

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

*Karoliina Pluuman*

**LASKENTAMENETELMISSÄ TEHTÄVIEN VALINTOJEN MERKITYS  
ALUEELLISEN LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANNON KASVIHUONEKAASU-  
PÄÄSTÖJEN KANNALTA**

Työn tarkastajat:

Professori, TkT Risto Soukka  
Tutkijatohtori, TkT Jukka Heinonen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Karoliina Pluuman

### **Laskentamenetelmissä tehtävien valintojen merkitys alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen kannalta**

Diplomityö

2014

97 sivua, 13 taulukkoa, 41 kuvaa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Risto Soukka  
Tutkijatohtori Jukka Heinonen

Ohjaaja: Tohtoriopiskelija Eeva Säynäjoki

Hakusanat: lämmön- ja sähköntuotanto, kasvihuonekaasupäästöt, laskentamenetelmävalinnat, alueellinen energiantuotanto, allokointimenetelmät

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon laskentamenetelmävalintojen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin. Työn tutkimuskysymyksenä on, onko mahdollista, että laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla. Laskentamenetelmävalinnoista tutkitaan tarkemmin CHP-laitoksen päästöjen allokoitintavan ja sähkönpäästöjen määrittämisen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin.

Tutkimusmenetelminä työssä on käytetty kirjallisuuskatsausta sekä tapaustutkimusta. Kirjallisuuskatsauksen aineistona käytetään tieteellisiä artikkeleita ja tutkimusraportteja. Tapaustutkimuksessa tutkitaan yksittäistä case-kohdetta, joka on Tampereen Härmälänrannan uudisrakennusalue, ja jossa vertaillaan maalämpöpumppua ja kaukolämpöä alueen lämmitysratkaisuina.

Työn tuloksena todetaan, että on olemassa sellaisia tilanteita, joissa laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla. Lisäksi case-tarkastelun perusteella huomataan, että laskentamenetelmävalinnoilla on sitä suurempi merkitys, mitä enemmän CHP-laitoksessa käytetään uusiutuvaa polttoainetta. Työn johtopäätöksenä voidaan todeta, että energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennassa on syytä ymmärtää ja huomioida eri laskentamenetelmävalintojen vaikutus esitettyihin tuloksiin.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
LUT Energy  
Degree Program of Environmental Technology

Karoliina Pluuman

### **The importance of the calculation method choices of greenhouse gas emissions from local heat and electricity production**

Master's Thesis

2014

97 pages, 13 charts, 41 figures and 3 appendices

Examiners: Professor Risto Soukka  
Postdoctoral researcher Jukka Heinonen

Supervisor: Doctoral student Eeva Säynäjoki

Keywords: heat and electricity production, greenhouse gas emissions, calculation method choice, local energy production, allocation methods

The purpose of this master's thesis is to study the importance of the calculation method choices of greenhouse gas emissions from local heat and electricity production. The research question is whether it is possible that the choice of calculation methods has a greater impact on the region's greenhouse gas emissions than the choice of energy production technology. From the choice of calculation methods, further evaluation is done for the allocation of CHP plant's emissions and the determination of electricity's greenhouse gas emissions.

As research methods the literature review and case study are used in this thesis. The materials used in the literature review are scientific articles and research reports. In the case study a single case is examined. The case study area is a new building zone in Härmälänranta in Tampere and the comparison of the heating solution is made between geothermal heat pumps and district heating.

As a result of the study, it is found that there are situations in which the choice of calculation methods has a greater impact on the region's greenhouse gas emissions than the choice of energy technology. In addition, it was found that the choice of calculation methods is more important, the more the CHP plant uses renewable fuel. In conclusion of the study can be noted that in the greenhouse gas emission calculation of energy production it is important to understand and take into account the effects of the choice of calculation methods on the results presented.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö toteutettiin Aalto-yliopiston, VTT:n ja SYKE:n yhteiseen KEKO B -projektiin liittyen. Haluan kiittää kaikkia projektiin osallistuneita mielenkiintoisesta projektista ja kiinnostavasta diplomityöaiheesta.

Kiitos Risto Soukalle ja Jukka Heinospelte työni tarkastamisesta ja ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää työni ohjaajaa Eeva Säynäjokea kannustavasta ohjauksesta. Suuri kiitos myös kiinteistöliiketoiminnan muulle henkilökunnalle hyvästä työilmapiiristä ja neuvoista diplomityöprosessin aikana.

Kiitos myös perheelleni, joka on tukenut ja kannustanut minua opinnoissani, sekä ystäväilleni hyvistä neuvoista ja vertaistuesta.

Wiesbadenissa 20.9.2014

Karoliina Pluuman

# SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	2
1 JOHDANTO .....	4
1.1 Tutkimuksen tavoitteet .....	7
1.2 Tutkimuksen rajaukset .....	7
1.3 Tutkimusmenetelmät .....	8
1.4 Tutkimuksen aineisto, kulku ja rakenne .....	9
2 ENERGIANKULUTUS JA -TUOTANTO SEKÄ ALUEELLISET ENERGIARATKAISUT SUOMESSA .....	12
2.1 Energiankulutus ja -tuotanto Suomessa .....	12
2.2 Alueellinen energiantuotanto ja energiaverkot .....	20
3 ENERGIANTUOTANNON ELINKAARENAIKAISET KASVIHUO- NEKAASUPÄÄSTÖKERTOIMET .....	35
4 KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖLASKENNAN LASKENTAMENE- TELMÄVALINNAT .....	41
4.1 CHP-tuotannon päästöjen allokoiminen .....	41
4.2 Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt .....	47
5 CASE: HÄRMÄLÄNRANTA .....	50
5.1 Laskentaperiaatteet .....	54
5.2 Laskenta .....	58
5.3 Case-tarkastelun tulokset .....	69
6 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI .....	72
7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	82
8 YHTEENVETO .....	86
LÄHTEET .....	88

## LIITTEET

Liite I	Sähköntuotannon energiamuotojen elinkaarenaikaiset kasvi- huonekaasupäästöt kirjallisuuden perusteella
Liite II	Sähköntuotannon keskiarvoisen kasvihuonekaasupäästökerto- imen laskenta
Liite III	Lämmitystarveluvut Tampereella 1971–2000

