessa

Taulukossa 3 on esitetty tässä työssä luotujen skenaarioiden oletukset eri sähköntuotantoteknologioiden käytölle. Skenaarioissa oletettiin, että Suomen sähkönkysyntä pysyy vakiona, mihin voidaan pyrkiä energiatehokkuutta parantamalla tai toisaalta jos Suomen toimialarakenne muuttuisi raskaasta energiaintensiivisestä teollisuudesta kohti informaatioteknologia- ja palvelukeskeisempää toimialarakennetta. Lisäksi sähkön nettotuontia pyrittiin skenaarioissa mahdollisuuksien mukaan vähentämään. Vesivoiman ja yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon (CHP) oletettiin pysyvän vakaina, koska ympäristönsuojelu estää uuden vesivoiman rakentamista ja kaukolämmön kysyntä rajoittaa edullisen vastapainesähkön (CHP) tuotantoa. CHP:ssä hyödynnettävien polttoaineiden suhdetta kuitenkin muutettiin lisäämällä puupolttoaineiden ja turpeen käyttöä ja vähentämällä hiilen ja kaasun käyttöä. Fossiilista energiaa korvattiin skenaarioissa ei-fossiilisella energialla, eli biomassalla, tuulivoimalla ja ydinvoimalla.

Skenaario 1 perustui ydinvoiman merkittävälle lisäämiselle: Vuodelle 2025 oletettiin, että vanhat ydinvoimalaitokset (Olkiluoto 1 ja 2 sekä Loviisan reaktorit) ovat yhä käytössä ja Olkiluoto 3 on valmistunut. Vuonna 2050

Olkiluoto 3:n lisäksi olisi rakennettu kaksi uutta samankokoista ydinvoimalaitosta, jotka tuottaisivat sähköä yhteensä 39 TWh. Skenaariossa 1 oletettiin lisäksi tuulivoiman ja puupolttoaineiden kohtuullinen kasvu, jolloin ydinvoima ja uusiutuva energia korvaisivat hiili-, kaasu- ja turvevoimat.

TAULUKKO 3 Skenaarioissa oletetut sähköntuotannon määrät eri teknologioille, TWh

		Netto-															
	Vuosi	Tuuli	Läh.	Hiili	Läh.	Kaasu	Läh.	Turve	Läh.	Ydin	Läh.	Vesi	Läh.	CHP	Läh.	tuonti	Yht.
<b>Perusvuosi</b>	2008	0,3	[a]	5,6	[a]	0,8	[a]	2,8	[a]	22,1	[a]	16,9	[a]	15,4	[a]	12,8	76,6
<b>Skenaario 1</b>	2025	0,5	[f]	4,5	[f]	0,8	[f]	2,8	[f]	35,1	[h]	16,9	[f]	15,4	[f]	0	76,0
	2050	5,0	[f]	0	[f]	0	[f]	0	[f]	39,0	[j]	16,9	[f]	15,4	[f]	0	76,3
<b>Skenaario 2</b>	2025	6,2	[c]	0	[f]	0	[f]	2,8	[f]	35,1	[h]	16,9	[f]	15,4	[f]	0	76,4
	2050	20,0	[d]	0	[f]	0	[f]	5,7	[f]	13,0	[g]	16,9	[f]	15,4	[f]	5,4	76,4
<b>Skenaario 3</b>	2025	8,0	[b]	0	[f]	0	[f]	1,4	[f]	35,1	[h]	16,9	[f]	15,4	[f]	0	76,8
	2050	18,0	[e]	0	[f]	0	[f]	0	[f]	26,0	[i]	16,9	[f]	15,4	[f]	0	76,3

[a] Tilastokeskus [f] Oma oletus  
 [b] Holttinen, 2008 [g] Vain Olkiluoto 3  
 [c] Oma arvio perustuen Holttiseen, 2008 [h] Olkiluoto 3 ja neljä vanhaa ydinvoimalaa  
 [d] Teknologiapolut 2050, 2008 [i] Olkiluoto 3 ja yksi uusi ydinvoimala  
 [e] Oma arvio perustuen Teknologiapolut 2050, 2008 [j] Olkiluoto 3 ja kaksi uutta ydinvoimalaa

Skenaario 2 rakentui uusiutuvan energian, eli tuulivoiman ja puupolttoaineiden, merkittävälle lisäämiselle. Tuulivoiman oletettiin tuottavan 8 TWh sähköä vuonna 2025 ja 20 TWh vuonna 2050. Vuonna 2025 vanhat ydinvoimalat ja Olkiluoto 3 olisivat toiminnassa, mutta vuonna 2050 enää Olkiluoto 3 tuottaisi sähköä. Puupolttoaineiden käyttöä lisättiin CHP-laitoksissa vuoden 2008 tasosta 7 TWh vuoteen 2025 ja 15 TWh vuoteen 2050 mennessä. Samalla korvattiin hiilen ja kaasun käyttöä CHP-laitoksissa, jolloin CHP-laitosten tuottama sähkön määrä pysyi vakiona. Hiili- ja kaasuvoimaloiden käytöstä luovuttaisiin, mutta turvevoiman tuotanto säilyisi entisellään vuoteen 2025. Vuonna 2050 ydinvoimalla tuotettaisiin huomattavasti vähemmän sähköä, ja ydinvoiman tilanne oletettiin turvevoimalaitosten sähköntuotannon kaksinkertaistuminen. Turpeen käytön lisääminen skenaariossa 2 perustui siihen, että se on kotimainen energialähde ja hitaasti uusiutuva. Skenaariossa 2 uusiutuvalla energialla ja turpeella ei pystytty korvaamaan kaikkea sähköntuotantoa, joten sähkön nettotuonnin osuudeksi jäi noin 5 TWh, mikä on kuitenkin alle puolet vuoden 2008 sähkön nettotuonnista.

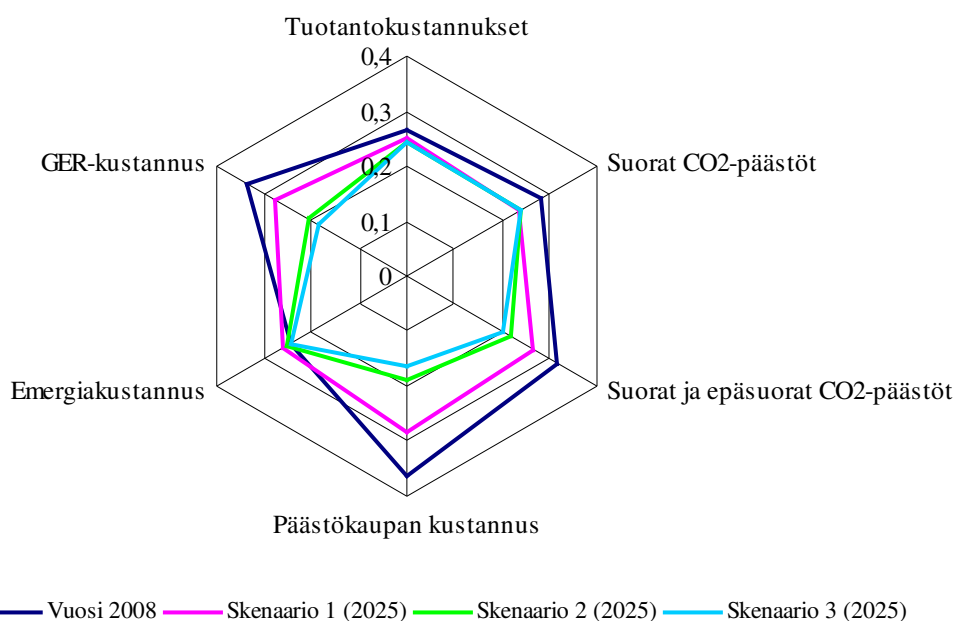
Skenaario 3 perustui sekä uusiutuvan energian että ydinvoiman käytön lisäämiseen, jolloin lähes kaikki hiili ja kaasu saatiin korvattua ja myös turpeen kokonaiskäyttö väheni, vaikka se lisääntyikin CHP-laitoksissa. Kaikissa skenaarioissa oletettiin, että vesivoiman osuus pysyisi vakiona, koska täysin uuden vesivoiman rakentaminen on epätodennäköistä ympäristösyistä johtuen.



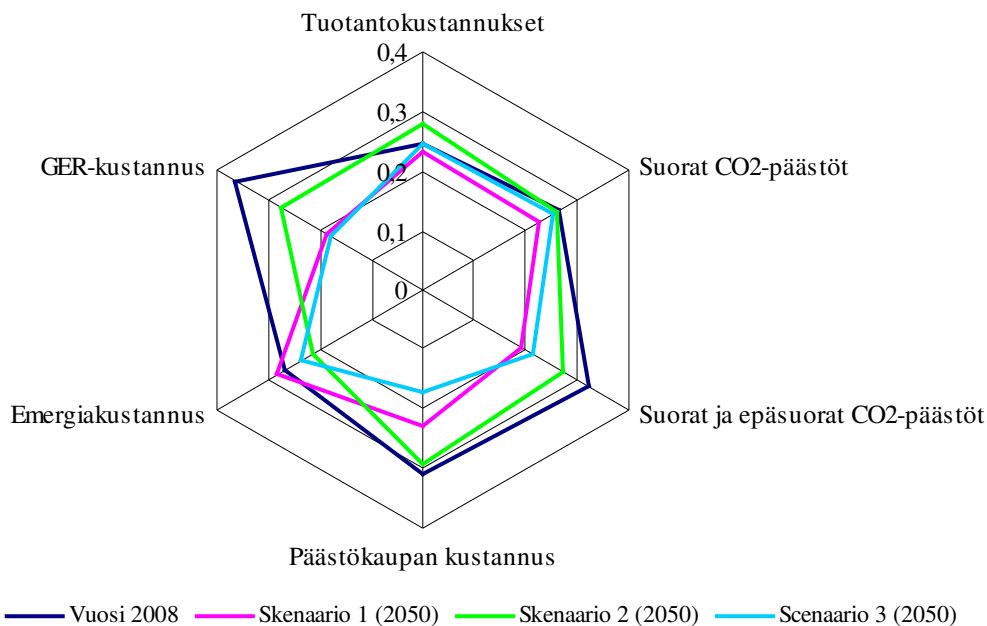
Kuvioissa 33 ja 34 on kuvattu Skenaariot 1,2 ja 3 valittujen indikaattoreiden osalta. Kuvioiden tarkoituksena on vertailla eri skenaarioiden ja referenssivuoden 2008 taloudellisia ja ympäristöindikaattoreita koko kansantalouden tasolla. Kuvio 33 osoittaa, että vuonna 2025 Skenaarioissa 2 ja 3 käytetty energiantuotantoyhdistelmä loi pienemmän taloudellisen ja ympäristöllisen kuormituksen kuin Skenaario 1 ja referenssivuosi 2008. Tämä johtui siitä, että kaikissa skenaarioissa ydinvoiman määrä on sama, mutta Skenaarioissa 1 ja 2 fossiilista energiaan korvattiin tuulivoimalla ja puupolttoaineilla.

