

# Irti kivihiilestä

## Kustannus-hyötyanalyysi uusiutuvien energialähteiden lisäämisestä Helsingissä

---

Aino Kuitunen

Helsingin yliopisto

Taloustieteen laitos

Ympäristöekonomia

Pro gradu

Syyskuu 2013

Tiedekunta/Osasto Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos Taloustieteen laitos	
Tekijä Aino Irene Kuitunen			
Työn nimi Irti kivihielestä - Kustannus-hyötyanalyysi uusiutuvien energialähteiden lisäämisestä Helsingissä			
Oppiaine Ympäristöekonomia			
Työn laji Pro gradu -tutkielma	Aika Syyskuu 2013	Sivumäärä 66	
Tiivistelmä  <p>Helsingissä energianhankinta nojaa pitkälti fossiilisiin polttoaineisiin, ja suuria päästöjä aiheuttavalla kivihiehellä tuotetaan edelleen noin kolmasosa energiasta. Ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi tulisi kivihieksen käytöstä luopua ja uusiutuvien energialähteiden käyttöä lisätä.</p> <p>Tässä työssä pohditaan keinoja korvata Helsingin kivihiehituotanto vuoteen 2030 mennessä energian säästöllä ja hajautetulla uusiutuvan energian käytöllä. Tutkielma tehtiin toimeksiantona WWF Suomelle ja se on osa järjestön Näytä voimasi -kaupunkienergiakampanjaa.</p> <p>Aluksi selvitetään paikalliset olosuhteet, jonka perusteella muodostetaan kivihieksen korvaava Maalämpöskenaario. Skenaarion ensimmäisenä askeleena etsitään tapoja vähentää energian kulutusta nykyisessä rakennuskannassa energiatehokkuuden parannuksien avulla. Seuraavaksi esitetään uusiutuvista energialähteistä muodostuva Helsingin paikallisiin olosuhteisiin sopiva energiapaletti, joka pyrkii vastaamaan kysyntään sekä vuosi- että kuukausitasolla. Maalämpöskenaariossa pääosa energiasta tuotetaan maalämmöllä, minkä lisäksi hyödynnetään tuulivoimaa, aurinkoenergiaa sekä biomassaa. Maalämpöskenaarion kannattavuutta arvioidaan kustannus-hyötyanalyysin avulla, jossa projektin nettonykyarvot on arvioitu eri aikahorisonteilla.</p> <p>Kustannus-hyötyanalyysin tuloksina nettonykyarvot lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä jäävät negatiivisiksi. Aikahorisontin merkitys on suuri, sillä nettonykyarvot vaihtelivat noin -3 miljardista noin -200 miljoonaan. Herkkyysanalyysissä testattiin päästöoikeuden, kivihieksen ja biomassan hintojen sekä korkotason merkitystä tuloksiin. Huomattavimpia olivat vaikutukset pitkällä aikavälillä. Työssä ei otettu huomioon markkinattomia arvoja.</p>			
Avainsanat Uusiutuva energia, Hajautettu energiantuotanto, Kustannus-hyötyanalyysi			
Säilytyspaikka Viikin tiedekirjasto, Viikinkaari 11 A, 00014 Helsingin Yliopisto			
Muuta tietoa			

Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Department Department of Economics and Management	
Author Aino Irene Kuitunen			
Title Rid of Coal – A Cost-Benefit Analysis of Increasing the Use of Renewable Energy in Helsinki			
Subject Environmental Economics			
Level	Month and year	Number of pages	
Master's Thesis	September 2013	66	
Abstract			
<p>The City of Helsinki relies strongly on the use of fossil fuels as its main energy source. Coal power with high level of emissions covers one third of the city's energy production. To mitigate the effects of climate change, the city should stop using coal and replace it with the use of renewable energy.</p> <p>The goal of this thesis is to find a way for Helsinki to replace coal by 2030 with energy efficiency improvements and distributed renewable energy. Thesis was an assignment from WWF Finland and it is a part of urban energy campaign called Seize your Power.</p> <p>First of all, the local circumstances have to be understood. This gives a basis to Geothermal Scenario that is formed to replace coal. First step of the Scenario is to reduce the demand of coal power by energy efficiency improvements in buildings. Next, a set of locally functional renewable energy sources is formed based on decreased demand. Main energy source of the Scenario is geothermal energy but also biomass, solar and wind power are utilized. The Geothermal Scenario is then evaluated with cost-benefit analysis.</p> <p>Results of Cost-Benefit Analysis show that the net present value (NPV) is negative in short, medium, and long term. The values vary between -200 million and circa -3 billion euros. In the sensitivity analysis, the effects of the changes in prices of emission permit, coal, and bio-SNG as well as discount rate were estimated. The length of time horizon had a huge impact on the results. Non-market values were not included in the analysis.</p>			
Keywords			
Renewable energy, Distributed Generation, Cost-Benefit Analysis			
Where deposited			
Viikin tiedekirjasto, Viikinkaari 11 A, 00014 Helsingin Yliopisto			
Additional information			

## Sisällys

Käsitteet ja lyhenteet.....	4
1. Johdanto: Kaupungit energiakysymysten ratkaisijoina .....	5
1.1. Tutkielman rakenne ja rajaukset.....	7
1.2. Kiitokset.....	10
2. WWF:n energiavisio .....	11
3. Helsingin energianhankinnan erityispiirteitä .....	15
3.1. Energian tuotanto Helsingissä.....	15
3.1.1. Kivihiilituotanto.....	16
3.2. Energian kysyntä Helsingissä .....	18
3.3. Kysyntään vaikuttavia tekijöitä .....	19
3.3.1. Vuodenaikojen vaihtelun merkitys .....	21
4. Maalämpöskenaario: Helsingin kivihiilituotannon korvaaminen .....	22
4.1. Kulutuksen vähentäminen vanhassa rakennuskannassa .....	22
4.2. Korvattava energiamäärä ja -kapasiteetti.....	25
4.3. Uusiutuvan energian lisääminen .....	26
4.3.1. Uusiutuvan energian paletti .....	30
5. Kustannus-hyötyanalyysi .....	33
5.1. Taustaoletukset.....	34
5.1.1. Hyötyjen ja kustannusten määrittäminen .....	34
5.1.2. Elinkaarien merkitys .....	36
5.1.3. Muuttujat .....	37
5.2. Tulokset.....	39
5.3. Herkkyysanalyysi .....	40
5.3.1. Diskonttokorko.....	41
5.3.2. Päästöoikeuden hinta .....	42
5.3.3. Kivihiilen hinta.....	43
5.3.4. Bio-SNG:n hinta.....	43
6. Johtopäätökset .....	45
7. Lähteet.....	48
Liitteet .....	55

## Käsitteet ja lyhenteet

<b>absorptio</b>	kappaleen vastaanottama säteilyenergia
<b>BAT</b>	Best available technique, paras olemassa oleva tekniikka
<b>BAU</b>	Business as usual, perusura
<b>bio-SNG</b>	bio synthetic natural gas, biomassasta valmistettu keinotekoinen maakaasu
<b>energiamuoto</b>	energia loppukäytössä (sähkö, lämpö tai polttoaine)
<b>energian kantaja</b>	aine tai ilmiö, johon on sitoutunut energiaa
<b>FBC</b>	fluidized bed combustion, kerrosleijupoltto
<b>huipunkäyttöaika</b>	Wh/W eli tuntimäärä, jolla tuulivoimala tuottaa täysteholla vuodessa
<b>kaukolämpö</b>	keskitetysti ja usein yhteistuotannolla tuotetun lämmön jakaminen kuuman veden avulla
<b>kWp</b>	aurinkopaneelin nimellisteho
<b>nimellisteho</b>	aurinkopaneelin tai tuulivoimalan maksimiteho ihanneolosuhteissa
<b>NPV</b>	Net present value, hyötyjen ja kustannusten nykyarvo
<b>TER</b>	The Energy Report, Ecofys'n WWF:lle laatima energiaraportti
<b>W</b>	watti, tehon yksikkö
<b>Wh</b>	wattitunti, tuotetun energian määrä
<b>WWF</b>	World Wide Fund for Nature, Maailman Luonnon Säätiö
<b>yhteistuotanto</b>	sähkön ja lämmön yhteistuotanto samassa laitoksessa

## 1. Johdanto: Kaupungit energiakysymysten ratkaisijoina

Ilmastonmuutos, energiantuotannon riittävyys ja kaupungistuminen ovat tällä hetkellä ihmiskunnan suurimpia ongelmia. Kysymykset eivät ole erillisiä, sillä energiantuotanto on ilmastonmuutoksen kannalta merkittävimpiä toimialoja ja kaupungit kuluttavat noin puolet maailman energiasta. Kaupungit ovat lisäksi kaupan, kohtaamisten ja innovaatioiden paikkoja, minkä takia ne ovat avaintekijöitä näiden haasteiden voittamisessa. (UN-HABITAT 2011; IEA 2012).

Tähän asti energian kysynnän kasvaessa tarvetta on paikattu pääosin fossiilisten polttoaineiden käyttöä lisäämällä (IEA 2012). Fossiiliset polttoaineet tarjoavat lyhyellä aikavälillä helpon ratkaisun energian kysyntään, mutta pitkällä aikavälillä niiden käyttö on monella tapaa kestämatöntä. Fossiiliset polttoaineet ovat suuria päästölähteitä, ja pahimmasta päästä on kivihiilen poltto (Tilastokeskus 2013a). Tasainen saatavuus, varastoitavuus ja halpa hinta pitävät sen kuitenkin vahvasti mukana energiantuotannossa (Energieollisuus 2012a). Kasvihuonepäästöjen aiheuttama ilmastonmuutos tuo mukanaan arvaamattomia vaikutuksia maailmanlaajuisesti (IPCC 2007). Myös polttoaineiden hankintaan liittyy riskejä – yhteiskunnan perustan luominen ehtyvien luonnonvarojen varaan tarkoittaa, että vaihtoehtoja on ennen pitkää alettava miettiä.

Nykytilaa kestävämpi vaihtoehto olisi uusiutuvien energialähteiden käytön huomattava lisääminen, mikä on mahdollista myös kaupungeissa. Laajamittainen uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiantuotanto kaupungeissa vastaisi kasvavaan kysyntään ja vähentäisi kaupunkien päästöjä (Lund 2012). Samalla luotaisiin uudenlaista energiaomavaraisuutta, kun riippuvuus fossiilisista polttoaineista vähenee.

Nykytekniikka ei tarjoa yksinkertaista ratkaisua monikäyttöisen kivihiilen korvaamiseksi uusiutuvalla energialla. Uusiutuvien energialähteiden lisääminen tarkoittaa investointeja lukuisiin eri energialähteisiin eli niin sanottuun hajautettuun energiantuotantoon. Hajautettu energiantuotanto on käytännössä vastakohta nykyisenslaiselle keskitetylle järjestelmälle: energia tuotetaan pienimuotoisesti paikallisilla energialähteillä, ja energian kuluttajat saattavat myös ajoittain tuottaa energiaa (Airaksinen ym. 2013). Koska hajautettu energiantuotanto eroaa nykytilasta

paljon, on selvää, että järjestelmän rakentaminen vaatii suuria investointeja ja poliittista tahtoa. Kyselyn mukaan Suomessa tahtoa riittäisi: Energiateollisuuden (2012a) kuluttajatutkimuksen mukaan uusiutuvilla luonnonvaroilla tuotetun energian määrää haluttaisiin selvästi lisätä. Etenkin aurinko- ja tuulivoiman haluttavuus korostui kyselyssä, kun 91 prosenttia vastaajista oli valmiita lisäämään aurinkoenergian ja 87 prosenttia tuulivoiman tarjontaa. Myös biopolttoaineiden käytön lisäämistä kannatti valtaosa (74 prosenttia) mutta kivihiilen käytön puolestaan tyrmäsi selvä enemmistö (70 prosenttia). (Energiateollisuus2012a).

Helsinki on Suomen suurin sähkön ja kaukolämmön kuluttaja, ja valtaosa tästä energiasta tuotetaan edelleen fossiilisilla polttoaineilla ja noin kolmasosa hiilivoimalla (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012). Helsingin kaupunki tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2050 mennessä ja on jo sitoutunut luopumaan hiilivoimasta. (Helsingin kaupunki 2012b). Kaupunki on lisäksi sitoutunut lisäämään uusiutuvan energian käyttöä 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä mutta tavoitteiden toteutuminen on vielä melko kaukana: tällä hetkellä uusiutuvan energian osuus Helsingissä on vain noin viisi prosenttia kokonaishankinnasta (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012).

Kaupungin energian hankinnasta vastaa sen omistuksessa oleva Helsingin Energia. Yhtiön toiminnassa kaupungin tavoitteet näkyvät muun muassa bioenergiakokeiluina ja tuulivoimapuistojen suunnitteluna (Helsingin Energia 2010). Käytännössä Helsingin Energia on kuitenkin korvannut hiilivoimaa maakaasulla, jonka päästöt ovat kyllä hiilen päästöjä matalammat, mutta silti suhteellisen korkeat verrattuna uusiutuviin energianlähteisiin (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012; Tilastokeskus 2013a). Maakaasu voi toimia keskipitkän aikavälin ratkaisuna päästöjen vähennykseen mutta lopulta senkin käytöstä tulisi luopua. Koska nyt tehtävien maakaasuinvestointien elinkaaret ovat pitkät, kannattaisi mieluummin panostaa uusiutuviin energialähteisiin.

Hiilineutraalius ei synny pelkästään tuotannon päässä vaan on ajateltava, missä energiaa kuluu. Helsingissä suurin osa energiasta kuluu lämpönä rakennuksissa, joten rakennuskannan energiankäytön tehostamisella voidaan saada suuriakin säästöjä aikaiseksi. Uusia rakennuksia koskevat jo tiukat energiatehokkuusmääräykset, joten parhaiten lisäsäästöjä syntyy vanhan

rakennuskannan energiatehokkuuden parantamisen yhteydessä. (Helsingin kaupunki 2011).

### **1.1. Tutkielman rakenne ja rajaukset**

Tämän pro gradu -tutkielman tavoite on pohtia keinoja, jolla Helsingin kaupunki pääsisi hajautetulla energiantuotannolla kokonaan irti kivihiilen käytöstä vuoteen 2030 mennessä. Tarkoitus on tutkia, millainen uusiutuviin energialähteisiin perustuva järjestelmä voisi fyysisesti olla, ja mitkä olisivat tällaiseen järjestelmään siirtymisen kustannukset yhteiskunnallisen kustannus-hyötyanalyysin keinoin. Tutkielmassa keskitytään pelkästään kivihiilen korvaamiseen, sillä sen käytöstä luopumisesta on jo tehty päätös mutta riittäviin toimiin ei ole vielä ryhdytty.

Tutkielma on tehty toimeksiantona WWF Suomelle, jonka käyttöön laadittiin samansisältöinen raportti osaksi järjestön Näytä voimasi -kaupunkienergiakampanjaa (ks. Kuitunen ym. 2013). Peruslinjanvedot tulevat konsulttiyhtiö Ecofys:n WWF:lle laatimasta globaalista energiaraportista *The Energy Report* (Deng, Cornelissen & Klaus 2011), jonka tuloksia ja tavoitteita pyritään tuomaan paikallistasolle Helsingissä. Ecofys'n raporttia mukaillen keinoina ehdotetaan energian säästöä jo olemassa olevassa rakennuskannassa sekä uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämistä kaupungin energian hankinnassa. Tutkielmaa varten on laadittu kivihiilen korvaava maalämpöskenaario, jonka toteutettavuutta on arvioitu kustannus-hyötyanalyysin avulla. Pro gradun sisältö eroaa hieman Kaupunkienergiaraportista, jossa kustannus-hyötyanalyysissa tarkasteltiin vain ajanjaksoa 2010 – 2030, kun tässä tutkielmassa on otettu huomioon kustannukset ja hyödyt kaikkien tekniikoiden elinkaarien ajalta. Lisäksi tämän tutkielman herkkyysoanalyysi on monipuolisempi.

WWF:n raportissa (Deng ym. 2011, 107) esitetyn paradigman mukaisesti ensin on selvitettävä mahdollisuudet energian kysynnän vähentämiseksi. Seuraava askel on rakentaa paikallisista energialähteistä pienennetyn kysynnän tyydyttävä paletti. Tätä varten täytyy selvittää, mitkä paikalliset energialähteet tarjoavat perusvoiman (jatkuvasti tuotettava energia), ja mitkä puolestaan toimivat säätövoimana (edellisen tuotannon tai kulutuksen heilahteluita tasaava energia). Jotta uusiutuviin energialähteisiin pohjaava järjestelmä olisi mahdollinen, on tärkeää entistä enemmän



tasapainottaa kysyntää ja tarjontaa. Vuodenaikojen vaihtelu tulee ottaa huomioon, sillä se vaikuttaa etenkin lämmön kysyntään huomattavasti.

Hajautettu energiantuotanto tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että kivihiihtä ei korvata yhdellä projektilla vaan lukuisilla eri tekniikoilla. Tämän takia kustannus-hyötyanalyysin aineistovaatimukset ovat melko suuret ja optimaalisimman kokonaisuuden määrittäminen olisi hyvin monimutkaista. Ensin täytyy ymmärtää paikallisia olosuhteita, kysynnän ja tarjonnan rakennetta, sekä eri tekniikoiden hyödyntämispotentiaaleja. Näiden tietojen perusteella voidaan muodostaa toimiva energiapaletti, ja vasta tämän jälkeen voidaan selvittää investointien, ylläpidon ja panoskäytön vaatimat kustannukset. Aineistoa ei aina ole saatavilla tai on jouduttava tyytymään epämääräisiin lukuihin, minkä takia tutkielman ote on melko karkea. Päällimmäisenä tarkoituksena onkin antaa viitteitä siitä, millä tavoin kivihiihtuotanto olisi mahdollista korvata, ja herättää keskustelua paikallisten energialähteiden hyödyntämisen mahdollisuuksista.

Ymmärrettävästi tutkielman aikana on tullut vastaan useita rajausongelmia. Lähtöpisteeksi eli vertailuvuodeksi on valittu vuosi 2010, joka on hyvin lähellä nykyhetkeä mutta siitä on saatavissa kattavasti aineistoa. Vuosi oli etenkin eteläisimmässä Suomessa normaalia kylmempi (Ilmatieteen laitos 2012). Kylmyyden takia lämmön ja siten myös kivihiihtien kysyntä olivat vertailuvuonna keskivertoa korkeammat, mikä sopii hyvin tutkielmani tavoitteisiin, sillä vaihtoehtoisilla tuotantomuodoilla pitää pystyä korvaamaan suurikin kysyntä huippukulutuksen aikana.

Maantieteellinen rajaus Helsinkiin on looginen ainakin lämmön suhteen, sillä käytännössä kaikki lämpö tuotetaan pääkaupungissa paikallisesti (Helsingin Energia 2011). Sähkön kohdalla asia on monimutkaisempi, sillä energian hankinta ja myynti eivät välttämättä ole yhteydessä fyysiseen energiankulutukseen kaupungin rajojen sisällä. Yksityiset sähkösopimukset, pohjoismaisen sähköpörssi Nord Poolin kautta tapahtuva kauppa sekä kaupungin laajeneminen monimutkaistavat energiataseen määrittämistä. Yksinkertaisuuden vuoksi kaupungin energian hankinta pyritään hahmottamaan mahdollisimman pitkälle suljettuna kokonaisuutena, vaikka tosiasiallisesti sähköä virtaa kaupunkiin ja ajoittain myös ulos.

Puhun tutkielmassani vuorotellen energiamuodoista, energialähteistä ja energian kantajista (engl. energy carrier). Jälkimmäinen termi on laajempi ja ottaa huomioon sen, että fysiikan lakien mukaan energian olemus ei muutu – pelkästään kantoaine (Falk, Herman & Schmidt 1982). Energian kantaja voi olla aine tai ilmiö. Esimerkiksi vety on energian kantaja mutta ei energialähde (Energiateollisuus 2013b). Öljystä tai kivihiilestä puhutaan usein primäärienergiälähteinä, eli energia on suoraan hyödynnettävissä. Energiamuodolla puolestaan tarkoitan tässä tutkielmassa sitä muotoa, missä energia on loppukäytössä.

Tutkielma koostuu kahdesta taustaluvusta, skenaarion esittelystä sekä kustannus-hyötyanalyysistä. Luvussa 2 kuvataan WWF:n maailmanlaajuisessa raportissa esitetty energiavisio. Esiin nostetaan tämän esitelmän kannalta tärkeimpiä oletuksia, tuloksia ja linjanvetoja. Luvussa 3 piirretään yleiskuva Helsingin energian kulutuksesta ja hankinnasta, sekä pyritään hahmottamaan energiankulutuksen kehitykseen vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 4 esitellään skenaariot, joilla Helsinki pääsisi irti kivihiilen käytöstä. Aluksi pohditaan mahdollisuuksia pienentää energiankulutusta säästämällä energiaa Helsingin vanhoissa rakennuksissa, jonka jälkeen esitellään Maalämpöskenaario. Luku 5 sisältää varsinaisen kustannus-hyötyanalyysin ja herkkyyshanalyysin. Luvussa 6 esitetään johtopäätökset ja samalla pohditaan tulosten merkitystä.