## SYMBOLILUETTELO

$E$	energia [GWh/a], [GWh/kk]
$F$	laskennallinen energiamuodon polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa [GWh/a]
$F'$	vaihtoehtoisen energiamuodon erillistuotannon polttoainekulutus [GWh/a]
$S_N$	lämmitystarveluku [%]
$t$	aika [kk]
$\eta$	hyötysuhde [-]

### Alaindeksit

e	sähkö
h	lämpö
kk	kuukausi
lkv	lämpimän käyttövedentarve
lä	lämmitysenergiantarve
p	teho

### Lyhenteet

ALCA	haitanjaollisen lähestymistavan elinkaariarviointi (engl. attributional life cycle assessment)
CHP	yhteistuotantolaitos (engl. combined heat and power)
CLCA	seurausvaikutuksellisen lähestymistavan elinkaariarviointi (engl. consequential life cycle assessment)
CO <sub>2</sub> -ekv.	hiilidioksidiekvivalentti
COP-luku	lämpöpumpun lämpökerroin eli tuotetun lämmön suhde käytettyyn sähköenergiaan
DN	nimellinen halkaisija milleissä (engl. diameter nominal)
EEA	Euroopan ympäristökeskus (European environmental agency)
ERA17	Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017
HINKU	Kohti hiilineutraalia kuntaa –hanke
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut

IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (engl. International Energy Agency)
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change)
ka	keskiarvo
KASVENER	Alueellinen kasvihuonekaasupäästöjen arviointimalli
KEKO	Kaupunkien ja kuntien alueellinen ekolaskuri
KL	kaukolämpö
KURKE	Kunnallisen rakentamisen kestävät energiaratkaisut -laskuri
LCA	elinkaariarviointi (engl. life cycle assessment)
LCC	elinkaarikustannusarviointi (engl. life-cycle cost analysis)
MLP	maalämpöpumppu
ORC	Organic Rankine Cycle -prosessi
pa	polttoaine
RES-direktiivi	Uusiutuvan energian direktiivi
toe	öljyekvivalenttitonni (engl. tons of oil equivalent)
UNFCCC	YK:n ilmastonmuutoskonventti (engl. The United Nations Framework Convention on Climate Change)
WWF	Maailman luonnonsäätiö (engl. World Wide Fund for Nature)

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillitseminen on edelleen ajankohtainen aihe, vaikka Kioton velvoitekausi päättyikin vuoteen 2012 eikä uutta sitovaa kansainvälistä ilmastopöytäkirjaa ole vielä saatu sovittua. Vuonna 2010 hallitukset YK:n alaisuudessa sopivat, että kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä niin, että globaali lämpötilannousu jää alle kahden Celsius-asteen (UNFCCC 2013). Kansainvälisten ilmastotavoitteiden lisäksi monet alueet, maat ja kaupungit ovat määritelleet omia ilmastotavoitteitaan.

Suomi on muiden EU-maiden tavoin sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään. Tämänhetkinen päästötavoite on niin sanottu Eurooppa 2020 -suunnitelma, jonka mukaan EU-maat pyrkivät vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 20 prosenttia verrattuna vuoden 1990 tasoon, nostamaan uusiutuvan energian osuuden 20 prosenttiin energian loppukäytössä ja parantamaan energiatahokkuutta 20 prosenttia. Kyseiset tavoitteet tulee täyttää vuoteen 2020 mennessä. EU:n päästövähennystavoite nousee 30 prosenttiin, jos muut kehittyneet maat sitoutuvat vastaaviin päästövähennyksiin ja taloudellisesti edistyneemmät kehitysmaat sitoutuvat riittävässä määrin päästöjen vähentämiseen. (European commission 2010, 11.) Tavoitteet ovat EU:n yleistavoitteita, jotka on sovitettu kansallisiksi tavoitteiksi. Suomen osalta kansallinen hiilidioksidipäästöjen vähennystavoite on 16 prosenttia, energiatehokkuus eli energiakulutuksen vähennys on 4,21 Mtoe ja uusiutuvan energian tavoite on 38 prosenttia energian loppukäytöstä. (Euroopan komissio 2013.) EU:n 20-20-20 tavoitteiden lisäksi Suomessa on sitouduttu myös ERA17 eli Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017 -toimintaohjelmaan. ERA17 sisältää EU 20-20-20 tavoitteet, mutta ne pyritään täyttämään jo vuonna 2017, jolloin Suomen itsenäistymisestä on kulunut sata vuotta. (Martinkauppi (toim.) 2010, 17–18.)

Suomi on tällä hetkellä saavuttamassa Kioton sopimuksen ensimmäisen velvoitekautensa tavoitetason (Tilastokeskuksen katsauksia 2013, 10). Kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaraportissa (2013, 72) todetaan, että strategiassa kuvatun perusskenaarion mukainen kehitys olisi suurelta osin täyttämässä EU:n vuodelle 2020 asettamat tavoitteet kasvihuonekaasupäästöjen, energiatehokkuuden ja uusiutuvan energian osalta. Raportissa todetaan myös, että Euroopan unionin 2050 vuoden 80 prosentin päästövähennystavoite vaatii



kuitenkin perusskenaarion lisäksi EU:lta paljon muita toimenpiteitä vähähiilisen yhteiskunnan saavuttamiseksi.

Suomessa ylivoimaisesti suurin kasvihuonekaasujen päästölähde on energiasektori, jonka osuus kokonaispäästöistä oli vuonna 2011 noin 80 prosenttia. Muita merkittäviä päästölähteitä Suomessa ovat teollisuusprosessit ja maatalous. (Tilastokeskuksen katsauksia 2013, 10.) IEA arvioi, että maantieteellisesti kaupungit ovat vastuussa yli 70 prosentin osuudella energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöistä (World Energy Outlook 2008, 180). Kaupungeilla onkin näin ollen suuri merkitys kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistoimissa. Lähienergiaratkaisut on nähty yhtenä tärkeänä keinona vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Kansallinen ilmasto- ja energiastrategia 2013, 19, 26, 32). Tämän vuoksi aluenäkökulman huomioiminen ilmanmuutoksen vastaisissa toimissa on tärkeää. Termeillä ”aluetasoinen” ja ”alueellinen” tarkoitetaan tässä työssä maantieteellistä rajausta, joka voi olla kokonainen kaupunki, kunta, useammista kunnista koostuva alue tai kaupungin tai kunnan mikä tahansa yksittäistä tonttia tai rakennusta suurempi osa, esimerkiksi asuntoalue tai kortteli.

