Energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tutkiminen yleisen tasapainomallin avulla

Anu Hernesniemi
Helsingin yliopisto
Taloustieteen laitos
Ympäristöekonomia
Pro gradu -tutkielma
Toukokuu 2010

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Faculty	Department
Faculty of Agriculture and Forestry	Department of Economics and Management

Author
Anu Hernesniemi

Title
Energy efficiency and the rebound effect in general equilibrium framework

Subject
Environmental economics

Level	Month and year	Number of pages
Master's thesis	May 2010	92

Abstract

In Finland energy requirement is high because of the cold climate and long distances. Energy is needed to ensure the welfare and an industrial life's needs. Energy taxation, emissions trading and subventions are well known political instruments for decreasing energy consumption. Energy efficiency has become a famous policy for reducing energy consumption without lowering the quality of energy services. There have always been critics for the energy efficiency and its consequences among the researchers. It is possible to have improving energy efficiency, while still seeing rises in energy consumption. This phenomenon is known as a rebound effect. If energy consumption rises above the level it would have been without efficiency improvements the phenomena is called backfire effect.

The objective of this thesis was to find out how to investigate the rebound-effect, what are the critical factors of it and present the results of the resent empirical studies. Attention has been also in finding out what energy efficiency is, how it appears in economical models and why it is an important research area.

The effects of energy efficiency are difficult to allocate between different economic factors. Hence it seems that a computable general equilibrium framework is obvious tool to investigate the rebound effect in the national economy level though it's quite complicated. The production function and the elasticity of substitution seem to be crucial for the size of the rebound effect in a computable general equilibrium framework. It was observed that when the elasticity of substitution was high, the rebound effect was also high. For this reason the form of production function is crucial, it should be one where the elasticity of substitution is not a constant. Empirical studies have established evidence of the rebound effect but its size varies with different areas, with a different elasticity of substitution and in different time periods. In some scenarios even backfire was observed. None of the cases reach total utility of the efficiency improvements.

Avainsanat
energy efficiency, rebound effect, general equilibrium model

Säilytyspaikka
Viikin tiedekirjasto, Viikinkaari 11 A, 00014 Helsingin yliopisto

Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto	Laitos
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta	Taloustieteen laitos

Tekijä
Anu Hernesniemi

Työn nimi
Energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tutkiminen yleisen tasapainomallin avulla

Oppiaine
Ympäristöekonomia

Työn laji	Aika	Sivumäärä
Pro gradu -tutkielma	toukokuu 2010	92

Tiivistelmä
Energiantarve on korkea Suomessa johtuen sekä kylmästä ilmastosta että pitkistä välimatkoista. Jotta voitaisiin turvata hyvinvointi ja tuotantoelämän tarpeet myös tulevaisuudessa, tarvitaan paljon energiaa. Tästä johtuen energiankulutuksen hillitseminen on yksi suurimpia ympäristöpolitiikan haasteita. Energiaverotus, päästökauppa sekä tukiaiset ovat mahdollisia keinoja vähentää energiankulutusta. Tämän hetken politiikassa suosiota onkin kasvattanut energiatehokkuus, jossa energiankulutuksen lasku saavutetaan tehokkuuden kasvun myötä ilman, että palvelun taso laskee. Energiatehokkuuden vaikutuksista ei kuitenkaan olla täysin yksimielisiä tutkijoiden keskuudessa. On nimittäin mahdollista, että tehokkuuden kasvun myötä ei saavuteta vastaavaa energiankulutuksen laskua. Tätä ilmiötä kutsutaan rebound-vaikutukseksi. Jos energiankulutus nousee korkeammalle tasolle kuin mitä se olisi ollut ilman tehokkuusparannuksia, puhutaan backfire-ilmiöstä. Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, miten energiatehokkuuden rebound-vaikutusta voidaan tutkia, mitkä tekijät ovat merkittäviä tutkimuksen kannalta ja minkälaisia tuloksia kirjallisuudessa on saatu rebound-vaikutuksen suuruudelle. Tutkimuksen kannalta kiinnostavaa on myös ymmärtää, mitä energiatehokkuus on, miten se voidaan tuoda taloudellisiin malleihin ja miksi energiatehokkuus on tärkeä tutkimuksen aihe.

Energiatehokkuuden vaikutuksia on vaikea kohdentaa eri talouden tekijöiden välille. Näin ollen näyttäisi siltä, että energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tarkasteluun soveltuisi parhaiten yleinen tasapainomalli, jonka avulla koko kansantalous voidaan huomioida. Kun rebound-vaikutuksen tarkastelu tehdään yleisen tasapainomallin avulla, on oleellista kiinnittää huomiota sekä tuotantofunktion valintaan että substituutiojouston suuruuteen. Substituutiojoustolla näyttäisi olevan vaikutusta rebound-vaikutuksen suuruuteen ja näin ollen rebound-vaikutuksen tarkasteluun soveltuu parhaiten tuotantofunktio, jossa substituutiojousto ei ole vakio. Rebound-vaikutuksesta tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että ilmiö on olemassa, mutta sen suuruus vaihtelee eri alueilla, eri substituutiojouston arvoilla sekä eri aikaväleillä. Muutamassa skenaariossa rebound-vaikutus saavutti jopa backfire-ilmiön, mutta yhdessäkään skenaariossa rebound-vaikutus ei saanut nolla-arvoa eli energiatehokkuuden kasvu ei tuottanut vastaavaa energiankulutuksen laskua.

Avainsanat
energiatehokkuus, rebound-vaikutus, yleinen tasapainomalli

Säilytyspaikka
Viikin tiedekirjasto, Viikinkaari 11 A, 00014 Helsingin yliopisto

Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information

Lyhenteet

γ	tehokkuusparametri
σ	Substituutiojousto
τ	Tekninen tehokkuusparametri
E	Energia
F	Polttoaine
K	Pääoma
L	työvoima
r	Tekninen rajakorvattavuusaste
s_F	Polttoaineen arvon osuus
Y	Tuotos
AES	Allen-Uzawan substituutiojousto
AMOSENVI	Energy-economy-environment general equilibrium model of Scotland, Skotlannin energia-talous-ympäristö yleisen tasapainon malli
BKT	Bruttokansantuote
CES	vakiosubstituutiojousto (constant elasticity of substitution)
CPE	kysynnän ristijousto (cross-price elasticity)
EEI	Energiatehokkuusindeksi
EIF	Energiaintensiteettikerroin
EU15	Euroopan Unionin jäsenvaltiot ennen vuotta 2004 (Alankomaat, Belgia, Ranska, Luxemburg, Saksa, Italia, Tanska, Irlanti, Britannia, Kreikka, Portugali, Espanja, Itävalta, Suomi ja Ruotsi)
EU27	Euroopan Unionin jäsenvaltiot vuosien 2004 ja 2007 jälkeen (EU15+ Kypros, Latvia, Liettua, Malta, Puola, Slovakia, Slovenia, Tšekki, Unkari, Viro, Bulgaria ja Romania)

GTAP	Global Trade Analysis Project
GTAP-E	Global Trade Analysis Project Energy-Environmental version
HSE	Hicksin substituutiojousto
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
KHK	Kasvihuonekaasu
KHK/BKT	Kasvihuonekaasuintensiteetti
MES	Morishiman substituutiojousto
RE	Rebound-vaikutus
ROW	Rest of world, muu maailma
SAM	Social Accounting System, Sosiaalitilinpito (tilastosysteemi)
SEC_1	Ominaisenergiankulutus
SEC_2	Ominaisenergiankulutus huomioituna tuotantorakenteen muutoksilla
SEC_3	Primäärienergian ominaiskulutus
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
UK	Yhdistynyt kuningaskunta
UKENVI	Economy-energy-environment computable general equilibrium model of the UK, Yhdistyneen kuningaskunnan talous-energia-ympäristö yleisen tasapainonmalli

Sisällys

1 Johdanto 7
2 Energiatehokkuus 9
2.1 Energiantuotantomuotojen ympäristövaikutukset 10
2.2 Energiatehokkuuden mittaaminen 13
2.3 Energiatehokkuuden tuominen taloudellisiin malleihin 17
2.4 Energiatehokkuuteen kohdistuva kritiikki 19
3 Rebound-vaikutus 21
3.1 Rebound-vaikutus 21
3.2 Kuluttajan näkökulma 24
3.3 Tuottajan näkökulma 30
3.4 Yleinen tasapainomalli rebound-vaikutuksen tarkastelussa 32
4 Tuotantofunktion ja substituutiojouston valinta energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tarkastelussa 38
4.1 Tuotantofunktioiden ominaisuudet 38
4.2 Tuotantofunktion sopivuus rebound-vaikutuksen tarkastelussa 42
4.3 Substituutiojouston määrittäminen 47
5 Energiankulutus, energiatehokkuus sekä rebound-vaikutuksen suuruus 56
5.1 Energiankulutus Suomessa 56
5.2 Energiatehokkuus 61
5.3 Rebound-vaikutuksen suuruus 68
5.4 Substituutiojouston merkitys rebound-vaikutuksen suuruuteen 76
5.5 Rebound-vaikutukseen kohdistuva kritiikki 78
6 Johtopäätökset 82
LÄHTEET 84
LIITTEET 91

1 Johdanto

> ”Arvoisa puhemies! Minä en kuulu ilmastouskovaisiin, joita tässä talossa tuskin kovin montaa on. Siksi haluan kyllä korostaa sitä, että tämä selonteko vie meidät kohti 50-lukua, kohti vähäpätöistä Suomea, joka on todellakin myös vähäpäästöinen. Hallitus haluaa, että kansalaiset asuvat maalla nurmijärveläisessä onnelassa, jokaisella suomalaisella täytyy olla oma matintalo, jonka takapihalla surraa tuulimylly ja etupihalla odottaa lautakasa - anteeksi, lantakasa - ahkeraa tomaatinviljelijää. 50-luvussa ei ole, arvoisa hallitus, mitään ihailtavaa. Suomi oli köyhä ja uhkasi sellaiseksi jäädäkin, elleivät suomalaiset olisi sisuuntuneet ja ryhtyneet tekemään töitä. 50-luvun suomalaiset eivät osanneet vaatia palveluja ja veloittaa valtiota rutiköyhäksi. Leipä oli kovalla työllä ansaittava. Tähän me ehkä palaamme, jos kaikki nämä toteutuvat, mitä tässä hallitus meille esittää.”
> (Ukkola, 2009.)

Energiankulutuksen hillitseminen on yksi ympäristöpolitiikan suurimpia haasteita. Suomen kansantalouden kannalta energian riittävyys kilpailukykyisellä hinnalla on tärkeää ja siksi keskustelu energiapolitiikasta saattaa nostaa myös poliitikkojen tunteet pintaan. Kun samanaikaisesti tulisi tehdä sekä kestäviä ratkaisuja ympäristön kannalta että pyrkiä säilyttämään kilpailukyky ja työpaikat Suomessa, ollaan monien poliitikkojen näkökulmasta haastavien päätösten edessä. Ilmastopoliittisten ongelmien ratkaisuun markkinavoimat eivät ole riittävät. Lundin (2007a) viimeisimmät kokemukset osoittavat, että vaikka resurssit käytettäisiin tehokkaasti, eivät lyhyen aikavälin ratkaisut tuota tyydyttävää tulosta pitkän aikavälin haasteisiin energian suhteen.

Energiankulutuksen, ja sen myötä kasvihuonekaasupäästöjen, hillitsemiseksi käytettävissä olevat instrumentit ovat moninaisia. Energiaverotus, päästökauppa sekä tukiaiset ovat mahdollisia keinoja hillitä energiankulutusta. Tämän hetken politiikassa suosiota on kasvattanut myös energiatehokkuus, jossa tehokkuuden kasvun myötä energiankulutuksen kasvun oletetaan hidastuvan. Energiatehokkuus on saavuttanut suosiota poliittisten päättäjien keskuudessa ja se onkin kirjattu yhtenä komponenttina Valtioneuvostona tulevaisuusselontekoon (2009) ilmasto- ja energiapolitiikasta. Suomen lisäksi myös Hollanti, Intia, Kiina, Saksa ja Uusi-Seelanti ovat ottaneet energiatehokkuuden osaksi ilmastopolitiikkaa. Energiatehokkuuden avulla pyritään saavuttamaan vastaava palveluntaso pienemmällä energianmäärällä. EU:ssa on määritelty energiankäytön tehostamiselle yhteinen indikatiivinen tavoite. Tavoitteena on

vähentää energiankäyttöä 20 % siitä tasosta, mitä se olisi ilman erillisiä toimenpiteitä. (Työ- ja elinkeinoministeriö TEM, 2009.) Energiatehokkuustoimenpiteet ovat hyvin erilaisia, ne voivat olla teknisiä tai liittyä energiaa kuluttavien laitteiden käyttöön, ne voivat myös liittyä toimintatapoihin, -ympäristöön tai käyttäytymiseen (TEM, 2008).

Kaikki tutkijat eivät kuitenkaan usko energiatehokkuuden tuomiin säästöihin. Herring (2006) kritisoi energiatehokkuutta siitä, ettei sen avulla välttämättä saavuteta vastaavaa energiankulutuksen laskua vaan on jopa mahdollista, että energiankulutus kasvaa. Kun energiankulutus kasvaa enemmän kuin potentiaalinen säästömahdollisuus olisi, kutsutaan ilmiötä nimellä rebound-vaikutus. Jos energiankulutus kasvaa enemmän kuin se olisi kasvanut ilman tehokkuusmuutoksia, puhutaan backfire-ilmiöstä.

Koska energiatehokkuus esiintyy yhtenä politiikan välineenä, on energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tarkastelu erityisesti mielekästä (Roy, 2000). Energiatehokkuuden rebound-vaikutus on monimutkainen ilmiö, jonka tutkiminen on haasteellista. Tässä tarkastelussa on tarkoitus koota yhteen jo tehtyjä tutkimuksia energiatehokkuuden rebound-vaikutuksesta ja selittää sen tutkimiseen liittyviä ongelmia. Tarkoituksena on selvittää, mikä rebound-vaikutus on, miten sitä on tutkittu, minkälaisiin tuloksiin tutkimuksissa on tultu ja mitkä tekijät ovat tutkimuksen kannalta oleellisia huomioida. Kiinnostuksen kohteena on erityisesti yleisen tasapainomallien avulla tehdyt tutkimukset, koska ne antavat kokonaisvaltaisimman käsityksen energiatehokkuuden kansantaloudellisista vaikutuksista. Jotta energiatehokkuuden rebound-vaikutus voitaisiin täysin ymmärtää, on aluksi ymmärrettävä energiatehokkuus niin taloudellisena kuin yhteiskunnallisena ilmiönä.

Tutkielma etenee siten, että luvussa 2 käsitellään energiatehokkuutta, sen mittaamista ja syitä, miksi energiatehokkuus on tärkeä politiikan väline. Luvussa 3 käydään rebound-vaikutuksen teoriaa läpi aluksi kuluttajan ja tuottajan näkökulmasta, jotka yhdistyvät lopulta koko taloutta käsittelevään yleiseen tasapainomallinnukseen. Luvussa 4 tarkastellaan niitä tekijöitä, jotka ovat ratkaisevia rebound-vaikutuksen tutkimisen kannalta, kuten tuotantofunktion valinta ja substituutiojouston suuruus. Tämän jälkeen luvussa 5 käsitellään Suomen energiankulutuksen rakennetta, energiatehokkuus indikaattoreita sekä rebound-vaikutuksen tutkimuksista saatuja tuloksia. Vertailun kannalta huomioon on otettu myös muiden Euroopan maiden tunnuslukuja.

2 Energiatehokkuus

Energiatehokkuus on itsessään suhteellinen käsite, joka voidaan jossain määrin erottaa energiansäästöstä. Energiansäästöllä tarkoitetaan yleensä energiankäytön absoluuttista vähentämistä. Energiatehokkuus puolestaan tarkoittaa suuremman tuotoksen aikaansaamista samalla tai pienemmällä energiankäytöllä samanaikaisesti säilyttäen palvelutaso ja ottaen huomioon muun muassa turvallisuus- ja terveysnäkökohdat. Elintason noustessa kuluttajat hankkivat yhä enemmän hyödykkeitä, joten usein sekä energiatehokkuus että energiankulutus kasvavat samanaikaisesti. (Sektoritutkimuksen neuvottelukunta, 2008)

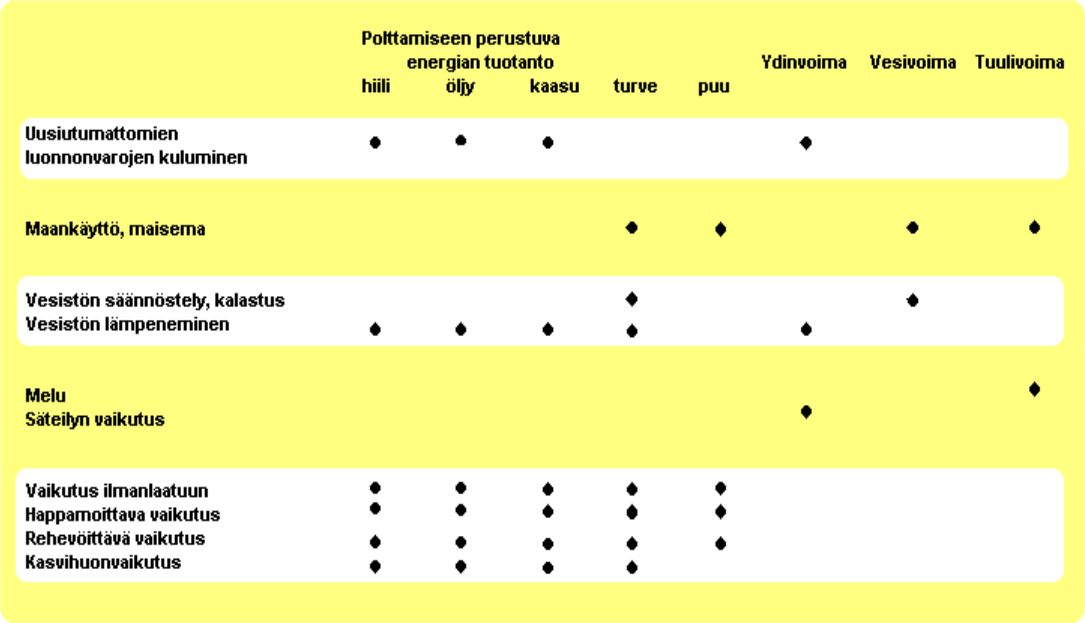
Kun sama tuotantomäärä tai tuotannonarvo saavutetaan alhaisemmalla energiakulutuksella, kun suurempi tuotantomäärä tai arvo saavutetaan samalla energiakulutuksella tai kun tuotannonmäärän tai tuotannon arvon kasvun aikaansaamiseksi tarvitaan suhteellisesti pienempi energiankulutuksen kasvu, voidaan puhua energiatehokkuuden paranemisesta (Heikkilä ym. 20, 2008). Energiansäästämisellä tarkoitetaan energian kulutuksen vähentämistä energiapalvelun laadun kautta. Säästöä saadaan aikaan muun muassa laskemalla asunnon sisälämpötilaa tai rajoittamalla ajonopeuksia. Energiansäästämiseen vaikuttaa säädökset, kuluttajien käyttäytyminen sekä elämäntavan muutokset. (Herring, 2006, 11.)

Energiankulutuksen suhde bruttokansantuotteeseen ei yksin riitä kuvaamaan energiatehokuutta tai sen ominaisuuksia. Tämän vuoksi energiantehokkuuden mittaamista varten on käytettävä tilanteeseen sopivaa mittaria, riippuen tutkimuksen lähtökohdista. Seuraavassa kappaleessa käsitellään tehokkuuden mittaamista varten käytettäviä mittareita. Kun energiatehokkuuden vaikutusta koko kansantalouden tasolla halutaan mitata, vaatii tehokkuuden määrittäminen erilaista analyysiä.

Tarkastelussa pohditaan aluksi energiatehokkuuden tuomia hyötyjä, jonka jälkeen käydään läpi erilaisia keinoja mitata energiatehokkuutta. Ennen energiatehokkuuden tarkastelua käydään kuitenkin läpi energiantuotannon ympäristövaikutuksia, jotta voidaan ymmärtää, miksi energiatehokkuudella on niin merkittävä rooli energiapolitiikassa.

2.1 Energiantuotantomuotojen ympäristövaikutukset

Energiantuotannon ympäristövaikutukset ovat moninaiset. 1980-luvulta lähtien on kiinnitetty korostuneemmin huomiota fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyvien päästöjen vaikutuksiin. Palamisesta syntyvien päästöjen ongelmana on niiden globaalius. Kuviossa 1 on esitetty merkittävimpiä energiantuotantomuotojen ympäristövaikutuksia.



KUVIO 1 Energian tuotantomuotojen merkittävimpiä ympäristövaikutuksia
Lähde: VTT Energia. 1999, 219.

Noin 80 % nykyisistä hiilidioksidipäästöistä on peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Kasvihuoneilmiö voimistuu, kun kasvihuonekaasujen pitoisuus ilmakehässä kasvaa ja yhä suurempi osa lämpösäteilystä jää lämmittämään alailmakehää. Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan tämän ilmiön voimistumista. Hiilidioksidin määrä on lisääntynyt noin 20 % ja metaanin noin 70 % tällä vuosisadalla. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasuista merkittävin, vaikka muiden kasvihuonekaasujen määrä on suhteellisesti voimakkaampi, on niiden päästöt hiilidioksidiin verrattuna pieniä. Energiasektori on ihmisten aiheuttamien kasvihuonekaasujen tärkein lähde. Ilmastonmuutoksen rinnalla happamoituminen ja hapanlaskeuma ovat merkittäviä

energiantuotannon ympäristövaikutuksia. Rikkidioksidi, typenoksidi ja ammoniakki ovat happamoitumista aiheuttavia päästöjä. Kivihiilen, turpeen ja öljyn poltossa syntyy rikkidioksidia (SO_2) niiden sisältämän rikin palaessa. Polttoilman sekä itse polttoaineen sisältämästä typestä syntyy typenoksideja (NO_X). (Finergy, 1998/ 1999.)

Ilmaan nämä kulkeutuvat savukaasujen mukava, missä ne muodostavat yhdessä ilman sisältämän vesihöyryn kanssa rikki- ja typpihappoa. Tätä kutsutaan niin sanotuksi happosateeksi ja se aiheuttaa maaperän ja vesistöjen happamoitumisen. Metsämaiden ja vesistöjen rehevöitymistä voivat aiheuttaa typenoksidit ja ammoniakki. Vuonna 1996 68 % rikkipäästöistä oli energiantuotannon aiheuttamia, kuitenkin merkittävin osa rikkipäästöistä tulee maamme rajojen ulkopuolelta. Energiantuotannon kannalta rikkipäästöjen vähentäminen on ollut mahdollista, koska rikki voidaan poistaa savukaasuista teknisin keinoin. Typenoksidien määrään on mahdollista vähentää polttoteknisin keinoin sekä kemiallisten pelkistys- absorptio- ja adsorptioreaktioiden avulla. Suomen kannalta on tärkeää vaikuttaa lähialueiden ja muuan Euroopan päästöjen vähentämiseen. (Finergy, 1998/ 1999.)

Energiantuotannosta syntyy myös pienhiukkasia. Sen aiheuttama osuus taajamien hengitysilmaan on arvioitu olevan enimmillään 5–10 %. Voimalaitosten hiukkaspäästöjä on mahdollista vähentää sähkösuodattimien avulla. Pienhiukkaset vaikuttavat ympäristöilman laatuun ja sitä kautta niiden katsotaan vaikuttavan terveyteen. Ilmalaadun lisäksi energiantuotanto vaikuttaa myös vesistöihin. Laitosten lämpimien jäähdytysvesien aiheuttamaan veden lämpeneminen jäähdytysveden purkualueella aiheuttaa lauhdutusvoimalaitosten vesistövaikutukset. Biologinen toiminta lisääntyy purkualueella veden lämpötilan nousun seurauksena. Lämpötilan muutoksella on myös vaikutusta alueen kalastoon ja kalastukseen. (Finergy, 1998/ 1999.)

Energiantuotannossa syntyy myös jätettä. Voimalaitoksen tuhkat ja rikinpoistotuotteet ovat merkittävimmät näistä. Kiinteät polttoaineet sisältävät aina palamatonta ainesta. Tällaisesta aineksesta syntyy poltossa tuhkaa. Kivihiilen tapauksessa tuhkaa syntyy 10–15 % hiilen määrästä, kun taas turpeen ja puuperäisten polttoaineiden tuhkapitoisuus on selkeästi alhaisempi. Savukaasujen mukana kulkeutuvat hiukkaset eli lentotuhka kerätään sähkö- tai letkusuodattimiin. Pohjatuhka kertyy kattilan alaosaan ja on

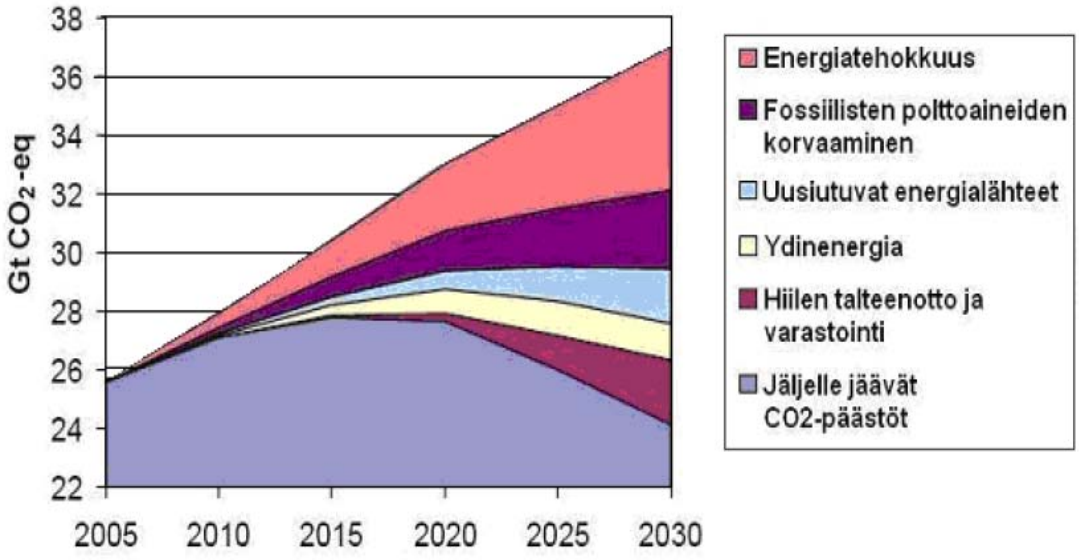
raekooltaan karkeampaa kuin lentotuhka. Kivihiilituhkien hyötykäyttöaste on keskimäärin 68 %, mikä on korkeampi kuin turvetuhkien hyötykäyttöaste, joka on 60 %. Kipsiä syntyy sivutuotteena voimalaitosten rikinpoistolaitoksilla. Käytettävissä oleva menetelmän lisäksi rikinpoistossa syntyvien sivutuotteiden määrään vaikuttaa myös poltettavan hiilen rikkipitoisuus, polttotapa, rikinpoistoaste sekä lentotuhkan poistotehokkuus. Rikinpoistokipsin hyötykäyttö aste on noin 80 % ja niin kutsutun puolikuivan rikinpoistomenetelmän sivutuotteita voidaan hyödyntää noin 40 %. (Finergy, 1998/ 1999.)

Ydinvoiman suurin ympäristövaikutus on siellä syntyvät jätteet. Ne luokitellaan niiden sisältämän radioaktiivisuuden mukaan vähä-, keski- ja runsasaktiivisiin. Suurin osa jätteestä on vähä- ja keskiaktiivista voimalaitosjätettä, jotka koostuvat pääasiasiassa laiteosista, suodatinmateriaaleista, huoltojätteistä, ioninvaihtohartseista ja haihdutusjätteistä. Käytetty ydinpolttoaine on runsasaktiivista jätettä. Runsasaktiivisen polttoainenipun aktiivisuustaso laskee käytön jälkeen yhdessä vuodessa sadasosan alkuperäisestä. (Finergy, 1998/ 1999.)

Uusiutuvilla energialähteillä on myös ympäristövaikutuksia. Puuperäisiä polttoaineita pidetään kasvihuonekaasuneutraaleina, sillä niiden poltossa vapautuvan hiilidioksidin katsotaan sitoutuvan nopeasti kasvavaan biomassaan. Puupolttoaineen saannin tulisi olla tasalaatuista ja hinnaltaan kilpailukykyistä, jotta sillä olisi edellytykset laajalle käytölle. Vesivoima ei aiheuta päästöjä ilmaan, veteen eikä maahan, mutta se vaikuttaa vedenkorkeuden vaihteluväliin ja rytmiin sekä virtaamiin, joilla taas on vaikutuksia vesistön virkistyskäyttöön, kalatalouteen ja ekologiaan. Tuulivoiman ympäristövaikutukset ovat lähinnä alueellisia kuten maisemahaitat, melu, linnustonvaikutukset sekä mahdolliset maankäytön rajoitukset. Suomessa on tutkimusten mukaan runsaasti tuulivoima kapasiteettia. Sähkön ja lämmöntuotannossa on mahdollista hyödyntää aurinkoenergiaa. Sen potentiaali Suomessa ei ole suuri ja sillä on lähinnä lämmitysmuotoja täydentävä lämpöratkaisu. (Finergy, 1998/ 1999.)