## 1.2. Kiitokset

Haluan kiittää tutkielmani toteutumisesta ja ohjauksesta WWF Suomen Hanna-Liisa Kangasta sekä professori Markku Ollikaista Helsingin yliopiston Taloustieteen laitokselta.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia asiantuntijoita, jotka ovat auttaneet tekniikoiden ja realiteettien ymmärtämisessä, tai tarjonneet apuaan aineiston keräämisessä. Suurkiitos siis seuraaville henkilöille: Jarmo Kallio (GTK), Jari Niemelä (Metso), Olli Göös (Lämpöykkönen), Alpo Tani (Helsingin Kaupungin Kaupunkisuunnitteluvirasto), Miimu Airaksinen (VTT), Athanasios Votsis (Ilmatieteen laitos), Jussi Hirvonen (Suomen Lämpöpumppuyhdistys ry) sekä Sanna Syri (Aalto-yliopisto).

Olen myös erittäin kiitollinen 3. kerroksen avokonttorin vertaisapuryhmälle ja Joel Jaakkolalle gradustressin sietämisestä.

## 2. WWF:n energiavisio

Pohja tutkielmalleni tulee WWF:n energiaraaportista (Deng, Cornelissen & Klaus 2011), jonka on laatinut konsulttiyhtiö Ecofys. The Energy Report (tästä lähtien TER) esittelee maailmanlaajuisen energiavision, jonka pyrkimys on päästä kokonaan irti fossiilisista polttoaineista vuoteen 2050 mennessä. Raportin mukaan tavoitevuoteen mennessä on mahdollista päästä jopa 95 prosentin uusiutuvien osuuteen. TER kuvaa fyysisen polun ja laskee tarvittavat investoinnit nykyhetkestä vuoteen 2050 sekä kysynnän että tarjonnan puolelta. Tässä luvussa esittelen tutkimuskysymykseni kannalta TER:n tärkeimmät oletukset.

TER:n lähtökohtana on *Trias Energetica* -paradigma (Deng ym. 2011, 107), jota pyrin myös omassa tutkielmassani seuraamaan. Sen mukaan yhteiskunnan energiahuolto tulisi muuttaa kestävämmäksi seuraavien kolmen askeleen avulla:

- 1) Energian kysynnän minimointi
- 2) Energiatarpeen tyydytys uusiutuvilla ja paikallisilla energialähteillä niin pitkälle kuin mahdollista
- 3) Jäljelle jääneen energian tuotanto perinteisillä energialähteillä

Aluksi täytyy siis pyrkiä minimoimaan tulevaisuuden energian kysyntä kaikin mahdollisin keinoin yhteiskunnan kaikilla osa-alueilla. Tämä tapahtuu toimintojen tarpeellisuuden arvioinnin ja energiankäytön tehokkuuden parantamisen avulla. Energiatarve tulisi tämän jälkeen ensisijaisesti tyydyttää uusiutuvilla ja mielellään paikallisilla energialähteillä. Vasta viime kädessä voidaan turvautua perinteisiin eli fossiilisiin polttoaineisiin niin, että niiden käyttö on mahdollisimman tehokasta. (Deng ym. 2011)

Raportissa vaadittu kestävyys voidaan tulkita eri kohdissa eri tavoin. Tärkeimpänä uusiutuvan energian käytön lisääminen vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä, ja siten myös kestäättömiä ilmastomuutosta kiihdyttäviä päästöjä. Toisaalta myös biomassan käytön sisäiset kestävyysvaatimukset ovat skenaariossa tiukat: hyödynnettävän kannan on oltava kestävällä tasolla, hyödynnys ei saa vähentää luonnon monimuotoisuutta eikä energiakäyttö saa heikentää ruoka- tai vesiturvaa tai inhimillistä kehitystä (Deng ym. 2011, 162). Myös fossiilisten polttoaineiden avulla

valmistettujen jätteiden hyödyntämistä on pyrittävä pitkällä aikavälillä välttämään. Tässä tutkielmassa ehdotan energiakäyttöön lähinnä hakkuujätteinä syntyvää haketta, jonka hyödyntäminen ei ole ristiriidassa raportin kriteereiden kanssa.

Deng ym. (2011, 115 - 116) painottavat energian tarpeen ymmärtämistä, jotta päästövähennykset tapahtuvat talouskasvua vaarantamatta. On hyväksyttävä, että yhteiskunta tarvitsee energiaa eri muodoissa eli sähkönä, lämpönä ja polttoaineena. Näitä kaikkia täytyy pystyä tuottamaan myös uusiutuviin energiamuotoihin pohjaavassa järjestelmässä mutta niiden määrät ja hyödynnyssuhteet saattavat poiketa nykytilanteesta.

Kyky tuottaa oikeanlaista energiaa oikeassa muodossa riippuu energian kantajasta. Sähköä voidaan tuottaa monin eri keinoin uusiutuvilla energialähteillä, joten monissa yhteiskunnan toiminnoissa olisi järkevä siirtyä sähkön käyttöön, mikä vähentäisi riippuvuutta polttoaineista. Täysin sähkövaltainen järjestelmä ei ole kuitenkaan järkevä, sillä jossain tilanteissa polttoaineiden ja lämmön korvaaminen sähköllä ei ole kovin tehokasta tai monissa prosesseissa edes mahdollista korkeiden lämpötilavaatimusten takia. (Deng ym. 2011)

TER:n uusiutuvan energian skenaariossa energianhankinnan perusosan muodostaa tarjontajohteinen tuotanto, jota tasaamaan käytetään kysyntäjohteisia energialähteitä (Deng ym. 2011, 147). Ensimmäinen on laitteiden asennuksen ja huollon jälkeen rajakustannuksiltaan ”ilmaista” energiaa, kuten esimerkiksi tuuli- tai aurinkovoimaa, joka voidaan hyödyntää ilman jatkuvaa panossyöttöä. Jälkimmäinen puolestaan tasaa kysyntäpiikkejä tai perustuotannon vajaatuotantoa, ja sen käyttöä voidaan mukauttaa tarpeen mukaan. Tällaista olisi esimerkiksi biomassan käyttö lämmöntuotannossa. Kysyntäjohteinen energia jakaantuu käsitteellisesti säästövoimaksi ja varavoimaksi: Suomessa ensimmäinen hankitaan yleensä pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta tasaamaan lyhytaikaisia tuotannonvaihteluja, kun taas jälkimmäisen on tarkoitus pystyä korvaamaan suurimman voimalan tuottama energia esimerkiksi kriisin sattuessa (Holttinen 2008).

Energian säästön kannalta tärkeää olisi tasapainottaa nykyistä paremmin kysyntää ja tarjontaa (Deng at al. 2011, 147). Nykyinen energiajärjestelmä perustuu pitkälti keskitettyihin ratkaisuihin: pitkäikäisillä ja pääomaintensiivisillä tuotantotavoilla, kuten ydin- tai hiilivoimaloilla, on pyritty turvaamaan energian tasainen tarjonta

silloinkin, kun kysyntä on pienempää. Dynaamisemman sähköverkon tulisi yhdistää useita tuottajia ja tuotantotapoja. Puhutaan niin kutsutuista älyverkoista (engl. smart grids), jotka käyttävät hyväkseen informaatio- ja kommunikaatioteknologioita mahdollistamaan vuoropuhelun kuluttajien ja tuottajien välillä (Sarvaranta 2010). Tällaisessa järjestelmässä pientuottajat voivat välillä toimia energian netto-ostajina ja toisena hetkenä myyjinä. TER:ssa investoinnit älyverkkoihin tuottavat vähiten suoria voittoja, mutta ne ovat välttämättömiä, koska ne lopulta mahdollistavat hajautetun tuotannon (Deng at al. 2011, 209-210). Mittavilla infrastruktuurin muutoksilla on purettava pullonkauloja, lisättävä siirtokapasiteettia, parannettava kysyntäpuolen toimivuutta ja mahdollistettava energian varastointi ennen kuin laajamittaista pientuotantoa voidaan harjoittaa. Tässä työssä verkkojen kustannuksia ei ole otettu mukaan laskelmiin, sillä niiden ajatellaan joka tapauksessa olevan osa tulevaisuuden infrastruktuuria.

TER:ssa laskettiin myös, mitä siirtyminen uusiutuvan energian järjestelmään tulisi maksamaan globaalisti, ja eroteltiin kohteet, joihin rahaa kuluisi ja joista syntyisi hyötyjä. Vuosittaisia pääomamenoja tarvitaan kattamaan muutokset teollisuudessa, liikenteessä, energiantuotannossa, sähköverkossa, rakennuksissa, tutkimus- ja kehitystyössä sekä uusiutuvien lämmön ja polttoaineiden käyttöönotossa. Voittoja tai säästöjä saavutetaan, kun siirrytään uudenlaisiin toimintatapoihin ja energiantuotantomuotoihin. Esimerkiksi rakennuksissa investoinnit energiaparannuksiin vähentävät fossiilisten polttoaineiden kulutusta ja tämä kustannussäästö on voittoa. Kaikkien toimien nettovaikutus muuttuu raportin mukaan positiiviseksi vuonna 2040, jonka jälkeen säästöt ylittävät kustannukset. (Deng at al. 2011, 196-197)

Raportin mukaan kokonaisvaltainen muutos uusiutuviin energianlähteisiin pohjaavaan järjestelmän hoituisi investoinneilla, jotka vastaavat 1-2 prosenttia globaalista bruttokansantuotteesta. Bruttokansantuotteen oletetaan mallissa kasvavan tasaisesti. Pääajureita uuden järjestelmän saavuttamiseksi ovat yhteiskunnan sähköistäminen, liikenteen uusiutuvat polttoaineet sekä uusien teknologioiden nopea käyttöönotto. (Deng at al. 2011, 229)

TER jakaa maailman karkeasti kymmeneen piiriin. On selvää, että paikalliset olosuhteet vaihtelevat huomattavasti, joten skenaario ei anna suoraan teknisiä

vastauksia alueellisesti. Se kuitenkin tarjoaa hyvät lähtökohdat maailmanlaajuisen energiajärjestelmän muutokseen. WWF on tuottanut myös paikallistasoille omia raportteja. Näitä ovat muun muassa Euroopan tasolla *Renewable energy: a 2030 Scenario for the EU* (Heller, Deng & van Breevoort 2012) sekä Ruotsille IVL:n (Svenska Miljöinstitut) yhdessä WWF:n kanssa laatima *Energy Scenario for Sweden 2050* (Gustavsson, Särholm, Stigson & Zetterberg, 2011). Ruotsin raportista on mahdollista vetää suoraan myös Suomea koskevia johtopäätöksiä, mutta myös erot esimerkiksi vesivoiman käytössä on pidettävä mielessä.

### 3. Helsingin energianhankinnan erityispiirteitä

Tässä luvussa tarkastellaan Helsingin nykyistä energian kysyntää ja tarjontaa. Samalla pyritään löytämään kysynnän kehitykselle suunta. Tarkoituksena on selvittää, kuinka iso osa Helsingin kuluttamasta energiasta tuotetaan paikallisesti kivihieillä, ja mikä on sen suhde muuhun energian hankintaan ja kulutukseen. Nykyisen hiilivoimatuotannon korvaamiseksi on ymmärrettävä kysynnän ja tarjonnan rakenne, jotta voidaan löytää sopiva uusiutuviin pohjaava tuotantopaletti, jolla kysyntä voidaan tulevaisuudessakin tyydyttää. Tärkeää on erottaa toisistaan sähkön ja lämmön tuotanto. Tutkielmassa keskitytään vain fyysiseen lämpöön ja sähköön eli esimerkiksi liikenteen polttoaineisiin tai sähkösopimuksiin ei kiinnitetä huomiota.

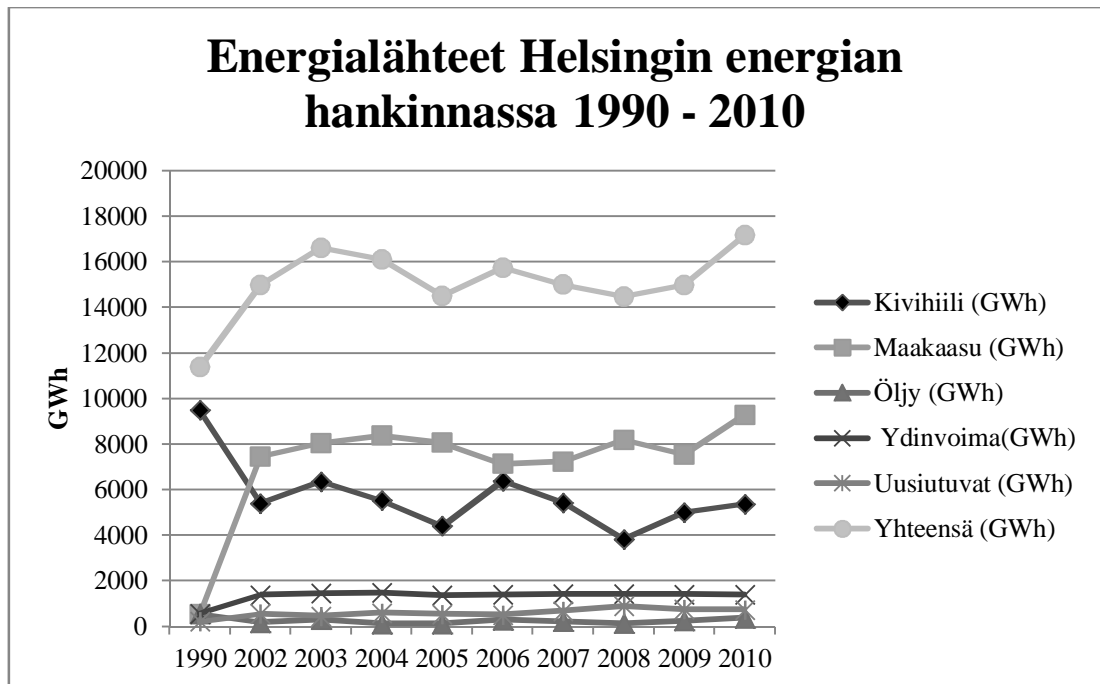
#### 3.1. Energian tuotanto Helsingissä

Helsingissä käytettävän energian hankkii ja siirtää Helsingin Energia tytäryhtiöineen. Suurin osa hankitusta energiasta eli 73 prosenttia sähköstä ja käytännössä kaikki kaukolämpö tuotettiin kaupungissa sijaitsevilla laitoksilla. (Helsingin Energia 2011). Valtaosa eli noin 98 prosenttia sähköstä ja 85 prosenttia lämmöstä tuotettiin yhteistuotannolla (CHP, Combined Heat and Power). Yhteistuotannossa syntyy sekä sähköä että kaukolämpöä, jolloin polttoaineen sisältämä energia voidaan hyödyntää melkein kokonaan.

Helsingin energian hankinta perustuu pitkälti fossiilisiin polttoaineisiin. Kuvassa 1 pystyakselilla on vuosittainen energian hankinta gigawattitunteina (GWh) ja vaakakselilla vuodet 1990 ja 2002 – 2010. Kivihieiden käyttöä kuvaa tummansininen käyrä, uusiutuvia vaaleansininen ja maakaasua viinipunainen. Kuvasta näkee, kuinka eri polttoaineiden käyttö on kehittynyt Helsingin energianhankinnassa: maakaasun käyttö on lisääntynyt 1990-luvun nollasta käytetyimmäksi energianlähteeksi ja se on syrjäyttänyt kivihieiltä tuotannossa. Osittain tähän on vaikuttanut päästökauppa, joka on nostanut kivihieiden kustannuksia ja parantanut siten maakaasun kilpailukykyä (Energiateollisuus 2012a). Kivihieillä tuotetaan silti vielä toiseksi eniten energiaa eli noin kolmasosa. Sähkön tuonti ja voimalaitososuudet tuovat helsinkiläisten energianlähteiksi myös ydinvoiman ja uusiutuvan energian, joka muodostuu



pääosaksi vesivoimasta. (Helsingin Energia 2011.) Tarkempia energian hankintaan liittyviä lukuja on esitetty Liitteessä 1.



**Kuva 1: Helsingin energian hankinnassa käytetyt polttoaineet (lähde: Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012)**

Uusiutuvien energialähteiden osuus hankinnasta oli vuonna 2010 vain noin 5 prosenttia, kun tavoitteena on nostaa niiden osuus 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (Helsingin kaupunki 2012b). Helsingissä hyödynnetään tällä hetkellä pieni määrä maalämpöä ja vesivoimaa tuotetaan pienimuotoisesti Vanhankaupungin museovesivoimalla (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012). Paikallisesti tuotettua bioenergiaa hyödynnetään kasvavassa määrin: Helsingissä tuotetuista jätteistä tuotetaan Espoon Ämmäsuolla biokaasua ja HSY:n Viikin jätevedenpuhdistamo on 60 prosenttisesti energiaomavarainen tuottamansa kaasun ansiosta (HSY 2013). Uusilla asuinalueilla lähienergia, kuten aurinko- tai geoenergian hyödyntämismahdollisuus, otetaan jo suunnitteluvaiheessa huomioon osana matalaenergiarakentamista (Östersundom-klinikka 2013).

### 3.1.1. Kivihiilituotanto

Kivihiilen osuus energian nettotuotannosta oli noin 30 prosenttia mutta kaukolämmön tuotanto nojasi kivihiileen jopa 40 prosentin osuudella (Helsingin Energia 2011). Taulukossa 1 on esitetty kivihiilen tuotantoon liittyviä lukuja.

Käyttökohde	GWh	Lähde
<b>Kivihiiltä nettotuotannossa</b>	5280	Energiateollisuus 2011
<b>Kaukolämmön tuotanto kivihiilellä</b>	3140	Johdettu lähteestä Helsingin Energia (2011) (40% kaukolämmöstä kivihiilellä)
<b>Sähkön tuotanto kivihiilellä</b>	1651	Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012

*Taulukko 1: Kivihiili Helsingin energiantuotannossa*

Kivihiili tuodaan Helsinkiin pääosin Venäjältä ja Puolasta (Helsingin Energia 2013, 3). Sillä tuotetaan energiaa kahdessa yhteistuotantolaitoksessa: Hanasaassa ja Salmisaassa. Voimaloiden tehot on esitelty Taulukossa 2. Yhteensä voimaloissa syntyy sähköä noin kolmasosa ja loput lämpöä. Tehokkaampi Salmisaaren voimala koostuu kahdesta hiilivoimayksiköstä sekä yhdestä varavoimalana toimivasta raskaan polttoöljyn yksiköstä (Helsingin Energia 2012a). Vanhempi A-voimala tuottaa pelkästään lämpöä ja 1980-luvulla rakennettu B-voimala yhteistuotannolla sähköä ja lämpöä. Hanasaaren A-voimala purettiin muutama vuosi sitten, ja jäljelle jääneen B-voimalan sulkemisesta on myös tehty periaatepäätös (Helsingin kaupunki, Kaupunginhallitus 2012).

	sähköteho	lämpöteho
<b>Hanasaari B</b>	220	445
<b>Salmisaari B</b>	170	300
<b>Salmisaari A</b>	-	180
<b>yhteensä</b>	390	925

*Taulukko 2: Helsingin kivihiilivoimaloiden tehot (MW) (Lähde: Helsingin Energia 2012a ja 2012b)*

Kivihiilivoimaloiden päästöt eivät ole suoraan julkista tietoa, joten ne on laskettava kivihiilen ominaispäästöjen avulla. Vuoden 2013 kivihiilen päästökertoimella (1 TJ kivihiiltä = 93,3 tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä) vuoden 2010 päästöt olisivat olleet noin 1 800 tuhatta tonnia (Tilastokeskus 2013a). Tämä vastaa hieman alle 50 prosenttia kaupungin energiatuotannon päästöistä (3733 tuhatta tonnia, Helsingin ympäristötilasto 2013) vaikka energian hankinnassa kivihiilen osuus on alle kolmasosa.