Kaupungeilla on paljon vaikutusmahdollisuuksia ja halua tehdä ilmastotyötä. Hoornwegin et al. (2011) tutkimuksen mukaan kaupunkien on helpompi reagoida kansalaisten toiveisiin ja pyrkimykseen kuin korkeamman tason hallinnon, ja näin ollen kaupunkien pyrkimyksillä on huomattava maailmanlaajuinen vaikutus. Hoornweg et al. mukaan esimerkiksi USA:ssa 1 017 kaupunkia on sitoutunut Kioton pöytäkirjan tavoitteisiin, kun taas kansallinen hallitus on kieltäytynyt allekirjoittamasta sopimusta. Kansallisen ilmasto- ja energiastrategian taustaraportin (2013, 28) mukaan Suomessa moni kunta on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään ja yli 40 prosenttia Suomen kunnista tekeekin suunnitelmallista ilmastotyötä ja noin kolmannes on laatinut oman ilmastostrategiansa. Tällaisia hankkeita ovat esimerkiksi HINKU-hanke, jossa mukana olevat kunnat ovat sitoutuneet 80 prosentin kasvihuonekaasupäästövähennykseen vuoteen 2030 mennessä vuoden 2007 toimiessa vertailutasona. Muita alueellisia hankkeita ovat muun muassa ECO2- Ekotehokas Tampere 2020, jonka tavoitteena on toteuttaa kaupungin ilmastositoumukset sekä kehittää ekotehokasta ja vähähiilistä kaupunkia, sekä Skaftkärrin asuinalue Porvoossa, jossa pyritään luomaan energiatehokas asuinalue. (HINKU-foorumi, Tampereen kaupunki 2013a, Rajala et al. 2010, 11–15.) Kansainvälisesti ja kansallisesti on myös kehitetty ja kehitetään edelleen erilaisia laskentatyökaluja rakennusten ja alueiden energia- ja ekotehokkuusvertailuun.

Tällaisia kotimaisia laskureita ovat esimerkiksi KURKE - Kunnallisen rakentamisen kestävät energiaratkaisut -laskuri ja KEKO B - Kaupunkien ja kuntien alueellinen ekolaskuri (KURKE 2013, Kaupunkien ja kuntien alueellinen ekolaskuri - KEKO B 2013).

Ei kuitenkaan ole aina itsestään selvää, että hankkeista ja laskureista saadut tulokset osoittavat yksiselitteisesti eri vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksen kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Tämä johtuu siitä, että kasvihuonekaasupäästölaskennan takana on eri laskennan vaiheita, joissa on tehty laskentamenetelmävalintoja. Nämä laskentamenetelmävalinnat puolestaan vaikuttavat energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennasta saatuihin tuloksiin ja kasvihuonekaasupäästölaskennan nämä tuloksiin vaikuttavat valinnat on esitetty kuvassa 1.

<b>Kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin vaikuttavat valinnat</b>		
Energiatekniikan valinta	Kasvihuonekaasupäästökertoimen valinta	Laskentamenetelmävalinnat

**Kuva 1.** Energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttavat valinnat.

Kasvihuonekaasupäästöjen tulokset ovat näin ollen riippuvaisia energiatekniikan lisäksi erilaisista laskentavalinnoista. IPCC (2006, 10–11) esittää, että monet eri epävarmuustekijät vaikuttavat kasvihuonekaasupäästöjen inventointiin ja sitä kautta kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin. Huijbregts (1998) taas nostaa elinkaarilaskennan yhdeksi epävarmuudeksi ja tuloksiin vaihtelevuutta aiheuttavaksi tekijäksi päätöksistä johtuvat valinnat, kuten usean tuotoksen prosessin allokoititavan valinnan. Laskentamenetelmävalinnoista johtuvia kasvihuonekaasupäästölaskelmien eroja on käsitelty myös mediassa. Esimerkiksi Helsingin Sanomissa tästä asiasta kirjoitettiin Kasvihuonekaasupäästöjen erilaiset laskutavat hämmentävät -artikkelissa, jossa todettiin, että erilaiset laskentatavat ja niistä johtuvat erilaiset tulokset hämmentävät ilmastonmuutoksesta huolestuneita kansalaisia (Pyykkönen 2008).

Onkin tärkeä ymmärtää erilaisten laskentamenetelmävalintojen vaikutukset energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin. On myös tärkeää ymmärtää ja tunnistaa

sellaiset tilanteet, joissa laskentamenetelmän valinta saattaa vaikuttaa kasvihuonekaasupäästölaskennan lopputulokseen enemmän kuin valittu energiatekniikka.

## 1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon laskentamenetelmävalintojen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin. Alueellisella energiantuotannolla tarkoitetaan tässä työssä energiaratkaisuja, joiden ensisijainen tarkoitus on palvella alueen rakennuskohteita. Käytännössä alueellista energiantuotantoa ovat lämpöpumput, aurinkosähkö- ja lämpö, pientuulivoimalat, CHP- tai lämpölaitokset ja -kattilat, jotka tuottavat lämpö- tai sähköenergiaa rakennuskohteiden käyttöön. Lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin vaikuttavat tietyt valinnat, kuten johdannossa aiemmin todettiin. Tässä työssä on haluttu perehtyä energiatekniikan valinnan ja laskentamenetelmävalintojen vaikutuksiin kasvihuonekaasupäästölaskennassa.

Tämän työn tutkimuskysymys on

- Onko mahdollista, että laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla?