Energiatehokkuuden kasvun myötä saavutetaan hyötyjä, jotka ovat hyvin tunnistettavissa. Tällaisia hyötyjä ovat muun muassa vähentynyt tarve energiainfrastruktuuri investoinneille, alentunut riippuvuus fossiilisista polttoaineista, kasvanut kilpailukyky sekä kuluttajan hyvinvoinnin kasvu. Tämän lisäksi hyötyä

voidaan saavuttaa myös ympäristön näkökulmasta vähentyneiden kasvihuonekaasujen ja paikallisten saasteiden muodossa. (IEA, 2008.)



KUVIO 2 Keinot vähentää CO_2 päästöjä

Lähde: European Comission (2008, 8)

Energiatehokkuuden kasvun myötä energiankysynnän oletetaan laskevan ja samalla myös riippuvuus energiantuonnista laskee (von Wees, Uyterlinde & Maly, 2002, 1058). Kuviossa 2 on esitetty keinoja torjua ilmastonmuutosta pitkällä aikavälillä. Energiatehokkuudelle muodostuu merkittävä rooli ja siksi sen vaikutusten tutkiminenkin on tärkeää.

2.2 Energiatehokkuuden mittaaminen

IEA (2008) jakaa mittarit aggregaattitason mittareihin ja mittareihin, joita ei ole aggregoitu. IEA:n mittarit poikkeavat aikaisemmin määritellyistä mittareista siten, että mittareiden tulee mahdollistaa kansainvälinen vertailu mahdollisimman todenmukaisesti. Käytetyt aggregaattitason mittarit ovat energiankokonaiskulutus suhteessa bruttokansatuloon sekä energiankulutus suhteutettuna väestönmäärään. Ensimmäinen mittaa, kuinka paljon energiaa tarvitaan, jotta voidaan tuottaa yksikkö taloudellista tuotosta. Toinen mittari kertoo, kuinka paljon energiaa kulutetaan henkilöä kohti. Kun vertailuja halutaan tehdä eri maiden kesken, on tärkeää käyttää yleisesti vertailtavissa olevaa bruttokansantuotetta. Kaksi hyvää vaihtoehtoa ovat ostovoimalla

korjattu BKT ja reaalisilla valuuttakursseilla korjattu BKT. Valuuttakursseilla korjattu BKT kertoo, mitä kansallinen BKT on toisella tunnetulla valuutalla mitattuna (esimerkiksi Suomen BKT USA:n dollareilla mitattuna). Hintatasojen erot eivät ilmene tässä hyvin, joten sen vertailtavuus on heikko. Ostovoimalla korjatussa BKT:ssa hintatasojen erot saadaan esille ja kahden maan elintasoja voidaan verrata toisiinsa läpinäkyvämmin. Näin ollen näillä kahdella eri mittarilla mitattuna energiankokonaiskulutus/ BKT antaa varsin erilaisen tuloksen, mikä on myös hyvä pitää mielessä johtopäätöksiä tehdessä. Molempiin mittareihin sisältyy energiattomia komponentteja kuten ilmasto, maantiede, matkapituudet, kotitalouksien koko ja teollisuuden rakenne. Jos maita halutaan asettaa järjestykseen energiatehokkuuden tason puolesta, antaa energiankulutus/ BKT kyseisten komponenttien vuoksi harhaanjohtavia tuloksia. Näiden komponenttien huomioiminen vaatii tarkempaa tarkastelua ja aggregaattitason mittareiden hajauttamista.

Jotta voitaisiin selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat energiankulutuksen kasvuun ja mitkä taas hillitsevät sitä, tarvitaan yksilöllisempää tietoa energiaa käyttävistä loppusektoreista (kotitaloudet, teollisuus, palvelut, kuljetus). Sektorin aktiviteetti mitataan sektorille sopivalla mittarilla kuten arvonlisänä, matkustajakilometrinä, tonnikilometreinä tai väestönlukuna. Rakenne voidaan jakaa teollisuuden alasektoreihin, kuljetustyyppeihin tai asuinkäyttötarkoituksen mittareihin. Energiaintensiteetit voidaan laskea näiden mukaisesti. Energiaintensiteettivaikusta käytetään energiatehokkuuden muutosten kuvastajana ja se erottelee, miten muuttuvat energiaintensiteetit vaikuttavat energiankulutukseen tietyllä sektorilla. Vaikutus voidaan laskea siten, että aluksi energiankulutuksen suhteellinen vaikutus lasketaan perusvuoden tasolla ja tulevaisuuden tasolla, aggregaattitason toiminta ja sektorien rakenne pidetään kiinteinä perusvuoden tasolla kun taas energiaintensiteetin annetaan seurata sen todellista kehitystä.

Heikkilä ym. (2008) ovat käyttäneet seuraavanlaisia mittareita energiatehokkuuden mittaamiseksi. Mittarit eivät ota kantaa energian arvoon. Tällöin arvokkaampien (polttoaineet ja sähkö) ja vähemmän arvokkaiden (höyry, kaukolämpö, sekundaarilämpö) energialajien energiatehokkuudesta ei voida vetää johtopäätöksiä.

Ominaisenergiankulutuksesta (Specific Energy Consumption, SEC) puhutaan, kun käytetty energiamäärä suhteutetaan tuotannon määrään.

$$SEC_1 = \frac{energiankäyttö}{tuota\ ntomäärä}\left[\frac{GJ}{t}\right] tai \left[\frac{MWh}{t}\right] \tag{2.1}$$

Kun tuotantolaitoksen kunkin tuotteen erillistä ominaisenergiankulutusta ei ole mahdollista seurata erikseen, voidaan jakaa koko tuotantolaitoksen energiankulutus kaikkien tuotteiden yhteenlasketulla energianmäärällä. Tällöin tulee huomioida, että tuotantorakenteen muutokset vaikuttavat eri ajanjaksojen ominaisenergiankulutuksiin vaikuttaen niiden vertailukelpoisuuteen.

$$SEC_2 = \frac{energiankäyttö}{\sum tuotettujen\ tuotteiden\ määrä} \tag{2.2}$$

Ominaisenergiankulutusta verrattaessa valittuun referenssiarvoon, on energiatehokkuusindeksi (Energy Efficiency Index, EEI) hyvä mittari.

$$EEI = \frac{SECref}{SEC} \tag{2.3}$$

Energiankäytön tehostamispotentiaali saadaan energiatehokkuusindeksin avulla.

$$Energiankäytön\ tehostamispotentiaali = 1 - EEI \tag{2.4}$$

Tuotannon taloudellinen arvo on huomioitu energiaintensiteettikertoimessa (Energy Intensity factor, EIF). Energiaintensiteettikerrointa käytettäessä on huomioitava, että liikevaihto kasvaa ajan kuluessa, jolloin energiaintensiteettikerroin voi pienentyä, vaikkei laitoksen energiankulutuksessa tapahtuisi muutoksia. Tämä kerroin soveltuu yhteiskunnan valtiontalouden energiatehokkuuden mittaamiseen, jolloin jakajana yhtälössä käytetään bruttokansantuotetta (BKT).

$$EIF = \frac{energiankäyttö}{laitoksen\,liikevaihto} \tag{2.5}$$

Primäärienergian ominaiskulutus voidaan laskea silloin, kun energia loppukäyttö muutetaan primäärienergiaksi. Sellaiset teollisuusprosessit, joissa käytetään energianlähteinä niin polttoaineita kuin sähköä ja höyryä, primäärienergian ominaiskulutus hyötysuhteiden avulla.

$$SEC_3 = \frac{E_{polttoaine} + \frac{100}{\eta_{sähkö}} E_{sähkö} + \frac{100}{\eta_{höyry}} E_{höyry}}{tuotantomäärä} \quad , \tag{2.6}$$

jossa

$E_{polttoaine}$= polttoaineiden kulutus prosesseissa

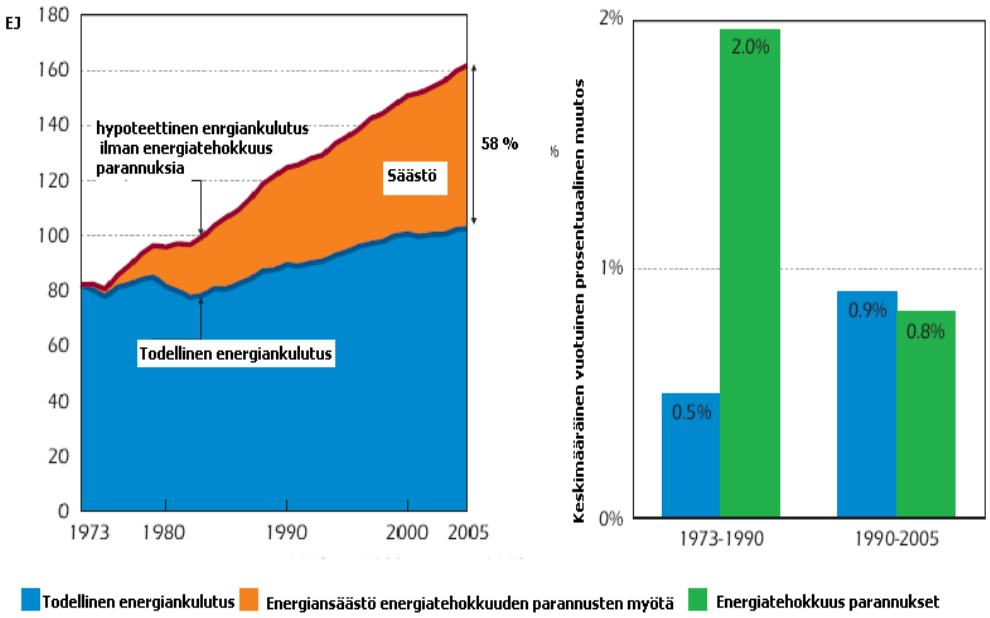
$E_{sähkö}$ = sähkön kulutus prosesseissa

$E_{höyry}$ = höyryn kulutus prosesseissa

$\eta_{sähkö}$= sähköntuotannon hyötysuhde

$\eta_{höyry}$= höyryntuotannon hyötysuhde

Energiaintensiteettikerroin mitattuna koko kansantalouden tasolla on hyvin yleinen energiatehokkuutta koskevissa tutkimuksissa esiintyvä mittari, mutta sitä ei pidetä parhaana mahdollisena mittarina selittämään muutoksia energiankulutuksessa. Schipperin ja Grubbin (2000, 369) mukaan vähemmän aggregoidut mittarit kertovat enemmän siitä, mikä on energiankulutuksen muutoksen osuus muutoksiin taloudenrakenteissa tai – intensiteetissä. He määrittelivät energiaintensiteetin energiankulutuksen ja tuotoksen tai aktiviteetin suhteena (kuten lämmitetty lattiapinta-ala per lämpötila). Vastaavanlainen mittari voisi olla ominais- tai yksikkökulutus, kWh/ vuosi tietylle jääkaappi mallille ja koolle.



KUVIO 3 Energiatehokkuuden tuomat pitkän aikavälin säästöt energiankulutuksessa

Lähde: IEA 2008, 26.

Kuviossa 3 on havainnollistettu energiatehokkuuden tuomat pitkän aikavälin säästöt energiankulutuksessa. Kuviosta nähdään, että säästöpotentiaali on 1973-luvusta 2005-lukuun jopa 58 %.

2.3 Energiatehokkuuden tuominen taloudellisiin malleihin

Energiatehokkuuden sisällyttäminen makrotaloudellisiin malleihin vaatii oman määrittämisensä. Yleisesti taloudellisissa malleissa tehokkuus tuodaan malliin tuotantofunktion kautta tietyn tehokkuusparametrin avulla. Energiatalouden tarkasteluissa (esim. van der Werf 2008 & Kemfert 1998) usein esiintyvä funktiomuoto on vakiosubstituutiojoustoinen tuotantofunktio eli niin sanottu CES-tuotantofunktio. Se voidaan esittää seuraavasti ilman tehokkuutta

$$Y = \left[\delta K^{-\rho} + (1-\delta)L^{-\rho}\right]^{-1/\rho} \qquad (2.7)$$

yleisen tehokkuuden lisääminen tuotantofunktioon muuttaa sen Arrow'n (1961, 230) esittämään muotoon seuraavanlaisesti

$$Y = \gamma\left[\delta K^{-\rho} + (1-\delta)L^{-\rho}\right]^{-1/\rho}, \tag{2.8}$$

jossa γ on tehokkuusparametri. Muutos tehokkuusparametrissa muuttaa tuotosta millä tahansa joukolla panoksia samassa suhteessa. Rebound-vaikutuksen tarkastelussa ollaan kuitenkin kiinnostuneita siitä, miten energiatuotteisiin kohdistuva tehokkuuden kasvu vaikuttaa tuotokseen muihin panoksiin kohdistuvan tehokkuuden pysyvän ennallaan. Tällöin tuotantofunktiota joudutaan muokkaamaan hieman, jotta tehokkuus voitaisiin kohdistaa oikein. Hogan ja Manne (1997, B-22) esittivät seuraavanlaisen muodon CES-tuotantofunktiosta

$$Y = \left[a(K^{\alpha}L^{1-\alpha})^{\rho} + b(\tau F)^{\rho}\right]^{1/\rho}. \tag{2.9}$$

Tässä tehokkuus kohdistuu ainoastaan energiatuotteisiin tehokkuusparametrin τ kautta. Tuotantofunktiota ja sen muodon valintaa käydään tarkemmin läpi luvussa 4.

Kuluttajan näkökulmasta tehokkuus ilmenee energiansäästämisen kautta (sama hyödyke voidaan tuottaa pienemmällä määrällä energiaa) ja sitä kautta energialaskun pienenemisenä. Energiatehokkuus ilmenee siis tuotteen yksikkökustannusten laskuna, jonka voidaan olettaa johtavan hinnan laskuun. (Berkhout, Muskens & Velthuijsen 2000.) Kuluttajankäyttäytymistä tutkittaessa oletetaan siis, että kuluttajan budjettirajoite kasvaa tehokkuuden myötä. Tuottajan näkökulmasta energiatehokkuus ilmenee siten, että energia muodostuu edullisemmaksi suhteessa pääomaan ja sen myötä tuotantorakenne muuttuu (Berkhout ym. 2000).

Seurataan tehokkuuden määrittämisessä Hanleyn, Mcgregorin, Swalesin ja Turnerin (2009) esittämää tapaa sisällyttää energiatehokkuus yleisen tasapainon malliin.
Määrittäminen aloitetaan erottamalla energia luonnollisena ja tehokkuus yksikkönä. Luonnollisena yksikkönä energia määritellään fyysisenä yksikkönä kuten kWh tai PJ ja siitä käytetään merkintää E. Tehokkuusyksikkönä energia voidaan ilmaistaan tehokkaana tuotettuna energiapalveluna, ε. Jos on olemassa energiaa kasvattava

teknologinen prosessi tasolla ρ, niin suhde energiankäytön prosentuaalisessa muutoksessa fyysisissä yksiköissä $\dot{E}$ ja tehokkuusyksiköissä $\dot{\varepsilon}$ mitattuna on

$$\dot{\varepsilon} = \rho + \dot{E}. \tag{2.10}$$

Tätä voidaan tulkita siten, että 5 % kasvu tehokkuudessa vaikuttaa tehokkaaseen energiankäyttöön 5 % kasvulla, kun energiankäyttö fyysisinä yksikköinä pidetään kiinteänä. Tämä tarkoittaa energiankäyttöön liittyvien panosten kohdalla sitä, että 5 % kasvu energiatehokkuudessa aikaansaa vastaavan vaikutuksen kuin 5 % kasvu fyysisissä energiapanoksissa ilman energiatehokkuuden kasvua. Muutos energiatehokkuudessa vaikuttaa myös energian hintaan kun energiaa mitataan tehokkuusyksiköissä. Tämä osoittautuu rebound-vaikutuksen kannalta oleelliseksi ja sitä tarkastellaankin tarkemmin luvussa 3.

2.4 Energiatehokkuuteen kohdistuva kritiikki

Energiatehokkuutta pidetään tärkeänä keinona vähentää energiankulutusta. Sitä vastaan on kuitenkin esitetty myös kritiikkiä. Vaikka energiatehokkuuden aiheuttavat hyödyt ovat hyvin tunnettuja, ei energiatehokkuus aina johda energiankulutuksen laskuun. Tämä voi olla seurausta siitä, että energiatehokkuus on vain yksi tekijä, joka vaikuttaa energiankulutukseen ja näin ollen energiatehokkuuden ja energiankäytön välinen yhteys ei ole täysin suoraviivainen. (IEA, 2008.)

Herringin (2006) mukaan energiatehokkuuteen kohdistuva kritiikki rajoittui 1990-luvun puoleen väliin saakka akateemisiin julkaisuihin, jonka jälkeen myös sanomalehdet ovat ottaneet kantaa keskusteluun. Hän argumentoi, että energiatehokkuus ei välttämättä johda energian kulutuksen vähennyksin ja sitä kautta hiilidioksidipäästöjen laskuun. Tätä väitettä Herring perustelee sillä, että energiatehokkuuden kasvun myötä energian hinta laskee, mikä johtaa kuluttajien käytettävissä olevien tulojen nousuun, jonka myötä energiankulutus ei laske vaan pikemminkin kasvaa. Tällöin voidaan puhua rebound-vaikutuksesta. Herring antaa historiallisen esimerkin rebound-vaikutuksen ilmenemisestä 1900-luvulla. Tällöin hehkulamppujen hehkulanka vaihdettiin hiililangasta volframiin, koska volframin avulla sähköä kului vain neljännes hiililankaan

verrattuna. Lyhyellä aikavälillä sähkön kulutus laski, mutta pitkällä aikavälillä tarkasteltuna sähkölamppujen markkinat kasvoivat. Ennen yrityksen voitot perustuivat suurempiin katteisiin, jolloin myydyt määrät pysyivät pienempinä. Uudessa tilanteessa katteet olivat pienempiä, mutta sitä kompensoi suuremmat myydyt määrät. Näin ollen syntyivät massamarkkinat, joissa myydyt määrät ja voitot olivat suurempia. Jos tiedossa on uusi vallankumous, jossa hehkulampun voittaa vähemmän energiaa kuluttava lamppu, on epätodennäköistä, että energiakulutus laskee. Tällöin sähkölamppujen käyttämisen olisi mahdollista esimerkiksi kehitysmaille, jolloin energian tarve kasvaisi. On myös mahdollista, että kehittyneissä maissa energiankulutus kasvaisi, jos tehokkuuden tuoman edun myötä valaistusta käytettäisiin enemmän. Rebound-vaikutuksen suuruudesta ja sen olemassa olosta ei olla yksimielisiä. Rebound-vaikutuksen teoriaa käsitellään luvuissa 3 ja 4. Luvussa 5 perehdytään rebound-vaikutuksen suuruuteen kokoamalla jo tehtyjä empiirisiä tutkimuksia yhteen.

Herringin (2006) mielestä energiatehokkuus politiikan välineenä epäonnistuu helposti. Energiankulutuksen vähentämisessä verot ja säännöt ovat parempia käyttäytymistä ohjaavia välineitä. Herring huomauttaa, että sen sijaan että keskitytään energiankulutuksen laskuun, olisi tärkeämpää vähentää hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi vihreän energiakulutuksen kautta.

Rudin (1999) kritisoi tehokkuuteen keskittyvää politiikkaa siitä, että se perustuu luonnonvarojen tehokkaaseen kulutukseen ilman rajoituksia kulutuksessa. Energiatehokkuudesta on tehty ympäristöliikkeen julistus, joka on poliittisesti konservatiivinen, rahoitettavissa ja taloudellisen kasvun perusta. Hänen mukaansa energiatehokkuuden kasvu yksinkertaisesti mahdollistaa länsimaisen elämäntavan, kyseenalaistamatta sitä. Vaihtoehtona energiatehokkuudelle Rudin tarjoaa kulutuksen vähentämistä. Kuluttajien tulisi tarkastella omaa kulutusta, tulla tietoiseksi siitä mitä kulutetaan ja vähentää sitä. Herring (2006) näkee asian ydinkysymykset pikemminkin eettisinä kuin teknisinä ja toisaalta kulttuurisena eikä niinkään taloudellisena. Nämä kysymykset jätetään kuitenkin tämän tarkastelun ulkopuolelle pitäen fokus taloudellisessa näkökulmassa.

3 Rebound-vaikutus

Teknologisen kehityksen myötä tuotteet ovat tulleet energiatehokkaimmiksi. Tuotannossa tarvittava energian määrä laskee, jolloin hyödyke on mahdollista valmistaa samalla koneistolla, mutta vähemmällä energialla ceteris paribus. Energiatehokkuuden saavuttamisen myötä yksikkökustannukset laskevat. Kustannusten lasku johtaa hinnan nousuun, mistä seuraa kulutuksen kasvu. Berkhout ym. (2000) mukaan tällaista energian kulutuksen kasvua kutsutaan rebound-vaikutukseksi. Jos rebound-vaikutus on 10 %, tällöin 10 % saavutetusta energiatehokkuudesta menetetään kasvaneen kulutuksen kautta. Rebound-vaikutusta on tarjottu ratkaisuna sille, miksi esimerkiksi Isossa-Britanniassa energiatehokkuuden kasvun myötä ei ole saavutettu energiankulutuksen laskua makrotasolla. (House of Lords 2005, Turner 2009, 648 mukaan). Khazzoom-Brookes oletuksen mukaan kiinteällä energian reaalihinnalla energiatehokkuuden kasvu lisää energiankulutusta korkeammalle kuin se olisi ilman saavutettua tehokkuutta (Saunders 1992). Tässä luvussa käyn läpi rebound-vaikutuksen teoriaa kuluttajan, tuottajan ja yleisen tasapainomallin kautta.

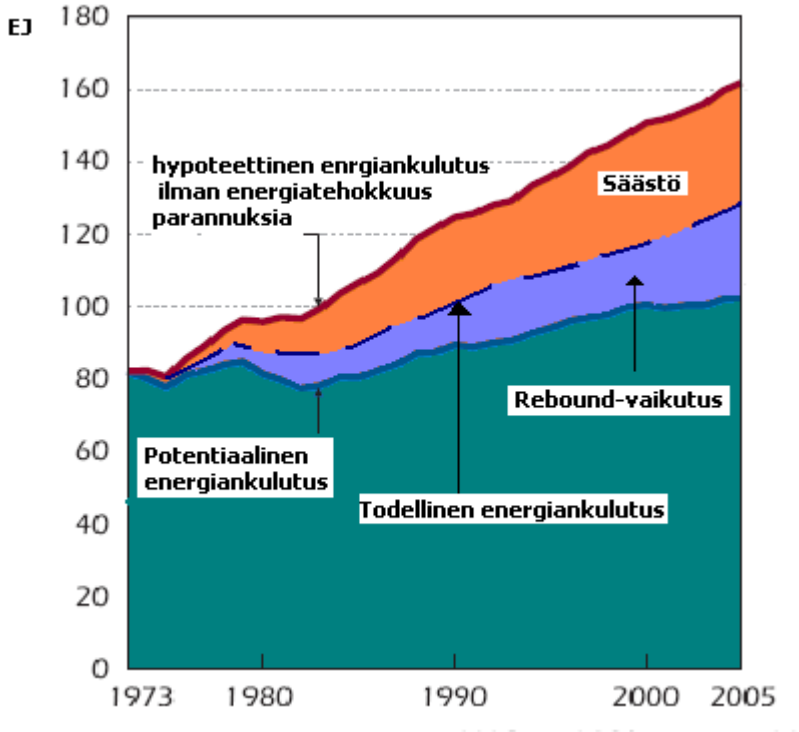
3.1 Rebound-vaikutus

Rebound-vaikutus voi ilmetä kolmella eri tavalla. Vaikutus voi olla suora, jolloin energiatehokkuuden kasvun myötä energiapalveluiden hinnat laskevat ja kulutus kasvaa. Energiapalveluiden kustannusten laskun myötä kuluttajalla on mahdollisuus käyttää enemmän rahaa kaikkiin hyödykkeisiin, tällöin voidaan puhua epäsuorasta rebound-vaikutuksesta. Yleisen tasapainon vaikutukset liittyvät sekä kuluttajiin että tuottajiin. (Greening & Greene 1997, Herring 2006, 12 mukaan.) Greening, Greene ja Difiglio (2000, 390) käyttivät rebound-vaikutuksen tulkitsemiseen neljäosaista luokittelua, jonka avulla vaikutus voidaan tulkita sekä mikro että makrotasolla. Hänen mukaansa energiatehokkuuden kasvu voi aiheuttaa suoran rebound-vaikutuksen, toissijaisen vaikutuksen, tasapainohinnan ja – määrän sopeutumisen tai kansantalouden laajuisen vaikutuksen ja muunnosvaikutuksen. Greening ym. (2000) rajaa suoran rebound-vaikutuksen koskemaan vain mikrotasoa. Teknologinen parannus polttoaineen kulutuksessa laskee energiapalvelun hintaa, koska energiapalvelu on mahdollista tuottaa edullisemmin. Näin ollen tarjonnan pitäisi teoriassa kasvaa ja hinnan laskun pitäisi

virkistää kysyntää tai siirtää kysyntäkäyrää. Kuluttajan näkökulmasta suora vaikutus voidaan jakaa substituutiovaikutukseen ja tulovaikutukseen.

Toissijaisena vaikutuksena voidaan pitää ilmiötä, jolloin reaalitulojen kasvu tai yritysten kustannusten lasku vaikuttaa myös muuhunkin kuin välittömään energiapalveluiden kysyntään tai toimialan suuruuteen. Tällöin muiden hyödykkeiden ja palveluiden kysyntä kasvaa sisältäen myös muut energiapalvelut. Tämän kaltainen kasvu voi johtaa polttoaineen kulutuksen lisääntymiseen, mutta myös taloudelliseen kasvuun. Toissijaisen vaikutuksen suuruus kuluttajalle riippuu kuluttajan kokonaistulojen osuudesta tai energiapalveluihin käytetystä kokonaiskulutuksen osuudesta. Energian osuus kuluttajan kokonaiskulutuksesta on pieni, eivät toissijaiset vaikutukset ole merkittäviä. Tuottajalla toissijaiset vaikutukset ilmenevät joko polttoaineettomien panoksien kysynnän kasvuna tuotannon prosesseissa tuotannon kysynnän kasvun vuoksi tai yhden sektorin tuotoksen alentuneiden kustannusten vaikutus muiden sektoreiden tuotantokustannuksiin. Myös tuottajan kohdalla toissijaisen vaikutuksen oletetaan olevan vähäinen.

Muunnosvaikutuksesta puhutaan kun teknologiset muutokset vaikuttavat kuluttajien käyttäytymiseen, muuttavat sosiaalista rakennetta tai uudelleen järjestää tuotannon järjestelyä. Myöhemmin tähän tyypittelyyn on viitattu myös muussa kirjallisuudessa (esim. Bentzen 2004, Sorrell & Dimitropoulus 2008). Kuviossa 4 on havainnollistettu, miten energiatehokkuuden rebound-vaikutus voidaan hahmottaa.



KUVIO 4 Energiatehokkuuden rebound-vaikutus

Saudersin (2000, 440) mukaan makrotasolla energian kysyntää mallintaessa nojataan koko kansantaloutta koskeviin tuotantofunktioihin tai niiden kaksoisekvivalentteja kustannusfunktioita. Makrotasolla pitkän aikavälin merkitys korostuu. Neoklassinen teoria tarjoaa loogisen viitekehyksen rebound-vaikutuksen tarkastelulle.

Berkhout ym. (2000) noudattavat rebound-vaikutuksen teoriassa myös neoklassista viitekehystä. Sen mukaan kuluttaja maksimoi hyötyä ja tuottaja minimoi kustannuksia. Koska energia on tarpeellista sekä kuluttajalle että tuottajalle, tulee myös rebound-vaikutuksen tarkastelu tehdä kahdesta eri näkökulmasta. Rebound vaikutus on riippuvainen tuotantofunktion muodosta ja kysynnän hintajouston määrästä. Kappaleessa 3.1 tarkastellaan ilmiötä kuluttajan näkökulmasta ja kappaleessa 3.2 tuottajan näkökulmasta. Lopuksi käsitellään sitä, miten rebound-vaikutus voidaan huomioida yleisen tasapainon malleissa.

3.2 Kuluttajan näkökulma

Kuluttajat kohtaavat hyvinvoinnin maksimointiongelman, jossa hyötyä maksimoidaan käytettävissä olevien varojen sallimissa rajoissa. Kuluttajan oletetaan saavan hyötyä siitä, että hän kuluttaa ostamiaan hyödykkeitä. Koska kuluttajan tulot ovat rajalliset, menot eivät voi ylittää tuloja ja kuluttajalla on voimassa oleva budjettirajoite. Preferenssejä voidaan kuvata hyötyfunktion avulla, jossa oletuksena on, että lisäkulutus tuo aina lisähyötyä. Hyötyfunktion oletetaan olevan lineaarisesti homogeeninen ja kuluttajan oletetaan käyttävän kaikki tulonsa. (Varian, 2003.)