Helsingin Energialla on suunnitelmia kivihiilen käytön vähentämiseksi (Helsingin Energia 2013). Yksi vaihtoehto on korvata Hanasaaren B-voimala kokonaan

Vuosaareen suunnitteilla olevalla monipolttolaitoksella, joka käyttäisi 20 – 100 prosenttia kivihiiltä, ja loput biopolttoainetta (Helsingin Energia 2013, 13). Vaihtoehtona tälle on aloittaa puupellettien seospolttu nykyisissä laitoksissa. Helsingin Energian mukaan pellettien osuus voi nykytekniikalla olla maksimissaan 10 % mutta tekniikan kehittyessä osuus saattaa kasvaa 40 %:iin. Puupellettien poltto saattaa siis syrjäyttää hiiltä mutta ei voi nykyisissä voimaloissa korvata sitä kokonaan.

### 3.2. Energian kysyntä Helsingissä

Helsinki on suurin sähkön ja kaukolämmön kuluttaja Suomessa (Energiateollisuus ry 2012c). Helsingin energiatilaston mukaan vuonna 2010 kokonaisenergiankulutus oli noin 15 000 GWh ja ilman liikenteen kulutusta noin 12 000 GWh (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012). Suurin osa eli noin 70 prosenttia kaikesta energiasta kuluu lämpönä rakennuksissa (Helsingin kaupunki 2012a). Osaltaan tätä selittää se, että kaupungissa ei ole pahemmin raskasta teollisuutta.

	GWh	Lähde
Energian kulutus yhteensä	12 337	Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012
<b>Sähkö</b>		
sähkön kulutus	4 700	Energiateollisuus ry 2012c
sähkön kulutus per asukas	7 802 (kWh)	Helsingin kaupunki 2012a
<b>Lämpö</b>		
kaukolämmön kulutus	7 360	Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012
sähkölämmitys	354	”
öljylämmitys	431	”

*Taulukko 3: Sähkön ja lämmön kulutus Helsingissä*

Taulukossa 3 on esitetty kulutukseen liittyviä lukuja. Sähkön kulutusluvut vaihtelivat hieman lähteestä riippuen. Taulukosta nähdään, että kaupungissa lämmön kysyntä on huomattavasti suurempaa kuin sähkön. Lämpö tuotetaan pääosin keskitetysti: suurin osa eli noin 90 % rakennuskannasta kuuluu kaukolämpöverkkoon ja osuus kasvaa vuosittain (HSY 2012). Öljyllä tai sähköllä lämpiävien talojen osuus on hyvin pieni. Kaukolämmön keskimääräinen ominaiskulutus oli 41,3 kilowattituntia (kWh) kaukolämpöverkkoon kuuluvaa kuutiometriä kohti (Helsingin kaupungin

ympäristökeskus 2012). Ominaiskulutus vaihtelee paljon asunnon rakennusvuodesta riippuen.

### **3.3. Kysyntään vaikuttavia tekijöitä**

Koska tässä tutkielmassa pyritään rakentamaan pitkälle tulevaisuuteen ulottuva skenaario, on tärkeä ymmärtää, millaisista palasista kysyntä rakentuu. Energian kysyntään vaikuttavat monet eri tekijät pitkällä ja lyhyellä aikavälillä, eikä näiden tekijöiden huomioonottaminen ole aina ihan yksinkertaista.

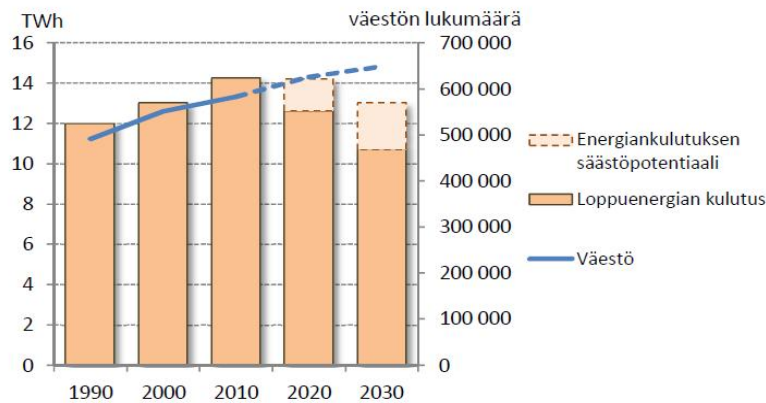
Peruskysyntään vaikuttavat muun muassa väestön koko ja asumisväljyys sekä rakennusten ekotehokkuus. Kompleksisuutta lisäävät epävarmat tekijät kuten sää, talouden tila sekä kuluttajien käyttäytyminen, jotka voivat tuoda hyvinkin suurta vaihtelua kulutukseen. Sähkön kulutus riippuu ekotehokkuuden lisäksi muun muassa käytössä olevien sähkölaitteiden määrästä, mitkä puolestaan riippuvat muun muassa talouskasvusta, kulutustrendeistä ja yritysten käytännöistä. (Helsingin kaupunki 2011, 18).

Lämmitettävien neliöiden määrällä on suora vaikutus lämmöntarpeeseen. Tämä puolestaan riippuu sekä asumisväljyydestä että kaupungin väkiluvusta. Helsingissä keskimääräinen asunnon koko vuonna 2010 oli 64 neliömetriä, kun koko Suomessa vastaava luku on noin 80 (Tiihonen 2011). Väestön kasvaessa kuitenkin myös neliöiden määrä kasvaa. Helsingissä luonnollinen väestönkasvu on tasaista, mutta erityispiirteenä on kaupunkiin suuntautuva muuttoliike, jonka määrä vaihtelee runsaasti (Helsingin kaupungin tietokeskus 2012). Väestöennusteiden arviot heittelevät sadoilla tuhansilla vuoteen 2050 asti ulottuvissa skenaarioissa mutta kaikissa odotetaan kasvun jatkuvan. Enimmillään kaupunkiin saattaa muuttaa jopa 300 000 uutta asukasta. Rakennuskanta siis väistämättä kasvaa, mikä lisää energian kulutusta.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset voivat siirtää kysyntäkäyriä pysyvästi. Ilmatieteen laitoksen ennusteiden mukaan lämpötilat tulevat nousemaan, mikä vähentää lämmön kulutusta kylminä kausina, kun taas kesäisin viilennyksen tarve lisääntyy (Jylhä ym. 2011). Vuoteen 2030 mennessä tämä tarkoittaisi pientaloissa keskimäärin 10 prosenttia pienempää lämmitystarvetta talvisin ja 17 – 19 prosenttia suurempaa jäähdystystarvetta kesällä. Toimistotaloille vastaavat ennusteet ovat 13 prosenttia

vähemmän talvella ja saman verran enemmän kesällä verrattuna vertailuvuoteen. Kaiken kaikkiaan kokonaisenergiankulutus vähenisi 4-7 prosenttia ilmastonmuutoksen myötä. (Jylhä ym. 2011.)

Helsingin parhaat energiatehokkuuskäytännöt -työryhmän loppuraportissa (Helsingin kaupunki 2011) on arvioitu kaupungin energiankulutuksen kehitystä. Selvitys arvioi sähkön kulutuksen kasvavan etenkin palveluiden sähköistymisen ja talouskasvun kautta. Kotitalouksien sähkön kulutuksen arvioiminen kuitenkin on hyvin epävarmaa (Helsingin kaupunki 2011, 19). Kehitysarvio vuoteen 2030 näkyy Kuvassa 2, jossa pystyasteikolla on energian kulutus terawattitunneissa ja väestön lukumäärä.



**Kuva 2 Helsingin väestön ja loppuenergiankulutuksen kehitys vuoteen 2010 asti sekä vaihtoehtoiset energiankehityspotit vuoteen 2030 asti. (Lähde: Helsingin kaupunki 2011)**

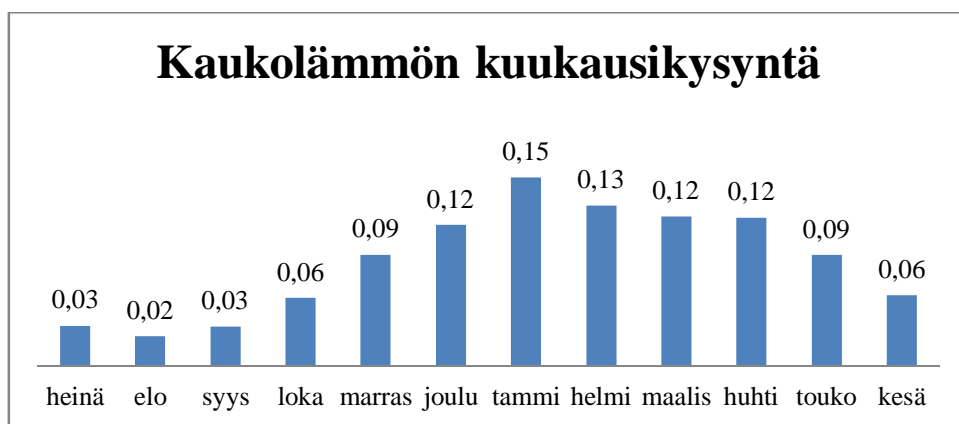
Kuvasta 2 nähdään, kuinka ilman lisätoimia kokonaisenergiankulutuksen ennustetaan pysyvän nykytasolla vuoteen 2020 asti huolimatta kaupungin väkiluvun kasvusta, minkä jälkeen kulutus alkaa laskea viimeistään 2030. Lasku syntyy rakentamisen ekotehokkuusnormien kiristymisestä, laitteiden energiatehokkuuden parannuksista sekä ajoneuvojen kehityksestä. Raportissa painotetaan, että lisätoimilla kaupungin on mahdollista saada aikaan huomattavasti suurempi vähennys. (Helsingin kaupunki 2011.)

Tämän työn puitteissa ei ole mahdollista huomioida kaikkia kysyntään liittyviä tekijöitä ja epävarmuuksia, mutta ne on hyvä pitää mielessä. Väestönkasvun, ilmastonmuutoksen ja asumistiheyden muutosten ei oleteta tässä työssä vaikuttavan kysyntään. Sen sijaan työssä arvioidaan energiatehokkuusparannusten vaikutusta, joka sovitetaan suhteellisen säännöllisten vuodenaikojen vaihteluluun.

### 3.3.1. Vuodenaikojen vaihtelun merkitys

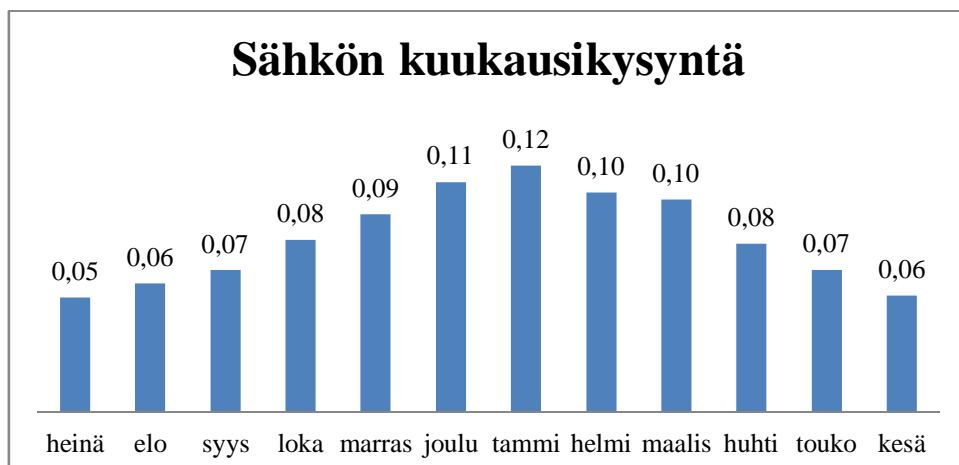
Sähkön ja lämmön kysyntä vaihtelevat hyvin paljon vuodenaikojen vaihtelun mukaan. Koska uusiutuvien energianlähteiden käyttö on usein sääriippuvaista, on hyvin merkittävää ymmärtää, milloin energiaa tarvitaan. Tämän vuoksi kysynnälle oli muodostettava kuukausirakenne (ks. Liite 2).

Lämmöntuotannon rakenne on esitetty Kuvassa 3. Palkit osoittavat sen, kuinka suuri on kunkin kuun osuus koko vuoden kysynnästä. Lämmön kysynnän huippukausi asettuu välille marras-huhtikuu, jolloin kuluu noin 70 prosenttia vuoden lämmönkulutuksesta, ja kesäkaudella touko – lokakuussa 30 prosenttia.



**Kuva 3** Kaukolämmön kysyntä Suomessa kuukausittain osuuksina vuoden kulutuksesta. (Muokattu lähteestä Energiateollisuus ry 2012d)

Sähkön kulutus ei vaihtele yhtä jyrkästi vaan talvikaudella kuluu noin 60 ja kesällä 40 prosenttia sähköstä (Kuva 4).



**Kuva 4** Sääkorjattu sähkönkulutus Suomessa osuuksina vuoden kulutuksesta. (Muokattu lähteestä Energiateollisuus ry 2012e)

## **4. Maalämpöskenaario: Helsingin kivihiilituotannon korvaaminen**

Tässä luvussa kuvataan fyysiset toimet, joilla Helsingin kivihiilituotanto voidaan korvata. Toimenpiteiden priorisoinnissa mukaillaan TER:n paradigmaa, jonka mukaan aluksi pyritään pienentämään energian kysyntää ja tämän jälkeen korvataan jäljelle jäänyt kysyntä uusiutuvilla energialähteillä. Koko kivihiilituotanto pyritään korvaamaan uusiutuvilla energialähteillä, joten fossiiliset polttoaineet, turve ja ydinvoima ovat tarkastelun ulkopuolella. Vuonna 2030 kivihiili on korvattu kokonaan.

### **4.1. Kulutuksen vähentäminen vanhassa rakennuskannassa**

Helsingissä uudisrakennusten energiatehokkuuden kehitys on ollut nopeaa tiukentuneiden normien takia: esimerkiksi vuonna 2010 rakennettu talo kuluttaa 13 prosenttia vähemmän kaukolämpöä kuin vuonna 2009 rakennettu (Helsingin kaupunki 2012a, 31). Helsingin rakennuskanta on kuitenkin keskimäärin melko vanhaa eivätkä rakennusnormit vielä koske rakennusten korjausrakentamista. Normeja kiristämällä nykyisen rakennuskannan energiankulutusta voitaisiin pienentää huomattavasti ja saavuttaa samalla tehokkaita lisäsäästöjä (Helsingin kaupunki 2011, 4-5). Erityisen suuri säästöpotentiaali olisi 1960- ja 70-luvuilla rakennetuissa lähiökerrostaloissa, joista suurin osa on energiatehokkuudeltaan joko huonoja tai erittäin huonoja. Koska tämän ikäkauden rakennuksia on erityisen paljon ja ne ovat malliltaan samanlaisia, voitaisiin korjausrakentamisessa saavuttaa skaalaetuja. (Helsingin kaupunki 2011).

Deng ym. (2011) arvioivat, että 2-3 prosentin vuositahtilla korjausrakentamisen yhteydessä tehdyillä ekotehokkuusparannuksilla ja uusiutuvan energian integroinnilla rakennuksiin voitaisiin rakennuskanta muuttaa kokonaan hiilineutraaliksi vuoteen 2050 mennessä (Deng ym. 2011, 129). Erityisesti lämmönkulutusta olisi mahdollista leikata reippaasti nykyisestä muun muassa parantamalla kattojen, seinien ja pohjakerrosten eristystä sekä kehittyneemmällä ikkunoilla ja ilmanvaihtojärjestelmien muutoksilla (Deng ym. 2011, 129). Helsingissä suurin osa energiaa kuluu nimenomaan lämpönä rakennuksissa, ja tätä

kulutusta on mahdollista pienentää jopa 50 prosenttia (Lahti, Nieminen ja Virtanen 2008).

Suomen korjausrakentamistahti on tällä hetkellä 1-1,5 prosenttia vuodessa (Airaksinen ym. 2013, 10). Tahti tulisi siis kaksinkertaistaa ja kaikissa korjauksissa olisi tehtävä myös energiatehokkuustoimenpiteitä, jotta päästäisiin TER:ssa esitettyihin lukuihin. Airaksisen ja Vainion (2012, 16) mukaan TER:n mukainen energiakorjausrakentamisen tahdin nopeuttaminen vähentäisi nykyisen kannan energiankulutusta 29 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Perusuralla, jossa tahti on hitaampi ja energiaparannuksia on oletettu tehtävän vain puolissa korjauksista, kysyntä tulisi vähenemään 22 prosenttia.

Tilastokeskuksen (2012) mukaan Helsingin nykyisen rakennuskannan kerrosala on 45 439 380 neliometriä. Vuonna 2010 asunnon keskikoko oli Helsingissä 64 neliometriä ja rakennuksen 1130 neliometriä (laskettu jakamalla kerrosala rakennusten määrällä) (Tiihonen 2011, Tilastokeskus 2012). Rakennuskannan on tässä oletettu yksinkertaistetusti pysyvän samansuuruisena ja korjausrakentamisen kohdistuvan vain jo olemassa olevaan kantaan. Uudisrakennusten oletetaan olevan niin kutsuttuja passiivitaloja eli niiden nettoenergiankulutus olisi nolla ja niiden energiantuotanto tullaan hoitamaan paikallisilla, järjestelmään integroiduilla uusilla systeemeillä. Lisäksi korjausrakentamisen syklit ovat noin 40 vuotta, joten uudisrakennukset eivät ehdi korjausikänsä tämän tutkielman aikajanaalla. Ruotsin ympäristöinstituutin (IVL) raportin mukaisesti oletan, että rakennusten poistuma puolestaan on niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon (Gustavsson ym. 2011).

Taulukosta 4 nähdään, mitä nopeutettu korjausrakentamisen tahti tarkoittaisi Helsingissä keskimääräisiä asunnon ja rakennuksen kokoja käyttäen.

	m <sup>2</sup>	asuntoja	rakennuksia
<b>nykytahti (1,25 %)</b>	567 992	8 875	503
<b>tavoite (2,5 %)</b>	1 135 985	17 750	1 006

*Taulukko 4: Korjausrakentamisen tahdin nostamisen vaikutukset (korjausrakennettua neliometriä / asuntoa / rakennusta vuodessa).*

Kun tarkasteltavana on nykyinen eli ennen vuotta 2012 rakennettu rakennuskanta ja korjausrakentamisen oletetaan kohdistuvan koko rakennuskantaan tasaisesti,

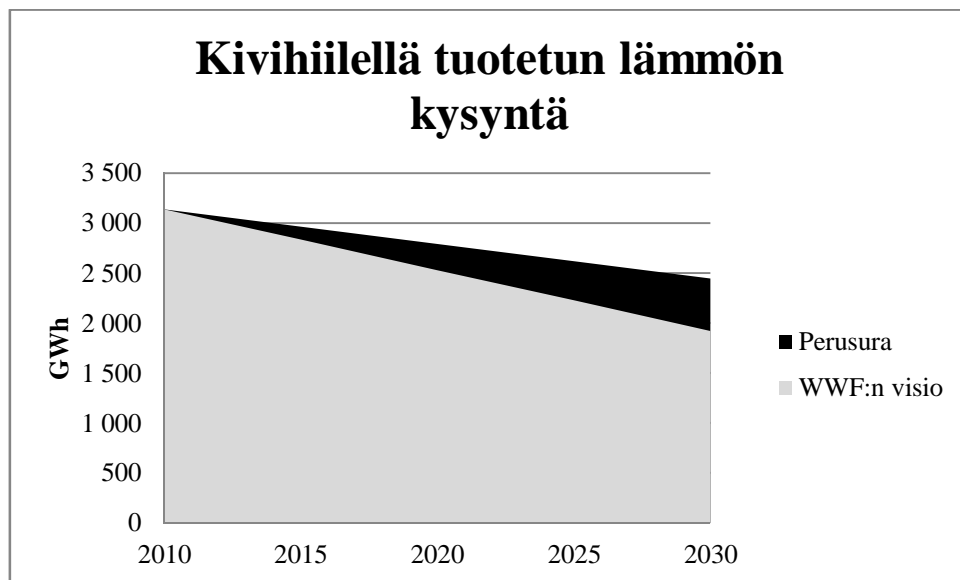


vuosittain korjausrakennettujen neliöiden määrä kaksinkertaistuu nykyisestä noin 600 000 neliömetristä yli miljoonaan neliömetriin vuodessa.

Vuonna 2010 Helsingin kivihiiivoimaloissa tuotettiin 3 140 GWh lämpöä, joka kaikki käytettiin Helsingissä (laskettu lähteestä Helsingin Energia 2011). Perusuralla ilman lisätoimenpiteitä lämmön kysyntä laskee Airaksisen ja Vainion (2012) mukaisesti 22 prosenttia eli noin 700 GWh vuodessa. Nopeutetulla tahdilla luku on 29 prosenttia. Jos lisätoimilla aikaansaatu vähennys allokoidaan kokonaan hiilen vähennyksiin, vähenee kivihiiellä tuotetun kaukolämmön kysyntä noin 1200 GWh eli 39 prosenttia nykyisestä tasosta.