Kuviosta 34 nähdään, että vuoden 2050 oletuksilla Skenaarion 1 CO<sub>2</sub>-päästöt ja niihin liittyvät kustannukset olivat matalat, mikä johtui siitä että fossiilisia polttoaineita korvattiin merkittävällä määrällä ydinenergiaa. Skenaarion 1 energiakustannus eli luonnon antama panos (global environmental support) oli kuitenkin suuri. Turpeen laaja käyttö vaikutti Skenaarion 2 tuloksiin negatiivisesti, koska turpeen päästöt ja niihin liittyvät kustannukset ja sitä kautta myös tuotantokustannukset olivat korkeat. Skenaario 3 muodosti pienimmän alueen, mihin syinä olivat fossiilisten polttoaineiden sekä turpeen kulutuksen merkittävä vähentäminen lisäämällä sekä uusiutuvaa energiaa että ydinvoimaa.

Eri skenaarioiden suorat CO<sub>2</sub>-päästöt, joissa myös metsähakkeen päästöt oli huomioitu, olivat huomattavasti yhdenmukaisemmat kuin skenaarioiden suorat ja epäsuorat päästöt. Ilman uusiutuvan energian päästöjä, referenssivuoden 2008 päästöt olivat  $1,85 \cdot 10^7$  tonnia CO<sub>2</sub>, kun taas Skenaarioiden 1,2 ja 3 päästöt olivat vuoden 2050 tarkastelussa  $1,01 \cdot 10^7$ ,  $1,22 \cdot 10^7$  ja  $7,66 \cdot 10^6$  tonnia CO<sub>2</sub>. Skenaarion 3 päästöt laskivat eniten vuoteen 2008 verrattuna, noin 60 prosenttia.



KUVIO 33 Suomen sähköntuotannon skenaarioiden vertailu, vuosi 2025



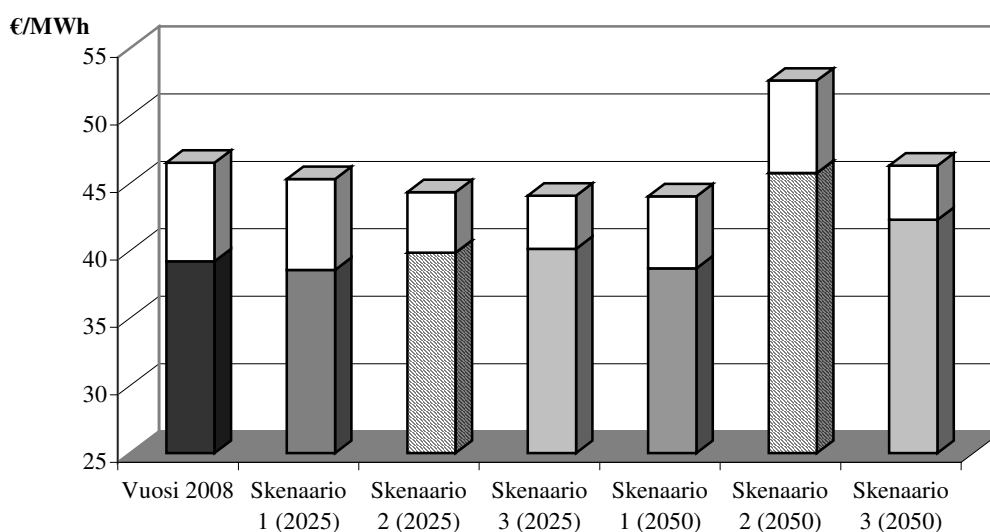
KUVIO 34 Suomen sähköntuotannon skenaarioiden vertailu, vuosi 2050

Taulukkojen 3, 4 ja 5 oletuksilla Skenaarioiden 1, 2 ja 3 taloudelliset kustannukset vuodelle 2025 olivat ilman päästökauppaa 39, 40 ja 40 € per MWh, ja 45, 44 ja 44 €/MWh, kun päästöoikeuden hinnaksi oletettiin 30 euroa/t CO<sub>2</sub>. Vuoden 2050 kustannukset olivat ilman päästökauppaa 39, 46 ja 42 €/MWh, ja päästökaupan arvolla 40 €/t CO<sub>2</sub>, 44, 53, 46 €/MWh. Koko kansantalouden suorat kustannukset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, koska eri skenaarioissa sähköntuotannon kokonaismäärä oli hieman erilainen.

Vuoden 2008 tapauksessa päästöoikeuden hinnaksi oletettiin 25 €/t CO<sub>2</sub> ja skenaarioissa vuoden 2025 päästöoikeuden hinnaksi siis 30 € ja vuoden 2050 hinnaksi 40 €/t CO<sub>2</sub>. Kun kaikki muut tuotantokustannusten tekijät säilytettiin taulukkojen 4 ja 5 (liite 1) oletusten mukaisina, vuoden 2008 sähköntuotantoyhdistelmän tuotantokustannukset olivat korkeimmat (46,50 €/MWh) verrattuna vuoden 2025 skenaarioiden tuotantokustannuksiin. Ilman päästökauppaa Skenaario 1 oli kokonaistuotantokustannuksiltaan pienin, mutta fossiilisten energialähteiden käyttö nosti kyseisen skenaarion kustannuksia päästökauppatilanteessa enemmän kuin Skenaarioissa 2 ja 3.

Vuoden 2050 skenaarioista Skenaario 1 oli edullisin sekä päästökaupan kanssa että ilman, koska se perustui merkittävään ydinvoiman hyödyntämiseen ja ydinvoiman tuotantokustannukseksi oletettiin vain 35 €/MWh. Skenaarion 2 vuoden 2050 kustannukset ovat huomattavasti suuremmat kuin Skenaarioiden 1 ja 3, mihin syinä ovat tuulivoiman laajamittainen käyttö ja turpeen korkeat päästökaupan kustannukset. Lisäksi Skenaariossa 2 oletettiin vuoden 2050 kohdalle noin 5 TWh sähkön nettotuonti. Tuulivoiman, metsähakkeen ja ydinvoiman lisäämiseen perustuneen Skenaario 3:n kansantaloudelliset

tuotantokustannukset olivat suunnilleen referenssivuoden 2008 tasolla. Ilman päästökauppaa Skenaario 2 olisi kuitenkin vertailuvuotta 2008 kalliimpi.



KUVIO 35 Referenssivuoden 2008 ja eri skenaarioiden tuotantokustannukset, €/MWh, perusoletuksilla. Valkoiset palkit kuvaavat päästökaupan aiheuttamia lisäkustannuksia (vuonna 2008: 25 €, vuonna 2025: 30 € ja vuonna 2050: 40 €/t CO<sub>2</sub>).

## 5.5 Tulosten tarkastelu

Tässä tutkimuksessa käytettiin kustannusanalyysia ja biofysikaalisia indikaattoreita arvioimaan Suomen nykyistä sähköntuotantoa ja tulevaisuuden kustannuksia tavoitteena fossiilisten energialähteiden korvaaminen ei-fossiilisella energialla tämän hetken teknisten ja ekologisten rajoitteiden puitteissa. Sähköntuotantoa arvioitiin tuotantokustannusten, fossiilisen energian suoran ja epäsuoran kulutuksen (GER-kustannus), hiilidioksidipäästöjen ja luonnon antaman panoksen (energia-kustannus) osalta. Monitieteelliset indikaattorit tekivät sähköntuotantoteknologioiden kattavamman ja monipuolisemman tarkastelun ja vertailun mahdolliseksi.

### 5.5.1 Tuotantokustannukset

Ilman päästökauppaa ja huomioimatta eri polttoaineiden verotusta tai energiantuotannon tukia vesivoima osoittautui edullisimmaksi sähköntuotantotavaksi, koska vanhojen vesivoimalaitosten pääomakustannukset on jo kuoletettu ja enää maksetaan vain käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. Tulevaisuudessa vesivoiman osuutta ei kuitenkaan ympäristönsuojeluun liittyvistä syistä johtuen ole mahdollista lisätä merkittävästi.

Ydinvoimalaitokset ovat erittäin kalliita rakentaa, mutta ydinsähkön tuotantokustannukset megawattituntia kohden olivat kuitenkin suhteellisen alhaiset. Koska ydinvoima on pääomavaltainen tuotantomuoto, rahoituskustannukset ja korkokanta vaikuttavat eniten sen tuotantokustannuksiin, kun taas polttoaineen hinnanmuutoksilla ei ole suurta merkitystä kokonaiskustannuksiin. Ydinvoiman etuna ovat siis vakaat kustannukset, sillä kustannustaso tiedetään pitkäksi aikaa eteenpäin.