Kuluttaja voi jakaa käytettävissä olevat tulonsa kahden eri hyödykkeen välille, se miten kuluttaja jakaa tulonsa näiden kahden hyödykkeen välille voidaan ilmaista kulutuskorilla. Oletetaan, että hyödykkeiden hinnat ovat (p_1, p_2), kulutuskori on (x_1, x_2) ja kuluttajan käytettävissä olevat tulot ovat m. Kuluttajan budjettirajoite voidaan siten kirjoittaa seuraavaan muotoon

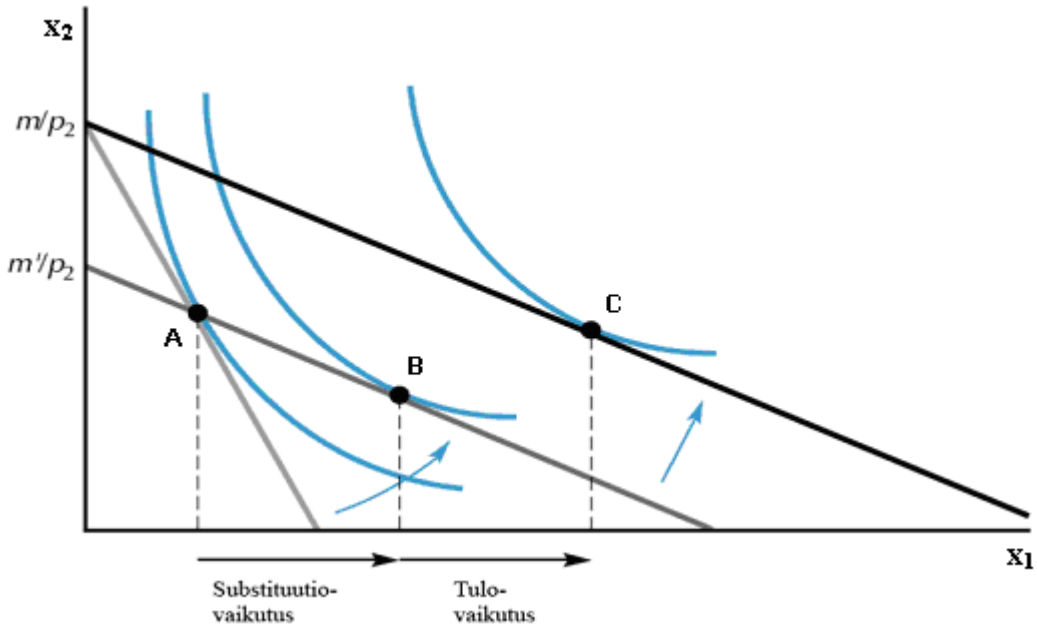
$$p_1 x_1 + p_2 x_2 \leq m . \tag{3.1}$$

Kuluttaja käyttää hyödykkeeseen yksi $p_1 x_1$ määrän rahaan ja hyödykkeeseen kaksi $p_2 x_2$ määrän rahaa. Budjettisuora saadaan, kun asettaan budjettirajoite vastaamaan tuloja

$$p_1 x_1 + p_2 x_2 = m . \tag{3.2}$$

Oletetaan, että hyödykkeen yksi hinnassa tapahtuu muutos, mutta hyödykkeen kaksi hinta ja tulot pysyvät samana. Jos hyödykkeen yksi hinta nousee, jyrkistyy budjettisuora ja jos hinta laskee, budjettisuorasta tulee loivempi. Molemmissa tapauksissa hyödykkeen kaksi leikkauspiste pysyy samana. Se, miten kuluttaja valitsee haluamansa hyödykekorin, riippuu kuluttajan preferensseistä. Graafisesti kuluttajan preferenssejä voidaan kuvata indifferenssikäyrän avulla. (Varian, 2003.)

Berkhoutin ym. (2000) mukaan kuluttajapuolen rebound-vaikutus on riippuvainen hinnan muutoksesta, joka vaikuttaa kysynnän määrään substituutio- ja tulovaikutuksen kautta. Koko hintavaikutus on näiden yhtälöiden summa eli niin sanottu Slutskyn yhtälö. Jotta ilmiö voitaisiin ymmärtää paremmin, johdetaan aluksi Slutskyn yhtälö seuraten Variannin (2003) tekstiä. Hyödykkeen yksi hinnan lasku vaikuttaa hyödykkeiden väliseen vaihtosuhteeseen sekä siihen minkälaiseksi kuluttajan kulutuskori muodostuu. Kun muutokset kysynnässä tapahtuvat vaihtosuhteiden muutoksen vuoksi, puhutaan substituutiovaikutuksesta. Kun muutokset kysynnässä tapahtuvat ostovoiman lisääntymisen vuoksi, puhutaan tulovaikutuksesta. Jotta molempien vaikutus voitaisiin ymmärtää, tehdään tarkastelu jakamalla vaikutukset kahteen eri osaan. Slutskyn yhtälöiden vaikutuksen graafinen esitys on näkyvissä kuviossa 5.



KUVIO 5 Slutskyn substituutio- ja tulovaikutus

Lähde: Varian, 2003.

Tarkastelu aloitetaan muuttamalla suhteellisia hintoja siten, että ostovoimassa ei tapahdu muutoksia. Tämän jälkeen ostovoiman annetaan sopeutua, kun suhteelliset hinnat pidetään vakiona.

Tarkastellaan tilannetta, jossa hyödykkeen yksi hinta laskee. Aluksi budjettisuoraa käännetään (pivot) alkupisteen ympäri jolloin siitä tulee loivempi. Optimivalinta uudella budjettisuoralla on piste B. Tämän jälkeen budjettisuora siirretään sen uudelle paikalle, jossa optimivalinta on piste C. Ensimmäinen siirtymä kuvaa substituutiovaikutusta ja toinen siirtymä tulovaikutusta.

Analyyttisesti ongelmaa voidaan tarkastella seuraavasti. Alkuperäinen kulutuskori (x_1, x_3) voidaan saavuttaa sekä alkuperäisillä arvoilla (p_1, p_2, m) että uusilla arvoilla (p_1', p_2, m'). Näistä saadaan budjettirajoitukset

$$m' = p_1' x_1 + p_2 x_2 \ , \tag{3.3}$$

$$m = p_1 x_1 + p_2 x_2 . \tag{3.4}$$

Kun nämä vähennetään toisistaan, saadaan $m' - m = x_1[p_1' - p_1]$. Asetetaan $\Delta p_1 = p_1' - p_1$ ja $\Delta m = m' - m$, jolloin tulomuutos on

$$\Delta m = x_1 \Delta p_1 . \tag{3.5}$$

Tulonmuutos kulkee aina yhdensuuntaisesti hinnanmuutoksen kanssa. Jos siis hinta nousee, täytyy tuloja nostaa, jotta sama kulutuskori pysyisi saavutettavissa.

Substituutiovaikutus on muutos hyödykkeen yksi kysynnässä, kun hyödykkeen yksi hinta muuttuu määrästä p_1 määrään p_1' ja samalla käytettävissä olevat tulot muuttuvat määrästä m määrään m':

$$\Delta x_1^s = x_1(p_1', m') - x_1(p_1, m) . \tag{3.6}$$

Tulovaikutuksessa hyödykkeen yksi kysyntä muuttuu kun tuloja muutetaan määrästä m määrään m', pitäen hinnat uudella tasolla p_1':

$$\Delta x_1^n = x_1(p_1', m) - x_1(p_1', m') . \tag{3.7}$$

Substituutiovaikutus on vastakkainen hinnan muutoksen kanssa, hinnanlasku kasvattaa kysyntää ja nousu laskee. Yleisesti substituutiovaikutuksen etumerkkiä pidetään negatiivisena. Tulovaikutus voi olla joko positiivinen tai negatiivinen eli se voi joko nostaa tai laskea kysyntää, riippuen siitä onko kyseessä normaali- vai inferiorinen hyödyke.

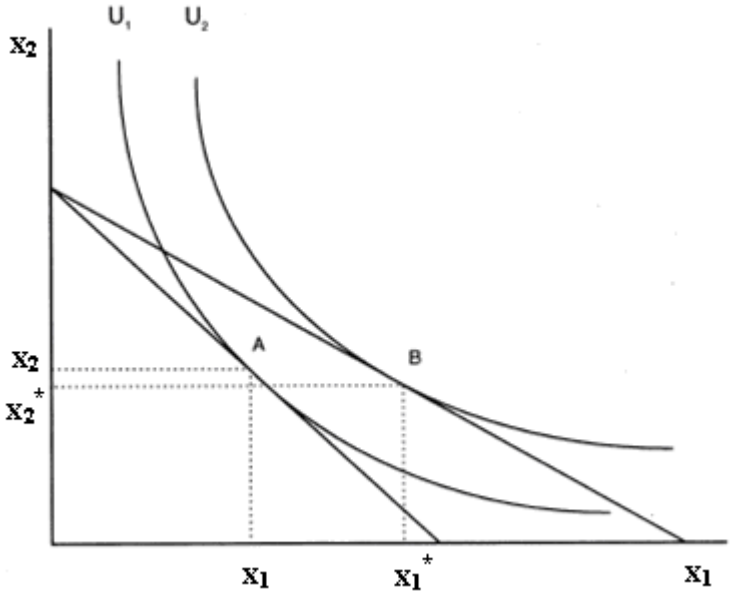
Kysynnän kokonaismuutos riippuu sekä substituutio- että tulovaikutuksesta. Nämä vaikutukset voidaan yhdistää niin sanotuksi Slutskyn yhtälöksi:

$$\Delta x_1 = \Delta x_1^s + \Delta x_1^n . \tag{3.8}$$

Normaalihyödykkeellä substituutio- ja tulovaikutus vaikuttavat samansuuntaisesti. Nousu hinnoissa, laskee hintoja substituutiovaikutuksen vuoksi. Jos taas hinta laskee, tarkoittaa se käytettävissä olevien tulojen laskua ja näin ollen myös kysyntä laskee. Tulo- ja substituutiovaikutus voimistavat toisiaan normaalihyödykkeen tapauksessa.

$$\begin{array}{ccc} \Delta x_1 = & \Delta x_1^s + & \Delta x_1^n \\ (-) & (-) & (-) \end{array}$$

Rebound-vaikutuksen tarkastelussa kuluttaja tekee päätöksenä eri hyödykkeiden kulutuksesta käytettävissä olevien tulojen, preferenssiensä (hyötyfunktion) sekä energian ja hyödykkeen hinnan kautta. Itse energiankuluttaminen ei lisää kuluttajalle hyötyä vaan hyöty tulee hyödykkeiden kautta, jotka vaativat energiaa toimiakseen. Kuluttaja voidaan nähdä palveluiden tuottajana, jossa energiaa käytetään yhtenä panoksen. Näin ollen energian hinnasta muodostuu määräävä tekijä siihen, miten paljon hyödykettä kulutetaan. Tähän vaikuttaa myös muiden panosten hinnat, koska energia ja muut panokset ovat komplementteja. Energiatehokkuuden myötä hyödykkeen suhteellinen hinta laskee ja kuluttaja valitsee uuden hyödykekorin, koska kuluttaja pystyy ostamaan käytettävissä olevilla tuloillaan enemmän kuin alkuperäisessä tilanteessa. Rebound-vaikutuksen suuruuteen vaikuttaa palvelun kysynnän hintajousto sekä tuotteen energiaintensiivisyys verrattuna sen substituutteihin ja komplementteihin.



KUVIO 6 Rebound-vaikutus kuluttajalle

Lähde Berkhout. ym. 2000, 428

Kuviossa 6 on kuvattu rebound-vaikutus kuluttajan näkökulmasta. Kuluttaja käyttää budjettinsa hyödykkeiden x_1 ja x_2 kesken. Hyödyke x_1 edustaa energiaa tarvitsevaa palvelua, joka tulee tehokkaammaksi ja tämän myötä myös edullisemmaksi. Jos kuluttaja käyttää koko budjettinsa hyödykkeeseen x_2, saa hän saman määrän kuin alkuperäisessä tilanteessa. Jos kuluttaja käyttää koko budjettinsa hyödykkeeseen x_1 saa hän alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna enemmän, koska tehokkuuden aiheuttaman hinnan muutoksen myötä budjettisuora siirtyy x-akselilla oikealle päin. Kuluttajan optimi siirtyy pisteestä $A(x_1, x_2)$ pisteeseen $B(x^*_2, x^*_2)$. Samalla kuluttajan on mahdollisuus saavuttaa korkeampi hyödyntaso U_2.

Energiankulutusta alkuperäisessä tilanteessa merkintään $EV(X)$, jossa x_1 on kulutus kyseisellä hetkellä. Uudessa tehokkaammassa tilanteessa energian käyttöä merkitään $EV^*(X)$. Oletetaan, että $EV(X) > EV(Y)$ kun $X > Y$ ja $EV(X) > EV^*(X)$, joka pätee kaikilla X ja Y arvoilla. Rebound-vaikutuksen suuruus voidaan nyt ilmaista seuraavasti

$$Rebound\ vaikutus = \frac{EV^*(x_1^* + z_2^*) - EV^*(x_1 + x_2)}{EV(x_1 + x_2) - EV^*(x_1 + x_2)} * 100\%$$

$$= \frac{[EV^*(x_1^*) - EV^*(x_1)] + [EV^*(x_2^*) - EV^*(x_2)]}{EV(x_1) - EV^*(x_1) + EV(x_2) - EV^*(x_2)} * 100\% \qquad (3.9)$$

$$= \frac{[EV^*(x_1^*) - EV^*(x_1)] + [EV(x_2^*) - EV^*(x_2)]}{EV(x_1) - EV^*(x_1)} * 100\%.$$

Jossa,

$EV^*(x_1^* + x_2^*) = energiankäyttö\ tehokkaassa\ ratkaisussa\ \ uudella\ kulutuskorilla\ (x_1^*, x_2^*)$
$EV^*(x_1 + x_2) = energiankäyttä\ tehokkaassa\ ratkaisussa\ vanhalla\ kulutuskorilla\ (x_1, x_2)$
$EV(x_1 + x_2) = energiankäyttö\ alkuperäisessä\ ratkaisussa\ vanhalla\ kulutuskorilla\ (x_1, x_2).$

Koska hyödykkeessä x_2 ei tapahdu tehokkuusmuutoksia, on $EV(x_2) - EV^*(x_2) = 0$. Jos x_2 on hyödyke, joka ei käytä energiaa, muodostuu rebound-vaikutukseksi

$$Rebound\ vaikutus = \frac{EV^*(x_1^*) - EV^*(x_1)}{EV(x_1) - EV^*(x_1)} * 100\%. \qquad (3.10)$$

Yhtälössä 3.10 osoittajassa lasketaan erotus energiankäytön määrällä hyödykkeen x_1 kulutuksella uudessa tilanteessa verrattuna kulutukseen alkuperäisessä tilanteessa. Näin ollen osoittaja kertoo sen, kuinka paljon energiankäyttö muuttuu uusilla arvoilla vanhoihin arvoihin verrattuna tehokkuuden vallitessa. Nimittäjässä lasketaan erotus sille, miten paljon tehokkuus laskee energiankäyttöä, kun energiankäytöstä alkuperäisessä tilanteessa alkuperäisellä x_1:n arvolla vähennetään energiankäyttö tehokkaassa tilanteessa alkuperäisellä x_1:n arvolla. Näiden kahden suhteesta saadaan rebound-vaikutus kuluttajalle. Yhtälöstä 3.1 voidaan vetää vastaavat johtopäätökset, mutta siinä vähennyt hyödykkeen x_2 kulutuksessa laskee rebound-vaikutuksen suuruutta.

Kun vertailussa on energiaintensiivinen ja – ekstensiivinen hyödyke, on relevanttia puhua substituutiovaikutuksesta. Ekstensiivisenä hyödykkeenä voidaan pitää lämmitystä (x_2) ja intensiivisenä hyödykkeenä auton käyttöä (x_1). Jos auton käyttäminen tulee tehokkaammaksi ja sen myötä edullisemmaksi, voi kuluttaja reagoida ajamalla enemmän autoa. Tällöin kuluttaja saattaa säästää talon lämmittämisessä. Kaavassa 3.9 on mukana termi ylimääräinen termi, joka on negatiivinen, koska $x_2 > x_2^*$. Tällaisessa tilanteessa substituutio vaikuttaa alkuperäiseen rebound-vaikutukseen laskevasti. Koko rebound-vaikutuksesta muodostuu negatiivinen.

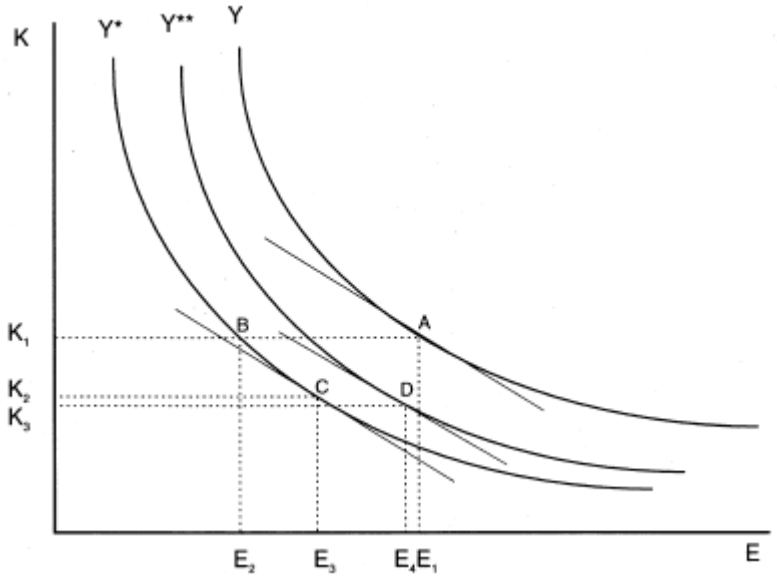
On myös tilanteita, joissa toisen energiahyödykkeen kulutus johtaa myös toisen hyödykkeen kulutuksen kasvuun ja rebound-vaikutuksen suurenemiseen. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun käytetään internetiä tiloissa, jotka vaativat lämmitystä, tällöin molempien energiankulutus lisääntyy. Tällöin $x_2 < x_2^*$ ja alkuperäiseen rebound-vaikutus suurentuu alkuperäiseen vaikutukseen nähden.

3.3 Tuottajan näkökulma

Tuottajan tuotannon ja tuotantopanosten kysynnän ratkaisemista kutsutaan yrityksen ongelman ratkaisemiseksi. Se miten tuotantopanosten suhteellista vaihdettavuutta voidaan muuttaa kun hintasuhteet muuttuvat, kutsutaan substituutiojoustoksi. Substituutiojousto on oleellinen piirre tuotantofunktion kuvaamisessa. Tuottaja yrittää maksimoida myynnistä saatujen tulojen ja käytettyjen panosten erotusta, jota rajoittaa käytettävissä olevatuotantotekniikka eli tuotantofunktio. (Forsström, Honkatukia, 2001.) Energiaa voidaan pitää sekä komplementtina että substituuttina pääomalle, sillä ilman energiaa ei olisi pääomaa tai työvoimaa (Ayres, Turtin & Casten, 2007).

Berkhout ym. (2000, 427) tutkivat rebound-vaikutuksen suuruutta myös tuottajan näkökulmasta. Tarkastelussa energia (E) ja pääoma (K) muodostavat tehokkaan tuotannon tason (Y). Tuotannontekijät ovat keskenään vaihdettavissa ja tuottajan on mahdollista saavuttaa uusi tuotannontekijöiden yhdistelmä. Tuottaja minimoi kustannuksena annetulla tuottajahinnalla pisteessä $A(E_1, K_1)$. Kun energiatehokkuus kasvaa teknologisen kehityksen myötä, samalla pääoman määrällä alkuperäiseen

tuotantoon tarvittava energian määrä laskee. Tällöin Y siirtyy vasemmalle Y^* ja tarvittavaksi energian määräksi muodostuu E_2, joka on piste B kuviossa yksi. Piste B ei kuitenkaan ole optimaalinen piste vaan kustannukset minimoituvat pisteessä C (E_2, K_2). Koska energiasta on tullut edullisempaa, vaihtaa tuottaja pääomaa energiaan. Tästä seuraa rebound-vaikutus, jonka suuruus on $E_3 - E_2$. Muutos on havainnollistettu kuviossa 7.



KUVIO 7 Rebound vaikutus tuottajan näkökulmasta

Lähde: Berkhout, P. 2000, 427

Toinen vaihtoehto on tarkastella rebound-vaikutusta markkinoiden kautta. Nyt energiatehokkuuden kasvu johtaa yksikkökustannusten laskuun, jonka seurauksena yksikkökustannusten ja -hinnan välinen marginaali kasvaa, mikä johtaa suurempaan voittoon. Täydellisen kilpailun markkinoilla hintakilpailu johtaa hinnan laskuun. Uudessa tasapainossa hinta on laskenut, mutta voitto pysyy alkuperäisellä tasolla. Nyt rebound-vaikutukseen vaikuttaa kysynnän hintajousto. Joustamattomassa tapauksessa myynnissä ei tapahdu muutosta ja rebound-vaikutus jää mitättömäksi. Joustavassa tapauksessa taas kysyntä ja energiankulutus kasvavat. Tässä tapauksessa tuottaja kasvattaa tuotantoaan $Y^* -> Y^{**}$ ja uudeksi optimiksi tulee piste D (E_4, K_3). Nyt rebound-vaikutukseksi muodostuu $E_4 - E_3$, mutta on myös mahdollista että uusi tasapaino on suurempi kuin alkuperäinen tasapaino. Teoriassa on mahdollista, että

energiatehokkuus johtaa suurempaan energian käyttöön, jolloin puhuttaisiin backfire-ilmiöstä. Tuotantofunktion muoto ja kysynnän hintajousto vaikuttavat siihen, syntyykö backfire-ilmiötä vai ei. Jos kyseessä olisi monopoli, voisi yritys asettaa hinnan haluamalleen tasolle ja ottaa energiatehokkuudesta aiheutuneen hyödyn itselleen suoraan. Yrityksen toimiessa näin, rebound-vaikutuksen suuruudeksi muodostuisi nolla, edellyttäen, ettei ylimääräistä voittoa kulutettaisi muihin hyödykkeisiin.

3.4 Yleinen tasapainomalli rebound-vaikutuksen tarkastelussa

Yleisen tasapainonmallit ovat hyvin käytettyjä rakenteellisten talouskysymysten tarkasteluun. Niiden avulla voidaan tuottaa rahamääräisiä arvioita talouden reagoinnista erilaisiin politiikan tai ympäröivän maailman muutoksiin. Ne ovat hyödyllisiä erilaisten rakenteellisten tekijöiden yli ajan tapahtuvan muutoksen aikaansaamaa kasvua ja tuotanto- ja kulutusrakenteen muutosta tarkasteltaessa. Ne eivät ole varsinaisesti ennustemalleja vaan ne mahdollistavat erilasia rakenteellisia tekijöitä koskevien skenaarionäkemysten yhdistämisen kiinteiksi kokonaistaloudelliseksi skenaarioksi. Laskennalliset mallit perustuvat tuotannon, kulutuksen ja julkisen sektorin yksityiskohtaisiin kuvauksiin. Niissä oletetaan, että niin kuluttajat kuin yrityksetkin pyrkivät toimimaan taloudellisesti rationaalisesti. Tietopohjana malleissa on yleensä panos-tuotosaineisto ja erilaiset kansantalouden tilinpidon aineistot. Kuluttajien ja yritysten käyttäytymisen kuvaamiseksi tarvitaan lukuisia määriä erilaisia parametreja. Osa parametreista perustetaan estimoituihin tai kirjallisuudesta saatavilla oleviin parametreihin. Tuotannontekijöiden saatavuus ja tuottavuus määräävät lyhyellä tähtäimellä talouden tuotantomahdollisuudet tasapainomalleissa. Eri panosten käytössä oletetaan kuitenkin olevan joustavuutta teknologian myötä. Joustoa voi olla monella tasolla esimerkiksi sekä tuonti- että kotimaisten välituotteiden että välituotteiden, pääoman ja työvoiman välillä. (Honkatukia, Parkkinen & Perrels, 2005.)

Yleisissä tasapainonmalleissa tuotantoa kuvataan useista ala-aggregaateista koostuvien CES-summafunktioiden avulla. CES-summien avulla voidaan kuvata kuinka välituotteita, energiaa sekä pääomaa ja työvoimaa eli arvonlisää yhdistetään lopputuotteiksi. Mallit noudattavat useimmiten top-down -lähestymistapaa. Tällä tarkoitetaan sitä, että tuotantotekniikka mallinnetaan siten, että tuotantopanokset voidaan joustavasti korvata toisillaan suhteellisten hintojen muuttuessa. Bottom-up

mallit ovat puolestaan jonkin toimialan yksityiskohtaisia kuvauksia, joissa määritellään kilpailevia teknisiä tuotantomahdollisuuksia annetun tuotantomäärän tuottamiseksi. (Forsström & Honkatukia, 2001.)

Yleisen tasapainomallin suosio rebound-vaikutuksen tutkimuksissa on selitettävissä sen monitasoisen luonteen vuoksi. Mallissa voidaan huomioida niin energia-, talous- kuin ympäristöpoliittisia näkökulmia. (Allan ym. 2009, 783.) Ennen yleisen tasapainomallin perusrakenteen läpikäymistä johdetaan rebound-vaikutus teoreettisesti seuraten Hanleya ym. (2009).

Rebound-vaikutuksen tarkastelu jatketaan aikaisemmin kappaleessa 2.3 johdetun tehokkuuden kautta, joka määriteltiin kaavassa 2.10. Oleellista on, että muutos energiatehokkuudessa vaikuttaa energian hintaan vastaavalla tavalla, kun energiaa mitataan tehokkuus yksiköissä.

$$\dot{P}_{\varepsilon} = \dot{P}_{E} - \rho \tag{3.11}$$

P kuvaa energian hintaa joko tehokkuus tai fyysisissä yksiköissä. Oletetaan vakiohinta energialle fyysisissä yksiköissä, 5 % parannus energiatehokkuudessa tuottaa 5 % laskun energian hinnassa tehokkuus yksiköillä mitattuna tai 5 % laskun viitteellisessä tai tehokkaassa energian hinnassa. Kun fyysinen energianhinta pidetään vakiona, lasku tehokkaissa energianhinnoissa kasvattaa energian kysyntää tehokkaissa yksiköissä mitattuna. Yleisen tasapainoteorian yhteydessä rebound-vaikutuksen suuruus saadaan näin ollen seuraavasti:

$$\dot{\varepsilon} = -\eta \dot{P}_{\varepsilon}, \tag{3.12}$$

missä η on yleisen tasapainon kysynnän hintajousto ja se on positiivinen. Energiatehokkuuden saavuttaminen koskee kaikkia energian käyttäjiä, jolloin muutos energiankulutuksessa luonnollisina yksiköinä mitattuna saadaan sijoittamalla kaavat 3.11 ja 3.12 kaavaan 2.10, jolloin saadaan

$$\dot{E} = (\eta - 1)\rho . \tag{3.13}$$

Rebound-vaikutus voidaan nyt määritellään seuraavasti

$$R = [1 + \frac{\dot{E}}{\rho}] * 100 \ . \tag{3.14}$$

Kun yhtälö 3.13 sijoitetaan yhtälöön 3.14, voidaan havaita rebound-vaikutuksen ja yleisen tasapainon kysynnän hintajouston välinen yhteys

$$R = \eta * 100 \, . \tag{3.15}$$

Kun

$$\begin{cases} R = 100\% & \textit{muutos energiatehokkuudessa ei vaikuta energiankulutukseen} \\ 0 < R < 100\% & \textit{energiatehokkuuden muutosksella on vaikutusta energian kulutukseen,} \\ & \textit{mutta koko potentiaalista hytötyä ei pystytä saavuttamaan} \\ R > 100\% & \textit{energiatehokkuus vaikuttaa positiivisesti energiankulutukseen,} \\ & \textit{syntyy ns. backfire – ilmiö} \end{cases}$$

.

Tämä lähestymistapa on ideaalinen esimerkiksi tuontiöljylle, jonka hinta on eksogeeninen tai muuttuu ainoastaan kysynnän mukaan (Hanley ym., 2009). Useimmissa kehittyneissä malleissa ongelmia seuraa kuitenkin kahdesta tekijästä. Siitä, että energia on usein tuotettu paikallisesti siten ja siitä, että energia on myös yksi käytetty panos. Tällöin hinta tulee endogeenisesti aiheuttaen sysäyksen rebound-vaikutukselle. Toinen ongelma koskee yleisentasapainon kysynnän hintajouston η määrittämistä. Energiankysynnän herkkyys reagoida aggregaattitasolla energianhinnan muutoksiin riippuu useista parametreista ja muista talouden ominaisuuksista (Allan ym. 2008, Turner 2009, 650 mukaan). Substituutiojoustot, kysynnänhintajousto yksittäisille hyödykkeille, kaupan avoimuus ja laajuus, muiden tuotteiden tarjonnanjoustot, eri toimintojen energiaintensiteetti sekä energian kysynnän tulojousto ovat herättäneet kiinnostusta rebound-vaikutuksen suuruuteen vaikuttajina. Substituutiojoustojen merkityksestä keskustellaan myöhemmin luvussa 4.