Korjausrakentamisen oletetaan laskevan vain kaukolämmön kysyntää, sillä muiden lämmitysmuotojen osuus kaupungissa vähäistä. Uusiutuvalla energialla täytyy siis pystyä tuottamaan noin 1900 GWh lämpöä vuonna 2030. Sähkön kulutuksen ei oleteta toimenpiteillä laskevan.

Kuvasta 5 nähdään, kuinka paljon nykyään kivihiiellä tuotetun lämmön kysyntä tulisi vähenemään perusuralla ja miten suuri on muutos nopeutetulla korjausrakentamisella. Vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla kysytyn lämmön määrä.



**Kuva 5 Kivihiihilämmön kysyntä 2010 - 2030**

## 4.2. Korvattava energiamäärä ja -kapasiteetti

Korvattavan energian määrästä on tehtävä tiettyjä oletuksia, ennen kuin uusiutuvan energian paletti voidaan rakentaa. Tarkoitus on, että tarjonta mukailisi kysyntää nykyistä enemmän. Tässä tutkielmassa ongelmaa pohditaan välillä tarvetta tehojen ja välillä kysytyn energiamäärän näkökulmasta: lämmön määrä on mitoitettu tyydyttämään huippukysyntäkauden suurin kysyntä, kun taas sähkön tarve on mitoitettu kysytyn määrän mukaan, sillä sähkön tuonti sallitaan. Laskennallisesti vuoden sähköntuotannolla pyritään tyydyttämään kysyntä, jolloin tuontienergiaa ei hinnoitella kustannus-hyötyanalyysissä, vaikka sitä jouduttaisiinkin ajoittain käyttämään.

Lämpötehon tarve määräytyy huippukulutuksen mukaan. Oletuksena on, että nykyinen kivihiilikapasiteetti vastaa nykyistä huippukysyntää, jolloin kysynnän vähetessä, myös tehon tarve tippuu samaa vauhtia. Nykyisten kivihiilivoimaloiden yhteenlaskettu lämpöteho on noin 925 MW, jolloin kysynnän tippuessa uusi tarve on 560 MW. Kysynnän vähennys gigawattitunneissa on laskettu luvussa 4.1., ja sitä kautta on saatu tuotetun lämmön tarve vuodelle 2030. Tämän avulla voidaan mitoittaa biovoimaloiden käyttötunnit ja sitä kautta polttoainetarve.

Sähkön kysynnälle ei oleteta laskua. Sähkön kysynnän ja tarjonnan lukuja vertaamalla (ks. Luku 3) voidaan kuitenkin huomata, että vuositasolla Helsingissä tuotetaan nykyään noin 1000 GWh ja hankitaan noin 3000 GWh enemmän sähköä kuin kulutetaan. Kun kivihiilituotannosta luovutaan, ei uusiutuvan energian sähkökapasiteetilla tarvitse siis korvata poistuvaa kapasiteettia kokonaan. Tässä tutkielmassa nykyisestä sähkön kivihiilituotannosta (1650 GWh) on vähennetty tuotannon ja kulutuksen erotus, jolloin korvattavaa jää 650 gigawattituntia.

Sähkönkulutusta lisää lämpöpumppujen käyttö. Tämä määrä lisätään perustarpeeseen seuraavassa luvussa, sillä sen määrä riippuu uusiutuvan energian skenaariossa esitetystä maalämmön käytöstä. Peruskysynnän oletetaan jakaantuvan Taulukon 5 mukaisesti kesä- ja talvikaudelle sähkön ja lämmön tarpeeseen.

	Kesä	Talvi	Yhteensä
<b>Sähkö</b>	250	400	650
<b>Lämpö</b>	550	1370	1920

*Taulukko 5: Sähkön ja lämmön tarve GWh vuonna 2030.*

Koska kysyntä ja erityisesti aurinkoenergian tarjonta vaihtelevat vuodenaikojen mukaan, kysynnälle on muodostettu kuukausirakenne. Tämä auttaa muodostamaan energiapaletin, joka tyydyttää kysynnän kaikkina vuodenaikoina. Kysynnän jakautuma on esitetty alla olevassa Taulukossa 6. Jakauma on laskettu nykyisen kuukausituotannon (ks. 3.3.1.) perusteella energian kysynnän vähenemisen jälkeen.

Kuukausi	Lämpö	Sähkö
tammi	256	77
helmi	237	68
maalis	238	66
huhti	177	52
touko	115	44
kesä	64	36
heinä	45	36
elo	59	40
syys	101	44
loka	170	54
marras	215	61
joulu	247	71
Vuosisumma	1924	650

*Taulukko 6: Energian kuukausittainen kysyntä (GWh) vuonna 2030*

### **4.3. Uusiutuvan energian lisääminen**

Tässä osiossa tarkoituksena on esittää monipuolinen ja lukuisista eri energialähteistä koostuvaa energiapaletti korvaamaan kivihiili. Tehtävä ei ole aivan yksinkertainen, sillä mahdollisia vaihtoehtoja ja hyödynnyssuhteita on lukuisia, eikä kaikkia tuotantotapojen yhdistelmiä ei ole mahdollista tarkastella tämän työn puitteissa. Potentiaalien hahmottamiseen käytetyt menetelmät ja aineistot on esitelty tarkemmin Liitteessä 3.

Energiapaletin on vastattava lukuisiin vaatimuksiin. Ensisijaisesti WWF:n energiaraportin paradigma määrää eri energialähteiden ajorjestyksen (ks. s. 10), mutta se ei tarjoa suoraan lopullisia hyödynnyssuhteita. Näitä arvioitaessa on otettava huomioon kysynnän ja tarjonnan vaihtelut, jotta perusenergiatarve voidaan

tydyttää kaikkina vuodenaikoina. Eri energialähteiden tulee toimia järjestelmätasolla yhdessä ja toisiaan tukien, sillä kaikkia lähteitä ei voida hyödyntää kaikkina vuodenaikoina. Kaiken kaikkiaan ratkaisujen on oltava kokonaisvaltaisia ja paikallisesti käyttökelpoisia.

Monipuolisen paletin muodostamiseksi tarvitaan valtavasti teknistä taustatietoa. Todellisten uusiutuvan energian potentiaalien tutkiminen vaatisi tarkkoja paikallisia mittauksia ja käytettävät tekniikat vaihtelisivat huomattavasti enemmän kuin mitä tässä on oletettu. On kuitenkin muistettava, että kyse ei ole todellisesta projektista vaan WWF:n keskustelunavauksesta.

Helsingissä lämmön tarve dominoi energianhankinnassa. Talven huippukulutuksen tyydyttämiseksi on olemassa rajoitteiden takia kolme vaihtoehtoa: bioenergia, lämpöpumput tai sähkölämmitys. Jälkimmäinen on tehottomin, joten sitä ei tulla tässä tutkielmassa tarkastelemaan lainkaan. Bioenergian kestävyysvaatimusten ja korkeiden kuljetuskustannusten vuoksi sen määrä olisi hyvä pitää pienenä, mutta koska myös lämpöpumppujen kohdalla huippukulutuskauden sähkönkulutuksen lisääminen on ongelmallista, ei sekään ole ongelmaton ratkaisu.

TER:n (Deng ym. 2011) painotusten mukaan ensisijaisesti tulisi hyödyntää ehtymättömiä energianlähteitä. Helsingissä paikallisesti hyödynnettäviä energialähteitä ovat tuulivoima, aurinkolämpö ja -sähkö sekä lämpöpumput, jotka kaikki hyödyntävät alun perin auringosta peräisin olevaa energiaa. Työtaakan keventämiseksi tässä työssä on keskitytty lämpöpumpuista pelkästään maalämpöön, sillä se on laajalti käytetty tekniikka, jonka kustannukset ja hyödynnystavat ovat hyvin tiedossa.

Aurinko- tai tuulivoiman hyödyntäminen ei vaadi yksikköpanoksia, kun taas lämpöpumput tarvitsevat pumppaukseen sähkön ulkopuolisesta lähteestä. Tämä lisää sähkön tarvetta samalla kun kivihieillä tuotetun sähkön määrä hiipuu. Olosuhderiippuvaisten aurinko- ja tuulienergian kohdalla on tärkeä ottaa huomioon säätövoiman ja energian varastoinnin tarve, joka vaihtelee hyvin paljon vuodenaikojen mukaan tuotantotavasta riippuen (Holtinen 2008).

Tämän lisäksi energia tulisi mahdollisimman pitkälti paikallisilla energialähteillä. Kaikkien energialähteiden kohdalla paikallisuus ei ole välttämätöntä tai mahdollista.

Esimerkiksi merituulivoiman kohdalla ei ole järkevää pitäytyä pelkästään Helsingin merialueissa, jos tehokkaampi tuotantoalue löytyy pienen matkan päästä (Kilpinen 2002). Puupolttoaineet taas väistämättä tuodaan muualta Suomesta, sillä Helsingistä puuttuvat laajat metsätalousalueet. Sähkön tuonti sallitaan mutta jotta vähähiilinen tavoite toteutuu, on myös mahdollisen tuontisähkön oltava tuotettu uusiutuvalla energialla. Oletuksena on, että vihreän sähkön kysynnän lisääntyminen Helsingissä lisää sen tarjontaa muualla maassa.

Suomen ilmastostrategioissa metsäbiomassan asema energiantuotannossa korostuu. Myös Helsingin Energian strategioissa puubiomassoilla eri muodoissaan on tärkeä osa (Helsingin Energia 2013). TER:n paradigman vuoksi tässä hajautetun energian skenaariossa biomassalla pyritään tuottamaan vain välttämätön jäännöserä, joka jää edellä mainittujen ehtymättömien ja paikallisten lähteiden hyödyntämisen jälkeen tyydyttämättä. Jäännöserän optimaalisinta suuruutta ei ole yksinkertaista ratkaista mutta varmaa on, että biomassalla tuotettua lämpöä tullaan tarvitsemaan etenkin talvikuukausina, kun lämmön tarve on suurinta.

Energiapaletin muodostamisessa pyritään täyttämään seuraavat kriteerit:

- 1) Kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen
- 2) Paikallisten energialähteiden valjastaminen
- 3) Ehtymättömien energialähteiden hyödyntäminen
- 4) Biomassan hyödyntäminen kestävyyskriteereitä noudattaen
- 5) Kehittyneimmän tekniikan käyttäminen
- 6) Vihreän sähkön tuonti tarpeen mukaan

Maalämpöskenaariossa uusiutuvaa energiaa pyritään lisäämään mahdollisimman tasaisesti vuoteen 2030 asti niin, että kivihiihi on lopulta kokonaan syrjäytetty. Eri energialähteiden investoinnit ovat erisuuruisia. Pienimuotoisten tekniikoiden (kuten aurinkopaneelien tai maalämpöpumppujen) kohdalla voidaan olettaa, että lisäykset ovat tasaisia. Suurempien investointien (kuten bio- ja kaasuvoimalaitosten) oletetaan, että rakentaminen kestää yhden periodin eli viisi vuotta, jonka jälkeen laitos otetaan käyttöön. Jokaisen periodin alussa tarvittava energian määrä on voitava tuottaa edellisen kauden lopussa olemassa olevalla kapasiteetilla.

Taulukossa 7 on esitelty tässä työssä käytetyt uusiutuvan energian tekniikat.

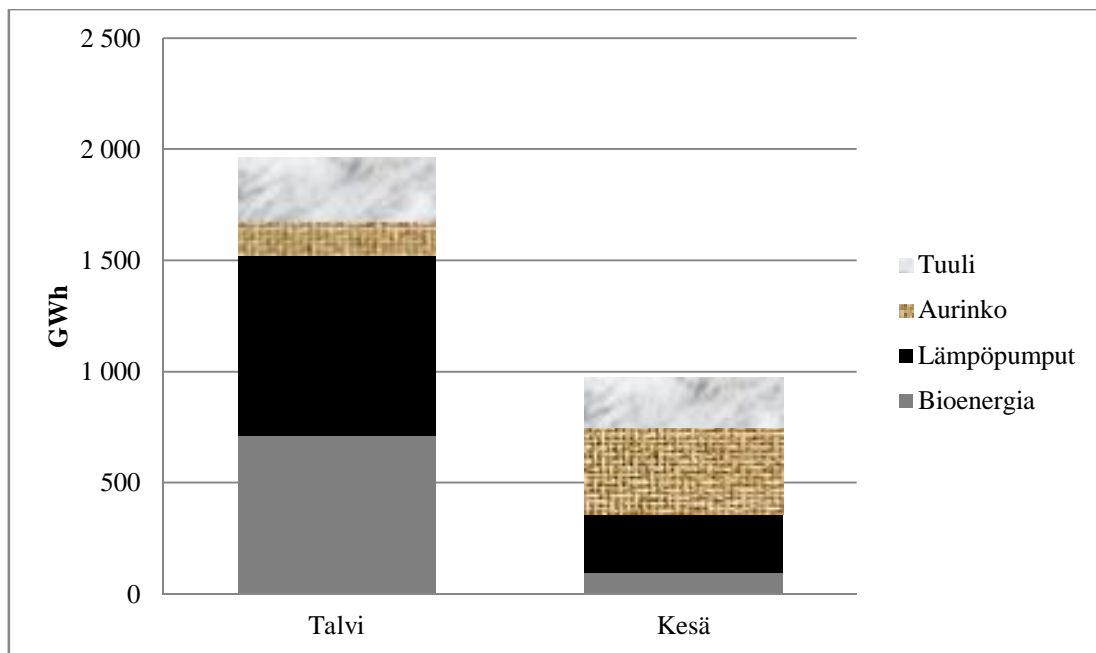
	<b>Aurinko</b>		<b>Tuuli</b>	<b>Biomassa</b>		<b>Lämpöpumput</b>
<b>Energialähde</b>	Auringon säteily		Tuulen liike-energia	Bio-SNG (synteettinen biomaakaasu)	Metsähake ja -tähde	Geolämpö kalliosta
<b>Potentiaali Helsingissä</b>	Keskimääräinen säteily 940 kWh/ m <sup>2</sup> /v. Kattopinta-alan kokonaispotentiaali 10 000 – 15 000 GWh / v		Hyvät (Suomenlahden rannikko- ja merialueet)	Ei merkittäviä paikallisia lähteitä: tuotava muualta maasta.		Vaikea määrittää
<b>Tekniikka</b>	Aurinko-paneeli	Aurinko-keräin	Tuuliturbiini	Kaasukombivoimala	Kerrosleijupoltto	Lämpöpumppu + lämpökaivo
<b>Tuotettava energiamuoto</b>	Sähkö	Lämpö	Sähkö	Sähkö + lämpö	Sähkö + lämpö	Lämpö
<b>Vaatimukset</b>	Riittävä säteilyn määrä ja lämpötila, ei varjostusta, oikea kallistuskulma		Riittävä tuulisuus	Metsähake kaasutetaan ja kuljetetaan putkella Helsinkiin hyödyntäen nykyistä maakaasuverkkoa.	Hakkeen saatavuus ja kuljetusmahdollisuus sekä riittävä tila säilytykseen	1/3 sähköä tuotettua lämpöyksikköä kohti. Kenttien mitoitus optimoitava tarkasti.
	Sähkön varastointikapasiteetin kasvu. Kulutuksen mukautuminen tuotantohuippuihin älyverkkojen avulla.					
<b>Rajoitukset</b>	Oletettu hyötysuhde 14 %	Oletettu hyötysuhde 47 %	Tuotannon vaihtelut suuria	Metsähakkeen saatavuus	Metsähakkeen saatavuus. Voitava polttaa useita erilaisia biopolttoaineita.	Rajoitteena etenkin kantakaupungissa kallioperän korkea rakennusaste
	Kaupungissa korkeiden talojen varjostus häiritsee hyödyntämistä					
<b>Milloin?</b>	Huipputuotanto keskikesällä. Pimeimpinä 3 kuukautena ei juurikaan tuotantoa		Ympäri vuoden, talvikuukaudet tuotteliaimpia	Talvikuukausina tarpeen mukaan	Kylmimpinä kuukausina tarpeen mukaan	Peruslämpö ympäri vuoden

Taulukko 7: Kooste uusiutuvan energian tekniikoiden potentiaaleista

### 4.3.1. Uusiutuvan energian paletti

Maalämpöskenaariossa valtaosa energiasta tuotetaan nimensä mukaisesti maalämmöllä. Maalämpöskenaario on pieniä korjauksia lukuun sama, mihin WWF:n kaupunkienergiaraportin laskelmat perustuivat (ks. Kuitunen ym. 2013). Maalämpöskenaarion rakentaminen lähti kysynnän selvittämisestä, minkä jälkeen pystyttiin etsimään eri vuodenajoille kysynnän tyydyttävä tarjonta.

Tämä energiapaletti on esitetty Kuvassa 6. Pystyasteikolla on tuotanto gigawattitunteina ja palkit osoittavat kunkin energialähteen osuutta energiantuotannossa niin, että kesän ja talven energialähteet ovat eroteltuina. Tällä tavalla korostuu se, mitä uusiutuvan energian lähteitä hyödynnetään eri vuodenaikoina. Osuudet on mitoitettu tyydyttämään Taulukossa 6 (ks.s. 30) lasketut kysynnät määrät.



Kuva 6 Maalämpöskenaario – Energian tarjonta eri vuodenaikoina vuonna 2030.

Kuvasta 6 nähdään, että maalämmön lisäksi etenkin talvella käytetään melko paljon biomassaa. Tämä on välttämätöntä lämmön tarpeen tyydyttämiseksi. Aurinkoenergiaa käytetään kesällä mahdollisimman paljon, ja biovoima toimii talven kysyntäpiikkien tasaajana. Tuulivoimalla tuotetaan kaikki jäljelle jäänyt sähköntarve.

Skenaariota varten otetaan käyttöön 4 000 maalämpöpumppua, joiden teho on 60 kW. Näitä varten on kaivettava yhteensä 4 800 kilometriä maalämpökaivoja, eli noin 24 000 kaivoa. Maalämmön käyttö lisää sähkön tarvetta. Bioenergiaa varten

rakennetaan yksi synteettistä maakaasua hyödyntävä kaasuvoimala sekä 6 pienempää metsähakkeella toimivaa voimalaitosta, jotka ovat kaikki yhteistuotantolaitoksia. Kaasuvoimalan etu on se, että sen käyttöä voidaan säädellä tarpeen mukaan pienelläkin aikavälillä. Hakevoimalat ovat hieman kömpelömpiä, mutta koska ne ovat pieniä ja niitä on monta, voidaan niidenkin käyttöä portaittain lisätä ja vähentää tarpeen mukaan. Tässä skenaariossa kaasu- ja hakevoimalat otetaan käyttöön vasta, kun se on täysin välttämätöntä. Suurimman kysynnän aikaan kaikki voimalat ovat käytössä.

Sähkö pyritään tuottamaan pääosin 70 tuulivoimalalla, joista suurin osa pystytetään merelle. On totta, että tuulisähkön tuotannon vaihtelevuus on käytännössä suurta (Holtinen 2008). Tuotanto on kuitenkin vuositasolla tasapainossa (eli tuotetaan yhtä paljon kuin kulutetaan), sillä tuotannon pohjan sattuessa sähköä voidaan tuoda muualta.

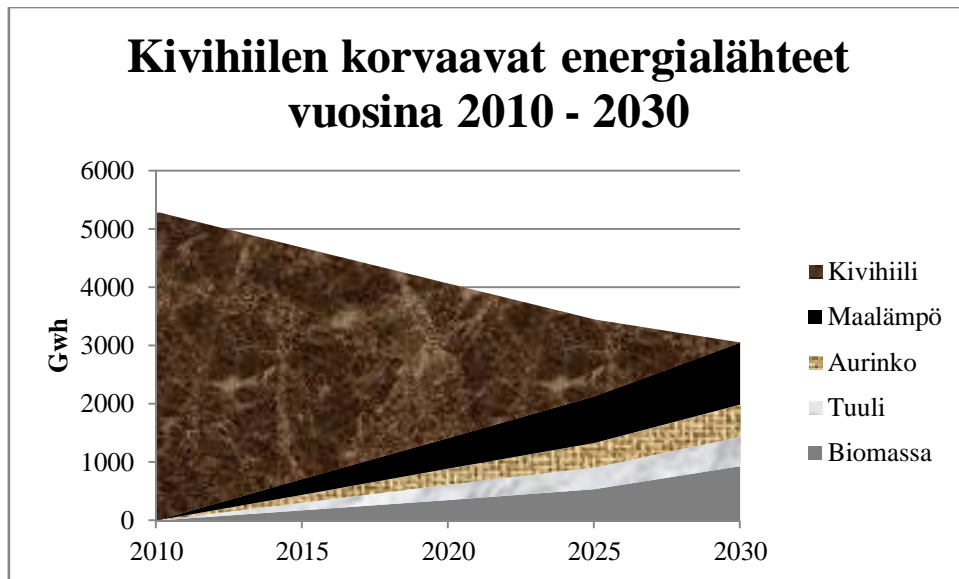
Kesällä auringolla tuotettu energia on merkittävässä osassa. Lämpökeräimillä voidaan helposti tuottaa heinäkuun kaikki tarvittava lämpö, jolloin maalämpöpumppuja tai biovoimaa ei tarvita. Aurinkosähköpaneeleita lisätään niin paljon, että jäljelle jäänyt laskennallinen sähköntarve saadaan tyydytettyä.