Laskentamenetelmävalinnoista käsitellään tarkemmin CHP-laitoksen kasvihuonekaasupäästöjen allokointitavan ja sähkön kasvihuonekaasupäästöjen määrittämisen vaikutuksia alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöihin. Työssä tehdään case-tarkastelu, jossa tutkittavan alueen lämmitysratkaisuna vertaillaan CHP-laitoksessa tuotettua kaukolämmön ja maalämpöpumpun kasvihuonekaasupäästöjä tutkimuskysymyksen näkökulmasta. Case-kohteena on Tampereen Härmälänranta, jonne on tehty myös aiempaa tutkimusta lähienergiaratkaisuihin liittyen (Ristimäki et al. 2013).

## 1.2 Tutkimuksen rajaukset

Tässä työssä tarkastelu on rajattu koskemaan sähkön- ja lämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästöjä. Työssä käytettävät kasvihuonekaasupäästökertoimet ovat elinkaarisia päästökerroimia, jotka ovat peräisin kirjallisuuskatsauksen tuloksista. Elinkaariarviointi tarkoittaa, että tarkastelussa otetaan huomioon tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ym-

päristövaikutukset. Tässä työssä toiminnallinen yksikkö on uudisrakennusalueen lämmön- ja sähköntarve vuoden aikana. Toiminnallisella yksiköllä tarkoitetaan tuotantojärjestelmän määrällistä suorituskykyä, jota käytetään referenssiyksikkönä esimerkiksi vertailtaessa tulosta toisen tuotantojärjestelmän kanssa. (ISO 14040.) Tässä työssä kasvihuonekaasupäästöt huomioidaan raaka-aineiden hankinnasta, rakentamisesta ja käytöstä aina tuotteen hävittämiseen ja rakennuksen purkuun. Järjestelmän rajaamisella tarkoitetaan sitä, mitkä yksikköprosessit elinkaariarviointiin otetaan mukaan. Järjestelmän rajat tulee valita yhdenmukaisesti selvityksen tavoitteiden kanssa. (ISO 14044.) Tässä työssä järjestelmän ulkopuolelle on rajattu CHP-laitoksessa tuotettu sähköenergia.

Koska tarkastelussa keskitytään tutkimaan Suomessa syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä, sähköntuotanto on rajattu koskemaan vain Suomessa tuotettua sähköä. Jos sähkön kasvihuonekaasupäästöt laskettaisiin koko sähkömarkkinat käsittävältä alueelta, laskennasta tulisi liian monimutkainen, sillä pohjoismaiden, Viron ja Liettuan lisäksi Nord Pool -alue on yhdistetty Venäjän, Puolan ja Saksan sähkömarkkinoihin.

### **1.3 Tutkimusmenetelmät**

Tässä diplomityössä tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta ja tapaustutkimusta. Creswellin (2009, 23–26) mukaan kirjallisuuskatsaus on metodi, jossa kootaan jo olemassa olevan tutkimuksen tuloksia, joita käytetään sitten uuden tutkimuksen aineistona. Hänen mukaansa kirjallisuuskatsaus kertoo aiheesta aiemmin tehdyn tutkimuksen tulokset ja rinnastaa tutkimuksen laajempaan kirjallisuussdialogiin täyttäen ja laajentaen vanhoja tutkimuksia. Finkin (2010, 3) määrittelee kirjallisuuskatsauksen systemaattiseksi, täsmälliseksi, toistettavissa olevaksi metodiksi, jolla voidaan tunnistaa, arvioida ja tiivistää valmiina olevaa tutkimustietoa. Kuvassa 2 on esitetty Creswellin suositus kirjallisuuskatsauksen etenemisestä.



**Kuva 2.** Creswellin suositus kirjallisuuskatsauksen etenemisestä (Creswell 2009, 29).

Tapaustutkimuksessa tutkitaan yksittäistä tapahtumaa, rajattua kokonaisuutta tai yksikköä, käyttämällä eri menetelmillä hankittuja tietoja. Tapaustutkimus voidaan jakaa tutkivaan, kuvailevaan ja selittävään strategiaan. Tutkimuskysymykset määritellään pääasiassa miten ja miksi -kysymysten avulla. (Yin 1994, 3–13.) Tapaustutkimuksessa tarkoitus on lisätä tietoa tietystä ilmiöstä siihen liittyvässä kontekstissa. Menetelmä ei tarjoa yleistettävää tietoa, mutta saatu tieto voi ylittää yksittäistapauksen. Lisäksi tulosten arvioinnissa tuloksia voidaan pohtia laajemmassa kontekstissa, varsinkin mikäli aineistosta ja analyysistä on esittää tarkka kuvaus. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006.) Yhden tapauksen tapaustutkimuksella voidaan tehdä yleistys, että jos väite on voimassa tässä tapauksessa, se on voimassa kaikissa samankaltaisissa tapauksissa. Samankaltaisesti sillä voidaan yleistää, että jos väite ei ole voimassa tässä tapauksessa, se ei myöskään ole voimassa missään samankaltaisessa tapauksessa. (Flyvbjerg 2006.) Jos tapaustutkimusten määrää lisätään, voidaan niiden avulla todentaa, että tietyllä yksittäisestä tapauksesta luodulla teorialla voidaan tutkia tietynlaisia tapauksia tai vaihtoehtoisesti kumota se, ettei luotu teoria sovellu tietyn tyyppiin tapauksiin. (Eisenhardt & Graebner 2007.)

#### 1.4 Tutkimuksen aineisto, kulku ja rakenne

Tämän työn kirjallisuuskatsauksen aineistona käytetään tieteellisiä artikkeleita sekä tutkimusraportteja, kuten Tilastokeskuksen ja Euroopan komission julkaisuja. Kirjallisuuskatsaus aloitettiin määrittelemällä työn avainsanat, joilla aineistoa haettiin. Taulukossa 1 on esitetty tämän työn kirjallisuuskatsauksen aineistonhaussa käytetyt avainsanat ja avainsanojen yhdistelmät.