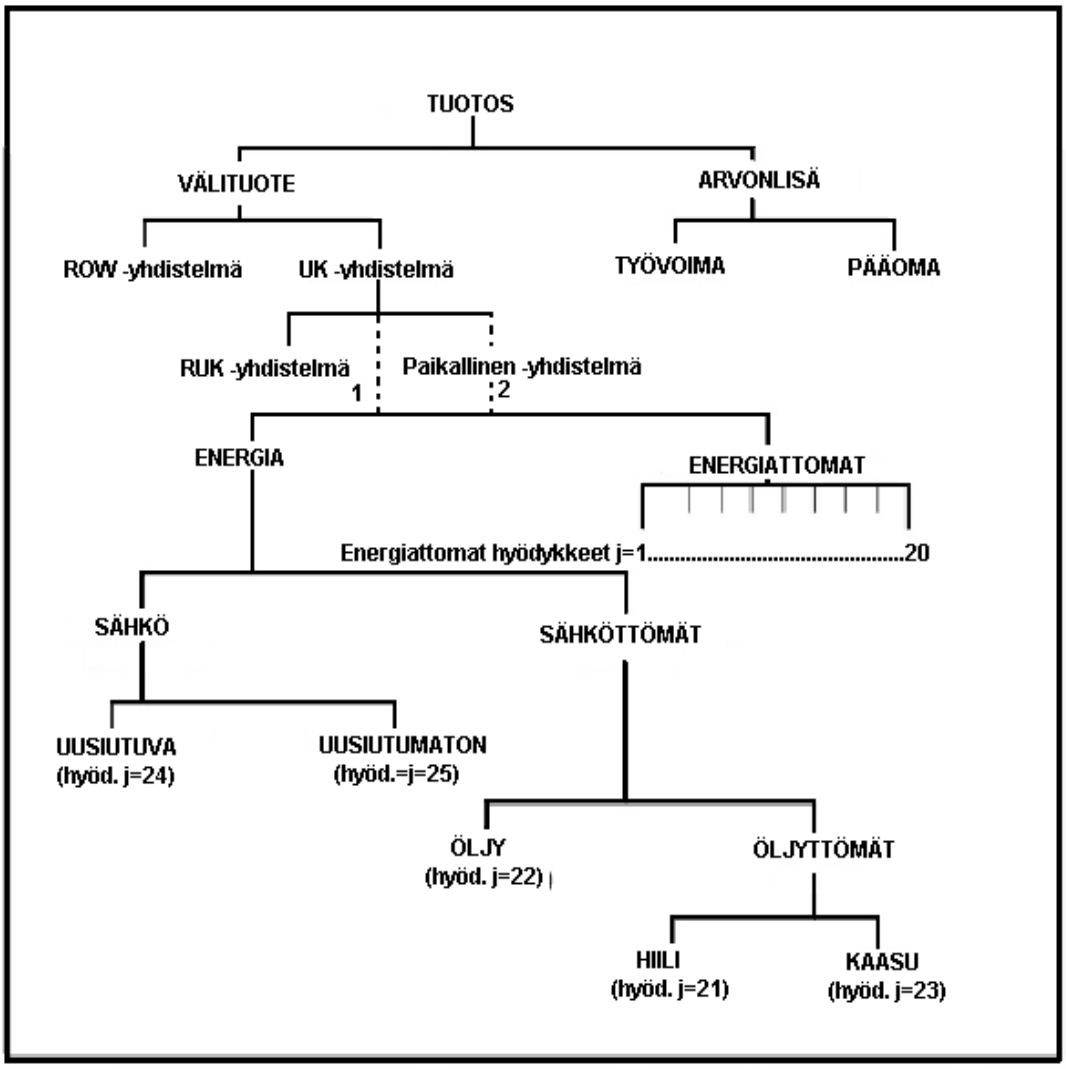
Energiatehokkuuden aiheuttama sokki vaikuttaa energiankulutukseen, jolloin mahdollinen rebound-vaikutus tai backfire-ilmiö ilmenee. Rebound-vaikutuksen suuruus voidaan laskea vertailemalla energiankulutuksen laskun (kasvun) skaalaa energiatehokkuuden shokkiin. BKT:n suhde energiaan kertoo kestävästä taloudellisen kehityksen parannuksesta. Mallissa tutkijat määrittelevät kaksi eri mittaria.

$$Y / E\ (1) = BKT\ /\ kulutettu\ sähkön\ määrä\ mitattuna\ gigawattit unteina$$

$$Y / E\ (2) = BKT\ /\ sähköttömän\ energiankulutus\ mitattuna\ öljy - ekvivalentti - tonneina$$

Yleisen tasapainomallin rakenne käydään yleisellä tasolla läpi tarkastelemalla Allan ym. (2007) käyttämää UKENVI -mallia, jota Turner (2090) käytti myös myöhemmin. UKENVI on koko Yhdistynyttä kuningaskuntaa (UK) koskeva malli. Hanley ym. (2009) tekivät tarkastelun koskien yhtä aluetta (Skotlantia) UK:n sisällä, jolloin malli seuraa UKENVI:n rakennetta, mutta sitä kutsutaan AMOSENVI nimellä.

UKENVI sisältää kolme eri taloudellista toimijaa; kotitaloudet, yritykset ja julkisen vallan, 25 hyödykettä ja toimijaa, viisi näistä on energiahyödykkeitä/ tarjontaa ja yksi on eksogeeninen toimija (ROW, Rest of the world, muu maailma). Toimialat on esitetty liitteissä 1 ja 2. AMOSENVI sisältää ROW rivin lisäksi alasumman RUK (Rest of the UK) ja paikallinen, jolla viitataan siis Skotlantiin. Myös RUK on ROW:n tapaan eksogeeninen. Hyödykemarkkinoiden oletetaan olevan kilpailulliset, malliin ei huomioida finanssivirtoja. Mallin osalta olennaista on, että kustannusten minimointi määritetään monitasoisen tuotantofunktion avulla. Kuviossa 8 havainnollistettua tuotantoa voidaan kuvata ala-aggregaateista koostuvien tuotantofunktioiden avulla.



KUVIO 8 Toimialojen i tuotantorakenne 25 toimialan/ hyödykkeen AMOSENVI/ UKENVI KLEM kehyksessä

Lähde: Hanley ym. 2009, 695. Turner. 2009, 650.

Huom. 1. UKVENVI, 2. AMOSENVI

Huom. Kirjoittaja muokannut.

Kysyntä muodostuu neljästä komponentista: kulutuskysynnästä, investoinneista, julkisista menoista ja tuonnista. Julkiset menot oletetaan eksogeenisiksi. Kulutus on funktio käytettävissä olevista reaalituloista, joka on lineaarihomogeeninen. Vaikka ulkopuoliset alueet (ROW & RUK) ovat eksogeenisia, muutokset UK:n (Skotlannin) ja ROW:n (RUK:n) suhteellisissa hinnoissa vaikuttaa UK:n (Skotlannin) vientiin ja tuontiin Armingtonin oletuksen mukaisesti. Armingtonin oletuksella tarkoitetaan, että kunkin toimialan tuotteen kotimainen ja ulkomainen versio oletetaan erilaiseksi ja ne

voivat korvata toisiaan vain osittain, siten että korvattavuus vaihtelee tuotetta käyttävän sektorin mukaisesti (Forsström & Honkatukia, 2001).

Mallilla lasketaan pitkän ja lyhyen aikavälin tasapaino perusvuoden periodille. Tämä tarkoittaa, että pääomakanta sopeutuu jokaisella teollisella toimialalla haluttuun tasoon. Vuosittaisia vaikutuksia ei ole ja ainoa teknologinen muutos on parannukset energiatehokkuudessa. Lyhyellä aikavälillä pääomakanta on kiinteä ja työvoima voi liikkua vapaasti toimialojen välillä. Pitkällä aikavälillä pääomakanta sopeutuu jokaisella toimialalla tavoitetasolle antaen toimialoittaisille arvonlisille, pääoman käyttökustannuksille ja palkkatasolle uudet arvot. Oletetaan, että korkotaso on sidottu kansainvälisiin pääoma markkinoihin, jolloin pääoman käyttökustannus vaihtelee pääomahyödykkeiden hintojen kanssa. Pitkäaikaväli on käsitteellinen aikaperiodi. Kun malli ajetaan periodi periodilta ja pääomakanta päivittyy asteittain, sopeutuminen pitkän aikavälin arvoihin voi viedä yli 25 vuotta. Mallissa pääomankanta päivittyy jokaisen periodin aikana. Mallissa huomioidaan sekä työmarkkinat että palkat. Työmarkkinat on mahdollista sisällyttää malliin kahdella eri tavalla.

Mallissa noudatetaan KLEM –lähestymistapaa. Koska energia on tuotettu panos, on Allan ym. (2007) mielestä mielekästä sisällyttää se muiden välituotteiden kanssa yhteen. Mallissa käytetään kaikilla muilla tasoilla CES–tuotantofunktioita, mutta energiattomien ja öljyttömien välituotteiden osalta käytetään Leontief-tuotantofunktiota, koska osalla näiden panoksilla on nolla-arvoja perusvuoden datassa. Sekä koko UK:lle että Skotlannille tehtävissä analyyseissä käytetään SAM –tietokantaa, jossa perusvuosi on 2000. Perusvuoden analyyseissä substituutiojouston arvo on 0,3 ja Armingtonin vaihtojousto on sekä viennille että tuonnille 5 ja uusiutuville ja uusiutuvalle ja uusiutumattomalle sähkölle 2,0.

4 Tuotantofunktion ja substituutiojouston valinta energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tarkastelussa

Kun rebound-vaikutuksen tarkastelu tehdään yleisen tasapainomallin avulla, joudutaan ottamaan kantaa sekä tuotantofunktion muotoon sekä substituutiojouston suuruuteen. Yleisen tasapainonmalleissa tuotanto voidaan hajottaa useisiin ala-aggregaatteihin, jolloin kullakin tasolla esiintyy tuotantofunktio. Tällöin jokaisella tasolla otetaan kantaa panosten keskinäiseen suhteeseen, toisen sanoen siihen, pidetäänkö panoksia substituutteina vai komplementteina. Tämän vuoksi tuotantofunktion valinta sekä substituutiojoustojen tarkastelu on oleellista rebound-vaikutuksen tarkastelun kannalta ja tästä johtuen on oleellista käydä läpi sekä yleisimmin käytetyt tuotantofunktiot että substituutiojouston määrittäminen. Näillä kahdella tekijällä on vaikutusta tutkimusten tulosten merkittävyyteen.

Tässä luvussa käsittelen tuotantofunktioita, niiden sopivuutta rebound-vaikutuksen tarkasteluun sekä substituutiojouston merkitystä rebound-vaikutukseen. Substituutiojouston teoriassa seurataan lähinnä Broadstock, Hunt ja Sorrell. (2007) tekstiä ja tuotantofunktion tarkastelussa Saudersin (2007) artikkelia.

4.1 Tuotantofunktioiden ominaisuudet

Saunders (2007) tutki funktiomuodon merkitystä rebound-vaikutuksen suuruuteen. Tuotantofunktion parametreja käsittelevässä sekä yleisen tasapainomallien kirjallisuudessa yleisimmin käytetyt funktiomuodot ovat Cobb-Douglas, CES- sekä Leontief-tuotantofunktio. Näiden funktioiden käsitteleminen on siten mielekästä, jotta voitaisiin ymmärtää rebound-vaikutuksen tutkimiseen liittyvät ongelmakohdat. Tuotantofunktioiden lisäksi esitellään translog-kustannusfunktio. Tarkastelussa seurataan Saundersin (2007) tekstiä. Saunders tutkii funktioiden toimivuutta aggregoidulla tasolla, mutta tulokset ovat sovellettavissa myös aggregoimattomalle tasolle.

Saundersin alkuoletuksena on käytettävissä oleva tuotanto- tai kustannusfunktio globaalille taloudelle, joka tuottaa yksittäistä aggregoitua tuotosta hyödyntäen pääomaa, työvoimaa ja energiaa. Energian tarjonnan oletetaan tulevan ulkoisesti tähän talouteen ja sitä tarjotaan kiintein reaalihinnoin. Työntarjonta kasvaa populaation kasvuun perustuvalla asteella ja se siihen eivät vaikuta muutokset teknologiassa. Pääoman tarjonta on lyhyellä aikavälillä kiinteä, mutta sen sallitaan sopeutua pitkällä aikavälillä pitäen reaalihinnat kiinteänä. Jotta neoklassinen kasvuteoria pysyisi dynaamisena, oletetaan että pitkän aikavälin reaalituotos on yhtä suuri pääoman reaalihinnan kanssa. Näiden lisäksi oletetaan täydellinen kilpailullinen käyttäytyminen, jatkuvuus, monotonisuus, positiivisuus sekä tuotanto-/ kustannusfunktion konkaavisuus. Edellä mainittujen lisäksi Saunders lisää vielä oletuksen vakioskaalatuotoista. Huomioon ei oteta summattuja funktioita eli funktioita tarkastellaan aggregaattitasolla. Tarkastelussa huomioidaan vain tehokkuusmuutokset, jotka vaikuttavat energiaan. Huomioon ei oteta, että energia on sekä tuotettu panos että joskus myös lopullinen kulutettava hyödyke. Se, mistä teknologinen kehitys johtuu, ei ole oleellista. Oleellista on teknologisen kehityksen vaikutus energiakulutukseen, kuten eri tuotantofunktioissa on kuvattu.

Tuotantofunktioissa tehdään ero energiapalveluille (E) sekä polttoaineelle (F). Energiapalveluiden ja polttoaineenkulutuksen suhdetta voidaan kuvata seuraavasti: $\tau F = E$. τ on teknillinen tehokkuusparametri, joka vaikuttaa energiapalvelun tuottamiseen tarvittavan polttoaineen määrän. Analyysissä oletetaan lähtöarvoksi $\tau = 1$, jolloin esimerkiksi uudella arvolla $\tau = 1{,}25$ saman energiapalvelun tuottamiseen tarvitaan 80 % vähemmän polttoainetta ($\frac{1}{1{,}25} = 0{,}80$ eli 80 %). Näin ollen tehokkuus parametrin kasvu johtaa energiankulutuksen laskuun. Tuotantofunktiossa tuotoksen Y tuottamiseen tarvitaan tuotannontekijät K, L ja E, näin ollen

$$Y = f(K, L, E)$$

ja huomioiden polttoaineenkulutus

$$Y = f(K, L, \tau F).$$

Tuotantofunktioiden tarkastelu aloitetaan Leontief-tuotantofunktiolla, joka on funktioista joustamattomin. Leontief-tuotantofunktiossa panossuhde on kiinteä ja näin ollen tuotannontekijät ovat toisiinsa nähden kiinteässä suhteessa määrätyin parametrein κ, λ ja ϕ. Teknologinen tehokkuus τ voi muuttaa tätä suhdetta.

$$Y = \min\left(\frac{K}{\kappa}, \frac{L}{\lambda}, \frac{\tau F}{\phi}\right) \qquad 4.1$$

Leontief-tuotantofunktio kuvaa hyvin rajoittunutta maailmaa ja sen käyttö on perusteltua vain tietyin edellytyksin. Yleisen tasapainonmalleissa se usein sijoitetaan arvonlisäyksen ja välituotteiden välille johtuen siitä, ettei välituotteiden ja panoksien substituutiosta ole varmaa tietoa. Tuotantofunktioista ehkä yleisin on Cobb-Douglas tuotantofunktio. Sen etu on, että se sallii tuotannontekijöiden määrän muutokset hinnan muutosten seurauksena toisin kuin Leontief-tuotantofunktio. Cobb-Douglas tuotantofunktio on yksi CES-tuotantofunktion erityismuoto substituutiojouston arvolla yksi.

$$Y = aK^{\alpha} L^{\beta} (\tau F)^{1-\alpha-\beta} \qquad 4.2$$

Cobb-Douglas tuotantofunktioon liittyvien rajoitusten vuoksi se antaa varsin yksinkertaistetun kuvan maailmasta toisin kuin esimerkiksi CES-tuotantofunktio, joka mahdollistaa monipuolisemman analyysiin. CES-tuotantofunktiossa sallitaan substituutiojouston vaihtelu, toisin kuin Cobb-Douglas tai Leontief-tuotantofunktiossa. CES-tuotantofunktio on suosittu energiataloudellisissa tutkimuksissa juuri tämän ominaisuuden vuoksi. CES-tuotantofunktion yleinen muoto käytiin energiatehokkuuden tarkastelun yhteydessä läpi kaavassa 2.7 ja tehokkuudella täydennettynä kaavassa 2.8. Energiatehokkuus huomioitiin kaavassa 2.9, joka voidaan siis kirjoittaa seuraavaan muotoon

$$Y = \left[a(K^{\alpha} L^{1-\alpha})^{\rho} + b(\tau F)^{\rho}\right]^{1/\rho},$$

jossa $\rho = \frac{\sigma - 1}{\sigma}$ ja σ on substituutiojousto energian (τF) ja pääoma/ työvoima – kombinaation [(KL)E] välillä. Cobb-Douglas tuotantofunktion lisäksi myös Leontief-

tuotantofunktio on CES-tuotantofunktion erityistapaus substituutiojouston arvolla 0 (Hogan & Manne 1997, B-22). Taulukkoon 1 on koottu eri tuotantofunktioiden muodot.

TAULUKKO 1 Tuotantofunktiot energiatehokkuudella (τ) täydennettynä

Tuotantofunktio	
Leontief	$Y = \min\left(\frac{K}{\kappa}, \frac{L}{\lambda}, \frac{\tau F}{\phi}\right)$
Cobb-Douglas	$Y = aK^{\alpha}L^{\beta}(\tau F)^{1-\alpha-\beta}$
CES	$Y = \left[a(K^{\alpha}L^{1-\alpha})^{\rho} + b(\tau F)^{\rho}\right]^{1/\rho}$

Vaikka CES-tuotantofunktio on ominaisuuksiltaan monipuolisempi, johtuu Cobb-Douglas tuotantofunktion yleisyys sen yksinkertaisemmasta käsiteltävyydestä. Parametrien estimoinnin kannalta on oleellista saada tuotantofunktio lineaariseen muotoon parametrien suhteen, mutta muuttujien suhteen sallitaan epälineaarisuus. Taulukosta 1 nähdään, että sekä Cobb-Douglas että CES-tuotantofunktio ovat molempien suhteen epälineaarisia. Tästä ongelmasta on mahdollista päästä ottamalla funktiosta logaritmit ja tehdä niin sanottu logaritminen funktio, jonka tarkoituksena on päästä eroon parametrien epälineaarisuudesta. Taulukkoon 2 on kuvattu sekä Cobb-Douglas että CES-tuotantofunktion logaritminen muoto.

TAULUKKO 2 Tuotantofunktioiden logaritmiset muodot

Tuotantofunktio	
Cobb-Douglas	$\ln Y = \ln a + \alpha \ln K + (1-\alpha)\ln L + (1-\alpha-\rho)\ln \tau F$
CES	$\ln Y = \frac{1}{\rho}\ln[a(K^{\alpha}L^{1-\alpha})^{\rho} + b(\tau F)^{\rho}]$

Logaritmisista muodoista voidaan havaita, että CES-tuotantofunktion estimointi on haasteellisempaa kuin Cobb-Douglas tuotantofunktion, sillä sitä ei saada parametrien suhteen lineaariseksi vaan sen estimointi vaatii monimutkaisempaa lähestymistä (katso esimerkiksi van der Werf, 2008).

Tuotantofunktioiden lisäksi myös kustannusfunktion valinnalla on myös merkitystä rebound-vaikutuksen suuruuteen. Empiirisessä tutkimuksessa on hyödynnetty translog-kustannusfunktiota (kuten Bentzen, 2004) ja se käsitellään vielä tuotantofunktioiden lisäksi, koska se on energiataloudessa usein käytetty kustannusfunktiomuoto.

$$\begin{aligned}\ln c = {} & \ln A + \alpha \ln p_K + \alpha \ln p + \alpha \ln \frac{p}{\tau} \\ & + 1/2 \left[\begin{array}{l} \gamma_{11} (\ln p_K)^2 + \gamma_{12} \ln p_K \ln p_L + \gamma_{13} \ln p_K \ln \frac{p_F}{\tau} \\ + \gamma_{21} \ln p_L \ln p_K + \gamma_{22} (\ln p_L)^2 + \gamma_{23} \ln p_L \ln \frac{p_F}{\tau} \\ + \gamma_{31} \ln \frac{p_F}{\tau} \ln p_K + \gamma_{32} \ln \frac{p_\tau}{\tau} \ln p_L + \gamma_{33} (\ln \frac{p_F}{\tau}) \end{array} \right]\end{aligned} \tag{4.4}$$

Se ilmaistaan siis tuotoksen ja panoksien hintojen luonnollisina logaritmeina. Yhtään hintaa tai sen logaritmia ei voida ratkaista eksplisiittisesti ilman, että se olisi funktio itsessään. Translog-kustannusfunktion käytettävyys liittyy sen ominaisuuksiin. Siinä ei ole vakiosubstituutiojoustoja kahden tuotantopanoksen välillä eikä se ole globaalisti konkaavi vaan on asetettava erityiset ehdot, jotka pakottavat sen konkaaviuteen.

4.2 Tuotantofunktion sopivuus rebound-vaikutuksen tarkastelussa

Tässä kappaleessa tarkastellaan tuotantofunktion sopivuutta rebound-vaikutuksen tarkasteluun. Edellisessä kappaleessa käsiteltiin tuotantofunktion ominaisuuksia yleisellä tasolla, nyt oleellista on selvittää, mikä tuotantofunktio antaa realistisimmat tulokset rebound-vaikutuksen suuruudesta. Aluksi keskitytään rebound-vaikutukseen lyhyellä aikavälillä. Tekstissä seurataan edelleen Saundersia (2007). Tarkastelussa ollaan kiinnostuneita siitä, miten τ kasvu vaikuttaa polttoaineen kulutuksen laskuun lyhyellä aikavälillä. Polttoaineen säästämisen ehtojen mukaan kasvava tehokkuus laskee

polttoaineen marginaalituottavuutta kun polttoaineen määrä pidetään kiinteänä, kun polttoaineen kulutus laskee kun polttoaine ei ole kiinteä. Polttoaineen säästämisen ehdot voidaan määritellä seuraavasti

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\bigg|_{F=F^0} \frac{\partial Y}{\partial F} < 0.$$

Lyhyen aikavälin tuotannon tarjonta ehdoissa määritellään K, L ja polttoaineen reaalihinta $\frac{pF}{c}$ kiinteäksi. Jos polttoaineen rajatuottavuus laskee tehokkuuden (τ) johdosta, tulee rajatuottavuuden olla yhtä suuri polttoaineen reaalihinnan kanssa ja polttoaineen kulutuksen tulee laskea, jotta tasapaino säilyisi. Funktiota kutsutaan ”polttoainetta säästäväksi”, jos se toteuttaa kyseiset ehdot ja ”polttoainetta kuluttavaksi”, jos se ei täytä kyseisiä ehtoja. Taulukossa 3 on esitetty, miten eri tuotantofunktiot täyttävät ehdot. Huomioitavaa on, että vain yksi kolmesta täyttää aina ehdot ja kaksi ei täytä koskaan ehtoja. Kyseiset tuotantofunktiot eivät sovellu hyvin tutkimuksiin, jossa tarkastellaan teknisen tehokkuuden muutosten vaikutusta polttoaineen kulutukseen, koska ne ovat jäykkiä tai joustamattomia rebound-vaikutuksen suhteen. CES-tuotantofunktion tulokset ovat riippuvaisia substituutiojouston suuruudesta. Jos substituutiojousto on ykköstä suurempi, funktio on ”polttoainetta kuluttava” tarkoittaen, että polttoaineen tehokkuuden kasvu kasvattaa myös polttoaineen kulutusta. CES-tuotantofunktio on näistä funktiotyypeistä ainoa, jonka käyttö on suositeltavaa rebound-vaikutuksen tutkimisessa.

TAULUKKO 3 Tuotantofunktion ehtojen täyttyminen

Tuotantofunktio	Polttoaineet säästävyyden ehdot
Leontief	täyttyvät aina
Cobb-Douglas	eivät täyty koskaan
CES	$\sigma < 1 - s_F$
s_F = polttoaineen arvon osuus	

Lähde: Saunders 2008, 2196.

Rebound-vaikutuksen tarkastelussa päästään parempiin tuloksiin, jos vaikutus hajotetaan osiin. Kun vaikutus hajotetaan kahteen osaan, määrittelee Saunders rebound-vaikutuksen seuraavasti

$$R = 1 + \eta_{\tau}^{F} \text{, jossa } \eta_{\tau}^{F} = \frac{\tau}{F}\frac{\partial F}{\partial \tau}. \tag{4.5}$$

Nyt R voi saada seuraavanlaisia merkityksiä

$R > 1$	*bacfire – ilmiö*
$R = 1$	*täysi rebound – vaikutus*
$0 < R < 1$	*osittainen rebound – vaikutus*.
$R = 0$	*ei rebound – vaikutusta*
$R < 0$	*suuri säästö*

Rebound-vaikutus voidaan nyt jakaa ja määritellä seuraavasti

$$R = \eta_{\tau}^{F_{INTENSITY}} + \eta_{\tau}^{F_{OUTPUT}}, \tag{4.6}$$

jotka saadaan yhtäläisyyden $F = \frac{F}{Y}Y$ kautta seuraavasti

$$\eta = \frac{\tau}{F}\frac{\partial F}{\partial \tau} = \frac{\tau}{(F/Y)}\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\frac{F}{Y}\right) + \frac{\tau}{Y}\frac{\partial Y}{\partial \tau}. \tag{4.7}$$

Ensimmäinen termi mittaa intensiivisyysvaikutusta ja toinen termi tuotosvaikutusta. Intensiivisyysvaikutus kuvaa polttoaine/ tuotos -suhteen dynaamisuutta τ:n vaikutuksesta.

Lyhyen aikavälin tarkastelussa pääoma ja työvoima sekä polttoaineen reaalihinta ($\frac{p_F}{c}$) pidetään kiinteinä. Eri tuotantofunktioiden osalta tulokset olivat seuraavanlaisia. Leontief-tuotantofunktion osalta rebound-vaikutusta ei ole havaittavissa. Näin ollen 1 % nousu tehokkuudessa laskee polttoaineen käyttöä 1 %:lla. Leontief-tuotantofunktio edustaa sitä mielikuvaa, mikä poliitikoilla on usein tehokkuuden tuomista hyödyistä.

Tulokset Cobb-Douglas tuotantofunktiolla antavat vastakkaisia tuloksia rebound-vaikutuksesta. Sillä mitattuna syntyy backfire-ilmiö. Cobb-Douglas funktion kohdalla ei synny nettosubstituutiovaikutusta, koska substituutiojousto on ykkösen suuruinen. Tuotosvaikutus on suuruudeltaan polttoaineenarvon osuuden suuruinen, jolloin tehokkuuden kasvu lisää tuotosta ja kasvattaa polttoaineen kulutusta ilman intensiivisyysvaikutuksen tasapainottavaa vaikutusta. Sekä Cobb-Douglas että Leontief-tuotantofunktion suuri ongelma on se, että ne antavat hyvin yksinkertaistetun kuvan maailmasta.

CES-tuotantofunktio antaa rebound-vaikutuksen tarkastelussa luotettavampia tuloksia. Se sallii lähes kaikki rebound-vaikutuksen arvot poissulkien ainoastaan super-säästämisen ($\sigma < 0$). Intensiivisyysvaikutuksessa hallitsevana on substituutiojouston (σ) suuruus kun taas tuotosvaikutus on vastaava kuin Cobb-Douglas tuotantofunktiolla täydennettynä substituutiojoustolla. Näin ollen myös substituutiojouston arvolla yksi saavutetaan vastaavat tulokset kuin Cobb-Douglas tuotantofunktiolla ja taas substituutiojouston arvolla 0 saavutetaan samat tulokset kuin Leontief-tuotantofunktiolla. (Taulukko 4.)

TAULUKKO 4 Rebound-vaikutus lyhyellä aikavälillä hajotettuna kahteen eri osaan

Tuotantofunktio	Intensiivisyysvaikutus	Tuotosvaikutus	R
Leontief	-1	0	0
Cobb-Douglas	0	$\frac{s_F}{1-s_F}$	$\frac{s_F}{1-s_F} > 1$
CES	$\sigma - 1$	$\frac{\sigma s_F}{1-s_F}$	$\frac{\sigma}{1-s_F}$

Lähde: Saunders 2198, 2008.

Pitkän aikavälin tarkastelussa joudutaan muuttamaan alkuoletuksia. Lyhyen aikavälin ehdot antavat vähätellyn kuvan rebound-vaikutuksen suuruudesta, koska pääoma ja työvoima pidetään kiinteinä. Tehokkuuden kasvu lisää muiden tuotannontekijöiden rajatuottavuutta lisäten näiden käyttöä ja kasvattaen tuotosta, kun tarjontaa on enemmän saatavilla.

Globaalissa taloudessa pääoman (K) tarjontaan vaikuttaa tekninen tehokkuus hyöty τ . Kasvuteoriassa Y :n kasvu teknisen tehokkuus hyödyn kautta, kasvattaa myös investointeja säästämisasteen kautta. Tämä laajentaa tuotantomahdollisuuksia, joka on rebound-vaikutuksen lisälähde. Nyt pääoman annetaan sopeutua, sen reaalihinta $\frac{p_K}{c}$ pidetään kiinteänä. Tällöin siis pääomantuotto on yhtä suuri tuotoksen kasvuasteen kanssa pitkällä aikavälillä. Huomioitavaa on, että kerta kasvu τ :ssa ei vaikuta pääoman kasvuasteeseen. Se asettaa talouden uudelle korkeammalle uralla pitäen kasvuasteen samana. Kuten olettaa saattaa, pitkän aikavälin rebound-vaikutus on suurempi kuin lyhyen aikavälin. Kaikilla muilla kuin Leontief-funktiolla tämä on seurausta suuremmasta tuotosvaikutuksesta. Taulukosta 5 on nähtävissä tulokset.