<b>Tuotantomuoto</b>	<b>Maalämpöskenaario</b>
<b>Maalämpö</b>	240
<b>Aurinkolämpö</b>	(1 km <sup>2</sup> )
<b>Aurinkosähkö</b>	204
<b>Merituulivoima</b>	180
<b>Maatuulivoima</b>	45
<b>Bio-SNG-kaasuvoimala</b>	300
<b>Hakevoimala</b>	228

*Taulukko 8: Eri energialähteiden tehot (MW) kahdessa skenaariossa*

Taulukko 8 näyttää uusiutuvien energialähteiden tehojen määrät megawateissa vuodesta 2030 eteenpäin. Aurinkolämpökeräinten tehoja on vaikeampi ilmaista megawateissa, joten niiden määrä on merkitty neliökilometreinä tarvittavaa kattopinta-alaa. Biomassavoimaloiden tehot on ilmaistu polttoainetehoina.





**Kuva 7 Uusiutuvien energialähteiden käyttö vuosina 2010 - 2030**

Uusiutuvien energialähteiden käyttö lisääntyy vuodesta 2010 vuoteen 2030. Tämä muutos on esitetty Kuva 7. Pystyasteikolla on vuosittainen kulutus gigawattitunneissa ja vaaka-asteikolla vuosi. Tämän jälkeen tekniikoita uusitaan sitä mukaa, kun niiden elinkaaret tulevat tiensä päähän. Tässä työssä oletetaan, että tuotettu energia pysyy samana vuoden 2030 jälkeen. Tosiasiassa tämänkin jälkeen energian kysyntä laskisi, mutta sitä ei ole tässä tutkielmassa huomioitu.

## 5. Kustannus-hyötyanalyysi

Tässä osiossa laaditaan kustannus-hyötyanalyysi, jonka avulla nähdään, mitkä olisivat Maalämpöskenaarion yhteiskunnalliset hyödyt ja kustannukset verrattuna perusuraan, jossa kivihiilen käyttöä jatketaan. Kustannus-hyötyanalyysi ja herkkyysanalyysi laadittiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Ohjenuorana toimivat Boardmanin ym. kirja *Cost-Benefit Analysis – Concepts and Practice* (2006) sekä Euroopan Komission ohjeet kustannus-hyötyanalyysin laatimiseksi (Euroopan komissio 2008). Oppaat eivät anna yksiselitteisiä ohjeita tämänkaltaisen analyysin laatimiseksi, sillä kyse ei oikeastaan ole yhdestä projektista vaan tuhansista erillisistä investoinneista, joiden elinkaaret vaihtelevat. Muuttujien määrä analyysissä on valtava, minkä takia analyysissä on tehty lukuisasti yksinkertaistavia rajanvetoja eikä kaikkia tekijöitä ole mahdollista mahduttaa mukaan analyysiin.

Kustannus-hyötyanalyysin tarkoitus on ilmaista projektille nettonykyarvo, jonka avulla sen kannattavuutta voidaan arvioida. Nykyarvolla tulevia rahavirtoja voidaan arvioida tämän hetken näkökulmasta ottamalla korko huomioon. Nykyarvo lasketaan seuraavalla kaavalla, tässä tapauksessa hyödyille ( $B_t$ ) (Boardman 2006, 14):

$$PV(B) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1-r)^t}$$

Kaavassa  $B_t$  tarkoittaa hyötyjä,  $r$  korkotasoa ja  $t$  vuotta. Kustannuksien nykyarvo lasketaan samalla kaavalla korvaamalla hyödyt kustannuksilla ( $C_t$ ). Nettonykyarvo tehdään vähentämällä kaikista projektin elinkaaren nykyarvoisista hyödyistä kustannukset (Boardman 2006, 15):

$$NPV = PV(B) - PV(C)$$

Negatiivinen nettonykyarvo kertoo, että projektin elinkaaren aikaiset hyödyt ylittävät sen kustannukset, ja voidaan ajatella, ettei projekti ole taloudellisesti kannattava.

Projektin aikahorisontilla on valtava merkitys hyötyjen muodostumiselle (Boardman 2006, 141). Tässä tapauksessa yhtä aikahorisonttia on vaikea määritellä, sillä projekti koostuu lukuisista eri tekniikoista ja siten myös eripituisista elinkaarista. Yksi

vaihtoehto on laskea eri tekniikoiden lisäyksien ja niiden avulla säästettyjen kivihiilikustannusten nettonykyarvot pitkälle tulevaisuuteen, jolloin kustannukset tasoittuvat ja niiden nähdään olevan jollain tapaa säännönmukaisia.

## 5.1. Taustaoletukset

Tässä kustannus-hyötyanalyysissä arvioidaan luvussa 4 esitetyn maalämpöskenaarion yhteiskunnallista nettonykyarvoa nollavaihtoehtoon verrattuna. Nollavaihtoehtona nykytila, jossa kivihiilen käyttöä jatketaan niin, että energian kysynnän ja siten myös kivihiilituotannon oletetaan laskevan 22 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Maalämpöskenaariossa kivihiilen kysyntä laskee 39 prosenttia, ja jäljelle jäänyt kysyntä korvataan vuoteen 2030 mennessä uusiutuvan energian käytöllä. Vuodesta 2030 eteenpäin kysyntä on vakaata, mutta uusiutuvan energian tuotantotekniikka on uusittava tekniikoiden elinkaarista riippuen.

Nettonykyarvon tarkastelu ulotetaan vuoteen 2100 saakka. Kaupunkienergiaraportissa (Kuitunen ym. 2013) hyödyt ja kustannukset oli laskettu vain vuoteen 2030, minkä takia kustannukset dominoivat huomattavasti, sillä tosiasiallisesti hyödyt kerääntyvät pitkälle tulevaisuuteen.

### 5.1.1. Hyötyjen ja kustannusten määrittäminen

Suurissa projekteissa yhteiskunnallisia hyötyjä ja kustannuksia syntyy monella saralla. On selvää, että osa maalämpöskenaariossa esitettyjen hankkeiden aiheuttamista hyödyistä ja kustannuksista tuntuu kaupungin ja jopa maan rajojen ulkopuolella. Uusiutuvan energian mittava lisääminen puolestaan vaikuttaa koko maan talouteen lisäämällä paikallisten polttoaineiden kysyntää ja kiihdyttämällä uusiutuvan energian tekniikoihin liittyviä markkinoita. Investoinnit saattavat myös vaikuttaa sähkön hintaan pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Kivihiilituotannon haitat vaikuttavat globaalilla tasolla, kun taas hyödyt ovat selkeästi paikallisia – usein CO<sub>2</sub>-päästöjen kustannus-hyötyanalyysien *standing* onkin ajateltu globaalista näkökulmasta (Euroopan komissio 2008, 31). Ehdotettu maalämpöskenaario vaikuttaisi varmasti myös kuluttajien mikrotasolla kokemaan hyötyyn: kysynnän mukautuminen tarjontaan tarkoittaisi sitä, että kuluttajien olisi mietittävä enemmän, milloin ja missä muodossa he haluavat energiaa kuluttaa. Tämä näkyisi käytännössä rajoitteina tai hinta-ohjauksena.

Skenaariossa huomioon otetut fyysiset ja taloudelliset vaikutukset on listattu pääpiirteittäin Taulukossa 9. Kuten taulukosta nähdään, kustannuksia ovat investoinnit energiakorjausrakentamiseen ja uusiutuvaan energian teknologioihin, sekä näiden tarvitsema panoskäyttö ja käyttökustannus. Hyötyjä (säästöjä) puolestaan syntyy, kun kivihiilituotannosta johtuvat kustannukset poistuvat. Päästöjen väheneminen näkyy päästöoikeuden hinnan kautta säästönä siirryttäessä uusiutuvan energian järjestelmään.

	Fyysinen vaikutus	Taloudellinen vaikutus
<b>Energiatehokkuus</b>	Korjausrakentamisen yhteydessä tehdyt energiatehokkuusparannukset	Kustannus: energiatehokkuusparannusten hinta €/ m <sup>2</sup>
<b>Kivihiilestä luopuminen</b>	Kivihiilellä tuotetun energian väheneminen	Säästö: Kivihiilituotannon käyttö- ja panoskustannusten poistuminen €/ GWh
	Korvaavien kivihiilivoimaloiden rakentamisen loppuminen	Säästö: Uuden kivihiilivoimalan investointikustannus € / MW
	Kivihiilen poltosta johtuvien päästöjen loppuminen	Säästö: päästöoikeuden hinta € / päästötonni (t CO <sub>2</sub> ekv)
	Ylijäämäsihtin tuotannon loppuminen	Kustannus: myynnin menetys, sihtin markkinahinta €/ kWh
<b>Uusiutuva energia</b>	Uusiutuviin energiamuotoihin liittyvien investointien lisääntyminen	Kustannus: investoinnit €/ MW tai €/ m <sup>2</sup>
	Uusiutuvan energian käyttökustannusten kasvu	Kustannus: €/ GWh
	Biopolttoaineiden käytön lisääntyminen	Kustannus: panoskäyttö €/ GWh

Taulukko 9: Kustannus-hyötyanalyysissä huomioidut vaikutukset

Koska tutkielman aikahorisontti on pitkä, tekniikoita on lukuisia ja vaikutukset monimutkaisia, on hyötyjen ja kustannusten suhteen tehty suuria yksinkertaistuksia: hyödyistä ja kustannuksista otetaan huomioon pelkästään paikallisten toimijoiden suorat markkinavaikutukset. Tämä tarkoittaa sitä, että markkinattomia vaikutuksia –

kuten sosiaalisia tai ekologisia kustannuksia tai hyötyjä – ei ole laskettu mukaan, sillä kaikkien vaikutusten huomioonottaminen ei olisi ollut tämän tutkielman laajuudessa mahdollista. Markkinattomien tekijöiden merkitys saattaa olla lopputulokseen hyvinkin suuri, joten kustannus-hyötyanalyysin tuloksiin on suhtauduttava suurella varauksella.

### 5.1.2. Elinkaarien merkitys

Kuten aiemmin jo todettiin, on projektin elinkaarella hyvin suuri merkitys laskennallisesti. Pitkällä aikavälillä tekniikoita on jatkuvasti uusittava mutta myös hyötyjä syntyy enemmän.

Eri tekniikoilla on erilaiset elinkaaret ja niitä uusitaan eri aikoihin riippuen siitä, milloin ensimmäinen investointi on tehty. Analyysissa käytetyt elinkaaret on esitetty Taulukossa 10.

<b>Tuotantomuoto</b>	<b>Elinkaari</b>	<b>Lähde</b>
<b>Energiakorjausrakentaminen</b>	∞	oletus
<b>Maalämpöpumppu</b>	20	Holopainen ym. 2010, 56
<b>Maalämpökaivo</b>	∞	oletus
<b>Aurinkolämpökeräin</b>	20	Päätelty lähteestä Erat ym. 2008, 91
<b>Aurinkosähköpaneeli</b>	30	Fthenakis & Kim 2011
<b>Merituulivoimala</b>	25	Tarjanne & Kivistö 2008, 6
<b>Maatuulivoimala</b>	25	”
<b>Bio-SNG-kaasuvoimala</b>	25	”
<b>Hakevoimala</b>	25	”
<b>Kivihiilivoimala</b>	25	”

*Taulukko 10: Eri tekniikoiden elinkaaret (v) kustannus-hyötyanalyysissä*

Energiatehokkuusparannusten ja maalämpökaivojen elinkaaret on oletettu ikuisiksi. Energiatehokkuusparannusten kohdalla oletus perustuu sille ajatukselle, että jatkossa energiakorjaukset olisivat osa yleistä korjausrakentamista, jolloin niiden kustannusten esittäminen erikseen ei ole tarpeen. Maalämpökaivojen puolestaan ajatellaan pystyvän antamaan lämpöä ikuisesti laitteistojen ollessa oikein mitoitettuja, jolloin ainoastaan pumput tulee uusia.

Tässä työssä nettonykyarvoja katsotaan eri aikahorisonteilla: vuoteen 2030 (n=20), 2050 (n=40) ja 2100 (n=90) saakka. Vuoteen 2030 ulottuva aikahorisontti näyttää lähinnä sen, miten kustannukset muodostuisivat siihen asti, että uusi järjestelmä olisi käytössä. Tällöin järjestelmän hyödyt jäävät hyvin pitkälti huomioimatta mutta merkitys nykyisille sukupolville korostuu. Vuoteen 2050 ulottuva keskipitkä aikahorisontti antaa jo jokseenkin hyvin kuvan nettonykyarvon käyttäytymisestä, ja pitkän aikavälin aikahorisontti vuoteen 2100 painottaa hyvin tulevien sukupolvien etuja.

Koska hyötyjä ovat tässä tutkielmassa pelkästään säästöt nollavaihtoehtoon verrattuna, on tärkeää, että myös nollavaihtoehdossa vaikutukset katsotaan tarpeeksi pitkälle. Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että kivihiiivoimaloiden elinkaaret ja niiden uusiminen on otettava myös mukaan laskelmiin välittämättä Helsingin kaupungin periaatepäätöksistä luopua kivihiiilen käytöstä. Tarjanteen ja Kivistön (2008, 6) mukaan hiilivoimalan elinkaari on 25 vuotta. Kuitenkin Hanasaaren B-voimala on ollut käytössä jo melkein 40 vuotta ja Salmisaari 30 vuotta (Helsingin Energia 2012b ja 2013). Tässä analyysissä kivihiiivoimalat uusittaisiin ensimmäisen kerran vuosina 2020 ja 2030, välittämättä nykyisten voimaloiden elinkaarista. Tämä tasoittaa tilannetta hieman, sillä myös uusiutuvan energian tekniikoiden elinkaarien oletetaan toimivat kirjallisuuden mukaan, vaikka tosiasiallisesti elinkaaret saattaisivat olla pidempiä.

### **5.1.3. Muuttujat**

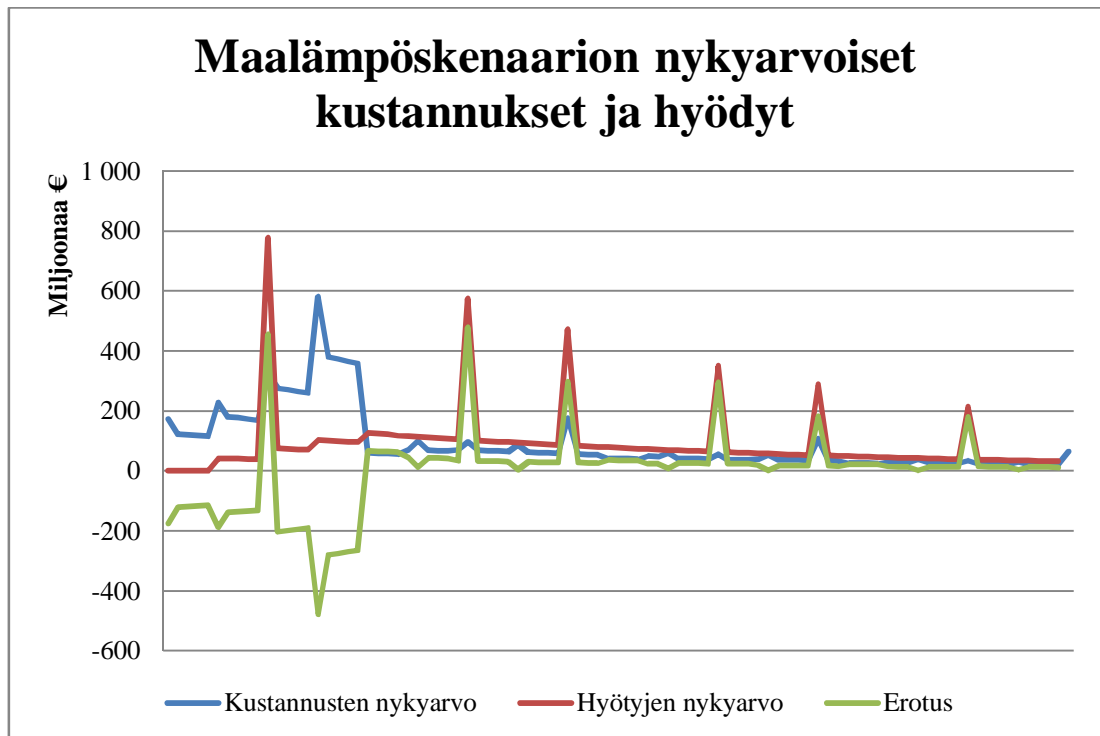
Kustannus-hyötyanalyysissä käytetyt muuttujat on esitetty Taulukossa 11. On selvää, että moniin muuttujiin liittyy suuria epävarmuuksia, ja kaikkia kustannuksia, kuten esimerkiksi maalämmön tai aurinkoenergian käyttökustannuksia, ei ole huomioitu. Suluissa on esitetty herkkyyssanalyysissä käytetty vaihteluväli. Diskonttokoroksi on valittu melko alhainen 2 prosenttia, joka on sopiva luku yhteiskunnallisissa kustannus-hyötyanalyysissä, jolloin tulevien sukupolvien näkökulma tulee paremmin huomioiduiksi (Boardman ym. 2006, 238). Energiatohokkuus-toimenpiteiden kustannusten määrittämiseen käytetyt menetelmät on kuvattu Liitteessä 4 ja uusiutuvien energialähteiden Liitteessä 3.

<b>Muuttuja</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Käytetty arvo</b>	<b>Lähde</b>
<b>Päästöoikeuden hinta</b>	€/ t CO <sub>2</sub>	25 (0 – 75)	
<b>Kivihiilen hinta</b>	€/ MWh	30 (10 – 50)	Tilastokeskus 2013b
<b>Diskonttokorko</b>	%	2 (0,5-10)	
<b>Kivihiilen käyttökustannus</b>	€/ MWh	8	Tarjanne & Kivistö 2008
<b>Sähkön hinta</b>	€/ kWh	0,07	Energiamarkkina- virasto 2013
<b>Energiakorjauskustannus</b>	€/ m <sup>2</sup>	70	Airaksinen & Vainio
<b>Maalämpöpumpun kustannus</b>	€/ kW	255	Holopainen ym. 2010, 31.
<b>Maalämpöpumpun tulistusvaraaja 1500dm<sup>3</sup></b>	€/ kpl 60 kW	2675	”
<b>Maalämpöpumpun liitokset</b>	€/ 3 kpl	2340	”
<b>Maalämpökaivo ja putkisto</b>	€/ m	30	”
<b>Aurinkokeräimen hinta</b>	€/ m <sup>2</sup>	167	Greenes Oy 2013
<b>Aurinkopaneelin hinta</b>	€/ kWp /periodi	2,2 / 1,9 / 1,6 / 1,3	ks. Liite 3 / Aurinkoenergia
<b>Merituulivoimalan hinta</b>	€/ 3 MW	7 500 000	TEM 2009
<b>Merituulivoimalan käyttökustannus</b>	% / v	3	”
<b>Maatuulivoimalan hinta</b>	€/ 3 MW	4 200 000	”
<b>Maatuulivoimalan käyttökustannus</b>	% / v	2	”
<b>Kaasuvoimalan investointikustannus</b>	€/ kW	700	Tarjanne & Kivistö 2008
<b>Kaasuvoimalan käyttökustannus</b>	€/ MWh	5	”
<b>BIO-SNG:n hinta (hakkeesta)</b>	€/ MWh	50 (25-75)	Ks. Liite 3 / Bioenergia
<b>Hakevoimalan investointikustannus</b>	€	25 000 000	Metso Oyj 2013
<b>Hakevoimalan käyttökustannus</b>	% / v	5	Tarjanne & Kivistö 2008
<b>Hakkeen hinta</b>	€/ MWh	19	Tilastokeskus 2013c
<b>Hakkeen kuljetuskustannus</b>	€/ MWh <sup>-3/2</sup>	1,2	Kangas ym. 2011

*Taulukko 11: Kustannus-hyötyanalyysissä käytetyt arvot*

## 5.2. Tulokset

Kuva 8 näyttää maalämpöskenaarion nykyarvoiset vuosittaiset kustannukset, hyödyt ja näiden erotuksen vuoteen 2100 asti. Pystyakselilla ovat kustannukset ja hyödyt miljoonina euroina. Miinusmerkkiset nettoarvot tarkoittavat, että kustannusten ja hyötyjen erotus on negatiivinen. Vaaka-asteikolla on aika vuosina.