Ilman päästökauppaa pääomavaltainen tuulivoima sitä vastoin oli kallein tuotantomuoto, noin 63 €/MWh, mutta jo päästöoikeuden hinnalla 25 €/t CO<sub>2</sub>, siitä tuli kilpailukykyinen verrattuna lauhdevoimaan. Tuulivoiman nykyisistä ja tulevaisuuden kustannuksista on kuitenkin annettu monenlaisia arvioita: Pöyryn (2007) raportissa rannikolle rakennettavan tuulivoiman nykykustannuksiksi laskettiin 82 eur/MWh ja merituulivoimalan kustannuksiksi 74 eur/MWh. Helysen (2007) mukaan rannikotuulivoiman kustannukset ovat 60 eur/MWh (± 20 %) ja merituulivoiman kohdalla noin 72 eur/MWh. GreenStream Network (2007) on laski sekä rannikolle että merelle rakennettavan tuulivoiman nykykustannusten olevan lähellä tasoa 85 eur/MWh, kun taas Tarjanteen ja Kivistön (2008) raportissa tuulivoiman tuotantokustannukset olivat noin 53 eur/MWh.

Pöyryn (2007) mukaan tuulivoiman laitos- ja projektikokojen kasvu lisää taloudellisesti toteutuskelpoista potentiaalia rannikkoalueilla. Savolaisen ym. (2008) varovaisen kehityksen skenaariossa arvioidaan, että tuulivoiman investointikustannukset säilyvät nykytasolla vuoteen 2020 asti, ja vuoteen 2050 mennessä tuotantokustannukset alenisivat vain tuottavuuden kautta eli laitostoon ja käyttövyöhykkeen paranemisen kautta. Optimistisen skenaarion mukaan tuulivoiman investointikustannukset alenisivat 25-30 prosenttia vuoteen 2020 mennessä sekä laitoskustannusten alenemisen että edellistä paremman tuottavuuden kautta. Savolaisen ym. (2008) varovaisen kehitysarvion mukaan hintahaarukka tuulivoiman tuotantokustannuksille olisi vuonna 2020 55-70 €/MWh ja optimistisen kehityksen mukaan 40-60 eur/MWh. Pienten laitosten kustannuksia alentaa myös se, että lukumäärän kasvaessa yksikkökustannus pienenee, kuten on käynyt tuulivoiman yleistyessä. Suomen hallitus on myöntänyt tuulivoimalle syöttötariffin, joka takaa tuulisähköstä 83,5 €/MWh hinnan. Tariffin tavoitteena on saada tuulivoimainvestoinnit liikkeelle.

Hiili-, kaasu-, ja turvevoimaloiden kustannukset tulevat todennäköisesti kasvamaan nousevien polttoainekustannusten, kiristyvän päästökaupan ja energiaverouudistusten seurauksena. Suomessa turve luokitellaan erittäin hitaasti uusituvaksi energialähteeksi, mutta EU:n päästökaupassa sitä kohdellaan kuten fossiilisia polttoaineita, minkä vuoksi sen poltosta aiheutuville hiilidioksidipäästöille tulee ostaa päästöoikeuksia. Hiilen hiilidioksidin ominaispäästökerroin on paljon suurempi kuin maakaasun mutta pienempi kuin turpeen ominaispäästökerroin, minkä vuoksi päästöoikeuksien hinta nostaa eniten turvevoimalaitoksen tuotantokustannuksia. Polttoaineen tai

päästöoikeuden voivat muuttua nopeasti, mikä vaikeuttaa lauhdetuotannon tulevaisuuden kustannusten arviointia.

Yhdyskuntien CHP-laitosten kohdalla kustannusvaikutukset riippuvat luonnollisesti siitä, mitä polttoaineita niissä käytetään ja miten eri polttoaineiden hinnat muuttuvat. CHP-laitoksen etuna on, että polttoaineyhdistelmää voidaan vaihtaa hintatason mukaan. Lisäksi tuotetusta kaukolämmöstä saadaan tuloa, joka alentaa kokonaiskustannuksia huomattavasti. Koska kaukolämpö on siihen liittyneisiin asiakkaisiin nähden määräävässä markkina-asemassa, lämmön vuoksi hinnoittelun tulee olla riittävän kustannusvastaavaa. Laskelmissa käytetyt polttoaineiden hinnat olivat verottomia, mutta eri polttoaineisiin kohdistuvat verot voivat muuttaa kilpailuasetelmaa.

Turpeen ja puun hinnat riippuvat merkittävästi kuljetusetäisyyksistä, koska näiden polttoaineiden energiasisältö tilavuuteen verrattuna on paljon öljyä ja hiiltä alhaisempi. Suurien kuljetuskustannuksien vuoksi kotimaisten polttoaineiden käyttö rajoittuu suurimmaksi osaksi 100-150 kilometrin etäisyydelle tuotantolaitoksesta (VTT 2004, 178), mikä suosisi hajautettua energiantuotantoa. Muutokset öljyn hinnassa vaikuttavat epäsuorasti myös puun ja turpeen hinnan kehitykseen, koska polttoaineiden hankinnassa ja kuljetuksessa tarvitaan paljon öljyä käyttäviä koneita. Jalostamalla polttoaineet pelleteiksi kuljetusetäisyyksiä voidaan pidentää, mutta tällä hetkellä suurin osa Suomessa valmistetuista pelleteistä menee kuitenkin vientiin.

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseen ja talousteoreettisesti haitallisten ulkoisvaikutusten, eli tässä tapauksessa hiilidioksidipäästöjen, sisäistämiseen suunnitellun päästökaupan kustannusvaikutukset riippuivat paitsi päästöoikeuden hinnasta myös käytetyn polttoaineen hiilidioksidipäästöistä ja laitoksen tehokkuudesta, joka vaikutti tarvittun polttoaineen määrään tuotettua megawattituntia kohti. Myös puun poltosta syntyi merkittäviä määriä hiilidioksidipäästöjä, mutta kestävästi käytettynä puu on uusiutuva energialähde, ja siksi sen päästöille ei tarvitse ostaa päästöoikeuksia. Työn lähtötiedoissa käytettiin päästöoikeuden hintaa 25 €/t CO<sub>2</sub>, mutta jos ilmastopolitiikkaa kiristetään tulevaisuudessa, päästöoikeuden hinta tulee päästöoikeusmarkkinoilla todennäköisesti nousemaan. Sähköntuotannon skenaarioissa käytettiin tästä syystä hieman korotettua, mutta silti kohtuullista päästöoikeuden hintaa 30 € vuodelle 2025 ja 40 € vuodelle 2050.

Päästökauppa nosti eniten turve- ja hiilivoiman kustannuksia, koska turpeen ja hiilen päästöt ovat suurimmat. Kaasukombituotannossa vaikutus oli huomattavasti pienempi paremman tehokkuuden ja pienempien päästöjen takia. Vesi-, tuuli- ja ydinvoimalle ei luonnollisestikaan koitunut päästökaupasta lisäkustannuksia. Päästöoikeuden hinnalla on voimakas vaikutus puupolttoaineiden kilpailukykyyn ja edelleen energialaitosten puupolttoaineiden saatavuuteen ja hyödyntämiseen (Pöyry 2007a). Suomessa puuta käytetään tavallisimmin yhdessä turpeen kanssa. Puuta käytetään yleensä niin paljon kuin sitä on saatavilla tiettyyn hintaan ja loput

polttoaineesta on turvetta. Näin ollen suuremman kokoluokan laitoksissa puu kilpailee turpeen kanssa. (Pöyry 2007a.)

Eri sähköntuotantotapojen kustannusrakenteet vaihtelivat paljon sekä kiinteiden että vaihtuvien kustannusten osalta. Yleisesti voidaan sanoa, että perustuotantovoimalaitosten investointikustannukset voivat olla korkeat, jos polttoainekustannukset ovat matalat. Käänteisesti vain huippukuorman aikana käytettävien voimalaitosten investointikustannusten tulee olla matalat, mutta polttoainekustannuksilla ei ole suurta merkitystä. Esimerkiksi vesivoima ja ydinvoima vaativat suuren pääoman pitkän rakennusvaiheen aikana, ja siksi ne ovat toteuttamiskelpoisia kun investointiolosuhteet ovat vakaat. Muutokset polttoaineiden hintasuhteissa voivat mullistaa teknologioiden vertailun perusteellisesti, kun muistetaan, että laitosten elinikä on ainakin 20 vuotta.

Tarjanteen ja Kivistön (2008) mukaan voimalaitosrakentamisen kustannukset ovat viime vuosina kasvaneet merkittävästi. Selittäviä tekijöitä ovat rakennuskustannusten, metallien (teräs, kupari ja alumiini) ja voimalaitoskomponenttien hinnan nousu, sekä kysynnän ja tarjonnan epätasapaino voimalaitosrakentamisen markkinoilla. Lisäksi polttoaineiden hinnat ovat olleet nousussa, ja yleinen kustannustason nousu on nostanut myös käyttö- ja kunnossapitokustannuksia.

Tuotantokustannuslaskelmat ovat tarpeellisia arvioitaessa, paljonko esimerkiksi uusiutuvaa energiaa pitäisi tukea, jotta siihen investoiminen ja sen käyttö olisi kannattavaa. Sähkön hinnalla on merkittävä rooli sen suhteen, paljonko uusiutuvaa energiaa kannattaa ottaa käyttöön ja kuinka korkea tukitaso potentiaalinen käyttöön saamiseksi tarvitaan. Sähköpörssi Nord Poolin noteeraamia sähkön forward-hintoja voidaan pitää markkinoiden parhaana näkemyksenä sähkön tulevasta hintakehityksestä. Tällä hetkellä vuosi-forwardien hinnat ovat noin tasolla 45 €/MWh.

### 5.5.2 Energiaverotuksen vaikutukset

Energiaverotus on valtiontaloudellisen merkityksensä lisäksi keskeinen energia- ja ympäristöpolitiikan väline, jolla pyritään hillitsemään energiankulutuksen kasvua ja ohjaamaan energian tuotantoa ja kulutusta vähemmän päästöjä aiheuttaviin vaihtoehtoihin. Suomen nykyinen energiaverojärjestelmä on ollut voimassa vuodesta 1997, mutta energiaverotusta suunnitellaan muutettavaksi vuodesta 2011 alkaen. Energiaverot ovat valmisteveroja, joita kannetaan liikenne- ja lämmityspolttoaineista sekä sähköstä. Sähköä verotetaan sen kulutusvaiheessa riippumatta sen tuotantotavasta, jolloin vero ei perustu sähkön tuottamiseen käytettyjen polttoaineiden hiili- tai energiasisältöön.