TAULUKKO 5 Rebound-vaikutus pitkällä aikavälillä hajotettuna kahteen eri osaan

Tuotantofunktio	Intensiivisyysvaikutus	Tuotosvaikutus	R
Leontief	-1	0	0
Cobb-Douglas	0	$\frac{s_F}{s_L}$	$1+\frac{s_F}{s_{LF}}>1$
CES	$\sigma-1$	$\frac{s_F+(\sigma-1)(1-\alpha-s_L)}{s_L}$	$\frac{s_F+sL+(\sigma-1)(1-\alpha)}{s_L}$

Lähde: Saunders 2199, 2008.

Leontief-tuotantofunktiolla τ ei vaikuta tuotokseen ja ei näin ollen vaikuta pääoman kasvuun. Cobb-Douglas tuotantofunktiolla rebound-vaikutus kasvaa suhteessa lyhyeen aikaväliin. Pitkällä aikavälillä myös työvoima vaikuttaa tulokseen, jolloin $\frac{s_F}{s_L}>\frac{s_F}{1-s_F}$, jossa $s_L=1-s_F-s_K$. Kyseessä on aina backfire-ilmiö.

Myös CES-tuotantofunktion tapauksessa työvoima vaikuttaa siihen, että rebound-vaikutus on suurempi pitkällä aikavälillä. Myöskään pitkällä aikavälillä ei CES-tuotantofunktion avulla voida super-säästämistä esittää. Polttoaineen osuudella on tärkeä vaikutus analyysissä ja siinä on ilmeinen merkitys funktion substituutiomahdollisuuksilla, sillä on ratkaiseva merkitys funktion rebound käyttäytymiseen.

4.3 Substituutiojouston määrittäminen

Tuotantofunktioiden osalta keskeinen piirre on tuotantopanosten suhteellisten osuuksien muutokset hintasuhteiden muuttuessa. Tätä voidaan kuvata substituutiojouston avulla, joka on panossuhteen ja tuotantokäyrän välinen yhteys. (Siikavirta, 2005.) Energiatehokkuuden parannukset voidaan ymmärtää pääoman ja energian substituutiona. Esimerkiksi pääomana nähtävän eristysmateriaalin voidaan nähdä olevan substituutti polttoaineelle, jonka avulla huoneen sisätila voidaan lämmittää korkeammaksi. Kun energianhinta nousee, loogisesti ajateltuna voisi kuvitella että energiaa korvattaisiin pääomalla, koska energiasta on tullut suhteessa kalliimpaa. Tämä päättely ei kuitenkaan ole aivan oikea, sillä muutos suhteellisissa hinnoissa voi aiheuttaa muutoksen kaikkien panoksien yhdistelmissä, sillä seurauksella että pitkä ja lyhyt aikaväli poikkeavat toisistaan. Tämän seurauksena energian ja pääoman panosten vaihdettavuus ei ole niin yksinkertainen. Monet empiiriset tutkimukset osoittavat, että energia ja pääoma ovat pikemminkin komplementteja, mikä tarkoittaa sitä että muutokset energian suhteellisissa hinnoissa aiheuttavat kysynnän laskun sekä pääomalle että energialle. (Broadstock ym. 2007)

Alan kirjallisuudessa on käyty väittelyä substituutiojouston merkityksestä rebound-vaikutuksen suuruuteen (mm. Howarth, 1997, Saunders 2000b, Broadstock ym. 2007). Saunders (1992) tarkasteli luvun 3 alussa esiteltyä Khazzoom-Brookes -oletusta kahden eri funktiomuodon kautta. Tarkastelu aloitettiin yksinkertaisemmalla Cobb-Douglas tuotantofunktiolla. Saunders tuli johtopäätökseen, että jos Cobb-Douglas funktiomuoto hyväksytään, on myös Khazzoom-Brookes -oletus hyväksyttävä. Koska Cobb-Douglas tuotantofunktio mahdollistaa vain ykkösen substituutiojouston, on laajempi tarkastelu tehtävä hyödyntäen tuotantofunktiomuotoa, joka sallii vaihtelun substituutiojoustossa.

Myös CES-tuotantofunktion tapauksessa Khazzoom-Brookes -oletus voidaan hyväksyä. CES-tuotantofunktion tapauksessa substituutiojouston ollessa yli yhden, energiatehokkuuden kasvun myötä myös energiankulutus kasvaa. Substituutiojouston ollessa alle yksi, energiatehokkuuden kasvun myötä energiankulutus laskee. Substituutiojoustolla on näin ollen Saundersin (1992) mukaan merkitystä rebound-vaikutuksen suuruuteen. Mitä helpommin polttoainetta voidaan vaihtaa muihin tuotannontekijöihin, sitä suuremmaksi rebound-vaikutus muodostuu (Saunders, 2000a).

Sekä Howarth (1997) että Broadstock ym. (2007) kyseenalaistavat Saundersin tavan ottaa energia automaattisesti osana tuotantofunktiota, tekemättä eroa energiapalveluiden ja energiankulutuksen välille. Howarthin (1997, 3) mukaan tämä lähestymistapa olettaa, että energiapalvelut tuotetaan ainoastaan energiapanoksista vaikka todellisuudessa energiapalvelut tuotetaan sekä energiaa sisältävistä panoksista että panoksista, jotka eivät sisällä energiaa. Energiaa käyttävien laitteiden kustannuksista energiakustannusten osuus on suhteellisen pieni ja näin ollen energiatehokkuuden tuoma alennus energiapalveluiden kustannuksiin ei ole merkittävä.

Broadstock ym. (2007) kyseenalaistavat substituutiojouston merkityksen rebound-vaikutuksen suuntaa-antavana mittarina. Heidän mukaansa Saudersin väite substituutiojouston ja rebound-vaikutuksen yhteydestä on harhaanjohtava. Tätä väitettä he perustelevat sillä, että Saundersin tulisi viitata polttoaineen sijasta energiapalveluihin. Heidän mukaansa myös substituutiojouston käsite tulisi tarkentaa (kyseessä Allen-Uzawa substituutiojousto energiapalveluiden ja muiden panosten yhdistelmän välillä) ja huomioon tulisi ottaa sekä se, että edellä oleva pätee ainoastaan jos energiapalvelut voidaan erotella yhdistelmästä ja että nämä ovat seurausta CES-tuotantofunktion eräästä summa-rakenteesta [(KL), E].

Substituutiojouston määritelmä ei ole yksiselitteinen. Mikrotalousteoriassa sen tulkinta on selkeämpi kuin makrotalousteoriassa. Mikrotasolla tuotannontekijöiden välinen tekninen substituutiojousto kertoo, missä suhteissa tuotannontekijöitä voidaan käyttää tietyn tuotannontason saavuttamiseksi. Makrotasolla substituutiojouston tulkinta on monimuotoisempi, koska se määrittyy makrotaloudellisen aggregaattidatan perustella.

Tuotantoteknologian teknisten ominaisuuksien lisäksi substituutiojoustoon vaikuttaa myös muut tekijät. (Valtakoski, 2006)

Neoklassisessa tuotantoteoriassa kahden panoksen tai kahden panosryhmän välistä vaihdettavuutta kutsutaan substituutiojoustoksi. Tuotannontekijöistä puhutaan usein joko komplementteina tai substituutteina. Kun tuotannontekijöiden hinnoissa tapahtuu muutos, samalla kun tuotos pidetään vakiona, voidaan puhua näistä ilmiöistä. Substituutit ja komplementit voidaan määritellä ainakin neljällä eri tavalla. Substituuteille on olemassa ainakin seuraavat määritelmät.

1. Tuotannontekijän X käyttö kasvaa kun Y käyttö laskee.
2. Tuotannontekijän X käyttö kasvaa, kun tuotannontekijän Y hinta kasvaa.
3. Tuotannontekijän X käyttö suhteessa tuotannontekijään Y nähden kasvaa kun tuotannontekijän Y hinta kasvaa.
4. Tuotannontekijän X käyttö suhteessa tuotannontekijään Y kasvaa, kun tuotannontekijän Y hinta kasvaa suhteessa tuotannontekijän X hintaan.

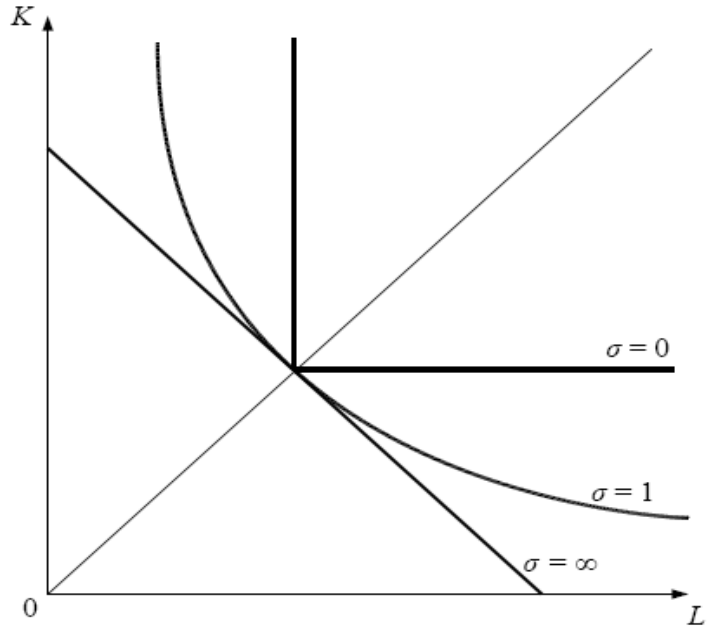
Komplementit voidaan määritellä seuraavasti.

1. Tuotannontekijän X käyttö kasvaa kun Y käyttö kasvaa.
2. Tuotannontekijän X käyttö kasvaa, kun tuotannontekijän Y hinta laskee.
3. Tuotannontekijän X käyttö suhteessa tuotannontekijään Y nähden kasvaa kun tuotannontekijän Y hinta laskee.
4. Tuotannontekijän X käyttö suhteessa tuotannontekijään Y kasvaa, kun tuotannontekijän Y hinta laskee suhteessa tuotannontekijän X hintaan.

Empiiristen tutkimusten tulkitsemisesta monimutkaistaa substituution ja komplementaarisuuden määritelmät. On mahdollista, että yhden määritelmän mukaan kaksi tuotannontekijää on substituutteja ja toisen määritelmän mukaan komplementteja. Tämän vuoksi on oltava tarkkana, kun empiirisiä tutkimuksia vertaillaan keskenään. Ensimmäisen määritelmän mukaan energiaa ja pääomaa voidaan pitää substituutteina, jos pääoman käytön kasvu myötä energian käyttö laskee samalla kun tuotos pidetään vakiona. Jos taas energiankulutuksen lasku liittyy pääoman kulutuksen laskuun, ovat kyseessä komplementit. Toisen määritelmän mukaan pääoman ja energia voidaan

määritellä substituuteiksi, jos nousu energian hinnoissa aiheuttaisi kasvun pääoman panoksien kysynnässä kun tuotos pidetään vakiona. Jos taas energian hinnan nousu laskisi pääoman panosten kysyntää, voidaan pääoma ja energia nähdä komplementteina. Pääoman käytön merkitys riippuu siitä, miten pääoma määritellään. Siinä tulisi kuitenkin huomioida sekä uudet investoinnit että käytöstä poistumassa oleva pääoma varanto. (Broadstock ym. 2007.)

Jos tuotannontekijät ovat täydellisiä substituutteja, riittää toisen tuotannontekijän käyttäminen. Silloin kuin tuotannontekijät ovat komplementteja, ovat molemmat välttämättömiä tuotannossa ja niitä käytetään aina vakiosuhteessa. (Valtakoski, 2006.) Kuviossa 9 on havainnollistettu CES-tuotantofunktioiden isokvanttikäyriä eri substituutiojouston arvoilla.



KUVIO 9 CES-tuotantofunktioiden isokvanttikäyriä eri substituutiojouston arvoilla

Lähde: Valtakoski. 2006, 15.

Substituutiojousto voi saada arvoja väliltä $[0,\infty[$.

$$\text{Kun} \begin{cases} \sigma = 0 & \textit{ovat pääoma ja työvoima täydellisiä komplementteja} \\ \sigma \to \infty & \textit{ovat pääoma ja työvoima täydellisiä substituutteja} \\ \sigma = 1 & \textit{jolloin kyseessä on Cobb – Douglas funktio} \end{cases} .$$

Broadstock ym. (2007) huomauttavat, että substituutiojoustosta käytetään ainakin neljää erilaista määritelmää sekä useita muita, jotka esiintyvät kirjallisuudessa harvemmin. Tällaisia tuotantopanosten vaihdettavuutta kuvaavia mittareita ovat Hicksin substituutiojousto, Allen-Uzawan substituutiojousto, kysynnän ristijousto (cross-price elasticity) Morishiman substituutiojousto sekä harvemmin käytetty tekninen rajakorvattavuusaste. Tarkastelussa seurataan Broadstockin ym. (2007) tekstiä.

Substituutiojoustojen määrittäminen aloitetaan teknisestä rajakorvattavuusasteesta (r), sillä se luo perustan Hicksin substituutiojoustolle. Tekninen rajakorvattavuusaste kuvaa sitä astetta, millä tuotannontekijät voidaan vaihtaa toisiinsa tuotoksen pysyessä vakiona.

$$r = -\frac{\partial x_i}{\partial x_j} \text{ tai } r = \frac{f_j}{f_i}, \text{ jossa } f_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \tag{4.9}$$

Tekninen rajakorvattavuus on siis rajatuottavuuden i suhde rajatuottavuuteen j. Rajatuottavuus kertoo kuinka paljon tuotos kasvaa kun toisen tekijän yksikköpanos kasvaa. Tekninen rajakorvattavuusaste kertoo suoraan sen, kuinka hyvin tuotannontekijät ovat keskenään vaihdettavia. Hicksin substituutiojousto on suhteellinen muutos tekijöiden osuuksissa verrattuna suhteelliseen muutokseen teknisessä rajakorvattavuudessa. Hicksin substituutiojousto kahdelle panokselle voidaan määritellä seuraavasti.

$$HES_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i / x_j)}{\partial \ln r} = -\frac{\partial \ln(x_i / x_j)}{\partial \ln(f_j / f_i)} \tag{4.10}$$

Kun Hicksin substituutiojousto yleistetään koskemaan tuotantofunktiota, jossa on useampi panos mukana, tulee muut kuin käsiteltävissä olevat panokset pitää kiinteinä. Täydellisten markkinoiden ja voiton maksimoinnin tilanteessa kahden tekijän teknisen korvaavuussuhteen tulisi vastata niiden hintasuhdetta, jolloin

$$HES_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i / x_j)}{\partial \ln(p_j / p_i)}. \tag{4.11}$$

Kun tuotos pidetään vakiona ja vain kahden panoksen annetaan vaihdella, silloin toisen panoksen laskun täytyy tarkoittaa sen vaihtamista toiseen panokseen, joka siis johtaa vaihdettavan panoksen kasvuun. Hicksin substituutiojoustossa siis oletetaan automaattisesti, että panokset ovat keskenään substituutteja ensimmäisen määritelmän mukaisesti (katso yllä).

Allen-Uzawan ja Morishiman substituutiojouston määritelmän perustana on kysynnän ristijousto ja se käsitellään seuraavaksi. Kysynnän ristijouston määritelmässä oletetaan, että yhden panoksen hinta muuttuu samalla kun muiden panosten hinnat pysyvät kiinteinä ja tuotos on kiinteä. Tällöin kysynnän ristijousto voidaan määritellä seuraavasti

$$CPE_{ij} = \frac{\partial \ln x_i}{\partial \ln p_j} \tag{4.12}$$

Kysynnän ristijouston mukaan kaksi panosta ovat substituutit, jos $CPE_{ij} > 0$ ja komplementit, jos $CPE_{ij} < 0$. Allen-Uzawan substituutiojousto on yleisimmin kirjallisuudessa käytetty substituutiojousto. Sen oletuksena on, että yhden panoksen hinta vaihtelee kun muiden panosten hinnat ja tuotos pidetään kiinteinä.

$$AES_{ij} = \frac{\sum_{k=I}^{n} x_k f_k}{x_i x_j} \frac{|F_{ij}|}{|F|} \tag{4.13}$$

x_k on panos tekijä, f_k on sen marginaalituottavuus, F on tuotantofunktion Hessianin raja ja F_{ij} on f_{ij}:n yhteistekijä. Empiirisessä kirjallisuudessa käytetään yleisemmin Uzawan (1962) tästä johtamaa muotoa, jossa käytetään tuotantofunktion sijaan kustannusfunktiota.

$$AES_{ij} = \frac{cc_{ij}}{c_i c_j} \tag{4.14}$$

AES_{ij} :n yhteys kysynnän ristijouston kanssa on seuraavanlainen

$$AES_{ij} = \frac{CPE_{ij}}{s_j}, \tag{4.15}$$

jossa s_j edustaa panoksen j osuutta kokonaiskustannuksista $s_j = x_j p_j / c$. Tämän yhtälön osoitti toteen Blackorby ja Russell artikkeleissaan 1981 ja 1989 (Broadstock ym. 2007, 23 mukaan). Viimeisimmän määritelmän mukaan panokset ovat substituutteja, jos toisen panoksen hinnan nousu laskee toisen panoksen käyttöä ja komplementteja, jos toisen panoksen hinnan nousu kasvattaa toisen panoksen käyttöä. Näin ollen, kun $AES_{ij} > 0$ ovat panokset substituutteja ja kun $AES_{ij} < 0$ ovat panokset komplementteja.

Morishiman substituutiojousto poikkeaa edellä käydyistä siten, että se kuvaa muutosta panosten suhteessa kun taas edellä olevat kuvaavat yksittäisen panoksen muutosta. Se poikkeaa HES joustosta siten, että hinta suhteiden muutoksen sijaan se mittaa yksittäisen hinnan muutosta. Oletuksena on, että yhden panoksen hinta vaihtelee (p_j), toisten panosten hinnat ja tuotos ovat kiinteitä. Määritelmässä hyödynnetään yleistä HES joustoa, mutta poiketen alkuperäisestä, nimittäjässä tapahtuvat hinnan muutokset tapahtuvat ainoastaan panoksen j hinnassa.

$$MES_{ij} = \frac{\partial \ln(x_i / x_j)}{\partial \ln(p_j)} \tag{4.16}$$

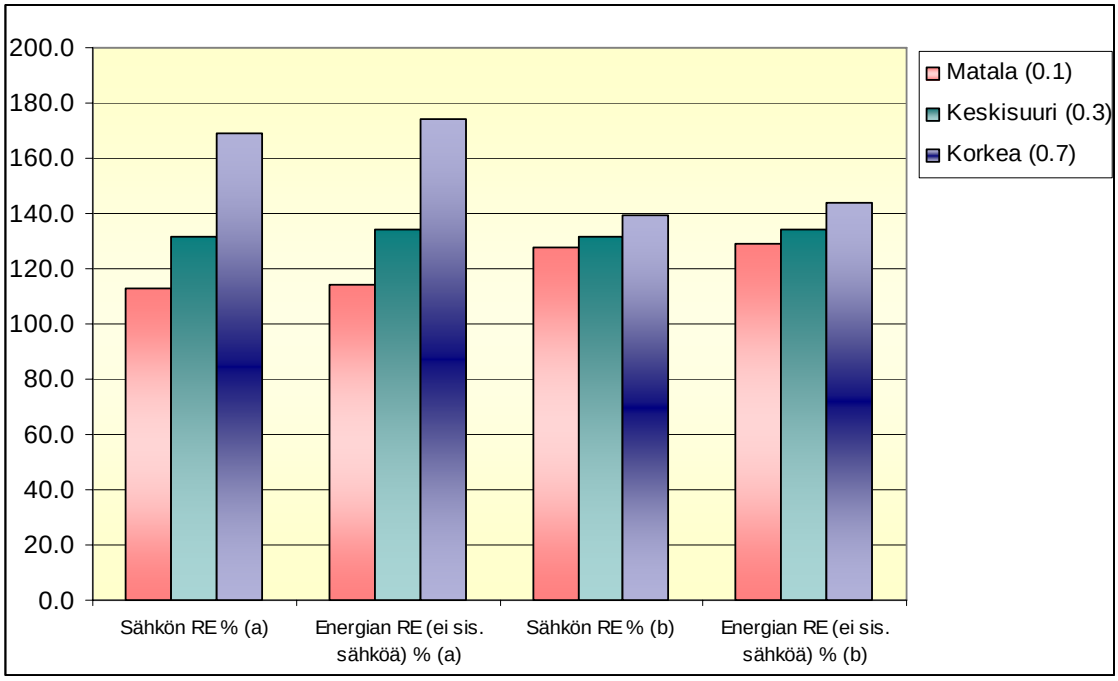
MES voidaan määritellä myös kustannusfunktion kautta, jolloin

$$MES_{ij} = \frac{p_j c_{ij}}{c_i} - \frac{p_j c_{jj}}{c_j}. \tag{4.17}$$

MES :n mukaan panokset ovat substituutteja, jos nousu toisen panoksen hinnassa johtaa toisen panoksen kulutukseen kasvuun, jolloin $MES_{ij} > 0$ ja komplementteja, jos toisen panoksen hinnan nousu johtaa toisen panoksen kulutuksen laskuun, jolloin $MES_{ij} < 0$. Blackorby ja Russell (Broadstock ym. 2007, 23 mukaan) näyttivät, että Morishiman substituutiojouston ja kysynnän ristijouston välinen suhde on $MES_{ij} = CPE_{ij} - CPE_{jj}$.

Tämä osoittaa, että panoksen j hinnan vaihtelun vaikutus määräsuhteeseen x_i / x_j voidaan jakaa kahteen eri osaan. Ensimmäinen osa on CPE_{ij}, joka on x_i:n suhteellinen vaikutus annetun kysynnän ristijouston kautta ja toinen osa on CPE_{jj}, joka on x_j n suhteellinen vaikutus itsessään oman hintajouston kautta. MES on epäsymmetrinen ja sen myötä tuotannontekijät i ja j voivat olla MES-komplementteja p_i muutosten suhteen ja MES-substituutteja p_j muutosten suhteen. Kahden panoksen tapauksessa MES ei voi olla negatiivinen, kuitenkin usein usean panoksen tapauksessa on teoreettisesti mahdollista, että MES on negatiivinen. Blackorbyn ja Russellin (1981, 156) mukaan MES ja AES voivat olla identtisiä tietyillä ehdoilla. Tuotantoteknologian tulee olla summaamaton CES- tai Cobb Douglas -rakenteinen tai muodostua vain kahdesta eri panoksesta, jotta ehdot täyttyvät.

Yleisesti ottaen empiirisissä tutkimuksissa CPE, AES ja MES ovat käytetyimpiä substituutiojouston mittareita kun taas HES on suositumpi teoreettisissa tarkasteluissa sekä energia-taloudellisissa mallinnuksissa. Sitä, ovatko panokset komplementteja vai substituutteja, voidaan mitata selkeimmin kolmen ensimmäisenä mainitun kautta, kaikissa tapauksissa substituution määrittäminen on selkeämpää substituutiojouston ollessa korea. Sekä CPE että MES ovat epäsymmetrisiä toisin kuin AES. Epäsymmetrisyyden voidaan nähdä kuvaavan todellisemmin taloudellista käyttäytymistä. Eri substituutiojouston määritelmille on paikkansa kirjallisuudessa. AES avulla voidaan tarkastella, miten panoksen j hinnan nousu vaikuttaa panoksen i osuuteen tuotoksen arvosta kun taas MES tarjoaa määrällistä tietoa siitä, miten panoksen j hinnan muutos vaikuttaa panoksen i osuuteen suhteessa panoksen j osuuteen.



KUVIO 10 Rebound-vaikutuksen suuruus eri substituutiojouston arvoilla

Huom. Tulokset koottu

Huom.

a Substituutiojousto on mitattu energian ja muiden välituotepanosten välillä.

b Substituutiojousto on mitattu arvonlisän ja muiden välituotepanosten välillä.

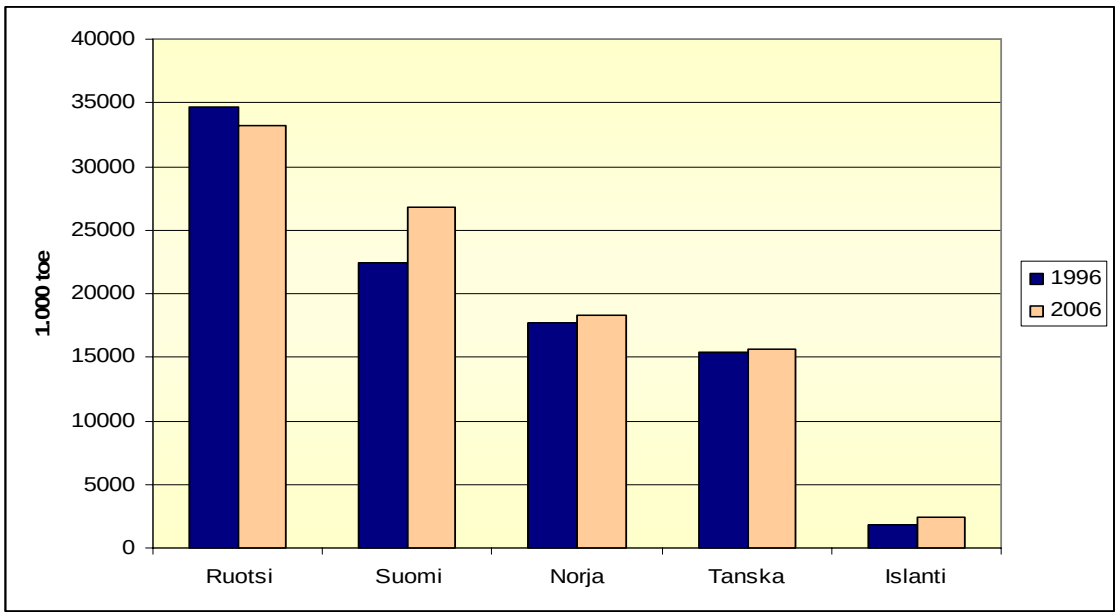
Kuvioon 10 on kuvattu sitä, miten substituutiojousto suuruus vaikuttaa rebound-vaikutuksen suuruuteen. Tästä nähdään, että suurimmat erot syntyvät kun substituutiojousto mitataan energian ja muiden välituotepanosten välillä. Substituutiojoustoista tehtyjen tutkimusten tuloksia käydään myöhemmin läpi luvussa 5.

5 Energiankulutus, energiatehokkuus sekä rebound-vaikutuksen suuruus

Rebound-vaikutuksen suuruutta on tutkittu empiirisesti melko vähän yleisten tasapainomallien avulla johtuen niiden monimutkaisesta luonteesta. Energian, pääoman ja työvoiman välistä substituutiota käsitteleviä tutkimuksia on tehty enemmän ja niitä tarkastelemalla, voidaan tehdä joitain johtopäätöksiä rebound-vaikutuksen suuruudesta makrotasolla. Tuotannon substituutiojoustojen laskeminen ei ole mielekästä tässä yhteydessä, johtuen estimointien haastavuudesta ja datan puutteellisuudesta. Seuraavassa käydään läpi jo saatuja tuloksia sekä rebound-vaikutuksesta että substituutiojoustoista ja pohditaan niiden perusteella mahdollista rebound-vaikutusta Suomelle. Ennen asiaan pureutumista tarkastellaan Suomea energiatilastojen valossa. Jotta voitaisiin paremmin ymmärtää Suomen energiakulutuksen tasoa, otetaan vertailun vuoksi yleisellä tasolla tietoja myös Euroopan maiden energiatilastoista.