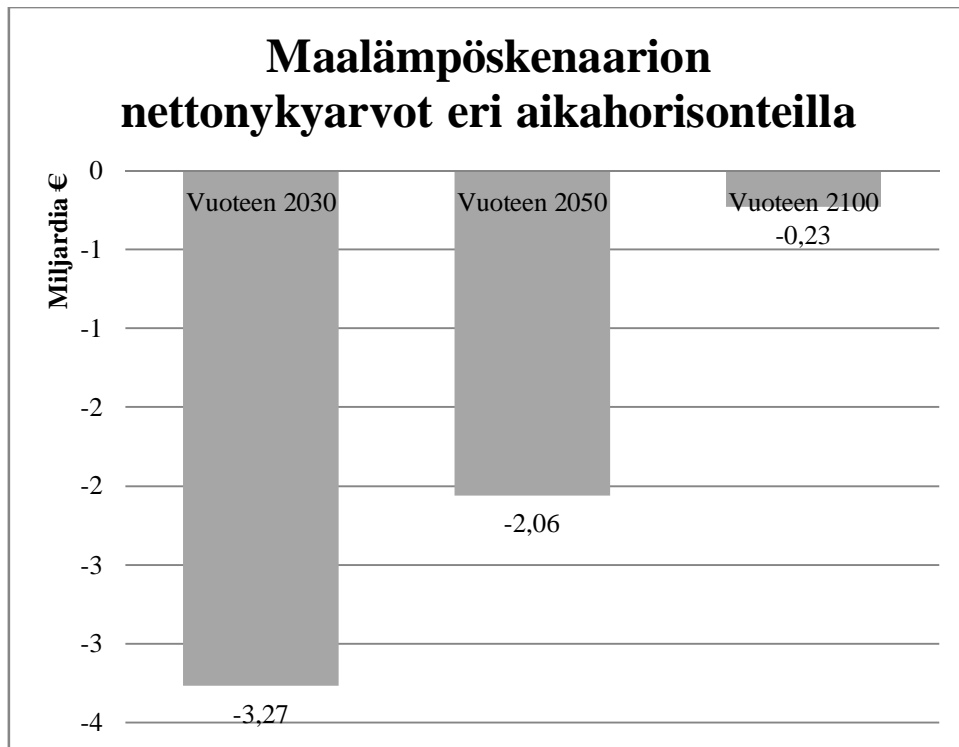
**Kuva 8 Maalämpöskenaarion nykyarvoiset hyödyt ja kustannukset vuosina 2010 – 2100**

Kuvasta nähdään, kuinka vuoteen 2030 kustannukset nousevat, kun suuria investointeja tehdään jatkuvasti. Tämän jälkeen kehitys tasaantuu, ja lähinnä kaasuja ja hiilivoimaloiden uusimisajankohdat näkyvät merkittävinä kustannus- ja hyötypiikkeinä. Vuoden 2030 jälkeen vuosittaiset hyödyt ylittävät kustannukset.

Vuoden 2030 jälkeen hyödyt ylittävät kustannukset. Tämä tarkoittaisi sitä, että tämän hetken ihminen maksaa tulevien sukupolvien hyödyistä. Tämä on kuitenkin epärealistinen odotus, sillä usein politiikkaa tehdään hyvin lyhyellä näkökulmalla.

Kuva 9 on esitetty maalämpöskenaarion nettonykyarvot (NPV) eri aikahorisonteilla. Pystyakselilla esittää NPV:n miljardeissa euroissa.





**Kuva 9 Nettonykyarvot maalämpöskenaariossa eri aikahorisonteilla**

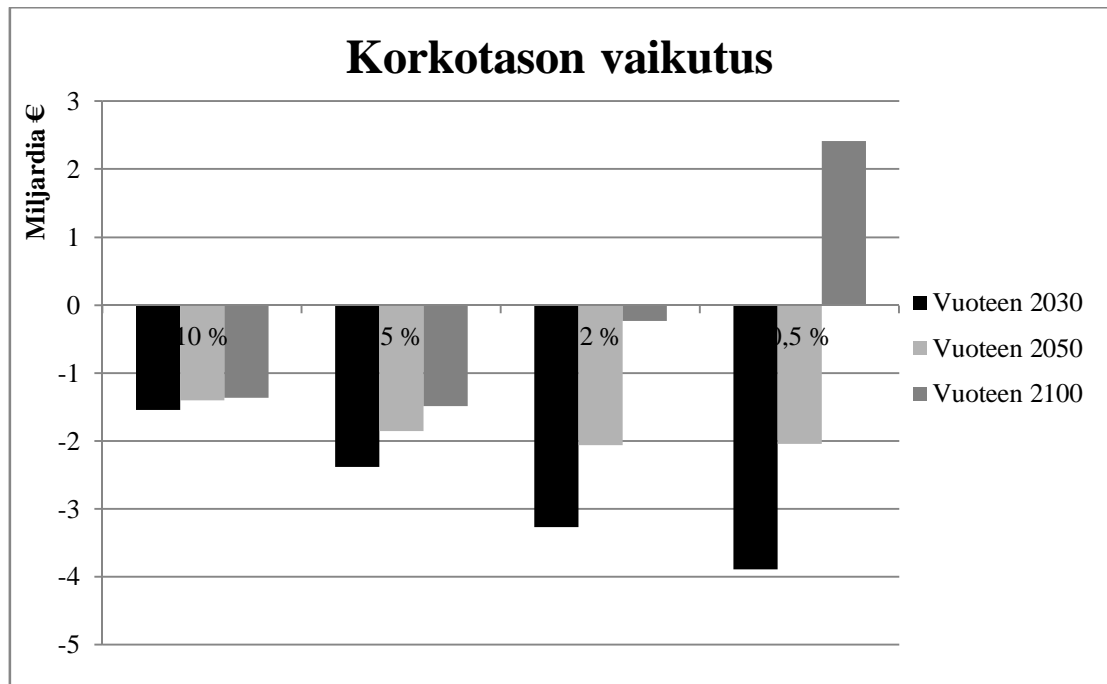
Kuvasta nähdään, että nettonykyarvot jäävät kaikilla aikahorisonteilla negatiivisiksi. Kuva osoittaa myös sen, että mitä pidemmällä aikavälillä hyötyjä ja kustannuksia katsotaan, sitä pienempiä ovat tappiot. Numeeriset tulokset ovat nähtävissä Liitteessä 5.

### 5.3. Herkkyysanalyysi

Analyysissa käytettävistä tekijöistä moniin liittyy suuria epävarmuuksia. Epävarmuuksien takia on laadittava herkkyysanalyysi, jotta nähdään, kuinka suuri vaikutus muutoksella on lopputulokseen. Tässä työssä kaikkien tekijöiden vaikutusta ei ole arvioitu, vaan herkkyysanalyysiin on valittu suurimpia ja epävarmimpia tekijöitä. Herkkyysanalyysi on tehty käsin Excel-ohjelmalla muuttamalla perustilanteessa yhtä tekijää kerrallaan. Herkkyysanalyysin tulokset ovat nähtävissä numeerisesti Liitteessä 6.

### 5.3.1. Diskonttokorko

Korkotason valinta on merkittävää. Matalampi korko painottaa enemmän tulevien sukupolvien hyötyjä kuin isompi (Boardman 2006, 238). Tässä herkkyyssanalyysi diskonttokoron suhteen on tehty korkotasolle kuvaajassa oikealta vasemmalta 10, 5, 2 (perustapaus) ja 0,5 prosenttia eri aikahorisonteille. Kuvassa 10 pystyasteikolla on nettonykyarvo miljardeissa euroissa. Eriväriset palkit kuvaavat eri pituisia aikahorisontteja.



Kuva 10 Korkotason vaikutus nettonykyarvoon eri aikahorisonteilla

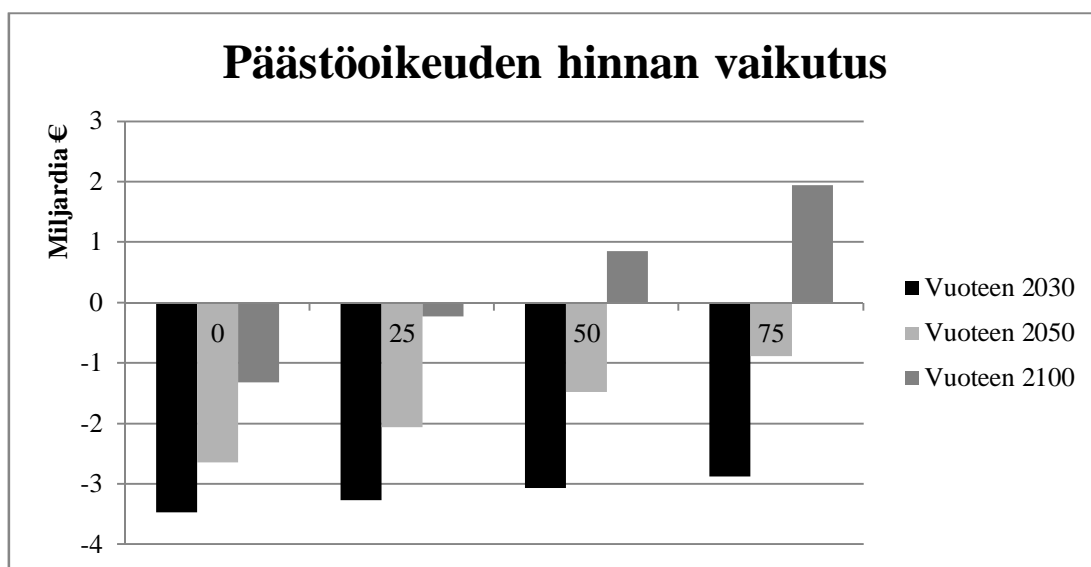
Kuvasta nähdään, että nettonykyarvot ovat pitkälti negatiivisia. 10 prosentin korolla eri aikahorisonttien nettonykyarvot ovat samalla tasolla hieman yli miljardin euron tappiolla. Muilla kuin pitkällä aikavälillä korkotason lasku hieman yllättäen laskee jo negatiivisia nettonykyarvoja. Korkotason laskiessa eri aikahorisonttien erot tulevat selvästi esiin, ja hajontaa lukujen välillä alkaa esiintyä

Ainoastaan 90 vuoden aikahorisontilla ja erittäin pienellä (0,5 prosenttia) korolla nettonykyarvo muuttuu positiiviseksi: tällöin nettonykyarvo on yli 2 miljardia euroa. Pitkä aikaväli ja tulevien sukupolvien hyötyä korostava korkotaso saavat siis aikaiseksi huomattavan korkean nettohyödyn.

### 5.3.2. Päästöoikeuden hinta

Päästöoikeuden hinta vaikuttaa kivihiilituotannon kannattavuuteen, sillä korkeampi päästöoikeuden hinta tarkoittaa korkeampia kustannuksia kivihiilelle. Tässä työssä kivihiilituotannon hiipussa vältetyt kustannukset ovat hyötyjä, joten korkeampi päästöoikeuden hinta parantaa uusiutuvan energian kannattavuutta. Tutkielmaa tehtäessä päästöoikeuden hinta oli tippunut hyvin lähelle nollaa (Talouselämä 2013).

Kuva 11 kuvaa päästöoikeuden hinnan vaikutusta nettonykyarvoihin eri aikahorisonteilla. Pystyasteikolla on nettonykyarvo miljardeissa euroissa ja vaakakselilla nettonykyarvot eri aikahorisonteille päästöoikeuden hinnoilla 0, 25 (perustapaus), 50 ja 75 euroa per 1000 päästötonnia.

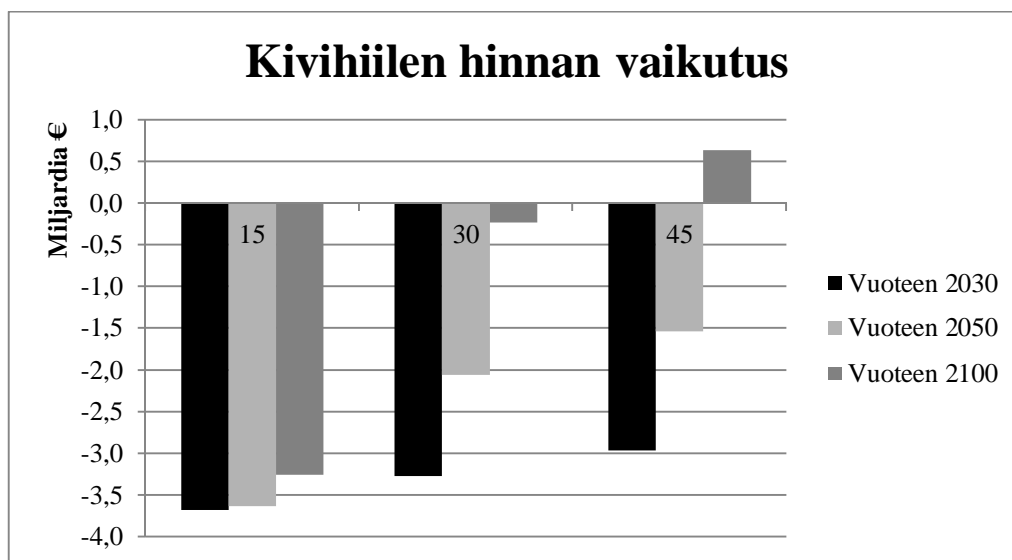


**Kuva 11 Päästöoikeuden hinnan vaikutus nettonykyarvoon eri aikahorisonteilla**

Kaikilla aikahorisonteilla nettonykyarvot kasvavat päästöoikeuden hinnan kasvaessa. 20 vuoden aikahorisontilla erot ovat melko hillittyjä eli noin 200 miljoonaa euroa päästöoikeuden hinnan noustessa 25 euroa. Pitkällä aikavälillä vaikutukset ovat dramaattisimpia, sillä ilman päästöoikeuksia nettonykyarvo on -1,3 miljardia euroa ja 75 euron hinnalla melkein 2 miljardia euroa muuttuen positiiviseksi jossain 25 ja 5 euron välillä. Aikahorisontilla vuoteen 2050 vaikutus on kahden edellisen välissä, mutta korkeallakin hinnalla nettonykyarvo pysyy negatiivisena.

### 5.3.3. Kivihiilen hinta

Kivihiilen hinta on vaihdellut huomattavasti viime vuosina. Suurin nousu oli vuodesta 2010, kun hinta nousi vuodessa 15 eurosta lähes 30 euroon (Tilastokeskus 2013b). Herkkyysanalyysi tehtiin arvoille 15, 30 (perustapaus) ja 45 euroa per megawattitunti. Kuva 12 esittää tulokset, jotka ovat melko suoraviivaiset: kivihiilen hinnan kasvaessa maalämpöskenaariosta tulee kannattavampi. 45 euron hinnalla ja 90 vuoden aikahorisontilla nettonykyarvo muuttuu positiiviseksi.



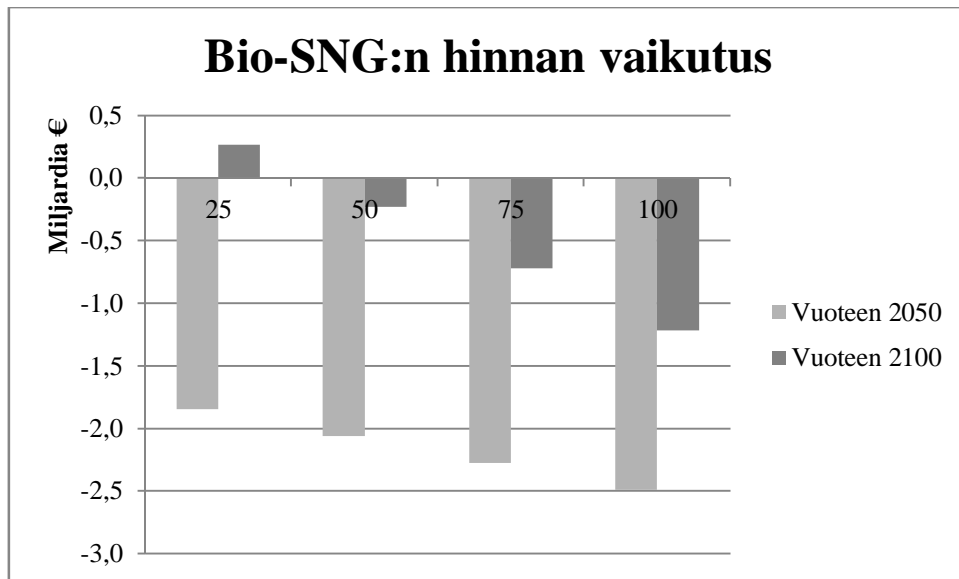
Kuva 12 Kivihiilen hinnan vaikutus nettonykyarvoon eri aikahorisonteilla

### 5.3.4. Bio-SNG:n hinta

Synteettisen biomaakaasun (bio-SNG) hinta on yksi suurimpia epävarmuustekijöitä tässä tutkielmassa, sillä kyseistä tekniikkaa ei ole vielä suuressa mittakaavassa käytössä missään. Oletuksena on, että kaasu tehdään hakkeesta, jolloin kustannus on yhdistelmä hakkeen hintaa ja tuotantokustannuksia. Perustapauksessa oletettiin, että kaasun hinta olisi 50 euroa per megawattitunti, mutta hinta saattaa vaihdella hyvinkin paljon riippuen hakkeen kysynnästä, kuljetuskustannuksista, ja monista muista tekijöistä, kuten valtion tuesta. Herkkyysanalyysi tehtiin tapauksille, joissa hinta nousee ja laskee 50 prosenttia, ja kaksinkertaistuu.

Kuva 13 näkyy kaasun hinnan vaikutus aikahorisonteilla nettonykyarvoon vuosiin 2050 ja 2100. Kaasuvoimala valmistuu vasta vuonna 2030, joten kaasun hinnan muutos ei vaikuta nettonykyarvoon 20 vuoden aikahorisontilla. Pystyasteikolla on

nettonykyarvo miljardeina ja vaaka-asteikolla eri aikahorisonttien nettonykyarvot hinnoilla 25, 50 (perustapaus), 75 sekä 100 euroa per megawatti.



**Kuva 13 Bio-SNG:n hinnan vaikutus nettonykyarvoon**

90 vuoden aikahorisontilla ja matalalla (25) kaasun hinnalla järjestelmä olisi kannattava. Kuitenkin hinnan noustessa tappiot kasvavat huomattavasti, joten kaasuinvestointi ei ainakaan tällä hetkellä vaikuta houkuttelevalta.

## 6. Johtopäätökset

Tässä työssä luotiin energian säästöön ja hajautettuun energiantuotantoon perustuvaa uusiutuvan energian skenaario, Maalämpöskenaario, korvaamaan Helsingin nykyinen kivihiilituotanto. Työ tehtiin toimeksiantona WWF Suomelle osaksi kampanjaa, joka ajaa kaupunkeihin vähähiilistä ja uusiutuvaa energiantuotantoa. Maalämpöskenaariossa Helsingin kivihiilituotanto pyrittiin korvaamaan vuoteen 2030 mennessä energiatehokkuuden parannuksilla olemassa olevassa rakennuskannassa sekä maalämmön, tuulivoiman, aurinkoenergian ja bioenergian käytön lisäämisellä. Kustannus-hyötyanalyysin avulla arvioitiin toimien kannattavuutta ja kustannuksia kivihiilivoimaan nähden.

Kustannus-hyötyanalyysin perusteella tässä työssä esitetyt investoinnit tulisivat kalliimmiksi kuin nykyinen kivihieillä toimiva järjestelmä. Eri aikahorisonteilla tulevien ja nykyisten sukupolvien hyödyt painottuivat eri tavoin, mutta perustapauksessa nykyarvoiset hyödyt olivat aina pienempiä kuin kustannukset aiheuttaen noin kolmesta miljardista 230 miljoonan euron tappiot. Ainoastaan pitkällä aikavälillä (n=90) nettohyödyt saattoivat muuttua positiivisiksi, kun herkkyyksianalyysissä vaihteleva tekijä oli tarpeeksi ääriasennossa.

Maalämpöskenaarion kuvaamassa tilanteessa olisi kyse suuresta projektista, jolloin kustannuksissa liikutaan miljardeissa euroissa. Herkkyyksianalyysissä kävi ilmi, että eräiden muuttujien vaihtelu voisi niin ikään aiheuttaa miljardien eurojen eroja nettohyödyissä. Todellisia projekteja suunniteltaessa tällaisen tulokset tarkoittaisivat, ettei projekteja luultavasti toteuteta.