Sähköntuotannossa käytetyt polttoaineet ovat verottomia, mutta käytettäessä veronalaisia polttoaineita lämmöntuotantoon niistä on maksettava valmisteveroa. Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa (CHP) verotetaan vain lämmön tuottamiseen käytettyjä veronalaisia polttoaineita. Verotuksen perusteena oleva polttoainemäärä saadaan kertomalla kulutukseen luovutettu

lämpö kertoimella 0,9. Kulutukseen luovutetulla lämmöllä tarkoitetaan voimalaitokselta kaukolämpö- ja prosessihöyryverkkoon ja vastaavaan hyötykäyttöön luovutettua lämpömäärää.

Sähkövero on jaettu kahteen veroluokkaan, joista alemman, II-luokan mukaista veroa maksavat teollisuus ja ammattimainen kasvihuoneviljely. Muut kuluttajat maksavat korkeampaa I-luokan veroa. Energiaverojärjestelmään sisältyy lisäksi erilaisia tukia, joista energiapoliittisesti tärkeimpiä ovat uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähköntuotannon tuet.

Hallituksen esittämässä verouudistuksessa maakaasun veroa nostettaisiin vaiheittain vuoteen 2015 mennessä, siten että se olisi 3 €/MWh vuoden 2011 alusta, 5,5 €/MWh vuodesta 2013 ja 7,7 €/MWh vuodesta 2015 alkaen, jonka jälkeen maakaasun vero säilyisi kuitenkin alhaisempana kuin kivihiilen vero, jota myös korotettaisiin hieman. Myös turpeelle tulisi vaiheittain vuoteen 2015 nouseva matala energiavero, ja lisäksi sähköveroa korotettaisiin. Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa käytettävien fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidiveroa alennettaisiin 50 prosentilla päällekkäisen hiilidioksidiohjauksen vähentämiseksi ja CHP-tuotannon kilpailukyvyyn parantamiseksi erilliseen lämmöntuotantoon verrattuna. Uusiutuvalla energialle osoitetaan 55 miljoonaa euroa tuotantotukia, jotka on tarkoitus maksaa tuulivoimalla, biokaasulla, metsähakkeella sekä puupolttoaineella tuotetulle sähkölle.

Koska sähköntuotannossa käytetyt polttoaineet ovat verottomia, hallituksen verouudistus vaikuttaa siis vai yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotantolaitosten tuotantokustannuksiin. Maakaasun vero nousee enemmän kuin hiilen vero, mikä heikentää maakaasun kilpailukykyä muihin CHP-voimaloissa käytettyihin polttoaineisiin nähden. Toisaalta hiilen hiilidioksidipäästöt ovat huomattavasti korkeammat kuin maakaasulla, joten päästökauppa nostaa hiilen käytön kustannuksia maakaasua enemmän. Puupolttoaineiden kilpailukyky sitä vastoin paranee. CHP-laitoksen etuna on, että polttoaineyhdistelmää voidaan vaihtaa hintatason mukaan. Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon kohonneet lämmöntuotantokustannukset todennäköisesti siirretään kaukolämmön hintaan.

### 5.5.3 Biofysikaaliset kustannukset ja vaikutukset

Myös GER ja Emergia ilmaiset tuotannon kustannuksia, koska ne huomioivat tuotantoprosessiin investoidut panokset. Koska ne ovat biofysikaalisia laskentamenetelmiä, kustannus on arvioitu energian muodossa, ei rahamääräisesti. Sähköntuotannon GER-kustannus ilmaisi paljonko fossiilisia polttoaineita oli hyödynnetty suoraan ja epäsuorasti, jotta saatiin tuotettua yksi megawattitunti sähköä. Hiili- ja turvevoiman GER-kustannukset olivat tarkastelluista teknologioista korkeimmat, mihin syinä olivat paitsi polttoaineen energiapitoisuus myös esimerkiksi sen hankintaan ja kuljetukseen liittyvä fossiilisten energialähteiden käyttö. Uusiutuvan energian teknologioiden GER-kustannus oli pieni, koska niiden elinkaaren aikainen fossiilisten

energiälähteiden kulutus oli vähäistä tuotettua sähköä kohti. Monissa prosesseissa, esimerkiksi maataloudessa ja biopolttoaineiden tuotannossa epäsuoran kulutuksen osuus voi kuitenkin olla merkittävä, jopa suurempi kuin suora kulutus, minkä vuoksi GER-kustannusten arvioiminen on hyödyllistä. Etenkin öljyn kulutuksen arvioiminen on tärkeää, koska se tulee lähivuosisikymmeninä ehtymään, mikä myös nostaa sen hintaa.

GER-menetelmässä keskityttiin ainoastaan fossiilisten energialähteiden niukkuuteen, mutta Emergia-menetelmässä huomioidaan kaikki prosessissa käytetyt panokset, myös luonnon tarjoamat uusiutuvat panokset, joilla ei ole markkinahintaa. Emergiateorian mukaisesti kaikki prosessia tukevat energia-, materiaali-, työvoima- ja rahavirrat otettiin huomioon ja konvertoitiin yhteiseksi yksiköksi, aurinkoenergiaksi. Tällöin pystyttiin kuvaamaan sekä luonnon että yhteiskunnan tekemää työtä tuotteen tai palvelun mahdollistamiseksi. Uusiutuvien resurssien huomioiminen on tärkeää, sillä myös ilmaisista luonnonvaroista, kuten esimerkiksi hedelmällisestä maaperästä on tulossa niukkaa. Solar transformity, eli emergia-kustannus per yksikkö lopputuotetta, oli samansuuntainen ydin-, hiili-, turve- ja kaasuvoimalle, kun taas huomattavasti pienempi vesi- ja tuulivoimalle. Tämä kertoo siitä, että luonnolta on vaadittu pienempi panos tuuli- ja vesisähkön tuotannon mahdollistamiseen, mikä on myös merkki siitä, että niiden käyttö on enemmän kestävän kehityksen mukaista. CHP-tuotannon kohdalla tutkimuksessa hyödynnettiin Buonocoren ym. (2010) laskemaa arvoa, joka perustui pääasiassa puubiomassaa polttavaan ja jätevesiä hyödyntävään laitokseen, ja siksi myös CHP:n solar transformity -arvo oli suhteellisen matala. Koska tässä tutkimuksessa sähköntuotannon solar transformity -arvot otettiin kirjallisuudesta, kyseisten lopputuotteen arvojen perusteella ei voitu päätellä, mikä oli esimerkiksi uusiutuvien ja uusiutumattomien tai paikallisten ja ei-paikallisten energialähteiden suhde kyseisessä prosessissa tai minkä yksittäisen tekijän osuus transformity-arvon muodostumisessa oli suurin.

Hiilidioksidipäästöillä kuvattiin sähköntuotannon ympäristövaikutusta. Sähköntuotantoteknologioiden suorat hiilidioksidipäästöt erosivat toisistaan enemmän kuin suorat ja epäsuorat hiilidioksidipäästöt yhteensä, mistä voidaan päätellä että energiantuotannossa ei pitäisi pelkästään tarkastella polttoaineeseen liittyviä suoria päästöjä, vaan koko prosessin elinkaaren päästöt pitäisi arvioida. Ei-fossiilisiin energiantuotantoprosesseihin liittyy myös hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi polttoaineen hankinnan ja kuljetuksen sekä voimalaitoksen rakentamisen aikana. Myös puupolttoaineiden päästöt laskettiin mukaan CHP-voimalan päästöihin, mutta niitä ei päästökaupassa huomioitu.

Kansallisella tasolla tarkasteltuna CHP-tuotannon osuus taloudellisista kustannuksista ja ympäristökuormituksesta oli suurin, mikä selittyy sillä, että kyseisen yhdyskuntien CHP-sähköntuotannon osuus oli 24 prosenttia tarkasteltavasta sähköntuotannosta. Jos myös teollisuuden CHP tuotanto (11,1 TWh) olisi laskettu mukaan, CHP vastaisi noin 30 prosenttia koko sähköntuotannosta Suomessa (kuvio 17). Myös ydinvoiman osuus Suomen



sähköntuotannosta on korkea, noin 25 prosenttia, ja ydinvoiman alue kuviossa 27 onkin toiseksi suurin. Toisaalta vesivoiman taloudellinen ja ympäristöllinen kuormitus kansantalouden tasolla oli pieni, vaikka sen osuus kokonaissähköntuotannosta oli varsin suuri, 19 prosenttia. Tämä johtui siitä, että vesivoima on uusiutuvaa ja vähäpäästöistä energiaa ja vanhojen vesivoimaloiden tuotantokustannukset ovat matalat. Tuulivoima on kuviossa 27 huomaamaton, sillä tuulivoimalla tuotettiin Suomessa vuonna 2008 vain noin 0,3 prosenttia sähköstä (kuvio 17).

Tarkasteltujen indikaattoreiden perusteella tuuli-, vesi-, CHP-voimaloita voidaan pitää ympäristön kannalta parempina ratkaisuina. Myös kaasukombivoimalan arvot ovat pienemmät kuin hiili- ja turvevoimaloilla. Kun päästöoikeuden hinta on vähintään 25 euroa, tuulivoiman tuotantokustannukset olivat jo lisäksi kilpailukykyiset muihin tuotantomuotoihin nähden. Ydinvoiman tulos oli positiivinen tuotantokustannusten, päästöjen fossiilisen energian käytön suhteen, mutta sen solar transformity -arvo oli korkea. Lisäksi ydinvoimaan liittyy paljon ongelmia, joita tarkastellut indikaattorit eivät pystyneet havainnollistamaan. Ne liittyvät etenkin turvalliseen tuotantoon, jätteiden käsittelyyn ja varastointiin, paisuviin kustannuksiin ja alhaiseen nettoenergiasuhteeseen.