5.1 Energiankulutus Suomessa

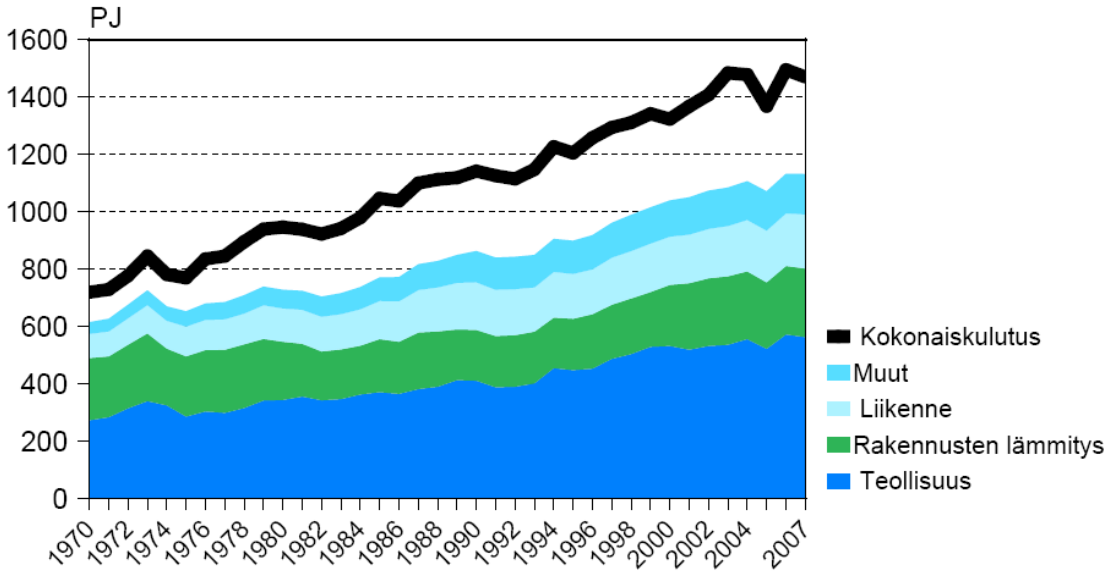
Energiantarve Suomessa on korkea johtuen kylmästä ilmastosta ja pitkistä välimatkoista. Jotta voitaisiin turvata hyvinvointi ja tuotantoelämän tarpeet, tarvitaan paljon energiavaroja. (Energia-alan toimialavuoropuhelutyöryhmä., 2007.) Suomi kuuluu EU:n pienimpiin maihin, sen väestön osuus koko Euroopan unionista (EU27) on 1,07 %. Suomi kuuluu Ruotsin ohella eniten energiaa kuluttaviin Pohjoismaihin (Kuvio 11). Suomessa BKT/asukas kasvoin vuodesta 1996 vuoteen 2006 58,7 %. (aineisto saatavilla Eurostatista: Eurostat 2010a).



KUVIO 11 Energian kokonaiskulutus Pohjoismaissa

Huom. Tilastoaineisto saatavilla Eurostatista (Eurostat 2009b).

Suomen energiankulutuksesta ja sen loppukäytöstä noin puolet käyttää teollisuus (kuvio 12). Energiankulutuksen ja käytön ero tässä yhteydessä on se, että energiankäyttöön ei sisälly sähkön ja lämmön tuotannon häviöt tai muut polttoaineiden jalostuksen konversiohäviöt (Tilastokeskus, 2009). Energiankulutuksen osuudet sektoreittain ovat pysyneet lähes samoina vuosien aikana siten, että teollisuuden osuus on ollut noin puolet, liikenteen 12–15 %, rakennusten lämmityksen osuus on laskenut 33 %:sta 20 %:iin ja muiden osuus on kasvanut 7 %:sta 16 %:iin. Käytön osalta muutokset ovat olleet lähes vastaavanlaisia, liikenteen osuus on hiukan korkeampi (14–17 %) ja muiden osuus matalampi (7–12 %). (Aineisto saatavilla tilastokeskuksesta, Tilastokeskus 2009.)

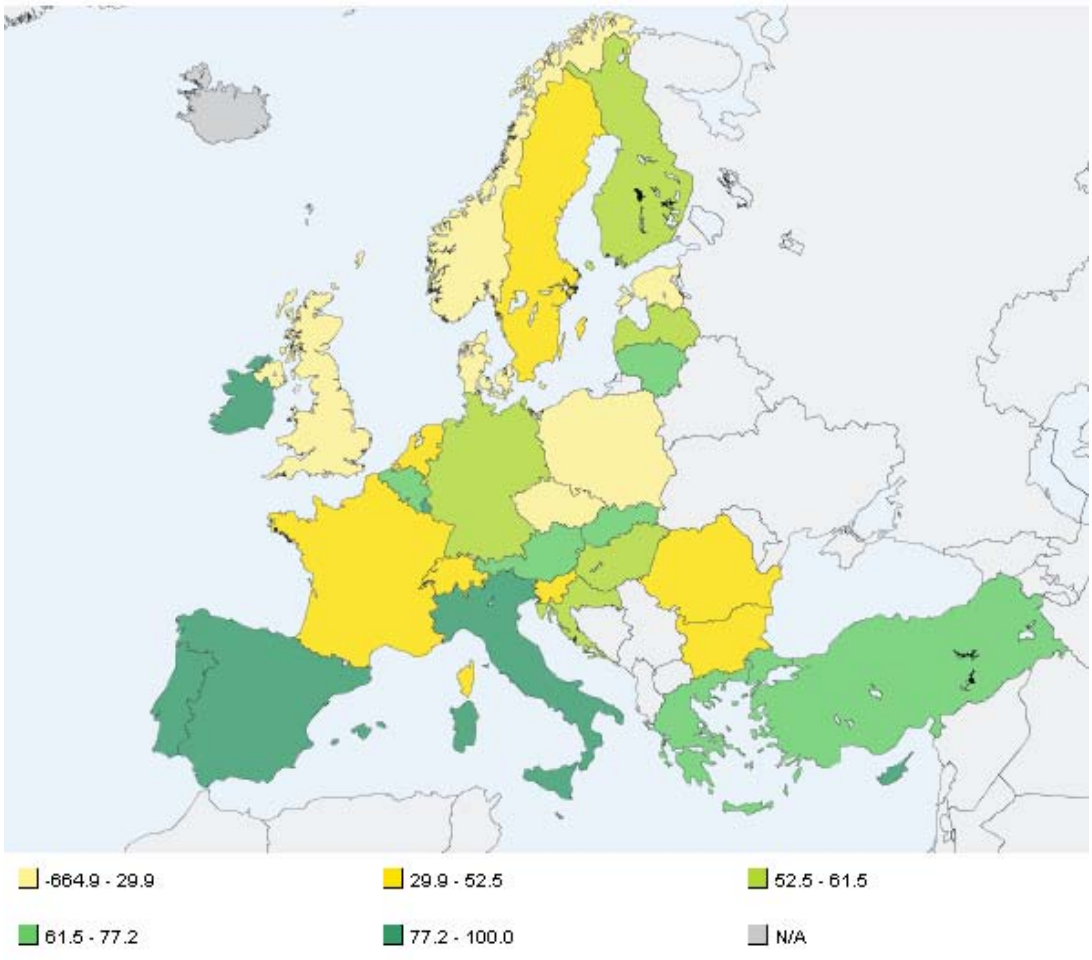


KUVIO 12 Energian kokonaiskulutuksen ja loppukäyttö sektoreittain 1970–2007

Lähde: Tilastokeskus, 2009

Suomessa perinteisen teollisuuden jalostusarvon osuus oli kokonaisuudessaan 87,6 %, josta tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden osuus oli 17,3 %, muiden koneiden ja laitteiden valmistus 10,3 %, paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus 7,3 % sekä elintarvikkeiden valmistus 7,3 % (Tilastokeskus, 2008b). Teollisuuden osuus BKT:sta oli vuonna 2001 25,7 % ja vuoden 2007 ennakkotieto oli 23,6 % (Tilastokeskus, 2008a).

Suomi on riippuvainen ulkomaisista energianlähteistä. Energiariippuvuus kuvaa sitä, kuinka paljon kukin joutuu nojautumaan energiassa tuontienergiaan. Indikaattori lasketaan jakamalla energian nettotuonti valtion energian kokonaiskulutuksella lisättynä varastoilla. (Eurostat 2009a) Norja on pohjoismaista omavaraisin energian suhteen, mikä onkin selitettävissä sen runsailla öljyvaroilla. Suomi on pohjoismaista riippuvaisin tuontienergiasta. Euroopan Unioniin (sekä 15 että 27) verrattuna Suomi on hiukan keskiarvoa riippuvaisempi tuontienergiasta, viime vuosien aikana EU15 maat ovat ohittaneet Suomen muutamalla prosentilla. Molempien vuosien kohdalla Suomi sijoittuu mediaanin läheisyyteen. Suomen energiariippuvuus on pysynyt vuosien 1996 ja 2007 välillä yli 50 prosentin. (Eurostat, 2009a.) Kuvioon 13 on havainnollistettu energiariippuvuutta Euroopassa. Suomi on energiariippuvuuden osalta keskitasoa.



KUVIO 13 Energiariippuvuus eri Euroopan mailla vuonna 2007.

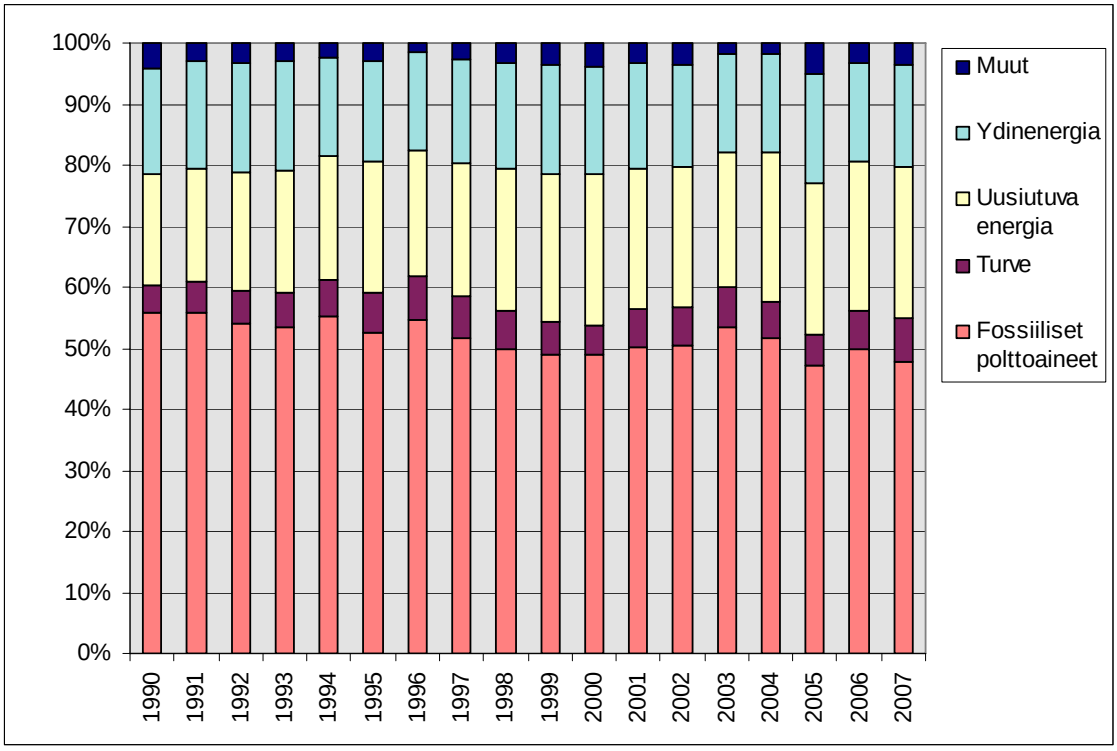
Lähde: Eurostat 2009a.

Huom.: Minimiarvo -664.9, maksimiarvo 100.

Huom. N/A= tietoa ei ole saatavilla.

Fossiilisten polttoaineiden käyttö on vähentynyt Suomessa 90-lukuun verrattuna. Silti melkein 50 % polttoaineista on fossiilisia. Uusiutuvan energiankäyttö on kasvanut 25 prosenttiin. Ydinenergian osuus on pysynyt 16–18 % tasolla ja turpeen osuus on noin 5–7 % tasolla. (kuvio 14.) Tämän hetken tilanne näyttäisi siltä, että Suomeen ollaan rakentamassa kaksi uutta ydinvoimalaa, joiden myötä tavoitteena on saavuttaa sähkön kannalta omavaraisuus, hiilen osalta päästöttömyys, teollisuuden sähkön saannin varmistus sekä sähkön hinnan pitäminen maltillisena. Tällöin ydinvoiman osuus

energian loppukulutuksesta tulisi olemaan noin 17 % ja sähkön tuotantoon käytettyjen polttoaineiden osalta noin 59 %. (Pekkarinen, 2010.)



KUVIO 14 Energiantuotannon fossiiliset ja uusiutuvat polttoaineet Suomessa

Huom. Muut sisältää teollisuuden reaktiolämmön, vedyn ja sähkön nettotuonnin.
Huom. Aineisto saatavilla tilastokeskuksesta (Tilastokeskus 2009).

Taulukossa 7 on energiankokonaiskulutuksen muutokset. Vuosina 1990–2007 energiankokonaiskulutus on kasvanut 29 %:lla. Suurin muutos on tapahtunut muiden energialähteiden kulutuksessa, jossa muutos tuona aikavälinä oli jopa 187 %. Muilla energianlähteillä tarkoitetaan tässä yhteydessä kierrätys- ja jätepolttoaineita, polttoaineena käytettyä vetyä, biokaasua, aurinkoenergiaa, lämpöpumpuilla saatua energiaa, muuta bioenergiaa sekä teollisuuden reaktiolämpöä (Tilastokeskus, 2009).

TAULUKKO 7 Energiankokonaiskulutuksen muutokset energialähteittäin

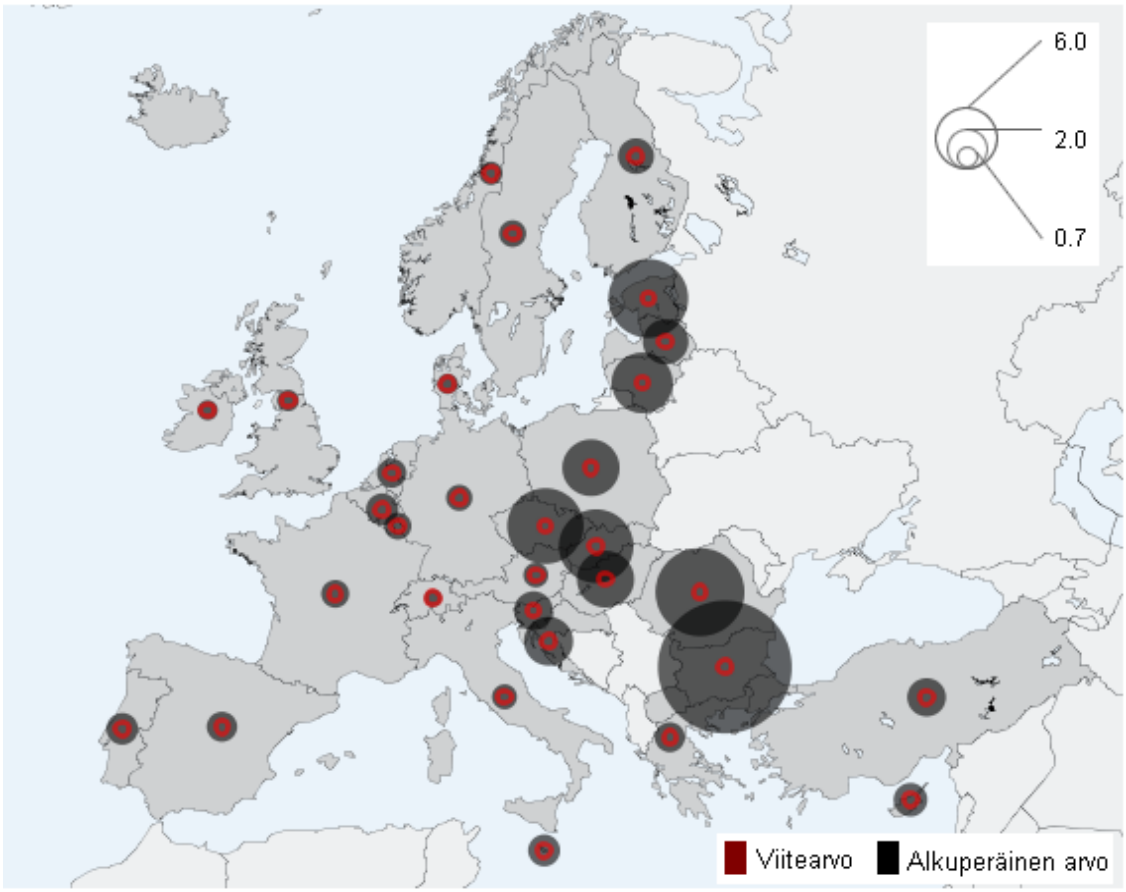
	2005–2006	2006–2007	1990–2007
Öljy	1 %	-1 %	-5 %
Hiili	66 %	-12 %	14 %
Maakaasu	7 %	-8 %	62 %
Ydinenergia	-2 %	2 %	24 %
Vesivoima	-16 %	24 %	32 %
Puupolttoaineet	12 %	-4 %	77 %
Turve	36 %	9 %	92 %
Muut	3 %	10 %	187 %
Sähkön	-33 %	10 %	17 %
Yhteensä	**9 %**	**-2 %**	**29 %**

Lähde: (Tilastokeskus 2009).

5.2 Energiatehokkuus

Energiatehokkuusindikaattoreita käydään läpi koko kansantalouden tasolla. Suomen kannalta kiinnostavaa on verrata sen energiatehokkuutta muiden EU-maiden energiatehokkuuteen, sillä vaikka Suomi kuuluu väestönmäärältänsä EU:n pienimpiin maihin, sijoittuu se energiankulutuksen osalta EU:n energiariippuvaisiin maihin. Eurostat laskee energiaintensiteetin maan energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen suhteena. Energiankulutus lasketaan viidelle eri energiatyypille, jotka ovat hiili, sähkö, kaasu, öljy ja uusiutuvat energianlähteet. Bruttokansantuotteen arvot ovat vuoden 2000 viitearvoja. Valtion energiankulutus mitataan kgtoe –yksikköinä ja BKT 1.000 euroina, näin energiaintensiteetti on kgtoe/ 1.000 €. (Eurostat, 2009a.) Energiaintensiteetti suhteessa EU27 maihin vuonna 2007 on kuvattu kuviossa 15. Tästä nähdään, että Suomi on EU-tasolla energiatehokkuuden osalta keskitasoa. Uusilla EU-mailla on selkeästi eniten parannettavaa energiaintensiteetin osalta.

KUVIO 15 Energiaintensiteetti verrattuna EU27-arvoon vuonna 2007



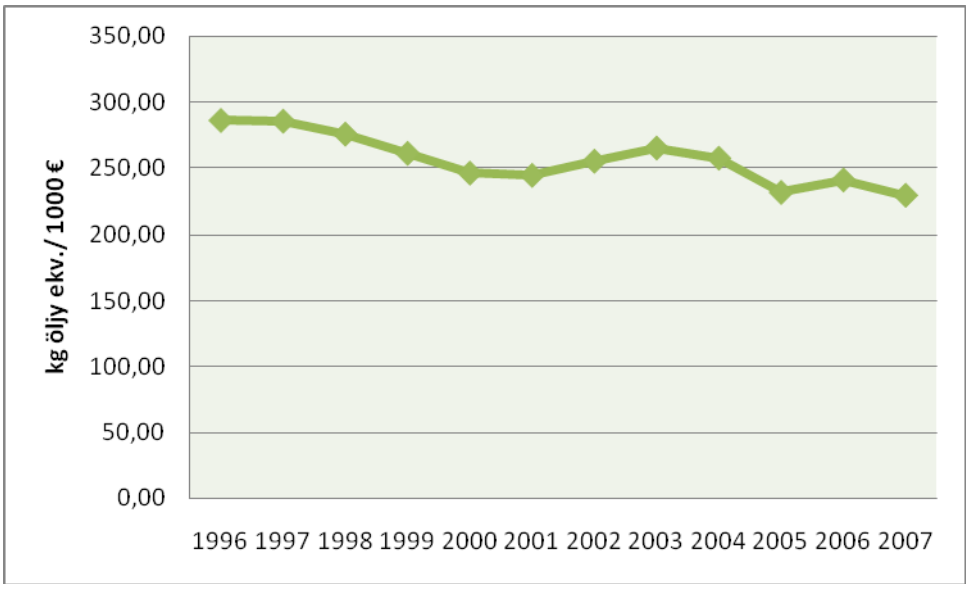
Lähde: Eurostat, 2009d.

Huom. Minimiarvo 0.515, maksimiarvo 6.0.

Huom. Viitearvo=EU27

Energiaintensiteetin osalta voidaan todeta, että ne maat, jotka ovat riippuvaisia tuontienergiasta, käyttävät energiaa myös hyvin tehokkaasti suhteessa bruttokansantuotteeseen. Kuvioon 16 on kuvattu energianintensiteetti Suomessa 1996–2007. Taulukossa 8 on kuvattu energiaintensiteetin muutokset vuodesta 1996 vuoteen 2007. Kokonaisuudessaan energiaintensiteetti on laskenut 19,89 %. Näyttäisi siltä, että ne maat, joiden energiariippuvuus on matala, näillä mailla energiaintensiteetti on korkea. Suomen osalta mielenkiintoista on nähdä, miten energiatehokkuuden käy kun uusien ydinvoimaloiden myötä Suomen on mahdollista saavuttaa sähkön osalta omavaraisuus.

KUVIO 16 Energiaintensiteetti Suomessa



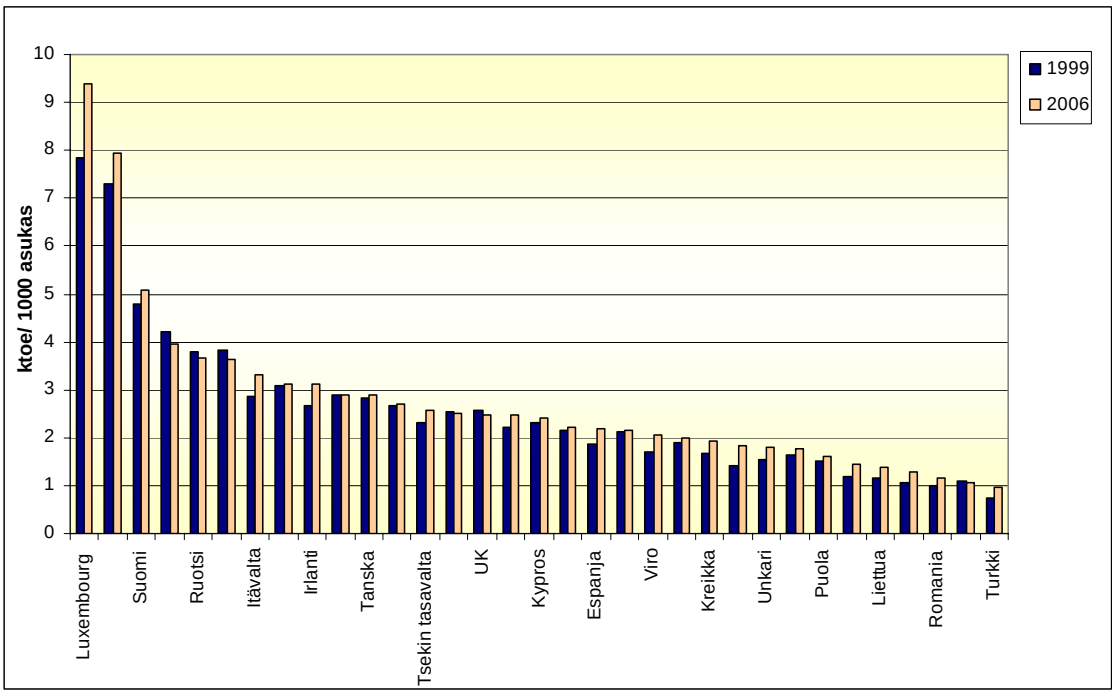
Huom. Aineisto saatavilla Eurostatista (Eurostat 2009d).

Taulukossa 8 on kuvattu energiaintensiteetin muutokset vuodesta 1996 vuoteen 2007. Kokonaisuudessaan energiaintensiteetti on laskenut 19,89 %. Näyttäisi siltä, että ne maat, joiden energiariippuvuus on matala, näillä mailla energiaintensiteetti on korkea. Suomen osalta mielenkiintoista on nähdä, miten energiatehokkuuden käy kun uusien ydinvoimaloiden myötä Suomen on mahdollista saavuttaa sähkön osalta omavaraisuus.

TAULUKKO 8 Energiaintensiteetin muutos Suomessa 1996–2007

	Muutos %
1996-1997	-0.18
1997-1998	-3.47
1998-1999	-5.29
1999-2000	-5.76
2000-2001	-0.70
2001-2002	4.43
2002-2003	3.92
2003-2004	-2.93
2004-2005	-10.09
2005-2006	4.06
2006-2007	-4.82
1996-2007	-19.89

Huom. Aineisto saatavilla eurostatista (Eurostat, 2009d)

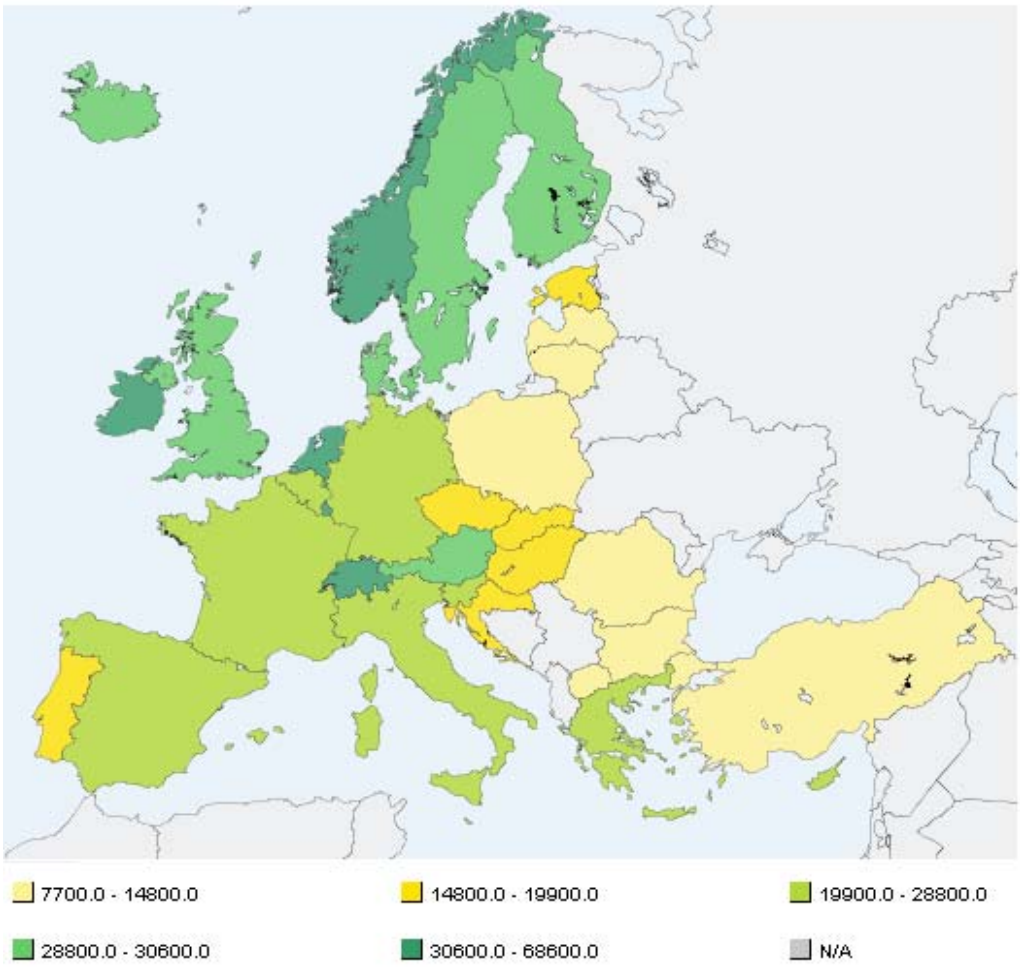


KUVIO 17 Energiankulutus asukasta kohden Euroopassa

Huom, Kroatian vuoden 1999 väkiluku on Eurostatin estimaatti. Espanjan, Islannin ja EU27:n vuoden 2006 energiankulutukset ovat väliaikaisia arvoja.

Huom. Tilastoaineisto saatavilla Eurostatista. (Eurostat 2009b, Eurostat 2010).

Energiankulutus asukasta kohden Suomessa on Euroopan korkeimpia. Suomi on huomattavasti mediaanin yläpuolella. Pohjoismaista Tanskalla on alhaisin energiankulutus asukasta kohden, muuten pohjoismaat sijoittuvat lähelle toisiaan. Tämä on varmasti selitettävissä sekä ilmastollisilla että infrastruktuurisilla tekijöillä. Euroopan unionin uusien jäsenmaiden sijoitukset ovat matalimpia, vaikka niiden energiaintensiteetit ovat korkeita. Tämä on selitettävissä maiden suurilla väestönluvuilla ja verrattain pienillä bruttokansantuotteilla Suomessa taas väestönluku on Euroopan alhaisimpia, mutta BKT verrattain korkea. Euroopan unioni (27) sijoittuu Viron ja Espanjan väliin. Suomessa energiankulutus asukasta kohden on pysynyt lähes samalla tasolla vuosien 1996 ja 2006 välillä. Tämä on havaittavissa kuviossa 17. Kuviossa 18 on havainnollistettu ostovoimalla korjattu BKT asukasta kohden.