**Taulukko 1.** Kirjallisuuskatsauksen aineistonhaussa käytetyt avainsanat ja avainsanojen yhdistelmät.

Avainsanat	LCA, Greenhouse Gases (GHG), GHG reduction, built environment, energy network, electricity production, marginal electricity, district heat, CHP production, ground source heat pump
Avainsanojen yhdistelmät	GHG reduction + grid, GHG reduction + electricity, LCA + energy, uncertainty + LCA, uncertainty + GHG

Näiden avainsanojen avulla aineistoa haettiin sekä Lappeenrannan teknillisen yliopiston että Aalto-yliopiston tunnuksilla Nelli-tietokannasta ja Google Scholarista. Tieteellisiä artikkeleita haettiin noin sata kappaletta, joista tarkempaan tarkasteluun otettiin noin kuumikymmentä. Nämä valikoidut artikkelit koottiin Excel-tiedostoon ja jaettiin seuraaviin kategorioihin: energiantuotannon päästöt elinkaarinäkökulmasta, lähienergiantuotanto, kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen ja laskentamenetelmävalinnat. Tämän jälkeen aineistoa käytiin edelleen läpi, jolloin tutkimukselle hyödylliset noin 40 artikkelia valikoituivat.

Työn tapaustutkimusosassa tutkitaan yksittäistä case-kohdetta, joka on Tampereen Härmälänrannan uudisrakennusalue. Tapaustutkimuksen tarkoituksena on tuoda lisätietoa esitettyihin tutkimuskysymyksiin yksittäistapauksen näkökulmasta. Tapaustutkimuksessa vertaillaan olemassa olevasta kohteesta saatujen tietojen perusteella tutkimuskysymyksessä esitettyjä ongelmia CHP-laitoksen päästöjen allokointitavan sekä sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen eri määrittämistapojen vaikutuksista lähienergian kasvihuonekaasupäästöihin. Case-alueen aineisto on osittain peräisin alueen rakennuttajalta, Skanska Oy:ltä, ja osittain aineisto on peräisin kirjallisuuskatsauksen tuloksista. Tapaustutkimuksen laskentaosiossa vertaillaan case-alueen kahden eri lämmöntuotantovaihtoehdon, kaukolämmön ja maalämmön, kasvihuonekaasupäästöjä. Case-tarkastelun kautta selvitetään, miten laskentamenetelmävalinnat ja eri energiantuotantotekniikat vaikuttavat tarkasteltavan alueen kasvihuonekaasupäästöihin. Tämän lisäksi selvitetään löytyykö case-tarkastelun asetelmasta tutkimuskysymyksen mukainen tilanne, jossa laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla.

Tutkimus jakautuu teoriaosaan ja tulososaan. Tutkimuksen teoriaosan ensimmäisessä käsitelyluvussa, luvussa 2, perehdytään Suomen energiankulutukseen ja -tuotantoon, alueelli-

siin energiaratkaisuihin sekä energiaverkostoihin. Luvun tarkoitus on selvittää Suomen nykyistä ja tulevaa energiakäyttämistä sekä esitellä erilaisia alueellisia energianmuotoja ja niiden ongelmia sekä energiaverkostoja. Luvussa 3 on puolestaan esitelty energiantuotannon elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästökertoimia. Luvun tarkoitus on esitellä kirjallisuuskatsauksen perusteella saatuja kasvihuonekaasupäästökertoimia sekä pohtia näiden kertoimien epävarmuuksia. Luvussa 4 kerrotaan kasvihuonekaasupäästölaskennan laskentamenetelmävalinnoista. Luvun tarkoitus on esitellä yleisesti kirjallisuuden perusteella löydetty laskentamenetelmävalinnat sekä perehtyä tarkemmin itse laskennassa käytettäviin valintoihin. Luvussa 5 esitellään case-tutkimuskohde, Tampereen Härmälänranta, esitetään yleisiä kasvihuonekaasupäästölaskennan periaatteita ja case-tutkimuksen laskenta. Luvussa 6 keskitytään tutkimustulosten analysointiin. Luvun tarkoituksena on analysoida kirjallisuuskatsauksen ja tapaustutkimuksen tutkimustuloksia. Lisäksi luvussa laajennetaan case-tarkastelua, pohditaan tulosten epävarmuuksia ja käytettävyyttä. Luvussa 7 esitetään työn johtopäätökset. Luvussa käsitellään tutkimustulosten ja havaintojen yhteensopivuutta teorian kanssa ja verrataan saatuja tuloksia esitettyyn tutkimuskysymykseen. Luku 8 on työn yhteenveto, jonka tarkoituksena on tiivistää tutkimuksen lähtökohdat, rajaukset ja tavoitteet sekä tutkimuksesta saadut tulokset, johtopäätökset ja jatkotutkimusideat.

## **2 ENERGIANKULUTUS JA -TUOTANTO SEKÄ ALUEELLISET ENERGIARATKAISUT SUOMESSA**

Tässä luvussa perehdytään energiankulutukseen ja -tuotantoon sekä alueellisiin energiaratkaisuihin Suomessa. Suomalaiset energiakulutustiedot sekä sähkön- ja lämmöntuotannon muodot ovat tärkeitä lähtötietoja, kun arvioidaan energiankulutuksen ja -tuotannon kasvihuonekaasupäästövaikutuksia. Alueellinen näkökulma energiankulutukseen ja -tuotantoon on tärkeä, sillä kaupungit ja muu rakennettu ympäristö on yksi suurimmista kasvihuonekaasupäästöjen tuottajista. Lisäksi perehtyminen alueellisiin energiaratkaisuihin ja energia-verkkoihin Suomessa antaa puolestaan tietoa siitä, mihin suuntaan nykyinen energiantuotantojärjestelmä on todennäköisesti tulevaisuudessa kehittymässä, sillä lähienergia ja kehittyvät sähköverkot on nähty tehokkaina keinoina vähentää energiankulutuksen ja -tuotannon kasvihuonekaasupäästöjä.