#### 5.5.4 Skenaariot

Suomen sähköntuotannolle luotiin skenaarioita, joista Skenaario 1 perustui ydinvoiman merkittävälle lisärakentamiselle, Skenaario 2 kotimaisten energialähteiden, eli metsähakkeen, tuulivoiman ja turpeen käytön lisäämiselle ja Skenaario 3 uusiutuvan energian sekä ydinvoiman maltilliseen kasvuun. Skenaario 1 nosti esiin monia ydinvoimaa koskevia teknologisia ongelmia ja ympäristöuhkia, jotka liittyvät etenkin turvalliseen tuotantoon, ydinjätteen käsittelyyn ja säilöntään, uraanivarojen rajallisuuteen. Myös Skenaariossa 2 herätti ympäristöön liittyviä huolia, etenkin metsien kestävän hyödyntämisen ja turpeen käytön ympäristöystävällisyyden takia.

Skenaariossa 2 uusiutuvalla energialla ja turpeella ei pystytty kattamaan koko sähköntuotantoa, vaan tarvittiin myös vähän tuontia, noin 5,4 TWh. Tässä tutkimuksessa uusiutuvan energian osalta työn painopiste oli metsähakkeen ja tuulivoiman lisäämismahdollisuuksissa, ja tarkastelun ulkopuolelle jätettiin peltoenergian, biokaasun, aurinkoenergian tai kierrätyspolttoaineiden energiantuotantomahdollisuudet ja energiansäästön ja -tehokkuuden parantamisen vaikutukset, mitkä osaltaan voisivat korvata skenaariossa oletettua sähköntuontia.

Skenaarioanalyysin perusteella Suomen sähköntuotannon kokonaiskustannukset megawattituntia kohden tulisivat ilman päästökauppaa todennäköisesti kasvamaan verrattuna referenssivuoteen 2008, paitsi ydinvoimaskenaarion kohdalla. Päästökauppa mukaan lukien skenaarioiden kustannukset jäivät kuitenkin jopa hieman alhaisemmiksi kuin vertailuvuoden 2008 kustannukset, paitsi Skenaarion 2 kohdalla vuonna 2050, jossa turpeen

hiilidioksidipäästöt aiheuttivat merkittävän lisäkustannuksen. Skenaariossa 2 sähköntuotannon kotimaisuusaste ja sitä kautta energiaturvallisuus kuitenkin kasvoivat. Ydinvoimavaltaisen Skenaarion 1 kustannuksiin vaikuttivat etenkin muutokset ydinvoiman pääomakustannuksissa, sillä ydinvoiman investointikustannukset ovat merkittävät, päästökauppa ei koske ydinvoimaa ja polttoainekustannukset ovat vain pieni osa kokonaistuotantokustannuksista. Skenaarion 3 kokonaiskustannuksissa tärkein tekijä oli puupolttoaineiden ja tuuliturbiinien hintakehitys ja toisaalta myös ydinvoimainvestointien kustannukset. Pitkän aikajänteen takia skenaarioiden kustannuksissa on luonnollisesti paljon epävarmuutta.

Riippumatta siitä, mikä sähkön tuotantoyhdistelmä olisi, kustannukset tulevat seuraavien vuosikymmenien aikana todennäköisesti kasvamaan. Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että fossiilisten polttoaineiden hinta nousee niiden varantojen ehtyessä ja kysynnän kasvaessa. Esimerkiksi jos energiantuotantoyhdistelmä pysyisi vuoden 2008 kaltaisena, mutta fossiilisten polttoaineiden hinnat nousisivat 50 prosenttia, tarkasteltujen teknologioiden kokonaiskustannukset nousisivat ilman päästökauppaa 2,5 miljardista eurosta 3,1 miljardiin euroon. Toiseksi kiristetty ilmastopolitiikka nostaa päästöoikeuksien hintoja. On kuitenkin mahdollista, että jos uusiutuvan energian hinta sitä vastoin alenisi, esimerkiksi teknologisen kehityksen ansiosta, energiantuotannon kustannukset voisivat jopa laskea.

Suomessa on vuonna 2050 nykyisistä ja rakenteilla olevista laitoksista käytössä lähinnä enää vanhat vesivoimalat ja Olkiluoto 3, joten lähitulevaisuudessa tehdään paljon uusia energiainvestointeja. Uusia energiainvestointeja suunnitellussa päätökseen vaikuttavat seuraavat tekijät: sähkönhinnan kehittyminen ja tulevaisuuden yhteiset sähkömarkkinat, epävarmuus poliittisista ohjauskeinoista, kuten avustuksista, veroista ja CO<sub>2</sub>-päästörajoituksista, polttoaineiden ja päästöoikeuksien hintataso ja hinnan vaihtelevuus, epävarmuus sähkönkysynnän kasvusta, johon vaikuttaa etenkin BKT:n kasvu ja energiaintensiivisen teollisuuden muutto, muiden toimijoiden investointipäätökset, ympäristölliset rajoitukset ja rakennusluvut ja maailman talouskehitys (VTT 2009, 278). Skenaario 3 näytti valittujen indikaattoreiden valossa parhaalta yhdistelmältä, mutta kyseiset indikaattorit eivät kuitenkaan heijasta kaikkia energiantuotannon puolia, ja siksi tarvitaan jatkotutkimusta, jotta tulevaisuuden energiapolitiikka pohjautuisi vahvasti kestävän kehityksen periaatteisiin.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomen energia- ja ilmastopolitiikka pyrkii lisäämään uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä, vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä, pysäyttämään energiankysynnän kasvun ja vähentämään riippuvuutta primäärienergian ja sähkön tuonnista. Uusiutuvien energialähteiden merkitys tulee kasvamaan tulevaisuudessa paitsi tiukentuvien päästöjen vähennystavoitteiden takia myös, koska fossiilisten polttoaineiden maailmanmarkkinahinnat nousevat varantojen vähentyessä ja hyödyntämiskustannusten noustessa. Myös energihuollon omavaraisuuden säilyttäminen edellyttää paikallisten energialähteiden hyödyntämistä. Tavoitteiden edistämiseksi tulee suunnitella vaihtoehtoisia energiaskenaarioita, joka pohjautuvat erilaisiin taloudellisiin ja ympäristöllisiin vaihtoehtois-kustannuksiin. Päätettäessä tulevaisuuden energiaratkaisuista on mahdollisimman laajan kokonaiskuvan luomiseksi kiinnitettävä taloudellisten kustannusten arvioimisen lisäksi huomiota paitsi energialähteen saatavuuteen ja luotettavuuteen, myös energiantuotannon ja sen käyttöön liittyviin epäsuoriin kustannuksiin ja ympäristövaikutuksiin.

Tässä tutkimuksessa arvioitiin Suomen sähköntuotannon suoria taloudellisia ja ympäristöllisiä kustannuksia sekä teknologiakohtaisesti että kansantalouden tasolla. Lisäksi luotiin kolme vaihtoehtoista skenaariota Suomen sähköntuotannon tulevaisuudelle, joissa fossiilista energiaa korvattiin uusiutuvalla energialla, turpeella ja ydinvoimalla teknisten ja ekologisten rajoitteiden puitteissa. Kustannus- ja skenaarioanalyysin pohjalta voidaan Suomelle suosittaa energiapolitiikkaa, joka perustuisi monipuoliseen energiantuotantoon ja paikallisten, uusiutuvien energialähteiden, etenkin biomassan ja tuulivoiman, kestäväälle hyödyntämiselle. Huoltovarmuuden ja energiaomavaraisuuden merkitys kasvaa tulevaisuudessa, jolloin energiaturvallisuuden kannalta mahdollisimman hajautettu energiantuotanto ja energiatehokkuuteen ja kestävään energiankulutukseen tähtäävä energiapolitiikka olisi tärkeää.

Uusiutuvien energialähteiden kilpailukyky fossiilisiin nähden paranee, jos fossiilisten energialähteiden maailmanmarkkinahinnat nousevat ja ilmastopolitiikkaa kiristetään. Sähköntuotannon tulevaisuuden kokonaiskustannukset voivat tällöin kohota energiantuotantoyhdistelmästä

riippumatta. Tässä työssä tarkastelu rajoitettiin sähköntuotannon suoriin kustannuksiin ja ympäristövaikutuksiin, mutta uusituvan energian käytön kasvattamisella voi olla myös huomattavia epäsuoria vaikutuksia, kuten uusia työllisyysmahdollisuuksia ja vientimarkkinoita uusiutuvia energialähteitä hyödyntävälle tekniikalle. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden kulutuksen pienentäminen vähentää kasvihuonekaasupäästöjen ohella muita haitallisia päästöjä.

Jatkotutkimusta tarvitaan selvittämään, mikä energiantuotantoyhdistelmä minimoisi sähköntuotannon sekä kansantaloudelliset kustannukset että ympäristökuormituksen. Kyseisissä tarkasteluissa pitäisi aina huomioida energiantuotannon nettoenergiatase, taloudellinen kannattavuus ja kestävä kehitys terveyden, biodiversiteetin suojelun ja toimivien ekosysteemipalveluiden kannalta. Lisätutkimusta kaivataan myös arvioimaan eri ohjauskeinojen, kuten energiaverotuksen ja syöttötariffien, vaikutusta tulevaisuuden energiaratkaisuihin. Vakaa ja johdonmukainen energiapolitiikka on välttämätöntä, koska ilman niitä pääomia runsaasti sitovia energiainvestointeja ei voida tehdä.

Taloudellisen ja biofysikaalisen analyysin yhdistäminen energiantuotannon arvioimiseksi oli hyödyllinen, koska näin pystyttiin muodostamaan laajempi kuva sekä energiantuotannon taloudellisista että ympäristöön liittyvistä ulottuvuuksista. Tulevaisuudessa poikkitieteellisiä menetelmiä tulisi edelleen kehittää ja hyödyntää yhä laajemmin.