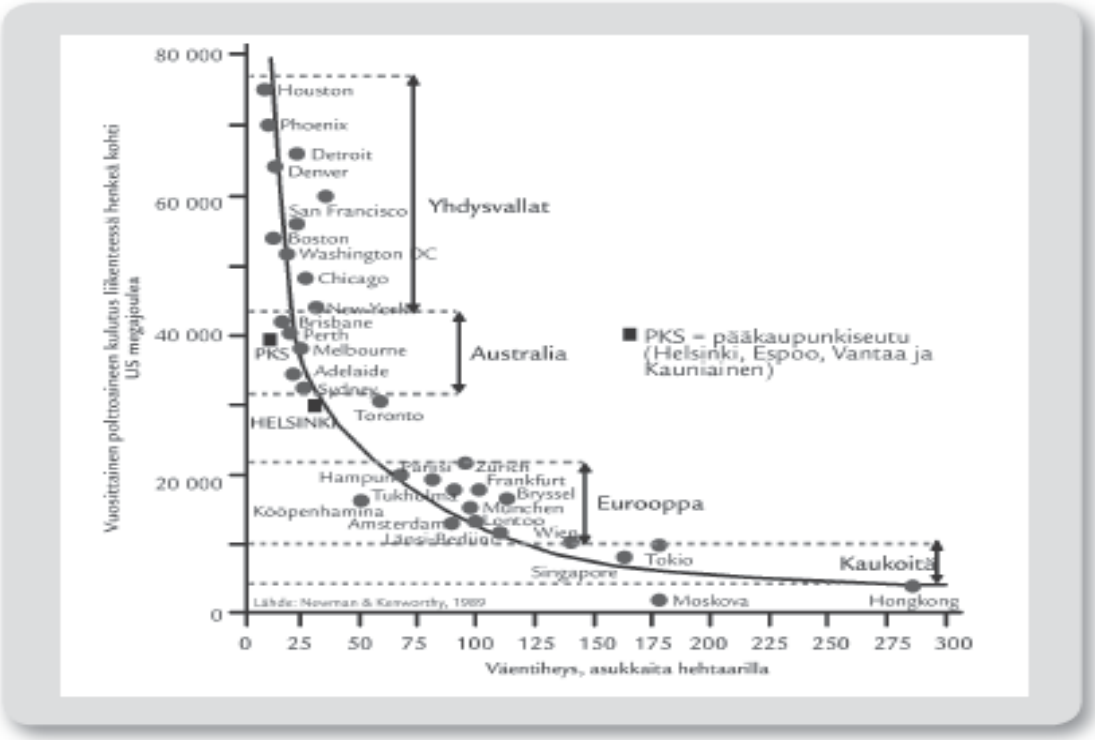
KUVIO 18 Ostovoimalla korjattu bruttokansantuote per asukas.

Lähde: Eurostat, 2010c.

Huom. Minimiarvo 7700, maksimiarvo 68600.

Huom. N/A= tietoa ei ole saatavilla.

Energiaintensiteetiltään korkeat Euroopan unionin maat kuuluvat ostovoimalla korjatulla bruttokansantuotteella mitattuna köyhimpiin maihin. Suomi taasen kuuluu Euroopan ostovoimaisimpiin valtioihin. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että Suomessa kulutettua energiayksikköä kohden liittyy suurempi ostovoima kuin esimerkiksi Bulgariassa ja tämän vuoksi energiaintensiteetti on myös korkeampi kuin esimerkiksi Bulgariassa. Toisaalta, tämä selittää myös sen, miksi Suomessa on energiankulutus asukasta kohden korkeampi kuin monella muulla Euroopan maalla, mutta energiaintensiteetti suhteessa EU27 on matalampi kuin uusilla Euroopan unionin mailla.



KUVIO 19 Liikenteessä vuosittain kulutettu polttoaine henkeä kohden ja väestöntiheys

Lähde: Vehviläinen ym. 2009.

Energiatehokkuutta voidaan havainnollistaa myös vähemmän aggregoidulla mittarilla. Helsinki kuuluu niihin Euroopan maihin, joissa liikenteessä kulutetaan polttoainetta väestötiheyteen nähden hyvin paljon. Jos pääkaupunkiseutua käsitellään kokonaisuutena, kasvaa polttoaineen kulutus entisestään väestöntiheyteen nähden. Pääkaupunkiseudun käsitteleminen yhtenä kokonaisuutena on mielekästä, koska se on alueena melko yhtenäinen ja sopii tällöin myös paremmin vertailukohteeksi muiden suurkaupunkien kanssa. (Kuvio 19.)

Eurostat laskee myös energiankulutuksen kasvihuonekaasuintensiteetin. Tämä lasketaan maan energiankulutuksen ja energiaan liittyvien kasvihuonekaasupäästöjen (hiilidioksidi, metaani ja typpioksiduuli) suhteena (KHK/ BKT). Taulukossa 9 on Pohjoismaiden (paitsi Norjan) sekä EU15 ja EU27 energiankulutuksen kasvihuonekaasuintensiteetti. Suomen kasvihuonekaasuintensiteetti on korkein. Tämä tarkoittaa siis sitä, että Suomessa jokaista euroa kohden tuotetaan enemmän kasvihuonekaasuja kuin muissa vertailussa olevissa maissa.

TAULUKKO 9 Kasvihuonekaasuintensiteetti

	1996	2006
Ruotsi	107.9	92.6
EU27	104.6	96.8
EU15	104	97.3
Islanti	102.5	98.2
Tanska	120.7	102.7
Suomi	118.8	103.4

Huom. Tilastoaineisto saatavilla eurostatista (Eurostat 2009c).

Energiatehokkuuden merkitys Suomelle on tärkeä ja sillä on suuri painoarvo energiapolitiikassamme. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon avulla säästetään polttoainetta ja rajoitetaan päästöjä noin 30 % erillistuotantoon verrattuna. Energiatehokkuutta voidaan lisätä jätteen käytöllä energiantuotannossa sekä kierrätyksellä. Eräiden arvioiden mukaan jäte sisältää noin 60 % uusiutuvaa energiaa. (Energia-alan toimialavuoropuhelutyöryhmä, 2007.)

TAULUKKO 10 Pitkän aikavälin mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseksi joiden teollisuustuotteiden valmistuksessa

Energiatehokkuuden parantamis-mahdollisuudet pitkällä aikavälillä

SEC, GJ/tonni tuotetta	Nykyinen paras	Tulevat teknologiat	SEC, teoreettinen minimi
Paperi/kartonki	2,3-8,6	0,6-4,3	0,0
Neitseellinen teräs	19,0	12,5	6,6
Kierrätysteräs	7,0	3,5	0,0
Ammoniakki	33,0	28,6	19,2
Typpihappo	26,8	15,3	3,2

Lähde: Tuckenburg, 2007, VTT 2009 8 mukaan.

Teollisuustuotteiden valmistuksessa on paljon tehokkuuspotentiaalia olemassa. Teoreettisen ja nykyisen parhaan välillä on eroa, joka voidaan tulevilla teknologioilla kuroa umpeen. (Taulukko 10.) Energiatehokkuuden parantamisessa valtiovallan ja energian loppukäyttäjien välisillä energiasäästösopimuksilla on merkittävä asema (Tarjanne & Kivistö 2006, 17).

5.3 Rebound-vaikutuksen suuruus

Greening ym. (2000) ovat tehneet rebound-vaikutusta koskevista tutkimuksista koosteen, jossa on kuvattu ilmiön arvioitu suuruus sekä sen suuruutta käsittelevien tutkimusten määrä. Tutkimukset ovat jaoteltu taloudentoimijan ja loppukäytön mukaan ja ne on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10 Kooste rebound-vaikutuksen tuloksista

Taloudentoimija	Loppukäyttö	RE (potentiaalinen)	Tutkimusten määrä
Kuluttaja			
	Huoneen lämmitys	10–30 %	26^{++}
	Huoneen viilennys	0–50 %	9^{+}
	Veden lämmitys	<10–40 %	5^{-}
	Asuntojen valaistus	5–12 %	4^{-}
	Kodinkoneet	0 %	2^{-}
	Autokuljetus	10–30 %	22^{-}
Yritykset			
	Prosessit (lyhyt aikaväli)	0–20 %	1^{-}
	Valaistus (pitkä aikaväli)	0–2 %	4^{-}
	Aggregaatti vaikutus	<100–0 %	paljon
Koko talouden			
	Muutos kokonaiskasvussa	0.48 %	1^{-}

Huom.

$^{++}$ Nämä tutkimukset ovat tehty useilla eri metodeilla ja sisältävät hyvän estimaattien vastaavuuden.

$^{+}$ Nämä tutkimukset on tehty eri metodeilla, muttei niin laajasti. Estimaateissa on jonkin verran vaihtelua.

$^{-}$ Nämä tutkimukset on tehty ainoastaan muutamalla metodilla ja tulokset eivät ole merkittäviä.

Huom. Muokattu: Greening ym. 2000, 398.

Taulukosta nähdään, että rebound-vaikutuksen arviot ovat melko maltillisen kokoisia. Tässä tarkastelussa rebound-vaikutuksen tutkimuksista käydään läpi yleisellä tasapainonmallilla tehdyt mallinnukset, sillä ne pyrkivät kuvaamaan parhaiten koko talouden muutoksia ja niiden avulla voidaan arvioida tarkemmin, mitkä tekijät vaikuttavat kulutukseen. Energiatehokkuuden rebound-vaikutuksesta ei ole tehty tutkimuksia Suomen aineistolle. Tutkimuksen kannalta on mielekästä tarkastella yleisen tasapainomalleilla tehtyjä tutkimuksia energiatehokkuuden rebound-vaikutuksesta. Siksi tarkastelu tehdään Yhdistyneelle kuningaskunnalle ja Skotlannille tehtyjen yleisen tasapainomallien kautta, jotta voidaan hahmottaa ilmiön suuruutta. Suomelle vastaavia tutkimuksia ei ole tehty. Allan, Hanley, McGregor, Swales ja Turner (2007, 2009) ovat viimeisimpien empiiristen tutkimusten tuottajia. Analyyseissä pyritään selvittämään rebound-vaikutuksen suuruutta yleisen tasapainon mallin avulla. Tutkimuksista käydään kolme läpi, jotka koostetaan lopulta yhteen.

Alan ym. (2007) esittelevät yleisen tasapainonmallin UK:n taloudelle, jossa huomioidaan talous, energia ja ympäristö (UKENVI). Malli on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.3 ja sen perusoletukset pätevät tässä. Energiatehokkuudessa tapahtuu 5 % muutos, joka koskee siis ainoastaan energiatuotteita. Taulukoon 11 on koottu tulokset prosentuaalisista muutoksista perusvuoteen verrattuna. Sekä sähkön että energian (ei sis. sähköä) kokonaiskulutus laskee lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Rebound-vaikutus on molemmilla korkeampi lyhyellä aikavälillä kuin pitkällä aikavälillä. Koko UK:n talouskasvuun tehokkuudella on positiivinen vaikutus.

TAULUKKO 11 Energiatehokkuuden vaikutukset perusskenaariossa (prosentuaaliset muutokset perusvuodesta)

Aikaväli	Lyhyt	Pitkä
BKT	0.11	0.17
Kulutus	0.37	0.34
Investoinnit	0.06	0.14
Vienti	-0.03	0.21
Tuonti	-0.23	-0.21
Kokonaistyöllisyys	0.20	0.21
Nettopalkka	0.28	0.30
Kuluttajahintaindeksi	-0.27	-0.27
Sähkön kokonaiskulutus	-1.92	-3.65
Sähkön rebound-vaikutus (%)	61.6	27.0
Energian kokonaiskulutus (ei sis. sähköä)	-2.27	-3.46
Energian rebound-vaikutus (ei sis. sähköä) %	54.6	30,8

Lähde: Alan ym. 2007, 787.

Hanley ym. (2009) tekivät vastaavalla mallilla analyysin Skotlannille. Simulaatio tehtiin Skotlannin taloudelle 1999-vuoden datalla. Simulaatiossa energiatehokkuus kasvaa 5 % eksogeenisesti aiheuttaen shokin perusuraan. Lyhyellä aikavälillä väkiluku ja osakepääoma ovat kiinteitä, keskipitkällä aikavälillä väestönmäärä vakautuu muuttoliikkeen myötä ja pitkällä aikavälillä sekä väkiluku ja osakepääoma sopeutuvat täysin. Aggregaattitason lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin tulokset on esitetty taulukossa 12. Substituutiojousto oletetaan 0.3 suuruiseksi. Lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä sekä sähkön- että energiankulutus (sähkötön) laskevat hiukan. Tämä lasku on kuitenkin suhteessa pieni, kun kyseessä on 5 % tehokkuuden kasvu ja sähkön- ja energiakulutus laskevat vain noin prosentin verran. Rebound-vaikutus on sähkönkulutukselle lyhyellä aikavälillä 63.2 % ja keskipitkällä 64.2 %. Energiankulutuksen rebound-vaikutukseksi muodostuu lyhyellä aikavälillä 54.4 % ja keskipitkällä aikavälillä 55.5 %. Pitkällä aikavälillä tilanne kääntyy kuitenkin toisin. Sekä sähkön- että energiankulutus kasvaa (1.15 % ja 0.81 %). Rebound-vaikutus muuttuu molemmilla kulutusryhmillä backfire-ilmiöksi, joka on sähkönkulutuksen osalta 131.6 % ja energiankulutuksen (sähkötön) osalta 134.1 %. Toisin kuin Allanin ym. (2007) saadut tulosten mukaan, nyt rebound-vaikutus kasvaa pitkää aikaväliä kohden.

TAULUKKO 12 Energiatehokkuuden 5 % :n kasvun vaikutus aggregaattitasolla kaikkiin tuotantosektoreihin (prosentuaalinen muutos perusvuoteen)

Aikaväli	Lyhyt	Keskipitkä	Pitkä
BKT	0.060	0.100	0.880
Kulutus	0.190	0.220	0.800
Investoinnit	0.290	0.360	1.030
Vienti	0.210	0.230	0.960
Tuonti	0.030	0.050	0.280
Nimellispalkka ennen veroja	0.120	0.020	-0.220
Nettopalkka	0.090	0.000	0.000
Kuluttajahintaindeksi	0.020	0.020	-0.220
Kokonaistyöllisyys	0.100	0.160	0.800
Kokonaistyöttömyys	-0.830	0.000	0.000
Kokonaisväkiluku	0.000	0.160	0.800
Sähkön kokonaiskulutus	-1.330	-1.300	1.150
Sähkön rebound-vaikutus (%)	63.20	64.20	131.6
Energian kokonaiskulutus (ei sähkö)	-1.080	-1.050	0.810
Energian rebound-vaikutus (ei sähkön) %	54.40	55.50	134.1

Lähde: Hanley ym. 2009, 699.

Perusanalyysiin sisältyy monia parametreja, joiden arvot vaikuttavat rebound-vaikutuksen suuruuteen. Tällaisia ovat esimerkiksi energian ja muiden panosten välinen substituutiojousto, kysynnän hintajousto tuotokselle, muiden tekijöiden tarjonnanjousto sekä toimialojen energiaintensiteetti. Kaksi ensimmäistä ovat tunnistettavissa AMOSENVI:ssa ja niiden muutosten vaikutusta on tarkasteltu seuraavassa.

Hanley (2009) testasivat substituutiojouston eri arvoilla rebound-vaikutuksen suuruutta. Mallissa tarkasteltiin ainoastaan pitkän aikavälin tuloksia substituutiojouston arvoilla 0.1, 0.3 ja 0.7. Kun tehokkaammaksi tulleen tuotannontekijän hinta laskee, matalilla substituutiojouston arvoilla tuotannontekijöiden vaihdettavuus keskenään on vaikeampaa. Taulukossa 13 on substituutiojousto energian ja energiattomien välituotepanosten välillä. Nyt siis energiaa sisältävät välituotteet tulevat suhteessa edullisemmiksi energiatehokkuuden kasvun myötä. Sekä sähkön että energian (sähköttömän) rebound-vaikutus kasvaa substituutiojouston kasvaessa. Molemmissa tapauksissa ei oikeastaan voida edes puhua rebound-vaikutuksesta vaan backfire-ilmiöstä. Sähkön kokonaiskulutus kasvaa substituutiojouston kasvaessa 0,48 prosentista aina 2,52 prosenttiin ja energian kokonaiskulutus 0,34 prosentista 1,76 prosenttiin. Muiden tekijöiden vaikutus pysyy lähes samana perusanalyysiin verrattuna.

TAULUKKO 13 Energian ja energiattomien välituotepanosten välisen substituutiojouston muutoksen vaikutus pitkällä aikavälillä (prosentuaaliset muutokset perusvuodesta)

Substituutiojousto	Matala (0.1)	Keskisuuri (0.3)	Korkea (0.7)
BKT	0.880	0.878	0.874
Kulutus	0.798	0.795	0.787
Investoinnit	1.024	1.028	1.038
Vienti	0.953	0.956	0.962
Tuonti	0.283	0.283	0.283
Nimellispalkka ennen veroja	-0.216	-0.217	-0.219
Nettopalkka	0.000	0.000	0.000
Kuluttajahintaindeksi	-0.216	-0.217	-0.219
Kokonaistyöllisyys	0.812	0.803	0.785
Kokonaistyöttömyys	0.000	0.000	0.000
Kokonaisväkiluku	0.812	0.803	0.785
Sähkön kokonaiskulutus	0.473	1.150	2.514
Sähkön rebound-vaikutus (%)	113.0	131.6	169.3
Energian kokonaiskulutus (ei sähkö)	0.337	0.810	1.756
Energian rebound-vaikutus (ei sähkön) %	114.2	134.1	174.2

Lähde: Hanley ym. 2009, 702.

Taulukossa 14 on arvonlisäyksen ja muiden välituotepanosten välinen rebound-vaikutus eri substituutiojouston arvoilla. Nyt substituutiojouston matalilla arvoilla siirtyminen arvonlisäyksestä (sisältää työn ja pääoman) muihin välituotepanoksiin (sisältäen energian) on vaikeampaa. Myös tässä tilanteessa voidaan puhua backfire-ilmiöstä, joka tosin jää hiukan matalammaksi kuin edellä ja kasvaa maltillisemmin substituutiojouston kasvaessa. Nyt substituutiojouston kasvu aiheuttaa maltillisemman kasvun rebound-vaikutuksessa.

TAULUKKO 14 Arvonlisäyksen ja muiden välituotepanosten välisen substituutiojouston muutoksen vaikutus pitkällä aikavälillä (prosentuaaliset muutokset perusvuodesta)

Substituutiojousto	Matala (0.1)	Keskisuuri (0.3)	Korkea (0.7)
BKT	0.893	0.878	0.848
Kulutus	0.807	0.795	0.771
Investoinnit	1.050	1.028	0.985
Vienti	0.954	0.956	0.962
Tuonti	0.279	0.283	0.289
Nimellispalkka ennen veroja	-0.217	-0.217	-0.218
Nettopalkka	0.000	0.000	0.000
Kuluttajahintaindeksi	-0.217	-0.217	-0.218
Kokonaistyöllisyys	0.813	0.803	0.784
Kokonaistyöttömyys	0.000	0.000	0.000
Kokonaisväkiluku	0.813	0.803	0.784
Sähkön kokonaiskulutus	1.010	1.150	1.430
Sähkön rebound-vaikutus (%)	127.8	131.6	139.3
Energian kokonaiskulutus (sähköttömän)	0.690	0.810	1.040
Energian rebound-vaikutus (sähköttömän) %	129.2	134.1	143.8

Lähde: Hanley ym. 2009, 702.

Korkea substituutiojousto energian ja muiden panosten välillä ei kuitenkaan ole välttämätön ehto backfire-ilmiölle vaikka backfire-ilmiö muuttuu suoraan verrannollisesti substituutiojouston arvojen kanssa. Sekä taulukossa 13 että taulukossa 14 esitettyjen tulosten kohdalla on havaittavissa sama ilmiö: substituutiojouston kasvaessa myös rebound-vaikutuksen suuruus kasvaa.

Vuonna 2007 Allanin ym. tekemän yleisen tasapainomallin tarkastelun jatkoksi Turner (2009) pureutui tarkemmin substituutiojouston arvojen merkitykseen rebound-vaikutuksen arvioinnissa UK:lle. Mallin perusoletukset pätevät myös tässä. Data saadaan SAM–tilastosysteemistä, jossa perusvuotena on vuosi 2000. Kuten edellä, myös nyt oletetaan eksogeeninen energiatehokkuuden 5 %:n kasvu. Perusskenaariossa on CES–tuotantofunktio, jonka substituutiojouston arvoksi oletetaan 0,3. Taulukkoon 15 on koottu analyysista saadut tulokset. Tulokset ovat prosentuaalisia muutoksia perusvuoden tasapainosta. Lyhyt aikaväli kuvaa seuraava jakso tehokkuus shokin jälkeen, pitkällä aikavälillä osakepääoma on sopeutunut täysin toivottuihin toimiala-arvoihin. Turnerin analyysin tarkoitus oli tutkia tärkeimpien parametrien merkitystä

rebound-vaikutuksen suuruuteen, mikä jäi huomiotta aikaisemmassa analyysissä Allan ym. (2007) kanssa.

Tuloksista nähdään, että sähkön ja energian (ei sis. sähköä) kokonaiskulutus laskee sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Kulutuksen lasku jää kuitenkin matalammaksi kuin tehokkuuden kasvu. Sähkön rebound-vaikutus on lyhyellä aikavälillä 59,6 % ja energian (ei sis. sähköä) 54.7 %. Molempien rebound-vaikutus laskee pitkällä aikavälillä lyhyeen aikaväliin verrattuna. Toisin kuin Saunders (2008) esittää, energiankulutuksen lasku kasvaa yli ajan, jolloin rebound-vaikutus pitkällä aikavälillä jää matalammaksi kuin lyhyen aikavälin rebound-vaikutus.

TAULUKKO 15 Energiatehokkuuden kasvun aggregaattivaikutus (muutokset prosentuaalisia perusvuodesta)

	Lyhyt	Pitkä
BKT	0.11	0.17
Kulutus	0.37	0.34
Investoinnit	0.06	0.14
Vienti	-0.03	0.22
Tuonti	-0.23	-0.21
Nimellispalkka ennen veroja	0.01	0.07
Nettopalkka	0.28	0.30
Kuluttajahintaindeksi	-0.27	-0.23
Kokonaistyöllisyys	0.20	0.02
Kokonaistyöttömyys	-2.44	-2.61
Kokonaisväkiluku	0.00	0.00

Lähde: Turner. 2009, 653.

Taulukkoon 16 on koottu pitkän ja lyhyen aikaväli absoluuttinen muutos eri tutkimuksissa. Kuviosta nähdään, että esimerkiksi Hanleyn ym. (2009) tutkimuksessa rebound-vaikutukset ovat kasvaneet huomattavasti kun taas Allan ym (2007) ja Turnerin (2009) saamien tulosten mukaan rebound-vaikutukset ovat laskeneet kohti pitkää aikaväliä. Kaikkien muiden muuttujien absoluuttinen muutos on ollut maltillinen, Hanley ym (2009) tutkimuksessa muutokset olivat suurempia kuin kahdessa muussa tutkimuksessa. On kuitenkin huomioitava, että Hanley ym (2009) tutkivat Skotlantia kuin taas muut koko UK:ta.

TAULUKKO 16 Pitkän ja lyhyen aikavälin absoluuttinen muutos (prosenttiyksikköä)

	Allan ym.	Hanley ym.	Turner
BKT	0.06	0.82	0.06
Kulutus	-0.03	0.61	-0.03
Investoinnit	0.08	0.74	0.08
Vienti	0.24	0.75	0.25
Tuonti	0.02	0.25	0.02
Kokonaistyöllisyys	0.01	0.7	-0.179
Nettopalkka	0.02	-0.09	0.02
Kuluttajahintaindeksi	0	-0.24	0.04
Sähkön kokonaiskulutus	-1.73	2.48	-1.31
Sähkön rebound-vaikutus (%)	-34.6	68.4	-36.5
Energian kokonaiskulutus (ei sis. sähköä)	-1.19	1.89	-0.7
Energian rebound-vaikutus (ei sis. sähköä) %	-23.8	79.7	-23.8

Taulukoihin 17 ja 18 on koostettu yllä olevien yleisen tasapainonmallinnusten tulokset rebound-vaikutuksen suuruudesta. Huomioitavaa on, että näistä Hanley ym. (2009) ovat tehneet analyysin Skotlannin dataa käyttäen kun taas Allan ym. (2007) ja Turner (2009) hyödynsivät UK:n dataa, molempien perusvuosi on 2000. Kaikissa tutkimuksissa perusskenaarion muut oletukset ovat vastaavat.

TAULUKKO 17 Sähkön rebound-vaikutus ja kokonaiskulutus eri tutkimuksissa perusskenaariossa

	Rebound-vaikutus (%)			Kokonaiskulutus (%)		
	Allan ym.	Hanley ym.	Turner	Allan ym.	Hanley ym.	Turner
Lyhyt aikaväli	61.6	63.2	59.6	-1.92	-1.33	-1.45
Pitkä aikaväli	27.0	131.6	23.1	-3.65	1.15	-2.76

TAULUKKO 18 Energian (ei sis. sähköä) rebound-vaikutus ja kokonaiskulutus eri tutkimuksissa perusskenaariossa

	Rebound-vaikutus (%)			Kokonaiskulutus (%)		
	Allan ym.	Hanley ym.	Turner	Allan ym.	Hanley ym.	Turner
Lyhyt aikaväli	54.6	54.4	54.7	-2.27	-1.08	-1.35
Pitkä aikaväli	30.8	134.1	30.9	-3.46	1.15	-2.05

Yhteenvetona näistä kolmesta tutkimuksesta voidaan sanoa, että jokaisen tutkimuksen osalta rebound-vaikutus on havaittavissa oleva ilmiö. Skotlannin tapauksessa pitkällä aikavälillä saavutetaan backfire-ilmiö, jossa energiankulutus kasvaa yli perusskenaarion kulutuksen. Koko UK:n tapauksessa rebound-vaikutus vähenee pitkällä aikavälillä. Toisin kuin Saunders (1992) esitti, myös substituutiojouston ollessa alle 1 saavutetaan rebound-vaikutus.

5.4 Substituutiojouston merkitys rebound-vaikutuksen suuruuteen

Edellisessä kappaleessa läpikäydyn perusteella voidaan todeta, että substituutiojoustolla näyttäisi olevan merkitystä rebound-vaikutuksen suuruuteen, vaikka substituutiojouston ja rebound-vaikutuksen yhteyttä ei ole todistettu. Näin ollen aikaisemmin esitellyistä tuotantofunktioista Leontief ja Cobb-Douglas antaisivat vääristyneen kuvan rebound-vaikutuksen suuruudesta. Substituutiojouston suuruutta pääoman ja työvoiman välille on estimoitu paljon, pääoman, työvoiman ja energian välille taas vähemmän. Tässä kappaleessa käyn läpi kolmitasoisella CES-tuotantofunktiolla tutkittuja substituutiojouston suuruuksia sekä eri toimialoille että eri maille. Tämän jälkeen voidaan joko hylätä tai hyväksyä Leontief- tai Cobb-Douglas tuotantofunktion käytön rebound-vaikutuksen tarkastelussa ja myös tehdä johtopäätöksiä siitä, miten suureksi rebound-vaikutus muodostuisi estimoiduilla substituutiojouston arvoilla.

Kemfertin (1998) tarkasteli tuotantorakenteen merkitystä mallintamisessa. Tutkimuksessa käytettiin Saksan talouden aikasarjaa 1970–1988. Sekä rakenteen (KE)L ja (EL)K selittävyysasteet olivat korkeammat kuin (KL)E:n. substituutiojoustot laskettiin sekä pääoman-työvoiman ja energian välille että pääoman ja työvoiman välille (ja samoin myös muille rakenteille). Matalin substituutiojousto saatiin (EL)K välille ja korkein (KE)L välille. Kemfertin mukaan rakenteista pääoman-energia ja työvoima olisi käytettävin. Sektorikohtaisessa tarkastelussa teollisilla aloilla pääoma-työvoima ja energia rakenne saattaa kuitenkin olla realistisempi. Substituutiojouston arvot olivat nollan ja yhden välillä, jolloin panokset ovat epätäydellisiä substituutteja, mutteivät komplementteja.

Van der Werf teki vastaavia havaintoja kuin Kemfert. Hänen tutkimuksensa pääpaino oli ilmastopoliittisen tarkastelun kannalta parhaan tuotantorakenteen löytäminen. Tarkastelu tehtiin eri maille sekä eri toimialoille. Aineisto on OECD:n tietokannasta 12 eri maasta ja 7 eri toimialasta periodilta 1978–1996. Van der Werf suosittelee (KL)E tuotantorakenteen käyttöä, sillä sen kohdalla vapausasteilla korjattu selitysaste sai korkeimmat arvot sekä maa että teollisuus tarkastelussa. (KE)L rakenteen ei voida sanoa selittävän kokonaisvaihtelua, sillä selitysaste jää molemmilla hyvin pieneksi (alle 0,15) Eri maiden substituutiojoustot vaihtelivat suuresti keskenään, mutta jokaisen kohdalla Cobb-Douglas tuotantofunktio (σ=1) voitiin hylätä. Suomen kohdalla van der Werf sai substituutiojouston suuruudeksi (KL)E -rakenteelle 0,5415 ($\sigma_{K,L}$ =0,5525), (KE)L -rakenteelle 0,9465 ($\sigma_{L,E}$ =0,8530) ja (LE)K rakenteelle 0,4495 ($\sigma_{K,E}$ =0,9882). Nämä arvot ovat melko korkeita verrattuna esimerkiksi muihin Pohjoismaihin, jotka huomioitiin myös tutkimuksessa. Taulukkoon 19 on koottu substituutiojouston arvoja eri maille tuotantorakenteella (KL)E. Suomi kuuluu USA:n ja Belgian kanssa maihin, joilla substituutiojouston arvo nousee yli 0,5. Tämän voitaisiin nähdä kuvastavan sitä, että Suomessa pääoma, työvoima ja energia ovat helpommin vaihdettavissa keskenään kuin maissa, joissa substituutiojousto on lähellä nollaa. Kun tuotantorakenne on kuvattu vain pääoman ja työvoiman välillä (K,L), nousee lähes jokaisen maan substituutiojousto, poikkeuksena USA ja Kanada.