Analyysissä otettiin huomioon pelkästään markkina-arvoiset tekijät. Tällöin esimerkiksi kaupunkilaisten arvostus uusiutuvien energianlähteiden käyttöä kohtaan ei näy. Todellisuudessa veronmaksajat voisivat olla valmiita lisäämään uusiutuvan energian käyttöä vaikka se lisäisikin vuosittaisia kustannuksia. Tätä varten olisi kuitenkin laadittava oma arvottamistutkimuksensa. On muistettava, että myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat vaikutukset ovat miljardiluokan kysymyksiä.

Työn eri vaiheissa jouduttiin tekemään paljon yksinkertaistuksia. Tosiasiallisten taloudellisten realiteettien, sosiaalisten aspektien tai poliittisen ilmapiirin selvittäminen vaatisi huomattavasti suuremman työmäärää, sillä jokaiseen maalämpöskenaariossa hyödynnettyyn tekniikkaan liittyvät omat laajat vaikutuksensa. Tämän vuoksi on hyvä huomioida, että työssä esitetyt tulokset ovat suuntaa-antavia. Taustaoletuksissa nojattiin usein siihen, että tulevaisuuden Helsinki tulee olemaan energianhankinnan rakenteeltaan hyvin erilainen paikka, ja myös monet realiteetit tulisivat muuttumaan. Moniin oletuksiin voidaan suhtautua hyvinkin kriittisesti.

Uusiutuvien energialähteiden käytössä painotettiin erityisesti sitä, että energia tuotettaisiin paikallisilla lähteillä. Paikallisuus kuitenkin ei välttämättä ole ihanne etenkin sähkön tuotannossa. Energian kotimaisuus nähdään usein tavoitteena, mutta uusiutuvan energian järjestelmissä kokonaisvaltainen ajattelu vaatii rajojen rikkomista. Yksi esimerkki voisi olla aurinkoenergia: aurinkoisemmissa maissa voidaan tuottaa aurinkosähköä paljon tehokkaammin kuin pohjoisilla leveysasteilla, ja tekniikan kehittyessä siirto voi onnistua pienillä häviöillä pitkiäkin matkoja.

Tavoitteena oli tuottaa uusiutuvan energian järjestelmä, jonka avulla eri vuodenaikoina hyödynnettäisiin eri energialähteitä. Tämä johtaisi siihen, että osa investointeja toimisi suuren osan vuotta taloudellisesta näkökulmasta alikapasiteetilla. Tämä olisi totta erityisesti kalliiden biovoimaloiden kohdalla. Jos asiaa kuitenkin katsottaisiin puhtaasi ympäristön näkökulmasta, olisivat seisokkijaksot kannattavia, jos niiden aikana säästetään ympäristön kannalta haitallisten panosten käyttöä. Usein nämä panokset ovat myös rahallisesti kalliita (ks. Liite 6).

Tässä tapauksessa negatiiviset nettohyödyt olivat odotettavissa, mutta luultavasti erilaisella uusiutuvan energian paletilla voitaisiin saada aikaan hyvin erilaisia tuloksia. Etenkin biomassan ja maalämmön osuksista voidaan keskustella.

Biomassan kohdalla luotettiin suuresti siihen, että tekniikka tulee kehittymään huomattavasti. Herkkyysanalyysin ja vaihtoehtoisen skenaarion (ks. Liite 6) perusteella sekä polttoaineiden kustannukset että kysytty määrä vaikuttavat huomattavan paljon kannattavuuteen. Jos tekniikka ei kehitykään halutulla lailla, bio-SNG-polttoaineen kustannukset voivat nousta huomattavasti. Kylminä vuosina

esimerkiksi hakkeen määrän kysyntä saattaa kivuta niin korkealle, ettei siihen yksinkertaisesti ole varaa ja saatavuuskin voi kärsiä.

Tutkielmassa esitetty maalämpöskenaario nojasi nimensä mukaisesti runsaaseen maalämmön käyttöön. Maalämpö on tällä hetkellä hyvin alihyödynnetty energian tuotantomuoto Helsingissä ja usein nähdään, että sen käyttö vähentää kaukolämpöverkon kannattavuutta ja lisää huippukulutuskaudella suuria päästöjä aiheuttavan lauhdekiivihiilituotannon käyttöä (ks. esim. Vanhanen, Pesola ja Vehviläinen 2011). Lyhyellä aikavälillä tämä on varmasti totta mutta pitkällä aikavälillä maalämmön rinnalle voidaan kehittää parempia, uusiutuvaan energiaan perustuvia sähköntuotantotapoja.

On selvää, että uusiutuvan energian lisääminen tulee lisäämään kustannuksia. Se, paljonko lopulta halutaan maksaa, riippuu täysin poliittisista päätöksistä ja teknisestä kehityksestä. Tässä työssä kaikki investoinnit oletettiin maksettavan samasta pussista, mutta todellisuudessa erilaisilla ohjaukeinoilla voidaan ohjata kuluttajien ja esimerkiksi taloyhtiöiden käyttäytymistä kestävämpään suuntaan.

Energian hankinta on nähtävä kokonaisuutena. Kun järjestelmätasolla halutaan lisätä uusiutuvan energian käyttöä, voidaan varmasti nähdä tapoja kehittää toisiaan tukevia energialähteiden käyttöä. Myös energian varastoimisen tekniikat varmasti kehittyisivät, jos tekniikoiden kehitystä tuettaisiin. Poliitikalla on suuri merkitys energiakysymyksissä, ja ympäristön näkökulmasta kokonaisvaltainen ajattelu on tärkeää. Uusiutuvien energialähteiden kannattavuutta ei voida ajatella yksi tekniikka kerrallaan.



## 7. Lähteet

Ahrenfeldt, J.; Thomsen, T.; Henriksen, U.; Clausen, L. 2012. Biomass gasification cogeneration – A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering* 50 (2013), 1407-1417

Airaksinen, M., Seppälä, J., Vainio, T., Tuominen, P., Regina, P K., Peltonen-Sainio, P., Luostarinen, S., Sipilä, K., Kiviluoma, J. Tuomaala, Savolainen, I., Kopsakangas-Savolainen, M. 2013. Rakennetun ympäristön hajautetut energiajärjestelmät. *Suomen Ilmastopaneeli. Raportti 4/2013*

Airaksinen, M.; Vainio, T. 2012. Rakennuskannan korjaamisen ja kunnossapidon energiatehokkuustoimenpiteiden vaikuttavuuden arviointi energiasäästön, CO<sub>2</sub> ekv päästöjen, kustannuksien ja kannattavuuden näkökulmista. *VTT 14.5.2012*

Boardman, A.; Greenberg, D.; Vining, D.; Weimer, D. 2006. Cost-Benefit Analysis. Concepts and Practice. *Third Edition*.

Deng, Y.; Cornelissen, S.; Klaus, S. 2011 The Ecofys Energy Scenario. Julkaistu WWF:n raportissa *The Energy Report*. Ladattavissa osoitteesta: [http://wwf.panda.org/what\\_we\\_do/footprint/climate\\_carbon\\_energy/energy\\_solutions/renewable\\_energy/sustainable\\_energy\\_report/](http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/climate_carbon_energy/energy_solutions/renewable_energy/sustainable_energy_report/)

Energiamarkkinavirasto 2012. Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys ja valvonnan vaikuttavuus. Valvontatiedot 2005-2010

Energiamarkkinavirasto 2013. Sähkön hintatilastot. Viitattu 12.4.2013. <http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs>

Energiateollisuus ry 2011. Kaukolämpötilasto 2010. Energiateollisuus ry.

Energiateollisuus ry 2012a. Kivihiili. Viitattu: 18.12.12 <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/kivihiili>

Energiateollisuus ry 2012b. Suomalaisten Energia-asenteet 2012.

Energiateollisuus ry 2012c. Kunnittainen sähkönkäyttö 2007 - 2011. [http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/sahkon\\_kulutus\\_kunnittain\\_2007-2011\\_excel\\_nettiin.xls](http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/sahkon_kulutus_kunnittain_2007-2011_excel_nettiin.xls)

Energiateollisuus ry 2012d. Electricity net-production, imports and exports (GWh) in Finland.

Energiateollisuus ry 2012e. Sähkönkulutuksen kuukausitilasto - monthly statistics of energy consumption.

Energiateollisuus ry 2013. Tuulivoima. Viitattu 20.2.13. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/tuulivoima>)

Energiateollisuus ry 2013a. Vesivoima Viitattu 20.2.13. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima>

Energiateollisuus ry 2013b. Vetytalous. Viitattu 20.2.13. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vetytalous>

Erat, B.; Erkkilä, V.; Nyman, C.; Peippo, K.; Peltola, S.; Suokivi, H. 2008. Aurinko-opas. Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Aurinkoteknillinen yhdistys ry.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU. Euroopan unionin virallinen lehti 18.06.2010

Euroopan komissio 2008. Guide to Cost Benefit Analysis of Investment projects.

Falk, G.; Herrmann, F.; Bruno Schmid G. 1982. Energy forms or energy carriers? *Am. J. Phys.* 51 (12), December 1983

Fthenakis, V.M.; Kim, H.C. 2011, Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy* 85 (2011) 1609–1628

Geodrill 2013.Referenssit. <http://www.geodrill.fi/referenssit/>

Gustavsson, M.; Särholm, E.; Stigson, P.; Zetterberg, L. 2011. Energy Scenario for Sweden. The IVL Scenario.

Greenes Oy 2013. Tyhjiöputkikeräin HCA-58/30. Viitattu 9.3.2013  
<http://greenes.fi/verkkokauppa/product/view/4/2>

Göös, Olli. 2013. Puhelinkeskustelu. Lämpöykkönen. 14.3.2013

Hacatoglu, K.; McLellan, P. J.; Layzell, D. B. 2010. Production of Bio-Synthetic Natural Gas in Canada. *Environmental Science & Technology* (2010), 44, 2183-2188

Happonen, K. 2011. Torrefied wood pellets as an alternative to coal: Climate benefits and social desirability of production and use. Master's thesis.

Heller, R.; Deng, Y.; van Breevoort, P. 2012 Renewable Energy: a 2030 Scenario for the EU. Ecofys 2012 by order of WWF – EPO.

Helsingin Energia 2010. Helsingin Energian kehitysohjelma kohti hiilineutraalia tulevaisuutta, 12.01.2010 [http://www.helen.fi/pdf/Helen\\_2020\\_kehitysohjelma.pdf](http://www.helen.fi/pdf/Helen_2020_kehitysohjelma.pdf)

Helsingin Energia 2011. Helen-konsernin vuosikertomus 2011 ja Yhteiskuntavastuun raportti 2010

Helsingin Energia 2012. Tuotamme energiaa. Viitattu 18.12.2012 <http://helen.fi/ymparisto/energiantuotanto.html>

Helsingin Energia 2012a. Turvallisuustiedote Helsingin Energian Salmisaaren voimalaitosten ympäristön asukkaille. Helmikuu 2012. [http://www.helen.fi/pdf/salmisaari\\_turvallisuustiedote.pdf](http://www.helen.fi/pdf/salmisaari_turvallisuustiedote.pdf)

Helsingin Energia 2012b. Hanasaaren voimalaitos tuottaa sähköä ja lämpöä. Viitattu 21.12.12. <http://www.helen.fi/ymparisto/hanasaari.html>

Helsingin Energia 2012c. Salmisaaren voimalaitoksesta sähköä ja lämpöä. Viitattu 21.12.2012. <http://www.helen.fi/ymparisto/salmisaari.html>

Helsingin Energia 2013. Biopolttoaineiden käytön lisääminen Helsingin energiantuotannossa. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma. Ramboll.

Helsingin kaupungin tietokeskus, 2012. Helsingin väestöennuste 2013-2050.

Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012. Helsingin ympäristötilasto.

Helsingin kaupunki 2010. Kestävän energiankäytön toimenpideohjelma. Kaupunginjohtajien energia- ja ilmastosopimus. Energiansäästöneuvottelukunta 1.12.2010

Helsingin kaupunki 2011. Parhaat energiatehokkuuskäytännöt. Rakennusvirasto. PEK-selvitys.

Helsingin kaupunki 2012a. Helsingin kaupungin ympäristöraportti 2011.

Helsingin kaupunki 2012b. V Päivitetty Helsingin Energian kehitysohjelma kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. Kaupunginhallitus. Pöytäkirja 09.01.2012

Helsingin kaupunki, Kaupunkisuunnitteluvirasto, 2012. HELSINGIN YLEISKAAVA. Helsingin yleiskaavan lähtökohdat ja työohjelma. *Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2012:2*. 13.11.2012

Helsingin kaupunki 2012a. Energian kulutus on kasvanut Helsingissä. Helsingin kaupunki. Viitattu 22.11.2012.

<http://www.energiatehokashelsinki.fi/energiankulutus-ja-paastot>

Helsingin kaupunki 2012b. HELSINGIN JA HELSINGIN SEUDUN VÄESTÖENNUSTE 2013–2050. Ennuste alueittain 2013–2022.

HSY (Helsingin seudun ympäristöpalvelut) 2012. Pääkaupunkiseudun ilmastoraportti. Päästöjen kehitys 2011.

Holopainen, R.; Vares, S.; Ritola, J.; Pulakka, S. 2010. Maalämmön ja –viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä. *VTT:n tiedotteita – Research Notes 2546*. 56 s.

Holtinen, H. 2008. Tuulivoiman säätö- ja varavoimatarpeesta Suomessa. VTT 7.3.2008

IEA, International Energy Agency 2012a. Key World Energy Statistics 2012

IEA, International Energy Agency 2012b. World Energy Outlook 2012.

IEA-ETSAP & IRENA 2013. Heat Pumps – Technology Brief. *IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E12 – January 2013*

Ilmatieteen laitos 2012. Vuoden 2010 säät. Viitattu 20.12.12  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2010>

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

Jylhä, K.; Kalamees, T.; Tietäväinen, H.; Ruosteenoja, K.; Jokisalo, J.; Hyvönen, R.; Ilomets, S.; Saku, S.; Huttila, A. 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteenlaitoksen raportteja 2011:6

Kallio, J., 2013. GTK 12.3.2013

Kangas, H-L.; Lintunen, J.; Pohjola, J.; Hetemäki, L.; Uusivuori, J. 2011. Investments into forest biorefineries under different price and policy structure. Appendix. *Energy Economics* 33 (2011) 1165-1175

Kilpinen, J. 2002. Tuulivoimaloiden sijaintipaikkaselvitys. Vastaukset lausuntoihin ja mielipiteisiin. Toteuttamisen vaikutusten arviointi. Helsingin kaupunki, Kaupunkisuunnitteluvirasto 3.12.2002.

Koornneef, J.; Junginger, M.; Faai, A. 2007. Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science* 33 (2007) 19–55

Kuitunen, A.; Kangas, H-L.; Lundqvist, A-S.; Niinimäki T. 2013. Eroon fossiilisista – Uusiutuvan energian tulevaisuus suomalaisessa kaupungissa. WWF:n kaupunkienergiaraportti 2013.

Lahti, P.; Nieminen, J.; Virtanen, M. 2008. Ekotehokkuuden arviointi ja lisääminen Helsingissä. Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto ja VTT, 2008.

Lund, P. 2012. Large-scale urban renewable energy schemes – Integration and interfacing aspects. *Energy Conversion and Management* 63 (2012) 162-172

Metso Oyj 2013. Metso toimittaa biomassavoimalaitoksen vihreän energian tuotantoon Vimmerby Energi & Miljölle Ruotsiin. Viitattu 24.4.13 klo 16:30 [http://www.mwpower.fi/mwpower/fi/mwpower\\_news\\_fi.nsf/WebWID/WTB-130221-22576-2D79D?OpenDocument](http://www.mwpower.fi/mwpower/fi/mwpower_news_fi.nsf/WebWID/WTB-130221-22576-2D79D?OpenDocument)

Motiva 2012a. Auringosta sähköä ja lämpöä. Ladattavissa osoitteesta: [http://www.motiva.fi/files/6137/Auringosta\\_lampoa\\_ja\\_sahkoa2012.pdf](http://www.motiva.fi/files/6137/Auringosta_lampoa_ja_sahkoa2012.pdf)

Motiva 2012b. Lämpöä omasta maasta. Ladattavissa osoitteesta: [http://www.motiva.fi/files/6058/Lampoa\\_omasta\\_maasta.pdf](http://www.motiva.fi/files/6058/Lampoa_omasta_maasta.pdf)

Talouselämä 2013. Päästöoikeuksien hintasukellus jatkuu, pitääkö Fortumin pohja?  
Viitattu 20.4.2013.

<http://www.talouselama.fi/uutiset/paastooikeuksien+hintasukellus+jatkuu+pitaako+fortumin+pohja/a2180338>

Tarjanne, R.; Kivistö, A. 2008. Comparison of electric generation costs. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Tutkimusraportti EN A-56.

Tiihonen, Arja 2011. Asumisväljyys lisääntyy hitaasti. Tilastokeskus 2011. Viitattu 12.2.2013 [http://www.stat.fi/tup/vl2010/art\\_2011-10-18\\_001.html](http://www.stat.fi/tup/vl2010/art_2011-10-18_001.html)

Tilastokeskus 2012. Helsingin rakennukset 2011.

Tilastokeskus 2013a. Polttoaineluokitus 2013.

Tilastokeskus 2013b. Kivihiilen ja maakaasun käyttäjähinnat lämmöntuotannossa (ei sis. alv:a)

Tilastokeskus 2013c. Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat lämmöntuotannossa (ei sis. alv:a)

Turkia, V.; Holttinen, H. 2013. Tuulivoiman tuotantotilastot – Vuosiraportti 2011. *VTT Technology*.

Raunio, O. 2012. SEES Espoo. Solar Energy from Existing Structures in Espoo Report.

Sarvaranta, Anni 2010. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Harjoitustyö. Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos.

Suomen Lämpöpumppuyhdistys (Sulpu) ry. 2013. Lämpöpumput. Viitattu 18.3.2013 klo 12:15 <http://www.sulpu.fi/lampopumput>

UN-HABITAT 2011. Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011.

Vanhanen, J.; Pesola, A.; Vehviläinen I. 2011. Koukkurannan lämpöenergiaratkaisuiden vertailu. Loppuraportti 1.12.2011. Gaia.

Ympäristöministeriö 2012. Lakiesitys korjausrakentamisen energiatehokkuusmääräyksistä lausunnoille. *ymparisto.fi* 04.06.2012

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=412713&lan=fi>

YLE 20120. Hanasaaren B-voimalan lähtölaskenta alkoi. 10.1.2012, päivitetty 9.6.2012. Viitattu 21.12.2012 klo 11:45 [http://yle.fi/uutiset/hanasaaren\\_b-voimalan\\_lahtolaskenta\\_alkoi/5057738](http://yle.fi/uutiset/hanasaaren_b-voimalan_lahtolaskenta_alkoi/5057738)

Östersundom-klinikka 2013. Östersundom-klinikan tulosraportti. Yhteenveto työpajojen ja seminaarien aineistoista. Helmikuu 2013.

## Liitteet

### Liite 1. Helsingin energianhankinnan nykytila

<b>Energian hankinta</b>	<b>GWh</b>	<b>Lähde</b>
<b>Energian kokonaishankinta</b>	17170	Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012
<b>Energian nettotuotanto Helsingissä</b>	16343	<i>Nettoyhteistuotanto</i> + <i>Lämmön erillistuotanto</i>
<b>Nettoyhteistuotanto</b>	15067	Energiateollisuus 2011
<b>Sähkö</b>		
<b>Sähkön hankinta</b>	7863	Helsingin Energia 2011
<b>Sähkön tuotanto Helsingissä</b>	5740	<i>Sähkön hankinta</i> * 0,73 (Helsingin Energia 2011)
<b>Sähkö yhteistuotannolla</b>	5596	Energiateollisuus 2011
<b>Sähkön tuonti</b>	2123	<i>Sähkön hankinta – tuotanto Helsingissä</i>
<b>Lämpö</b>		
<b>Kaukolämmön hankinta</b>	7771	Energiateollisuus 2011
<b>Kaukolämmön tuotannosta yhteistuotannolla</b>	6599	Energiateollisuus 2011
<b>Lämmön erillistuotanto</b>	1276	Energiateollisuus 2011

*Taulukko A1: Helsingin energian hankintaa koskevia lukuja*



**Liite 2: Kysynnän kuukausiranteen määrittäminen**

Helsingin energian kuukausikulutusta vastaavia lukuja ei ole saatavilla, joten osuudet laskettiin käyttäen Energiateollisuus ry:n (2012d ja 2012e) kaukolämmön ja sähkön tuotannon kuukausitilastoja Suomessa ilman teollisuuden energiantarvetta. Osuuksien oletetaan vastaavan Helsingin kysynnän vuosirakennetta.