## LÄHTEET

- Asplund, D. Korppi-Tommola, J. Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäsmahdollisuudet vuoteen 2015. Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Ayres, R.U. & Simonis, U.E. 1994. *Industrial Metabolism – Restructuring for Sustainable Development*. United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris.
- Bargigli, S., Raugai, M. & Ulgiati, S. 2004. Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes. *Energy*, 29, 2145-2159.
- Barnett, H. & Morse, C. 1963. *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resources Availability*. Baltimore: The John Hopkins University Press for Resources for the Future.
- Bergh, J. C.J.M. van den. 2000. *Ecological Economics: Themes, Approaches, and Differences with Environmental Economics*. TI 2000-080/3 Tinbergen Institute Discussion Paper.
- Biondi, P., Panaro, V. & Pellizzi, G. 1989. *Le richieste di energia del sistema agricolo italiano*. CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Progetto Finalizzato Energetica, Sottoprogetto Biomasse ed Agricoltura, Report LB-20, Roma, Italia, 389 s.
- Boulding, K.E. 1966. The economics of the coming spaceship earth. Teoksessa H. Jarret (ed.), *Environmental Quality in a Growing Economy*. Baltimore: John Hopkind University Press.
- Boustead, I. & Hancock, G.F. 1979. *Handbook of industrial energy analysis*. New York: John Wiley & Sons, 422 s.
- BP. 2009. *Statistical Review of World Energy*.
- BP. 2010. *Statistical Review of Word Energy June 2010*.
- Brown, M. T. & Ulgiati, S. 2002. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of cleaner production*, 10, 321-334.
- Brown, M. T. & Ulgiati, S. 2004. Emergy analysis and environmental accounting. *Encyclopedia of Energy*, volume 2.
- Bruntland, G. (ed.) 1987. *Our common future: The World Commission on Environment and Development*, Oxford, Oxford University Press.
- Buonocore, E., Franzese, P.P., Rydberg, T. & Ulgiati, S. 2010. Emergy evaluation of an integrated bioenergy production system. The case study of Enköping (Sweden). In: Brown M.T., Campbell D., Comar V., Haung S.L., Rydberg T., Tilley D. & Ulgiati S. (Eds.), *EMERGY SYNTHESIS 6. Theory and Applications of the Emergy Methodology*. H.T. Odum Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, January 12, 2009. Accepted for publication. In Press.
- Campbell, C. & Laherrere, J. 1998. The end of cheap oil. *Sci. Am.* (March), 60-65.
- Cleveland, C. J. 1991. Natural Resource Scarcity and Economic Growth Revisited: Economic and Biophysical Perspectives. Pages 289-317 in Costama R, ed. *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press.
- Cleveland, C. J. 1999. Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology. In *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Gerogescu-Roegen, J. Gowdy and K. Mayumi* (Eds.) s. 125-154. Cheltenham, England: Edward Elgar Publishing.
- Coase, R. 1960. The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics* Vol. 3 October 1960.

- Crocker, T. D. 1966. The structuring of atmospheric pollution control systems. *The Economics of Air Pollution* (61-68). New York: W. W. Norton.
- Dales, J. H. 1968a. Land, water, and ownership. *The Canadian Journal of Economics*. Vol. 1, no. 4, 791-804.
- Dales, J. H. 1968b. *Pollution, Property and Prices*. Toronto: University of Toronto Press.
- Daly, H. 1977. *Steady State Economics*. San Francisco: W.H. Freeman and Co.
- Daly, H. 1992. Allocation, distribution and scale: towards an economics that is efficient, just and sustainable. *Ecological Economics* 6, 185-193.
- Energiamarkkinavirasto 2010. Maakaasun kokonaishinnan kehitys. Viitattu 27.8.2010. [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1842&pgid=188\\*](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1842&pgid=188*).
- Energiateollisuus ry ja Elinkeinoelämän keskusliitto 2007. Arvio Suomen sähkön kysynnästä vuosille 2020 ja 2030.
- ESA 2010. Euratom Supply Agency - Annual Report 2009. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Flavin, C. 2008. Building a Low-Carbon Economy. Teoksessa *State of the World 2008: Innovations for Sustainable Economy*.
- Franzese P.P., T. Rydberg, Russo, G.F. & Ulgiati, S. 2009. Sustainable Biomass Production: A Comparison Between Gross Energy Requirement and Emergy Synthesis Methods. *Ecological Indicators*, 9, 959-970.
- Gagnon, N., Hall, C.A.S. & Brinker, L. 2009. A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Invested for Global Oil and Gas Production. *Energies*, 2, 490-503.
- Gardner, G. & Prugh, T. 2008. The Need to Remake Economies. Teoksessa *State of the World 2008: Innovations for Sustainable Economy*. s. 25-26.
- Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- GreenStream Network 2007. Selvitys uusiutuvan energian lisäämisen kustannuksista ja edistämiskeinoista. Raportti Energiateollisuus ry:lle.
- Hagström, P. 2006. Biomass Potential for Heat, Electricity and Vehicle Fuel in Sweden. PhD thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Hall, C.A.S. & Cleveland, C.J. 1981. Petroleum drilling and production in the United States: yield per effort and net energy analysis. *Science* 211, 576-579.
- Hall, C.A.S., Cleveland, C.J. & Kaufmann, R. 1986. *Energy and Resource Quality. The Ecology of the Economic Process*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 577 s.
- Hall, C., Lindenberger, D., Kümmel, R., Kroeger, T. & Eichhorn, W. 2001. The need to reintegrate the natural sciences into economics. *BioScience* 51 (8), 663-673.
- Hall, C.A.S. & Day, W.Jr. 2009. Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil. *American Scientist*, 97: 230-237.
- Halvorsen, R. & Smith, T. 1991. A Test of the Theory of Exhaustible Resources. *Quarterly Journal of Economics*. February 1991, 123-140.
- Hardin, G. 1968. The Tragedy of the Commons. *Science* 162, 1243-1248.
- Haukioja, T. 2007. Sustainable Development and Economic Growth in the Market Economy. *Turun kauppakorkeakoulun julkaisuja, sarja A-6:2007*.
- Heinberg, H. 2009. Searching For a Miracle. *Net Energy Limits & The Fate of Industrial Society. A Joint Project of the International Forum on Globalization and the Post Carbon Institute. False Solution Series #4*.
- Heino, J., & Nordlund, H. 2010. Materiaalien ympäristöominaisuuksia ennakoivat termodynaamiset menetelmät. Teoksessa Antikainen, R. (toim.) *Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010*.

- Helynen, S. 2008. Uusituvan energian potentiaalit. Asiantuntijaseminaari 1.2.2008. Viitattu 24.8.2010. <http://www.tem.fi/files/18619/Helynen01022008.pdf>.
- Hoffrén, J. 2001. Measuring the Eco-efficiency of Welfare Generation in a National Economy. The Case of Finland. Tilastokeskus. Tutkimuksia 233, Helsinki.
- Hoffrén, J. 2006. Tulevaisuuden tutkimuksen tilastolliset ennakointimenetelmät. Suomen tilastoseuran vuosikirja 2005. Helsinki.
- Holtinen, H. 2008. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosikirja 2007. VTT Working Papers: 106. Espoo: VTT.
- Holtinen, H. & Stenberg, A., 2009. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2008. VTT Working Papers : 132. Espoo: VTT. 47 s. + liitt. 8 s.
- Honkatukia, J., Joutsenvirta, E., Kemppi, H. & Perrels, A. 2002. EU-laajuisen päästökaupan toteuttamisvaihtoehdot ja vaikutukset Suomen kannalta. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus. Keskustelualoitteita 282.
- Honkatukia, J. 2008. Ilmastonmuutoksen torjunnan kustannukset ja hyödyt. Kansantaloudellinen aikakauskirja - 104. vsk. - 1/2008.
- Hotelling, H. 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economics*, 39, 137-175.
- Hubbert, M.K. 1956. Nuclear energy and the fossil fuels. *Drilling and Production Practices*, American Petroleum Institute, New York, s. 7-25.
- Hubbert, M.K. 1968. Energy resources. *Resources and Man*. Natl. Acad. Sci. W.H. Freeman, San Francisco, s. 157-242.
- Häyhä, T. & Franzese, P.P. 2010. Environmental and Economic Costs of Energy Production in Finland. *Biologi Italiani*, 8: 36-44. (ISSN:0392-2510).
- IAEA 2008. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030 Reference Data Series No. 1, 2008 Edition. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- IEA/NEA 2005. Projected Costs of Generating Electricity - 2005 Update. Joint Report, Nuclear Energy Agency and International Energy Agency, IEA/OECD, Paris.
- IEA 2006. World Energy Outlook 2006. International Energy Agency. Viitattu 1.9.2010. <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf>
- IEA 2008. World Energy Outlook 2008. Executive Summary. International Energy Agency ,OECD/IEA, Paris. Viitattu 1.9.2010. [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008\\_es\\_english.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_english.pdf).
- IEA 2009. International Energy Outlook 2009. International Energy Agency. Viitattu 1.9.2010. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>.
- IFIAS 1974. Energy analysis. Workshop Report no. 6. Stockholm, 89 s. International Federation of Institutes for Advanced Studies.
- IPCC 2006. The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Viitattu 27.8.2010. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- IPCC 2007. Working Group III Report "Mitigation of Climate Change" . Summary for Policymakers.
- Jevons, W.S. 1865. The Coal Question. An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines. London: Macmillan and Co.
- Junginger, M., Bolkesjø, T., Bradley, D., Dolzan, P., Faaij, A., Heinimö, J., Hektor, B., Leistad, Ø., Ling, E., Miles Perry, M., Piacente, E., Rosillo-Calle, F., Ryckmans, Y., Schouwenberg, P.-P., Solberg, B., Trømborg, E., da Silva Walter, A. and de Wit, M. 2008. Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, 32, 717-729.