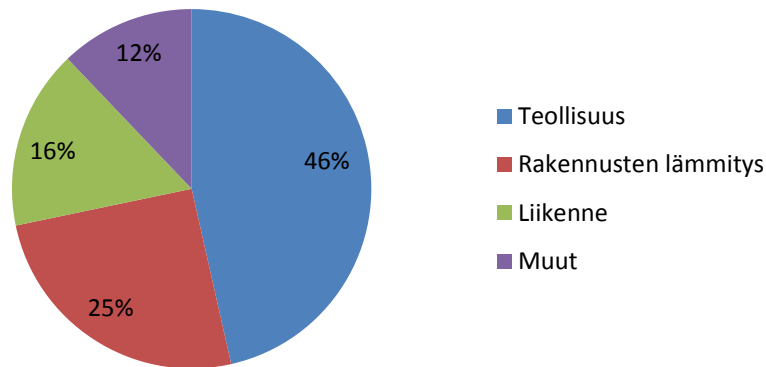
### **2.1 Energiankulutus ja -tuotanto Suomessa**

Yksi keskeisimmistä rakennetun ympäristön ympäristövaikutuksista liittyy energiankulutukseen, siihen vastaavan energiantuotantoon ja sitä kautta kasvihuonekaasupäästöihin. Kaupungit ovat maailmanlaajuisesti vastuussa yli 70 prosenttisesti maailman hiildioksidipäästöistä (World Energy Outlook 2008, 180; C40 Cities 2011; UN 2007).

#### Energiankulutus

Energian loppukäyttö oli Suomessa vuonna 2012 yhteensä 1 104 PJ. Suurimman osan energian loppukäytöstä vie Suomessa teollisuus, jonka osuus loppukäytöstä oli vuonna 2012 46 prosenttia. Rakennusten lämmitykseen kului puolestaan 25 prosenttia energian loppukäytöstä. Liikenteen osuus oli puolestaan 16 prosenttia. (Tilastokeskus 2013a.) Kuvassa 3 on esitettyä energian loppukäyttö sektoreittain Suomessa vuonna 2012. Energian loppukäyttö ei pidä sisällään energian tuotannon, siirron ja jakelun häviöitä eikä kiinteistökohtaisesti tuotettua uusiutuvaa energiaa.

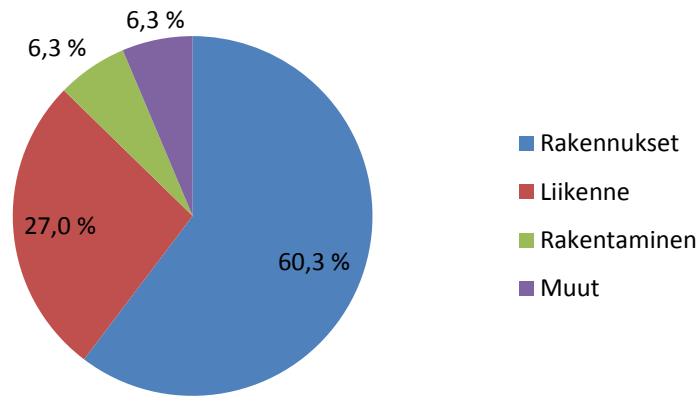




**Kuva 3.** Energian loppukäyttö sektoreittain vuonna 2012 (Tilastokeskus 2013a).

EU:n tavoitteena on tehostaa energian loppukäyttöä energiansäästöllä ja energiateokkuutta parantamalla. Loppukäytön tehostaminen vähentää primäärienergian kulutusta ja alentaa kasvihuonekaasupäästöjä. Energian loppukäytön tehokkuutta parantamalla voidaan energiansäästömahdollisuudet hyödyntää taloudellisesti tehokkaalla tavalla. Tämä energiansäästö voidaan saavuttaa energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden avulla, jolloin esimerkiksi yhteisön riippuvuus tuontienergiasta vähenee. (2006/32/EY.) Rakennetun ympäristön kannalta energian loppukäytön tehostaminen tarkoittaa esimerkiksi talojen lämmöntarpeen vähentämistä passiivirakentamisella.

Kuvassa 4 on esitettyä rakennetun ympäristön energianloppukäyttö vuonna 2007. Rakennukset-sektori pitää sisällään rakennusten lämmityksen ostoenergian ja sähkönkulutuksen. Rakentamis-sektoriin kuuluu rakennustoiminnan polttoaineiden käyttö ja sähkönkulutus sekä arvio materiaalien valmistuksen energiankulutuksesta. Liikenteeseen on huomioitu kotimaan tie-, raide-, ja laivaliikenteen polttoaineet ja sähkönkulutus. Muut-sektoriin on laskettu maa- ja metsätalouden polttoainekäyttö ja sähkönkulutus, kotitalouksien pienpolttoainekäyttö sekä osuus julkisen sektorin sähkönkulutuksesta, joka ei kulu rakennuksissa. (Vehviläinen et al. 2010, 11–12).

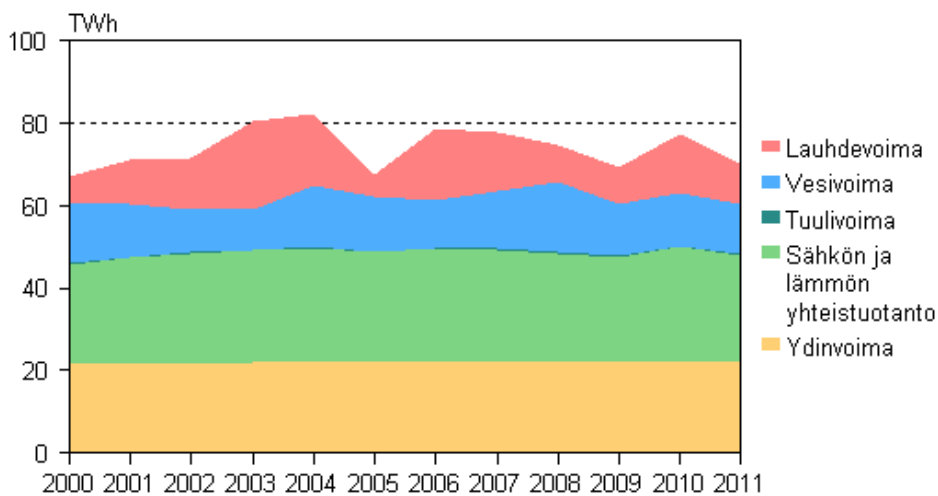


**Kuva 4.** Rakennetun ympäristön energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2007 (Vehviläinen et al. 2010, 11).