TAULUKKO 19 Substituutiojoustot eri maille

	(KL)E	
	$\sigma_{KL,E}$	$\sigma_{K,L}$
Alankomaat	0.1928*	0.2892
Belgia	0.6053	0.6154
Italia	0.2417	0.5216
Kanada	0.4957	0.4184
Länsi-Saksa	0.3311	0.4271
Norja	0.3255	0.3800
Ranska	0.3518	0.4200
Ruotsi	0.2531	0.4655
Suomi	0.5415	0.5525
Tanska	0.1725	0.5273
UK	0.2481	0.2748
USA	0.5470	0.3191

Lähde: Mukaillen van der Werf 2008, 2972.

Huom. * poikkeaa nollasta 5 % merkitsevyystasolla, muut 5 % merkitsevyystasolla

Taulukosta 20 nähdään, että perusmetallien ja kuljetuskoneiston osalta substituutiojoustot ovat hieman korkeampia. Tämä voisi selittää myös sen, miksi Suomen substituutiojoustot ovat hieman korkeampia kuin muiden maiden. Kuten aikaisemmin todettiin, Suomen kansantalous on rakentunut voimakkaasti teollisuudelle ja tämän voidaan olettaa heijastuvan substituutiojouston arvoissa.

TAULUKKO 20 Substituutiojoustot eri toimialoille

	(KL)E	
	$\sigma_{KL,E}$	$\sigma_{K,L}$
Perusmetallit	0.6454	0.619
Rakennus	0.2892	0.2242
Elintarvike ja tupakka	0.3990	0.4597
Tekstiilit ja nahka	0.1705	0.4638
Ei-malmikaivannainen	0.2546	0.4541
Kuljetuskoneisto	0.4489*	0.4103
Paperi-, paperimassa- ja kirjapainoteollisuus	0.2944	0.2737

Lähde: Mukaillen van der Werf. 2008, 2972.

Huom. * poikkeaa nollasta 5 % merkitsevyystasolla, muut 5 % merkitsevyystasolla

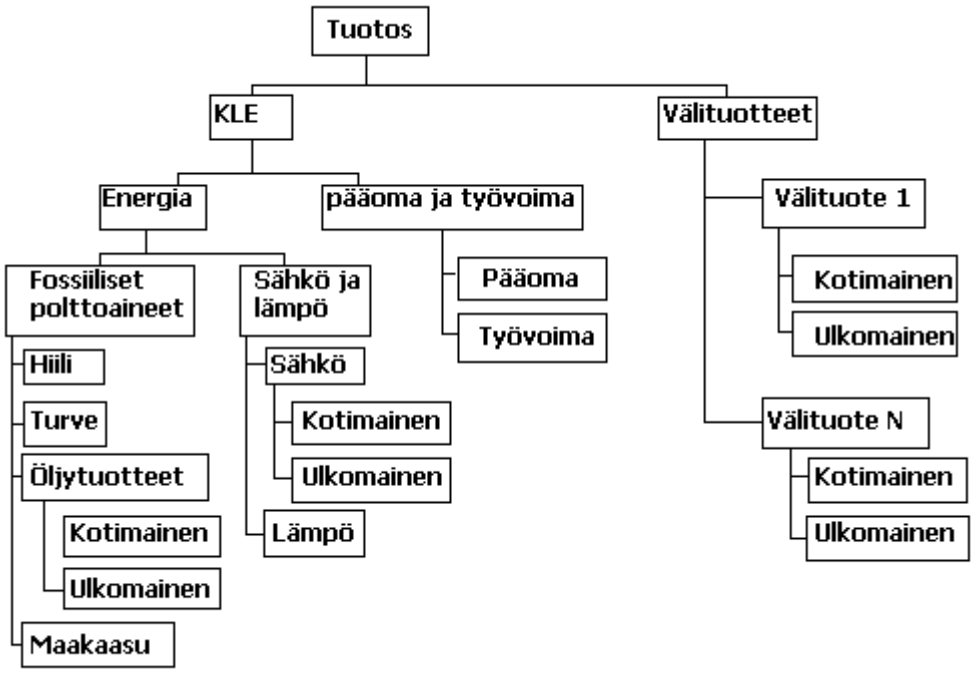
Van der Werf testasi myös todennäköisyyden Cobb-Douglas tuotantofunktiolle ($\sigma = 1$) (KL)E-rakenteelle. Testin mukaan Cobb-Douglas tuotantofunktio on epätodennäköinen sekä kaikkein toimialojen että kaikkien maiden osalta. Näin ollen Cobb-Douglas tuotantofunktion käyttäminen ei ole myöskään mielekästä rebound-vaikutuksen tutkimuksessa. Leontief-tuotantofunktion todennäköisyyttä ei tutkittu, mutta toisaalta substituutiojouston arvot poikkesivat kaikissa tapauksissa nollasta, joten ainakaan nämä arvot eivät tue Leontief-tuotantofunktion käyttöä.

5.5 Rebound-vaikutukseen kohdistuva kritiikki

Rebound-vaikutukseen kohdistuva kritiikki on Sorrellin ja Dimitropoulosin (2008, 637) mukaan seurausta perusmääritelmien ja ongelmien epäselvyydestä. Yleisellä tasapainomallilla tehdyissä substituutiojoustoja koskevissa tutkimuksissa ongelmaksi ovat muodostuneet tutkimusten erilaiset taustaoletukset ja funktiomuodot. Näin ollen eri substituutiojoustoja arvioitaessa ja niiden keskinäistä vertailua tehdessä tulisi olla tarkka. (Broadstock ym. 2007.) Rebound-vaikutuksen laskeminen kuluttajan teorian

kautta on reaalimaailmassa lähes mahdotonta, koska kuluttajat tekevät päätöksensä usein eri hyödykkeiden väliltä (Berkhout, 2000).

Yleisillä tasapainomalleilla tehdyissä tarkasteluissa kritiikkiä voi esittää myös tuotantorakenteen kuvaamiseen. Hanley, McGregor, Swales, Turner ja Allan (2007, 2009) käsittelevät energiaa yhtenä osana välituotepanoksia. Energia voidaan kuitenkin nähdä myös yhtenä panoksena pääoman ja työvoiman rinnalla. Esimerkiksi Forsström ja Honkatukia (2001) mallintavat toimialan yleistä rakennetta siten, että energia ja arvonlisä (pääoma ja työvoima) ovat yksi CES-summa, josta energia jakautuu fossiilisiin polttoaineisiin sekä sähköön ja lämpöön. Välituotekäyttö taas muodostuu toimialoittain kotimaisen ja ulkomailta hankitun hyödykkeen CES-summana. Ylin välituote on eri toimialojen CES-summa yhteensä. (Kuvio 20.)

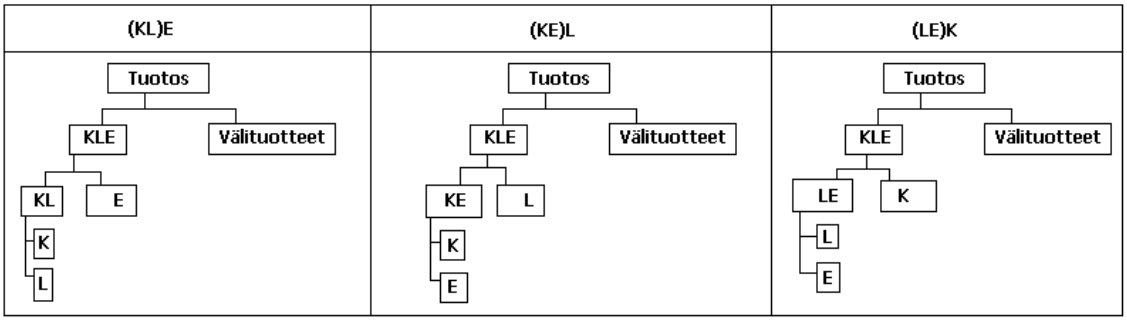


KUVIO 20 Toimialan yleinen malli

Lähde: Forsström & Honkatulia. 42, 2001.

Energiasta sekä pääomasta ja työvoimasta koostuva CES-summa voidaan jaotella myös muuten kuin energiaksi sekä arvonlisäksi [(KL)E]. Voidaan olettaa, että tuotanto rakentuu siten, että pääoma ja energia ovat yksi CES-summa ja työvoima omansa

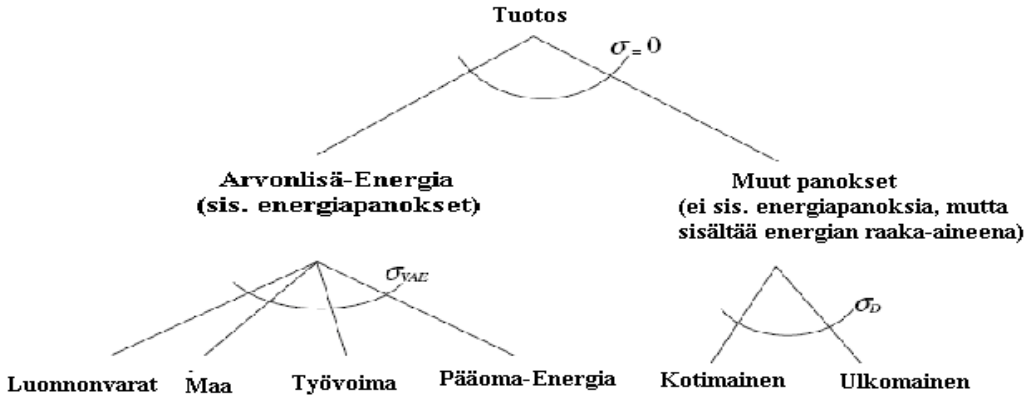
[(KE)L] tai että työvoima ja energian muodostava CES-summan ja pääoma omansa [(LE)K] (Kuvio 21). Eri CES-summien rakennetta on vertailtu kirjallisuudessa jonkin verran (esimerkiksi Kemfert 1998, van der Werf, 2008).



KUVIO 21 Tuotantorakenteiden KL(E), KE(L) ja LE(K)

Burniaux ja Truong (2002) näkevät yleisen tasapainomallin rakentamisessa kaksi oleellista kysymystä. Ensimmäinen koskee tuotannon mallintamista joko taloudellisen (top-down) tai teknisen (bottom-up) mallin kautta. Toinen oleellinen kysymys koskee juuri pääoman ja energian välistä vaihtosuhdetta. Myös Burniaux ja Truong erottavat energian välituotekäytöstä ja käsittelevät sitä yhtenä panoksena pääoman ja työvoiman rinnalla.

Edellä käydyissä rebound-vaikutuksen tutkimuksissa tuotantofunktio panosten ja välituotteiden välillä on asetettu CES-tuotantofunktioksi. Tämä tarkoittaa sitä, että panoksen ja välituotteet voivat olla substituutteja keskenään ja niitä voidaan vaihtaa keskenään. Näin ollen esimerkiksi eri energiamuotoja ja työvoimaa tai energiaa ja pääomaa voitaisiin vaihtaa keskenään substituutiojouston mukaisesti. Burniaux ja Truong (2002), ottavat GTAP-E malliin rakenteen, jossa arvonlisän ja välituotteiden välinen funktio on Leontief-tyyppiä. Tällöin panoksia ja välituotteitta oletetaan tarvittavan tietyssä kiinteässä suhteessa eikä niiden väliseen suhteeseen vaikuta hintojen muutokset. Kuvioon 22 on kuvattu GTAP-E mallin mukainen tuotantorakenne.



KUVIO 22 Tuotantorakenne GTAP-E mallissa

Edellä käydyissä rebound-vaikutuksen tutkimuksissa BKT:n kasvu jäi alle prosenttiin sekä pitkällä että lyhyellä aikavälillä. Tämä voisi mahdollisesti selittyä tuotannon kuvaamisen kautta. jos energia esiintyisi pääoman ja työvoiman rinnalla, olisi vaihtomahdollisuudet suuremmat ja energiatehokkuudessa tapahtuvat muutokset myös erilaisia.

6 Johtopäätökset

Energiatehokkuus on yleisesti hyväksytty poliittinen työkalu energiankulutuksen hillitsemiseen, koska sen on havaittu olevan ilmastonmuutoksen torjunnassa tehokas keino. Energiatehokkuuden mittaaminen on haastavaa, sillä energiankulutuksen ja tuotannon kohdistaminen ei ole yksiselitteistä. Koko kansantalouden tehokkuusmittarien avulla saadaan suuntaa antavaa tietoa talouden energiaintensiteetistä, mutta niiden pohjalta on vaikea vetää johtopäätöksiä, sillä ne eivät anna tietoa rakenteellisista muutoksista. Energiatehokkuuden kannalta onkin mielekästä pyrkiä hahmottamaan toimialan/ kansantalouden rakenne ja siinä tapahtuvat muutokset. Energiatehokkuutta poliittisena työkaluna on kritisoitu muun muassa siitä, että sen avulla ei välttämättä saavuteta tehokkuuden paranemista vastaavaa kulutuksen laskua. Tätä niin kutsuttua rebound-vaikutusta on käsitelty kirjallisuudessa jonkin verran ja sen tutkiminen koko kansantalouden tasolla on haastavaa. Energiankulutuksen kasvun syiden selvittäminen ei ole helppoa, sillä ei voida tarkasti sanoa, mitkä tekijät vaikuttavat energiankulutukseen. Näin ollen mikrotason tutkimuksien avulla ei saada ilmiötä selittävää tietoa. Tämän vuoksi yleinen tasapainomalli soveltuu ehkä parhaiten rebound-vaikutuksen tutkimiseen, koska sen avulla voidaan huomioida talous kokonaisvaltaisesti. Syy siihen, miksi sitä ei ole käytetty laajemmin rebound-vaikutuksen tutkimisessa on mahdollisesti sen monimutkaisuus. Mallin ymmärtäminen vaatii aikaa ja siksi tutkijat ovat lähinnä pyrkineet selittämään ilmiöitä mikrotasolla, muutamien muuttujien kautta.

Rebound-vaikutuksen tarkastelussa ei mielestäni ole tärkeintä, minkä suuruiseksi vaikutus arvioidaan vaan tuoda esille ilmiön olemassa olo. Kuten edellä on havaittavissa, tutkimusten tulokset vaihtelevat alhaisesta rebound-vaikutuksesta aina backfire-ilmiöön asti. Tutkimusmenetelmällä on suuri merkitys rebound-vaikutuksen suuruudelle. Yleisen tasapainomallien tarkastelussa rebound-vaikutuksen suuruus muodostui huomattavan korkeaksi ja eräissä tapauksissa se saavutti myös backfire-ilmiön. Substituutiojouston suuruus näyttäisi olevan yksi merkittävä tekijä rebound-vaikutuksen suuruuteen. Herkkyysanalyyseissa havaittiin, että mitä suurempi substituutiojousto on, sitä korkeammaksi myös rebound-vaikutus muodostuu.

Yleisen tasapainomallien tarkasteluissa on huomioitava tuotantorakenteen muodostuminen ja siinä esiintyvien tuotantofunktioiden muoto. Energia on perusteltua sijoittaa sekä panoksien että välituotteiden puolelle. On kuitenkin muistettava, että jos energia sijoitetaan välituotteiden puolelle, on oleellista huomioida funktiomuoto välituotteiden ja panoksien välillä. Jos mallilla halutaan saada luotettavia tuloksia, tulisi tuotantofunktion tällöin olla Leontief-muotoa. Leontief-tuotantofunktio kuitenkin rajoittaa substituutiota välituotteiden ja panosten välillä. Tämä on hyvä pitää mielessä tuloksia tarkastellessa ja niistä johtopäätöksiä tehtäessä. Tuotantofunktio muilla tasoilla on kuitenkin perusteltua pitää CES-muotoisena, jolloin substituutiomahdollisuudet eri välituotteiden tai panoksien välillä ovat joustavammat.

Yleisen tasapainomallien tutkimuksissa substituutiojoustoja ei erikseen lasketa vaan usein käytetään kansainvälisistä malleista (kuten GTAP) saatuja substituutiojoustoja. Van der Werf käytti tutkimuksessaan OECD:n aineistoa Suomelle ja hänen laskelmiensa mukaan substituutiojousto Suomelle on huomattavasti korkeampi kuin esimerkiksi Norjalla tai Ruotsilla. Tähän vaikuttaa mahdollisesti Suomen kansantalouden rakenne, jossa teollisuudella on vankka sija. Näin ollen Suomen osalta voi olla mahdollista, että rebound-vaikutus muodostuisi korkeammaksi kuin muille maille jo tehdyissä tutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu eri maiden toimialakohtaisia substituutiojoustoja. Varteenotettava tulevaisuuden tutkimuksen aihe olisi substituutiojoustojen estimointi pääoma-työvoima-energia -viitekehyksessä. Myös energiatehokkuuden rebound-vaikutuksen tutkiminen yleisen tasapainomallin avulla Suomelle olisi kiinnostava tutkimuksen aihe. Tällöin voitaisiin saada arvokasta tietoa energiatehokkuuden toimivuudesta poliittisena työkaluna.

LÄHTEET

Allan, G.J., Gilmartin, M., McGregor, P.G., Swales, J.K. & Turner, K.R. 2008. Economics of energy efficiency. Teoksessa Evans, J. & Hunt, L. C. (toim.) International handbook of Energy Economics. Cheltenham, UK: Edward Elgar.

Allan, G., Hanley, N., McGregor, P., Swales, K. & Turner, K. 2009. The impact of increased efficiency in the industrial use of energy: A computable general equilibrium analysis for the United Kingdom. Energy Economics 29, 779–798.

Arrow, K. J., Chenery, H. B., Minhas, B. S. & Solow, R. M. Capital-labor substitution and economic efficiency. The Review of economics and statistics 43, 225–250.

Ayres, R., Turton, H. & Casten T. 2007. Energy efficiency sustainability and economic growth. Energy 32, 634–648.

Bentzen, J. 2004. Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption. Energy Economics 26, 123–134.

Berkhout, P., Muskens, J. & Velthuijsen, J. 2000. Defining the rebound effect. Energy Policy 28, 425–432.

Blackorby, C. & Russell, R. 1981. The Morishima Elasticity of Substitution: Symmetry, Constancy, and its Relationship to the Hicks and Allen Elasticities. The Review of Economic Studies 48, 147–158.

Blackorby, C. & Russell, R. R. 1989. Will the real elasticity of substitution please stand up (a comparison of the Allen/ Uzawa and Morishima Elasticities). American Economic Review 79, 882–888.

Broadstock, D. C., Hunt, L. & Sorrell, S. 2007. UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect. Technical Report 3: Elasticity of substitution studies. UK Energy Research Centre.

Burniaux, J. M. & Truong, P T. 2002. GTAP-*E* : An Energy-Environmental Version of the GTAP Model. GTAP Technical Paper No.16

Energia-alan toimialavuoropuhelutyöryhmä. 2007. Tehokkaasti energiaa kohtuullisin kustannuksin Helsinki: MP-keskus.

European Comission. 2008. EU action against climate change: Leading global action to 2020 and beyond. Luxenbourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Eurostat 2009a. Energy dependency. Viitattu 22.3.2010.
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 25.6.2009.

Eurostat 2009b. Final energy consumption. Viitattu 25.3.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 30.4.2009

Eurostat 2009c. Greenhouse gas emissions intensity of energy consumption. Viitattu 23.3.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 4.6.2009

Eurostat 2009d. Energy intensity of the economy. Viitattu 28.03.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 25.6.2009

Eurostat. 2010a. National Accounts by 6 branches. Viitattu 30.3.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 29.3.2010

Eurostat 2010b. Total population. Viitattu 26.3.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 22.3.2010

Eurostat 2010c. GDP per capita in PPS. Viitattu 27.4.2010
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
Päivitetty 9.4.2010

Finergy. 1998/ 1999. Energia ja ympäristö. 2. korjattu painos. Helsinki: Energia-alan Keskusliitto ry Finergy. Saatavilla:
http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/liitteet%20ilmasto%20ymp%c3%a4rist%c3%b6%20energiatehokkuus/energiajaymparisto.pdf?SectionUri=%2ffi%2fjulkaisut

Forsström, J. & Honkatukia, J. 2001. EV-malli: taloudellis-tekninen tasapainomalli Suomelle. ETLA.

Greening, L. & Greene, D. 1997. Energy use, efficiency, and the rebound effect: a review of the literature. Washington DC: US Dept of Energy, Office of Policy Analysis and International Affairs.

Greening, L. A., Greene, D. L. & Difiglio, C. 2000. Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey. Energy Policy 28, 389–401

Hanley, N., McGregor, P., Swales, K. & Turner, K. 2009. Do increases in energy efficiency improve environmental quality and sustainability? Ecological economics 68. 692–709.

Heikkilä, I., Huumo, M., Siitonen, S., Seitsalo, P. & Hyytiä, H. 2008. Suomen ympäristö 51/2008. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Teollisuuden energiatehokkuus. SYKE.
Tulostettu 7.12.2009
http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=96740&lan=fi

Herring, H. 2006. Energy efficiency — a critical view. Energy 30, 10–20.

Hogan, W. & Manne, A. 1997. Energy-economy interactions: the fable of the elephant and the rabbit? Energy and the Economy. EMF Report 1 of the Energy Modelling Forum. Saatavilla:
http://emf.stanford.edu/publications/emf_1_energy_and_the_economy/

Honkatukia, J. Parkkinen, P. & Perrels, A. 2005. Pitkän aikavälin talousskenaariot. VATT-Keskustelualoitteita 363.

House of Lords. 2005. Energy efficiency, science and technology committee. 2nd report of session 2005-06, Volume 1 report. The Stationary Office, London. 2005.

International Energy Agency (IEA). 2008. Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. Key Insights from IEA Indicators Analysis. Pariisi: International Energy Agency (IEA). Saatavilla:
http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2026

Kemfert, C. 1998 Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany. Energy Economics 20, 249–264.

Lund, P. D. 2007a. Effectiveness of policy measure in transforming the energy system. Energy Policy 35. 627–639.

Lund, P. D. 2007b. The link between political decision-making and energy options: Assessing future role of renewable energy and energy efficiency in Finland. Energy 32. 2271–2281.

Odyssee. Evaluation of Energy Efficiency in the EU-15.
Tulostettu 10.12.2009
http://www.odyssee-indicators.org/publications/chapters.php

Pekkarinen, M. 2010. Ydinvoima ja periaatepäätöshakemukset. Hallituksen iltakoulu 21.4.2010. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). Saatavilla:
http://www.tem.fi/?89519_m=98850&s=2471
Päivitetty 21.4.2010

Roy, J. 2000. The rebound effect: some empirical evidence from India. Energy Policy 28, 433–438.

Rudin, A. 1999. How improved efficiency harms the environment.
Tulostettu 22.02.2010
http://home.earthlink.net/~andrewrudin/index2.html

Saunders, H. D. 1992. The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. Energy Journal 13, 131–148.

Saunders, H. D. 2000a. A view form macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brookes. Energy Policy 28, 439–449.

Saunders, H. D. 2000b. Does predicted rebound depend on distinguishing between energy and energy services? Energy Policy 28, 497–500.

Saunders, H. D. 2007. Fuel conserving (and using) production functions. Energy Economics 30, 2184–2235.

Sektoritutkimuksen neuvottelukunta. 2008. Energiatehokkuus ja parhaat käytännöt: Tietopohjan ja tarpeiden kartoitus.

Siikavirta, H. 2005. Pitkän aikavälin ilmastopolitiikka:
Sopimusarkkitehtuurivaihtoehtojen tarkastelu.
Tulostettu 28.4.2010
http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=965&lan=fi

Sorrell, S. & Dimitropoulus, J. 2008. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. Ecological Economics 65, 636–649.

Schipper, L. & Grubb, M. 2000. On the rebound? Feedback between intensities and energy uses in IEA countries. Energy Policy 28, 367–388.

Tarjanne, R. & Kivistö, A. 2006. Arvio Suomen energiatalouden nykytilanteesta ja siihen johtaneesta energiapolitiikasta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energia- ja ympäristötekniikan osasto, tutkimusraportti B-166.

Tilastokeskus. 2009. Energiatilasto. Energia CD. Helsinki: Tilastokeskus.

Tilastokeskus. 2008b. Teollisuustilastoa. Viitattu 30.3.2010 http://www.tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk_teollisuus.html#teollisuustilastoa Päivitetty 11.3.2010

Tilastokeskus. Teollisuus. Viitattu 30.3.2010 http://www.tilastokeskus.fi/meta/kas/teollisuus.html

Tuckenburg, W. C. 2007. Suggestions for an energy research agenda. Copernicus Institute –Utrecht University. Esitelmä, EC, Bryssel, 24.5.2007.

Turner, K. 2008. A Computable general equilibrium analysis of the relative price sensitivity required to induce rebound effect in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy. Strasthclyde Discussion Papers in Economics 08-07, 1–54.

Turner, K. 2009. Negative rebound and disinvestment effects in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy. Energy Economics 31, 648–666.

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2008. Energiatehokkuustoimikunnan väliraportti. Saatavilla: http://www.tem.fi/files/21300/ETT_valiraportti_281108.pdf

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2009. Energiatehokkuustoimikunnan mietintöjä: Ehdotus energiansäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Saatavilla: http://www.tem.fi/files/23350/TEM_ETT_Mietinto_8_6_2009.pdf

Ukkola, Tuulikki. Vastapuheenvuoro. Täysistunto 96/2009.

Valtakoski, A. 2006. Tuotannontekijöiden välinen substituutiojousto, kansainvälinen kauppa ja talouskasvu. Helsingin yliopisto. Valtiotieteellinen tiedekunta. Pro gradu – tutkielma.

Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: kohti vähäpäästöistä Suomea. 2009. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja. Helsinki: Yliopistopaino. Saatavilla: http://www.vnk.fi/julkaisut/listaus/julkaisu/fi.jsp?oid=273273

Varian, H. R. 2003. Intermediate Microeconomics A Modern Approach. (6th ed.). New York: Norton.

Vehviläinen, I., Halonen, M., Hiltunen, J., Kjellman, J., Kumpulainen, A., Pursula, T. & Vanhanen, J. 2009. Energiatehokkuus kansainvälisesti. Sitran raportteja 83. Helsinki: Edita Prima Oy. Saatavilla: http://www.sitra.fi/julkaisut/raportti83.pdf?download=Lataa+pdf

VTT Energia. 1999. Energia Suomessa. Helsinki: Edita.

VTT. 2009. Energy Visions 2050 lyhennelmä. Helsinki: Edita. Saatavilla: http://www.vtt.fi/research/technology/energysystems/energy_book_series.jsp

van Wees, M.T., Uyterlinde, M.A & Maly, M. Energy efficiency and renewable policy in the Czech Republic within the framework of accession to the European Union. Energy 27, 1057–1067.

Van der Weft. 2008. Production functions for climate policy modelling: An empirical analysis. Energy Economics 30, 2964–2979.

LIITTEET

Liite 1: UKENVI mallin toimialarakenne

1	Maatalous, metsätalous ja kaltus
2	Metallien louhinta sisältäen öljyn ja maakaasun louhinta
3	Elintarviketeollisuus
4	Tekstiiliteollisuus
5	Paperi ja massa sekä paperi ja pahvi tuotteiden valmistus
6	Graafinen teollisuus
7	Peruskemianteollisuus
8	Kemiallisten tuotteiden valmistus
9	Muu metalliteollisuus
10	Muu koneiden valmistus
11	Sähkölaitteiden valmistus
12	Muu valmistus
13	Vesihuolto
14	Rakennus
15	Jakelu ja liikenne
16	Viestintä, rahoitus ja business
17	Tutkimus ja kehittäminen
18	Julkinen hallinto ja koulutus
19	Terveys- ja sosiaalipalvelut
20	Muu palvelutoiminta
	ENERGIA
21	Hiili
22	Öljy
23	Kaasu
	SÄHKÖ
24	Uusiutuva
25	Uusiutumaton

Liite 2: AMOSENVI mallin toimialarakenne

1	Maatalous
2	Metsätalous ja puunkorjuu
3	Kalastus
4	Vesiviljely
5	Muu kaivostoiminta ja louhinta
6	Öljyn ja kaasun valmistus
7	Elintarvikkeiden, juomien ja tupakkatuotteiden valmistus
8	Tekstiilien ja vaatteiden valmistus
9	Peruskemianteollisuus
10	Metalli ja ei-metallisten tuotteiden valmistus
11	Kuljetus ja muiden koneiden sekä sähkölaitteiden valmistus
12	Muu valmistus
13	Vesihuolto
14	Rakennus
15	Jakelu
16	Liikenne
17	Kommunikaatio, rahoitus ja business
18	Tutkimus ja kehittäminen
19	Koulutus
20	Terveys- ja sosiaalipalvelut
	ENERGIA
21	Hiili
22	Öljy
23	Kaasu
	SÄHKÖ
24	Uusiutuva
25	Uusiutumaton