- Kaivo-oja, J. & Haukioja, T. 2002. Kestävä kehitys ja tietoyhteiskunta: Kriittiset ulottuvuudet. Teoksessa *Tulevaisuudentutkimus, Perusteet ja sovellukset*. Suomalaisen kirjallisuuden seura. Kirjakas/Tallprint.
- Kamppinen, M., Kuusi, O. ja Söderlund, S. 2002. *Tulevaisuudentutkimus. Perusteet ja sovellukset*. Suomalaisen kirjallisuuden seura. Kirjakas/Tallprint 2002.
- Kanniainen, V. 2007. Ilmastonmuutoksen talusteoriasta. *Tieteessä tapahtuu* 5/2007. Viitattu 6.1.2009. <http://ojs.tsv.fi/index.php/tt/article/viewFile/257/230>.
- Krautkraemer, J. 1998. Nonrenewable Resource Scarcity. *Journal of Economic Literature*, 36(4), 2065-2107.
- Kunnas, J. 2001. Ympäristötaloudellinen Kuznets-käyrä -hypoteesi ja Suomen energiantuotantoon liittyvä ilman saastuminen. Pro gradu -työ, Helsingin yliopisto.
- Kyllönen, S. 2004. Kansainvälisen ilmastopolitiikan tulevaisuus – arvioita vaihtoehtoista. Helsingin yliopisto.
- Lapp, C.W. 1991. Energy analysis of the nuclear power system in the United States. In: MS Paper, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida.
- Lenzen, M. 2008. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management* 49, 2178-2199.
- Liski, M. 2004. Ilmastopolitiikan kustannusten ja hyötyjen arviointi eri aikaväleillä. Tulostettu 2.4.2009. <http://www.environment.fi/download.asp?contentid=25531&lan=fi>
- Liski, M. 2008. Sternin raportti ja sen kritiikki. *Kansantaloudellinen aikakauskirja* – 104. vsk. – 1/2008.
- Lombardini-Riipinen, C. & Ollikainen, M. 2009. YE11. Kustannus-hyötyanalyysi. Luentomateriaali. Helsingin yliopisto. Viitattu 25.7.2010. [http://www.mm.helsinki.fi/mmtal/ye/YE11\\_09.htm](http://www.mm.helsinki.fi/mmtal/ye/YE11_09.htm).
- Luonnonvarat ja ympäristö 2005. Ympäristöministeriö ja Tilastokeskus.
- Luzzati, T. & Orsini, M. 2009. Investigating the energy-environmental Kuznets curve. *Energy* 34 (3), 291-300.
- Lähiajan energia- ja ilmastopolitiikan linjauksia – kansallinen strategia Kioton pöytäkirjan toimeenpanemiseksi. 2005. Valtionneuvoston selonteko eduskunnalle 24.11.2005. KTM Julkaisuja 25/2005 Energiaosasto. Edita Publishing Oy.
- Maier-Rigaud, G. 1991. Background to the conflict between economic and ecological ends. *Ecological Economics* 4, 83-91.
- Malthus, T. R. 1798. *An Essay on the Principle of Population*. Lontoo: J. Johnson.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randels, J. & Behrens III, W.W. 1972. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books.
- Millennium Ecosystem Assessment 2005: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- Montgomery, D. 1972. Markets in licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, 5, 395-418.
- Neittaanmäki, P. & Schroderus, O. 2010. Sähkön- ja lämmöntuotannon kustannussimulointi ja herkkyysanalyysi. Jyväskylän yliopisto. Tietotekniikan laitos.
- Nordhaus, W. 1973. The Allocation of Energy Resources. *Brookings Papers on Economic Activity* 4 (3), 529-576.
- Nordhaus, W. 2007. The Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature* 45 (3), 703-724.
- Odum, H. T. 1971. *Environment, Power and Society*. Wiley-Interscience, New York.
- Odum, H.T. 1988. Self-organization, transformity, and information. *Science* 242, 1132-1139.



- Odum, H.T. 1996. Environmental Accounting. Energy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, 370 s.
- Odum, H.T. & Odum, E.C. 2001. Prosperous Way Down: Principles and Policies. University Press of Colorado, USA.
- OECD 2008. Uranium 2007: Resources, Production and Demand. Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD, Paris.
- Pigou, A. 1938. The Economics of Welfare. 4th edition. Lontoo: Macmillan.
- Reynolds, D. 1994. Energy Grades and Historic Economic Growth. Journal of Energy and Development 19 (2), 245-264.
- Ricardo, D. 1817. On the Principles of Political Economy and Taxation. Lontoo: John Murray.
- Rintala, J., Alen, R., Lahti-Nuutila, T., Lund, P., Nyrönen, T., Pietola, K., Sipilä, K., Turpeinen, H. & Helynen, S. 2007. Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. Asiantuntijatyöryhmän raportti KTM:lle.
- Røpke, X. 2005. Trends in the development of ecological economics from the late 1980s to the early 2000s. Ecological Economics 55(2), 262-290.
- Prugh, T. Christopher, F. & Sawin, J. L. 2005. Öljyn uhkat. Teoksessa: Maailman tila 2005. Worldwatch-instituutti.
- Puuenergia 2010. Polttoaineiden hintatietoja. Viitattu 27.8.2010.  
<http://www.puuenergia.fi>.
- Pöyry Energy Oy. 2007a. Puupolttoaineiden kysyntä ja tarjonta Suomessa vuonna 2020 - Päivitetty tilannekatsaus. Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Pöyry Energy 2007b. Tuulivoimatavoitteiden toteutumisenäkymät Suomessa - Päivitetty tilannekatsaus. Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Santa Barbara, J. 2007. The False Promise of Biofuels. A Special Report From The International Forum on Globalization and the Institute for Policy Studies.
- Savolainen, I., Ohlström, M. & Kärkkäinen, A. 2003. Ilmasto. Haaste teknologialle. Näkemyksiä ja tuloksia Climatech-ohjelmasta. Tekes. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Savolainen, I., Sipilä, L. & Syri, S. 2008. Teknologiapolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasviuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. Taustaraportti kansallisen ilmasto- ja energiastrategian laatimista varten.
- Sovacool, B.K. 2008. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy, 36, 2940-2953.
- Stern, N. 2006. The Economics of Climate Change - The Stern Review. Cambridge University Press. 2007.
- Strahan, D. 2008. Coal: Bleak outlook for the black stuff. New Scientist. 19.1.2008. Issue 2639. London. Reed Business Information.
- Stranius, L. 2000. Ympäristön arvottaminen taloustieteessä: Rahastusta vai luonnonoikeuksien huomioonottamista. Ympäristötaloustieteen perusteet -kurssin materiaalia. Tampereen yliopisto.
- Tarjanne, R. & Kivistö, A. 2008. Sähkön tuotantokustannusvertailu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Tutkimusraportti B-175.
- TEEB 2010. The Economics of Environment and Ecosystems, Chapter 5: The economics of valuing ecosystem services and biodiversity, s. 10, 133 s.
- Teollisuuden toimialakatsaus. 2009. Tilastokeskus. Viitattu 2.6.2010.  
[http://www.stat.fi/ajk/poimintoja/2009-06-26\\_toimialakatsaus.html](http://www.stat.fi/ajk/poimintoja/2009-06-26_toimialakatsaus.html)

- Tilastokeskus 2007. Energian käyttö ja lähteet muutoksessa, Viitattu 30.11.2007.  
<http://www.stat.fi/tup/suomi90/maaliskuu.html>.
- Tilastokeskus. 2008. Teollisuuden toimialakatsaus 1/2008. Viitattu 1.6.2009.  
[http://www.stat.fi/artikkelit/2008/art\\_2008-06-27\\_001.html?s=8](http://www.stat.fi/artikkelit/2008/art_2008-06-27_001.html?s=8),  
[http://www.stat.fi/artikkelit/2008/art\\_2008-06-27\\_001.html?s=9](http://www.stat.fi/artikkelit/2008/art_2008-06-27_001.html?s=9).
- Tilastokeskus. 2009. Energiaennakko 2008.
- Tilastokeskus. 2010. Energiaennakko 2009.
- Tuomala, M. 2003. Julkistalous. Tampere: Tammerpaino Oy.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2007. Päästökauppa. Viitattu 8.9.2010.  
<http://www.tem.fi/index.phtml?s=1017>.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008.  
[http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus\\_311008.pdf](http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf)
- Ulgianti, S. 2001. A Comprehensive Energy and Economic Assessment of Biofuels: When "Green" Is Not Enough. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20 (1), 71-106.
- Ulgianti, S. & Brown, M.T. 2003. Towards a Conceptual Synthesis in Thermodynamics, Ecology, Biology and Economy. H.T. Odum's Energy Analysis. Teoksessa S. Dumontet, E. Landi and F. Pastoni (Eds), *Biologia Clinica, Ambiente, Sicurezza e Qualità: Obiettivi di una Professione che evolve*. Proceedings of the XVI International Congress of the Italian Biologists, Abano Terme (PD), s. 279-302.
- United Nations. 1982. World Charter for Nature. A/RES/37/7. Viitattu 1.9.2010.  
<http://www.un.org/documents/ga/res/37/a37r007.htm>
- Vartiainen, H. 2008. Onko taloustiede ihmistiede? *Kansantaloudellinen aikakirja* 104. vsk. 4/2008.
- Vatn, A. 2008. Payments for environmental services: An institutional analysis. The 10<sup>th</sup> biennial conference of ISEE "Applying Ecological Economics for Social and Environmental Sustainability", Nairobi, 7-11 August. 2008. 20 s.
- Vihervaara, P. & Kamppinen, M. 2009. Saako ekosysteemiä mitata rahassa? *Tieteessä tapahtuu* 3/2009, 18-27.
- VTT 2003. Energy Vision 2030 for Finland. 3. painos. Helsinki: Edita.
- VTT 2004. Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Helsinki: Edita Prima Oy.
- VTT 2009. Energy Vision 2050. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Weitzman, M. 2001. A Contribution to the Theory of Welfare Accounting. *Scandinavian Journal of Economics*, 103 (1), 1-23.
- Weitzman, M. 2007. The Stern Review of the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45 (3), 703-724.
- Ympäristöministeriön www-sivut. Euroopan unionin päästökauppa. Viitattu 17.1.2009.  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=166173&lan=FI>
- Ympäristöministeriö 2007: Suomi saavutti tavoitteensa Balin ilmastokokouksessa. Tiedote julkaistu 17.12.2007. Viitattu 13.1.2009.  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=260262&lan=fi>.
- Öljy- ja kaasualan keskusliitto. 2008. Maakaasu. Viitattu 1.8.2010. <http://www.oil-gas.fi/index.php?m=3&id=17>.