Kaukolämmön kysynnän rakenne on laskettu yhteistuotannolla tuotetun kaukolämmön kuukausitilastoilla (Energiateollisuus ry 2012d). Kunkin kuukauden prosenttiosuus on laskettu osuuksina koko vuoden tuotannosta vuosilta 1992 – 2012, ja näiden keskiarvoista on muodostettu vuosittaisen kysynnän rakenne.

Sähkön kulutuksen kuukausiosuudet on laskettu vastaavalla menetelmällä mutta pienemmällä otannalla, eli kuukausitilastoilla vuosilta 2006 – 2012 (Energiateollisuus ry 2012e). Sähkön kuukausikulutus on laskettu käyttäen sääkoryhtäviä lukuja, sillä Helsingissä sähköä ei juurikaan käytetä lämmitykseen, joten sää ei vaikuta kulutukseen yhtä paljon.

### **Liite 3: Uusiutuvan energian potentiaalien määrittäminen**

Tässä osiossa esitellään menetelmät, joilla uusiutuvan energian paikalliset potentiaalit on arvioitu. Potentiaalit toimivat lähinnä ylärajana, sillä maalämpöskenaariossa yhtään energialähdettä ei käytetä loppuun asti.

#### ***Aurinkoenergia***

Helsingissä vuotuinen aurinkoenergian säteily määrä on 940 kWh per neliometri (Erat ym. 2008). Hyödynnettävyys vaihtelee kuukausittain muun muassa auringon tulokulman ja sään takia, mutta paikallisesti myös esimerkiksi varjostuksella tai katon kulmalla on suuri merkitys.

Aurinkoenergian kokonaispotentiaali määritettiin suhteuttamalla Espoon kattojen aurinkoenergian potentiaalia (Raunio 2012) Helsingin kattopinta-alaan. Jos Espoon potentiaali suhteutettaisiin suoraan Helsingin kattopinta-alaan, joka on noin 17,6 km<sup>2</sup> (laskettu GIS-ohjelmistolla lähteestä MML 2013), kokonaispotentiaali olisi noin 10 000 GWh vuodessa. Koska Helsingin rakennuskanta poikkeaa huomattavasti Espoosta, oletan, että Helsingin katoista huomattavasti alle puolet on hyödynnettävissä aurinkoenergian tarpeisiin. Espoossa katoista aurinkoenergian hyödyntämisen kannalta ihanteellisiksi oli arvioitu 60 prosenttia.

#### ***Aurinkoenergia: Aurinkolämpö***

Motivan (2012) mukaan koko vuoden tuotto optimaalisesti asetetulla keräimellä olisi noin 440 kWh per neliometri. Tällöin hieman alle puolet auringon säteilystä saataisiin talteen (hyötysuhde noin 47 prosenttia). Tuotanto painottuu selvästi kesään, ja marraskuusta tammikuuhun aurinkolämmön tuotto olisi nolla.

Määritin tarvittavan absorptiopinta-alan lähtökohtana tuottaa kaikki heinäkuun lämpöenergia aurinkokeräimillä. Tällöin vuonna 2030 auringon energialla tuotettaisiin vuodessa noin 300 GWh lämpöä. Tätä varten tarvitaan 700 000 neliometriä absorptiopinta-alaa, mikä on koko keräimen pinta-alan kanssa yhteensä noin miljoona neliometriä. Tämä vastaa suunnilleen kuutta prosenttia koko kaupungin kattopinta-alasta.

Aurinkokeräinten hinnat vaihtelevat huomattavasti, eikä myytyjen keräinten hyötysuhteita useinkaan ilmoiteta yksiselitteisesti. Joudun tämän vuoksi tekemään

yksinkertaistavia oletuksia tarjolla olevien aurinkolämpökeräinten perusteella. Erilaisia hintatietoja vertaamalla halvin aurinkolämpöjärjestelmän kustannus olisi 250 euroa per neliometri apertuuripinta-alaa (laskettu lähteestä Greenes 2013). Tästä on vähennetty alv. 24 prosenttia sekä arvioitu 10 prosentin myyjän kate. Tällöin investointikustannus aurinkolämpökeräimiin olisi vuosittain 8 700 000 euroa tai noin 43 miljoonaa euroa per periodi. Kaikkien periodien diskonttaamaton kokonaiskustannus olisi 174 miljoonaa euroa. Aurinkokeräimille ei löytynyt suoraan elinkaaren pituutta, mutta Erat ym. (2008, 91) arvioivat laitteen kestävän 20 vuotta.

### ***Aurinkoenergia: Aurinkosähkö***

Aurinkosähkön potentiaali määritettiin laskemalla tarvittava pinta-ala, joka tarvittaisiin, jotta nykyisillä keskimääräisillä PV-paneelien hyötysuhteilla saataisiin tuotettua 16 prosenttia vuotuisesta sähköntarpeesta. Tämä pinta-ala kerrottiin PV-paneelien hinnalla kWp per neliometri.

PV-paneelien hinnan oletetaan työssä laskevan huomattavasti vuoteen 2030 asti mukaillen Saksan aurinkopaneelien hintojen kehitystä. Saksassa aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet vuoden 2006 5 eurosta (kWp) noin kahteen euroon per kWp vuoteen 2011 mennessä (BSW-Solar 2011). Suomen hintatason oletetaan tällä hetkellä olevan 2,5 €/kWp, josta hinta putoaa 1,3 €/kWp

### ***Bioenergia: Kaasuvoimala***

Yksi lupaava teknologia on puun kaasutus. Erilaisia metsäpolttoaineita (tässä: haketta) kaasuttamalla voidaan saada aikaan maakaasun korviketta (bio-SNG), jota voidaan polttaa kaasuturbiinissa maakaasun lailla. Kaasutuksessa jopa 70 prosenttia metsäbiomassan energiasisällöstä saadaan muutettua kaasuksi. (Hacatoglu, McLellan & Layzell 2010)

Kaasua ei välttämättä kannata tuottaa paikallisesti Helsingissä vaan se kannattaa ostaa alueelta, jossa ylijäämäistä puuta on runsaasti tarjolla, ja jossa kaasutuslaitosinvestointi on taloudellisesti kannattavaa tehdä. Kaasun kuljettaminen putkessa säästää kuljetuskustannuksia, vaikka putken rakentaminen aiheuttaakin kustannuksia.

Jotta kivihiilikapasiteetti saadaan korvattua, täytyy tilalle siis rakentaa lisää maakaasukapasiteettia, jossa poltetaan kaasutettua puuta – ei riitä, että biokaasua syötettäisiin nykyiseen maakaasuverkkoon. Koska teknologia on vielä uutta ja kaasun saanti epävarmaa, emme korvaa kaikkea lämmön tarjontaa bio-SNG-voimalalla. Oletamme laitoksen kooksi 300 MW, jossa tuotetaan 180 MW:n teholla lämpöä ja 90 MW:lla sähköä.

Tarjanne ja Kivistö (2008) ovat arvioineet kombi-kaasuvoimalan investointikustannukseksi 700 euroa per kW. 300 MW:n voimala maksaisi tällöin 210 miljoonaa euroa. Juoksevat kustannukset riippuvat tuotetusta energiasta. Oletamme voimalan toimivan huippukysynnän aikaan 2600 tuntia. Käyttökustannus on kaasuvoimalassa 5 euroa per megawatti, minkä lisäksi tulevat polttoainekustannukset (Tarjanne ja Kivistö 2008). Kuukausittain voimala voi tuottaa 130 GWh lämpöä ja 65 GWh sähköä. Jos voimala toimisi pelkästään talvikauden, tuotettaisiin sillä yhteensä 1300 GWh energiaa. Käyttökustannus olisi tällöin 6,6 miljoonaa euroa vuodessa.

Bio-SNG:n hinnan selvittäminen ei ole yksinkertaista, sillä kaasutustekniikka ei käytetä suuressa mittakaavassa. Kaasun hinnasta voidaan saada viitteitä tutkimalla maakaasun hintaa, tai tuotantoon tarvittavan hakkeen hintaa. Maakaasun hinta on lähes nelinkertaistunut 2000-luvulla noin 13 eurosta 47 euroon (Tilastokeskus 2013b). Metsähakkeen hinta on noussut vuoden 2007 13 eurosta nykyiseen 19 euroon per MW (Tilastokeskus 2013c). Analyysissä käytetty arvo perustuu arvioon kaasutukseen tarvittun metsähakkeen hinnasta sekä suurpiirteiseen arvioon sen prosessointikustannuksista. Etenkin jälkimmäinen puoli on erittäin epävarma. Tähän ei ole laskettu mukaan kaasun kuljettamiseen liittyviä kustannuksia, kuten putken rakennuskustannuksia.

### ***Bioenergia: Hakevoimalat***

Bio-SNG-voimalan lisäksi huippukulutuskaudelle tarvitaan muita lämmöntuotantolähteitä. Tärkeää olisi voida hyödyntää erilaisia biomassoja, jotta polttoaineen saatavuus olisi mahdollisimman turvattu. Tämän mahdollistaa muun muassa kerrosleijutekniikka (Koornneef, Junginger & Faaij 2007.) Kerrosleijutekniikan avulla voidaan hyödyntää myös polttoaineita, joiden lämpöarvo

on pieni, kuten haketta ja muita metsätähteitä. Se soveltuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon.

Kokonaan biomassaa käyttävät laitokset eivät ole kapasiteetiltaan kovin suuria, joten niitä tarvitaan useampi kappale. Esimerkkilaitoksemme polttoaineteho on 38 MW, jolla syntyy 26 MW sähköä ja 7 MW lämpöä. Tässä skenaariossa kerrosleijuvoimaloita otetaan käyttöön yhteensä kuusi kappaletta ja niitä käytettäisiin kolmena huippukysynnän kuukautena. Yhden tämän kokoisen laitoksen investointikustannus on 25 miljoonaa euroa (Metso Oyj, 2013).

Polttoainekustannukset laskemme olettamalla pääpolttoaineeksi hakkeen. Kuljetuskustannus ja kustannuksista syntyvät päästöt on otettava mukaan laskelmiin. Kuljetuskustannukset on laskettu käyttämällä Kankaan (2010) väitöskirjassa käytettyä logaritmista kerrointa metsähakkeelle. Kerroin ilmentää sitä tosiasiaa, että kuljetuskustannukset kasvavat sitä nopeammin, mitä enemmän haketta hyödynnetään.

### ***Lämpöpumput***

Maalämmön potentiaalien arviointi lähti oletuksesta kattaa 80 prosenttia huipputehon tarpeesta maalämmöllä. Maalämmön vuosittaisen hyödynnyksen rakenne mukaillee Holopaisen ym. (2010, 17 – 22) tutkimuksessa oletettuja maalämmön kuukausittaisia tuotantomääriä. Tehoihin suhteutettu tarvittavien porakaivojen määrä ja kaivojen keskimääräinen syvyys arvioitiin Geodrill Oy:n (2013) referenssien perusteella. Kun lämpökaivojen oletetaan sijaitsevan vähintään 15 metrin päässä toisistaan, pinta-alan tarve olisi 0,9 neliökilometriä.

Myös kustannusaineisto on peräisin Holopaisen ym. (2010, 32) tutkimuksesta. Koska maalämpöskenaarion laajuudessa maalämmön hyödynnyksessä on järkevää käyttää suurempia maalämpöpumppuja, on kustannukset laskettu tutkimuksen suurimmalla pumpulla, jonka teho on 60 kW.

### ***Tuulivoima***

Tuulivoiman tarpeen arvioinnissa lähdettiin liikkeelle jäljelle jääneen sähköenergian korvaamisesta huippukulutuskaudella eli talvella. Lopullinen voimaloiden määrä arvioitiin Lundin (2012) tutkimuksesta, jossa oli arvioitu tuulivoimaloiden määriä eri osuuksilla Helsingin tuotannosta. Laskelma tehtiin 3 MW:n voimaloille.

#### **Liite 4: Energiatehokkuustoimenpiteiden kustannusten määrittäminen**

Suomessa energiakorjausten merkitystä ovat tutkineet muun muassa Airaksinen ja Vainio (2012) sekä Helsingissä Lahti, Nieminen ja Virtanen (2008). Energiatehokkuusparannusten kustannusten määrittäminen ei ole yksinkertaista, sillä niitä on käytännössä vaikea erottaa korjausrakentamisen peruskustannuksista (Airaksinen ym. 2013). Airaksinen ja Vainio (2012) sekä Deng ym.(2011) ovat arvioineet neliökohtaisia energiaterhoikkustoimenpiteiden rajakustannuksia, ja hyödynnän näitä lukuja työssäni.

Deng ym. (2011, 201) arvioivat kustannuksia eristyksen parantamiselle, ilmastonmuutokselle sekä poistoilman talteenotolle. Kustannus olisi yhteensä 169 euroa per neliö, ja kun nämä toimet tehtäisiin 90 prosentissa korjausrakennettuja neliöitä, olisi lopullinen kustannus noin 150 euroa per neliö.

Airaksisen ja Vainion (2012, 18 – 19) tutkimuksessa on laskettu julkisivukorjausten, ikkunoiden uusimisen, paineen alennuksen ja veden säästön sekä ilmanvaihdon uudistamisen lisäkustannukset. Jos nämä kaikki toimet tehtäisiin, vaihtelisi neliökustannus 70 ja 105 euron välillä. Airaksisen ja Vainion tutkimus ei sisällä poistoilman talteenottoa.

Tässä tutkielmassa päädyttiin käyttämään kotimaisen tutkimuksen alinta summaa (70 euroa), sillä suuren kysynnän oletetaan laskevan hintoja matalalle.

**Liite 5: Kustannus-hyötyanalyysin tulokset**

	<b>PV(B)</b>	<b>PV(C)</b>	<b>NPV=PV(B)- PV(C)</b>
<b>Vuoteen 2030</b>	1 768 453 210	5 089 029 612	<b>-3 320 576 402</b>
<b>Vuotuinen keskiarvo</b>	88 422 661	254 451 481	<b>-166 028 820</b>
<b>Vuoteen 2050</b>	4 347 910 206	6 499 144 423	<b>-2 151 234 217</b>
<b>Vuotuinen keskiarvo</b>	108 697 755	162 478 611	<b>-53 780 855</b>
<b>Vuoteen 2100</b>	8 159 627 311	8 481 445 741	<b>-321 818 430</b>
<b>Vuotuinen keskiarvo</b>	90 662 526	89 569 622	<b>-3 575 760</b>

*Taulukko A2: Kustannus-hyötyanalyysin tulokset ja vuotuiset keskiarvot eri aikahorisonteille*

**Liite 6: Herkkyysanalyysin tulokset**

<b>Vuoteen</b>	<b>10 %</b>	<b>5 %</b>	<b>2 %</b>	<b>0,5 %</b>
<b>2030</b>	-1 542 665 903	-2 381 035 872	-3 265 994 572	-3 887 598 272
<b>2050</b>	-1 393 323 288	-1 847 698 790	-2 057 338 380	-2 037 864 653
<b>2100</b>	-1 358 004 133	-1 485 026 138	-227 922 593	2 421 410 023

*Taulukko A3: Koron vaikutus nettonykyarvoon eri aikahorisonteilla korkotasolla 10, 5, 2 ja 0,5 prosenttia*

<b>Vuoteen</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>
<b>2030</b>	-3 464 522 943	-3 265 994 572	-3 067 466 201	-2 868 937 830
<b>2050</b>	-2 644 087 656	-2 057 338 380	-1 470 589 104	-883 839 828
<b>2100</b>	-1 316 755 049	-227 922 593	860 909 863	1 949 742 319

*Taulukko A4: Päästöoikeuden hinnan vaikutus nettonykyarvoon hinnoilla 0, 25, 50 ja 75 €/1000 t CO<sub>2</sub>*

<b>Vuoteen</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>
<b>2030</b>	-3 675 157 852	-3 265 994 572	-2 965 994 952
<b>2050</b>	-3 629 361 985	-2 057 338 380	-1 533 435 769
<b>2100</b>	-3 253 020 214	-227 922 593	636 396 585

*Taulukko A5: Kivihiilen hinnan vaikutus nettonykyarvoon hinnoilla 15, 30 ja 45 €/MWh*

<b>Vuoteen</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
<b>2030</b>	-3 265 994 572	-3 265 994 572	-3 265 994 572	-3 265 994 572
<b>2050</b>	-1 842 256 050	-2 057 338 380	-2 272 420 710	-2 487 503 040
<b>2100</b>	265 324 100	-227 922 593	-721 169 285	-1 214 415 977

*Taulukko A6: Bio-SNG:n hinnan vaikutus nettonykyarvoon hinnoilla 25, 50, 75 ja 100 €/MWh*



## Liite 7: Vertailuskenaario: Biovoima

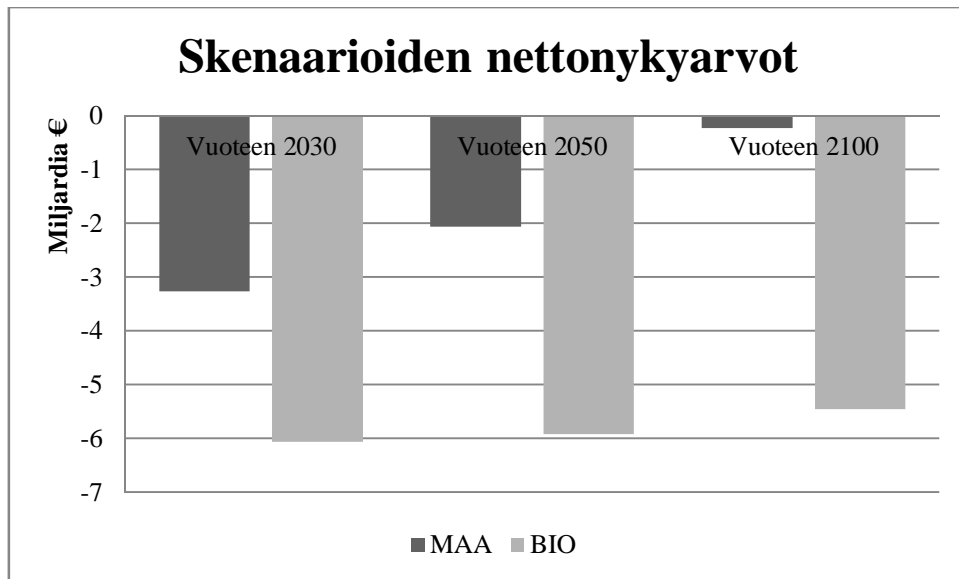
Maalämpöskenaarion rinnalle muodostettiin vertailuskenaario, jossa valtaosa lämmöstä tuotetaan bioenergialla. Hyödynnettävät tekniikat ovat samat kuin maalämpöskenaariossa mutta hyödynnyssuhteet eroavat hieman. Pieniä hakevoimaloita rakennetaan 10 kappaletta eli neljä enemmän kuin edellisessä ja niitä käytetään myös peruslämmöntuotantoon. Tämän vuoksi hakkeen kysyntä lisääntyy maalämpöskenaarioon nähden huomattavasti ja erityisesti siirtymäkaudella (2010-2030) hakkeen käyttö on hyvin runsasta. Lisäksi bio-SNG-kaasulla toimivan voimalan käyttötunnit noin kaksinkertaistuvat. Tämä vähentää maalämpökapasiteetin tarvetta noin sadalla megawatilla, jolloin myös sähkötehon tarve pienenee ja tuulivoimaloiden tarve tippuu viidellä voimalalla. Aurinkoenergian määrät pysyvät samoina.

Kahden skenaarion uusiutuvan energian tehot nähdään taulukossa A2.

Tuotantomuoto	Maalämpöskenaario	Biovoimaskenaario
Maalämpö	230	130
Aurinkolämpö	1 km <sup>2</sup>	
Aurinkosähkö	204	
Merituulivoima	180	165
Maatuulivoima	45	45
Bio-SNG- kaasuvoimala	300	300
Hakevoimala	228	380

Taulukko A7: Uusiutuvan energian tehot maalämpö- ja biovoimaskenaariossa

Hakkeen mittavassa käytössä kuljetuskustannukset nousevat merkittäviksi, jopa korkeammiksi kuin laitosten investointikustannukset. Tämän vuoksi kustannus-hyötyanalyysissa saatu nettonykyarvo on huomattavasti alhaisempi kuin maalämpöskenaariossa. Koska näin mittava hakkeen käyttö ei olisi realistista, on suuremmin biomassaan nojaava skenaario jätetty pois hankevaihtoehdoista.



*Kuva A1: Maalämpöskenaarion ja biovoimaskenaarion vertailu*

Kuvassa A1 ovat maa- ja biolämpöskenaarioiden nettonykyarvot eri aikahorisonteilla. Kuvasta nähdään, että biovoimaskenario olisi selvästi kannattamattomampi kuin maalämpöskenario kaikilla aikahorisonteilla.