Vringerin & Blokin (1995) tutkimuksen mukaan yksi tehokas keino vähentää hiilidioksidipäästöjä on vähentää kotitalouksien suoraa ja epäsuoraa energiantarvetta. Tutkimuksessa suoraksi energiantarpeeksi on määritelty sähkö, lämpö sekä polttoaineet ja epäsuoraksi energiantarpeeksi energian, joka sisältyy kulutustavaroihin, kuten ruokaan ja kalusteisiin sekä palveluihin. Vringer & Blok löysivät selkeän suhteen kotitalouksien kokonaisenergiankulutuksen ja kotitalouksien menojen välillä. Heidän tutkimuksensa osoittaa, että mitä suuremmat tulot kotitalouksilla on, sitä suurempi on myös energiantarve. Reiders, Vringer & Blok (2003) puolestaan tutkivat suoraa ja epäsuoraa energiantarvetta eri Euroopan unionin maiden välillä. Heidän tutkimuksensa mukaan epäsuora energiantarve korreloi lineaarisesti menojen kanssa. Suora energiantarve ei sen sijaan korreloi näin selvästi kotitalouksien menojen kasvamisen kanssa, vaan siihen vaikuttavat myös muut näkökohdat, kuten talojen ikä ja eristäminen. Lenzen, Dey & Foran (2004) päätyivät Sydneyn kotitalouksia käsittelevässä tutkimuksessaan samanlaisiin tuloksiin suoran ja epäsuoran energiantarpeen suhteesta kotitalouksien tuloihin. Heidän mukaansa tulevaisuudessa tärkeää olisi keskittyä myös vähentämään kotitalouksien epäsuoraa energiankulutusta suoran kulutuksen lisäksi. Bin & Dowlatabadin (2005) tekemän tutkimuksen, jossa he tutkivat USA:laisten elämäntapojen vaikutuksia energiankulutukseen, mukaan suurin energiankulutus oli asumisen toimintaan liittyvä epäsuora energiankulutus ja toiseksi suurin henkilökohtaisen matkustamisen suora energiankulutus. Kolmanneksi suurin energiankulutus oli tutkimuksen mukaan kotitalouksien suora energiankulutus. Bin & Dowlatabadin mukaan investointeja, uutta tekniikkaa ja tutkimusta kannattaisikin panostaa juuri näihin kolmeen energiaintensiivisimpään osaan.

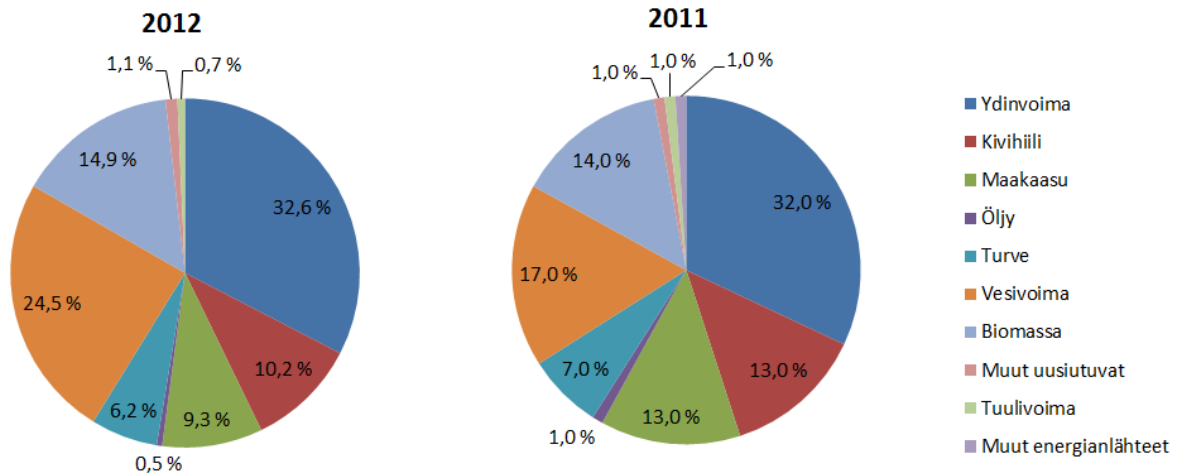
## Sähköntuotanto

Suomen sähköntuotanto tuotantomuodoittain vuosina 2000–2011 on esitetty kuvassa 5. Kuvasta voidaan havaita, että ydinvoiman tuotanto sekä sähkön ja lämmön yhteistuotanto pysyvät joka vuosi lähes samalla tasolla. Tilastokeskuksen (2012a) mukaan vesivoiman tuotto sen sijaan vaihtelee hieman, johtuen vesivoiman riippuvuudesta sääoloihin. Sateisina vuosina vesivoiman tuotto on suurempi kuin vähäsateisina vuosina. Lauhdevoiman tuotto vaihtelee kuvassa eniten ja se riippuu vesivoiman saatavuudesta ja sähköntarpeesta.



**Kuva 5.** Sähkön tuotanto tuotantomuodoittain 2000–2011 (Tilastokeskus 2012).

Kuvassa 6 on puolestaan esitetty Suomen sähköntuotanto energialähteittäin vuonna 2012 ja 2011. Vuonna 2012 uusiutuvia energialähteitä oli yhteensä noin 41 prosenttia, fossiilisia polttoaineita 20 prosenttia, ydinvoimaa noin 33 prosenttia ja turvetta noin 6 prosenttia. Vuonna 2011 uusiutuvia energialähteitä oli yhteensä 33 prosenttia, fossiilisia yhteensä 28 prosenttia, turvetta 7 prosenttia ja ydinvoimaa 32 prosenttia. Kuvasta voidaan hyvin huomata, että vuonna 2011 vesivoimaa tuotettiin vähemmän eli myös uusiutuvan energian koko osuus oli pienempi. Tämä johti vuonna 2011 myös siihen, että fossiilisista polttoaineista peräisin olevaa energiaa tuotettiin enemmän.