## LIITE 1

TAULUKKO 4 Suomen sähköntuotannon kustannusten ja muiden indikaattoreiden laskennassa käytetyt lähtöoletukset, vuosi 2008

Lähtöoletukset	Yksikkö	Tuuli	Läh.	Hiili	Läh.	Kaasu*	Läh.	Turve	Läh.	Ydin	Läh.	Vesi <sup>o</sup>	Läh.	CHP#	Läh.
Sähköteho(keskimääräinen laitos)	MW	3	[2]	500	[2]	400	[2]	150	[2]	1500	[2]	n.a.		200	[1]
Investointikustannus	€/kW	1300	[1]	1300	[2]	700	[2]	1500	[2]	2750	[2]	-		1500	[6]
Huippukäyttöaika	h/a	2000	[1]	8000	[2]	8000	[2]	8000	[2]	8000	[2]	-		8000	[6]
Vuosihyötysuhde		-		0,42	[2]	0,58	[2]	0,40	[2]	0,37	[2]	-		0,30	[18]
Polttoaineen hinta	€/MWh <sub>f</sub>	-		11,00	[2]	27,00	[3]	11,00	[4]	1,85	[2]	-		15,68	[2,5]
Reaalikorko		0,05	[6]	0,05	[6]	0,05	[6]	0,05	[6]	0,05	[6]	-		0,05	[6]
Taloudellinen elinikä	vuosia	20	[6]	20	[6]	20	[6]	20	[6]	40	[6]	-		20	[6]
Annuiteettitekijä		0,08	[9]	0,08	[9]	0,08	[9]	0,08	[9]	0,06	[9]	-		0,08	[9]
Päästöoikeuden hinta	€/t CO <sub>2</sub>	-		25	[6]	25	[6]	25	[6]	25	[9]	-		25,00	[6]
CO <sub>2</sub> -ominaispäästökerroin	g CO <sub>2</sub> /MJ	-		94,60	[5]	55,04	[5]	105,90	[5]	-		-		85,86	[5]
Polttoaineen t. muun panoksen solar transformity	sef/J	2,51E+03	[10]	6,70E+04	[10]	8,75E+04	[11]	3,18E+04	[10]	3,01E+03	[12]	4,68E+04	[10]	5,70E+04	[10,11,14]
Polttoaineen GER	MJ/yks.	-		29,4	[15]	51,3	[15]	2	[17]	-		-		26,10	[9]

TAULUKKO 5 Suomen sähköntuotannon taloudelliset ja ympäristöindikaattorit (per MWh tai joule)

Indikaattorit	Yksikkö	Tuuli	Läh.	Hiili	Läh.	Kaasu*	Läh.	Turve	Läh.	Ydin	Läh.	Vesi <sup>o</sup>	Läh.	CHP#	Läh.
Investointikustannus	€/MWh	650	[9]	163	[9]	88	[9]	188	[9]	344	[9]	-		188	[9]
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset	€/MWh	11	[2]	8	[2]	5	[2]	8	[2]	10	[2]	6	[7]	8	[6]
Pääomakustannukset	€/MWh	52,16	[9]	13,04	[9]	7,02	[9]	15,05	[9]	20,03	[9]	-		15,05	[9]
Polttoaineen määrä	MWh <sub>fuel</sub> /MWh	n.a.		2,38	[9]	1,72	[9]	2,50	[9]	2,70	[9]	n.a.		3,33	[9]
Polttoaineen määrä	J/MWh	n.a.		8,57E+09	[9]	6,21E+09	[9]	9,00E+09	[9]	9,73E+09	[9]	n.a.		1,20E+10	[9]
Polttoaineenkustannus	€/MWh	-		26,19	[9]	46,55	[9]	27,50	[9]	5,00	[9]	-		52,27	[9]
Polttoaineen suorat CO <sub>2</sub> -päästöt	t CO <sub>2</sub> /MWh	-		0,81	[9]	0,34	[9]	0,95	[9]	-		-		1,03	[9]

Suorat ja epäsuorat CO <sub>2</sub> -päästöt	t CO <sub>2</sub> /MWh	0,04	[20]	1,11	[20]	0,76	[20]	1,08	[8]	0,07	[16]	0,01	[20]	1,13	[9]
Päästökaupan kustannus	€/MWh	-		20,27	[9]	8,54	[9]	23,83	[9]	-		-		17,75	[9]
Tuotantokustannukset	€/MWh	63	[9]	68	[9]	67	[9]	74	[9]	35	[9]	6	[9]	93	[9]
Polttoaineen emergiakustannus	seJ/MWh	n.a.		5,74E+14	[9]	5,43E+14	[9]	2,86E+14	[9]	2,93E+13	[9]	n.a.		6,84E+14	[9]
Sähköntuotannon solar transformity	seJ/J	1,10E+05	[19]	2,87E+05	[20]	2,86E+05	[20]	2,99E+05	[10]	3,36E+05	[10]	1,12E+05	[19]	1,22E+05	[18]
Polttoaineen GER-kustannus	MJ/MWh	-		5,74E+03	[9]	4,99E+03	[9]	6,78E+02	[9]	3,50E+02	[16]	-		1,10E+04	[9]
Sähköntuotannon GER-kustannus	J/J <sub>e</sub>	0,13	[20]	4,00	[20]	2,78	[20]	4,18	[9]	0,26	[16]	0,04	[20]	2,33	[18]

TAULUKKO 6 Suomen sähköntuotannon taloudelliset ja ympäristöindikaattorit kansantalouden tasolla vuonna 2008

Indikaattorit	Yksikkö	Tuuli	Läh.	Hiili	Läh.	Kaasu*	Läh.	Turve	Läh.	Ydin	Läh.	Vesi <sup>o</sup>	Läh.	CHP <sup>#</sup>	Läh.
Sähkötöteho	MW	1,43E+02	[13]	n.a.		7,83E+02	[5]	n.a.		2,65E+03	[5]	3,05E+03	[5]	4,10E+03	[5]
Tuotettu sähkön määrä	MWh/year	2,61E+05	[9]	5,60E+06	[5]	8,00E+05	[5]	2,84E+06	[5]	2,20E+07	[5]	1,69E+07	[5]	1,54E+07	[5]
Tuotettu sähkön määrä	J/year	9,40E+14	[9]	2,02E+16	[9]	2,88E+15	[9]	1,02E+16	[9]	7,94E+16	[9]	6,09E+16	[9]	5,55E+16	[9]
Polttoaineen määrä	J/year	n.a.		3,79E+16	[5]	3,50E+15	[5]	1,84E+16	[5]	2,41E+17	[5]	n.a.		1,98E+17	[9]
Tuotantokustannukset	€/year	1,65E+07	[9]	3,78E+08	[9]	5,37E+07	[9]	2,11E+08	[9]	7,72E+08	[9]	1,05E+08	[9]	1,43E+09	[9]
Suorat CO <sub>2</sub> -päästöt	t CO <sub>2</sub> /year	-		3,59E+06	[9]	1,93E+05	[9]	1,95E+06	[9]	-		-		1,70E+07	[9]
Suorat ja epäsuorat CO <sub>2</sub> -päästöt	t CO <sub>2</sub> /year	1,04E+07	[9]	6,22E+09	[9]	6,08E+08	[9]	3,06E+09	[9]	1,54E+09	[9]	1,69E+08	[9]	1,75E+10	[9]
Päästökaupan kustannus	€/year	-		1,14E+08	[9]	6,83E+06	[9]	6,76E+07	[9]	-		-		2,74E+08	[9]
Polttoaineen emergiakustannus	seJ/year	n.a.		2,54E+21	[9]	3,06E+20	[9]	5,85E+20	[9]	7,24E+20	[9]	n.a.		1,13E+22	[9]
Sähköntuotannon solar transformity	seJ/year	1,03E+20	[9]	5,79E+21	[9]	8,23E+20	[9]	3,06E+21	[9]	2,67E+22	[9]	6,82E+21	[9]	6,77E+21	[9]
Polttoaineen GER-kustannus	MJ/year	-		3,22E+10	[9]	3,99E+09	[9]	1,92E+09	[9]	7,72E+09	[9]	n.a.		1,69E+11	[9]
Sähköntuotannon GER-kustannus	J/year	1,23E+14	[9]	8,07E+16	[9]	8,00E+15	[9]	4,26E+16	[9]	2,06E+16	[9]	2,56E+15	[9]	1,29E+17	[9]

\* Kaasukombivoimala, <sup>o</sup> Vanhojen vesivoimalaitosten pääomakustannukset on jo kuoletettu, <sup>#</sup> Yhdyskuntien laitos, joka tuottaa myös kaukolämpöä

Taulukon lähteet:

[1] GreenStream Network, 2007. [2] Tarjanne & Kivistö, 2008. [3] Energiamarkkinavirasto, 2010. [4] Puuenergia, 2010. [5] Tilastokeskus, 2010. [6] Kirjallisuuteen perustuvat omat oletukset. [7] IEA/NEA, 2005. [8] Omät laskelmat perustuen IPCC:hen, 2006. [9] Kirjallisuuteen perustuvat omät laskelmat. [10] Odum, 1996 perustuen. [11] Bargigli ym., 2004. [12] Lapp, 1991. [13] Holttinen & Stenberg, 2009. [14] Hagström, 2006. [15] Boustead & Hancock, 1972. [16] Omät laskelmat perustuen Sovacool, 2008. [17] Biondi ym., 1989. [18] Buonocore ym., 2010. [19] Brown & Ulgiati, 2004. [20] Brown & Ulgiati, 2002.