**Kuva 6.** Sähkön tuotanto energialähteittäin vuonna 2012 ja 2011 (Energiateollisuus 2013a; Tilastokeskus 2012b).

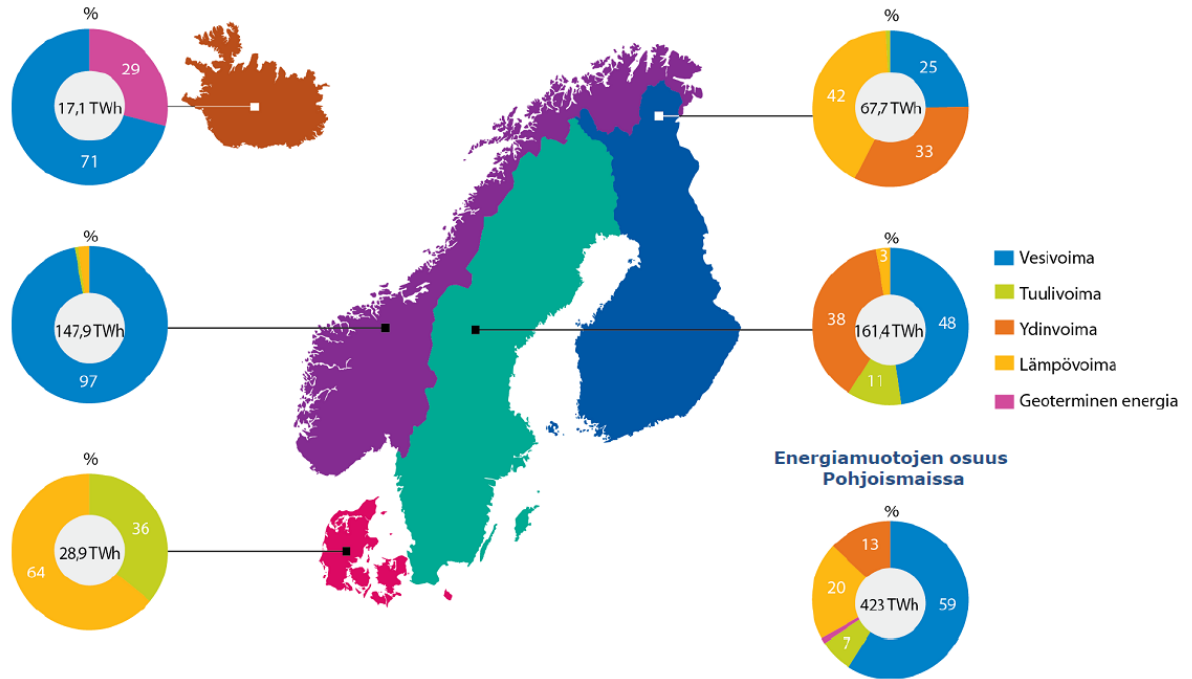
Energiateollisuuden visiona on vuonna 2050 saavuttaa hiilineutraali sähkön ja kaukolämmön tuotto. Tällöin sähkön ja kaukolämmön tuotanto, siirto, jakelu ja käyttö eivät tuottaisi lainkaan kasvihuonekaasupäästöjä. Tärkeimmät muutokset visiassa kohdistuvat tuulivoiman ja ydinvoiman lisääntymiseen. Muita muutoksia ovat konventionaalisen lauhdesähkön tuotannon poistuminen, kotimaisten biopolttoaineiden käytön lisääminen sekä hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologian käyttöönotto. (Energiateollisuus 2010, 33.) Taulukossa 2 on esitetty Energiateollisuuden arvio sähkön käytöstä Suomessa vuosina 2030 ja 2050. Kuvasta voidaan havaita, että arvion mukaan sähkön käyttö tulee kokonaisuudessaan kasvamaan kumpanakin tarkasteluvuonna. Eniten sähkön käyttö lisääntyy palvelut ja julkinen -sektorilla sekä liikenteessä.

**Taulukko 2.** Arvio sähkön käytöstä Suomessa vuosina 2030 ja 2050 (Energiateollisuus 2010, 49).

Sektori	Sähkön käyttö vuonna 2007 [TWh/a]	Sähkön käyttö vuonna 2030 [TWh/a]	Sähkön käyttö vuonna 2050 [TWh/a]
<b>Asuminen</b>	23	24–26	24–27
Kotitaloussähkö	11	13	13–14
Rakennusten lämmitys	12	11	9–11
Rakennusten jäähdytys	0,2	1	2
<b>Teollisuus</b>	48	49–56	48–58
<b>Palvelut ja julkinen</b>	15,5	22	30–40
<b>Liikenne</b>	0,5	3	8–10
<b>Häviöt</b>	3	3	4
<b>Yhteensä</b>	<b>90</b>	<b>100–111</b>	<b>113–138</b>

Eskeland et al. (2011) osoittavat tutkimuksessaan, että sähköntuotannolla on merkittävin potentiaali EU:n päästövähennystavoitteissa. Sähköntuotantosektori voi myötävaikuttaa jopa puoleen EU:n päästövähennyksistä, mikä on suurempi kuin sen 40 prosentin päästöosuus. Heidän tutkimuksensa osoittaa myös, että sähköntuotannolla on alhaiset kustannukset tehdä päästövähennyksiä. Samankaltaiseen tulokseen on päätyntä da Graça Carvalho (2012) artikkelissaan, jossa vähähiilisen teknologian osuuden sähköntuotannossa ennustetaan nousevan 45 prosentista 60 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. da Graça Carvalhon mukaan kasvu kuitenkin vaatii erityisesti uusiutuvan energian osuuden lisäämistä sähköntuotannossa. Suomessa kuitenkin suuri osa sähköstä tuotetaan sähkön- ja lämmön yhteistuotannolla, ja tämä saattaa johtaa siihen, että ainakin tällä hetkellä tilanne ei ole niin selkeä Suomen kohdalla. Tulevaisuudessa, kuten Energiategollisuuden visioista käy ilmi, sähkönkäytön oletetaan kuitenkin yhä kasvavan ja kun taas lämmönkulutuksen oletetaan vähenevän passiivirakentamisen ynnä muun seurauksena, myös sähkön päästövähennykset ovat tärkeä kysymys myös Suomessa.

Suomi kuulu muiden pohjoismaiden sekä Viron ja Liettuan tavoin Nord Pool Spot sähkömarkkinoihin. Lisäksi Nord Pool -alue on yhdistetty Venäjän, Puolan ja Saksan sähkömarkkinoihin. (Nord Pool Spot 2013.) Kuvassa 7 on esitetty sähköntuotannon jakautuminen Pohjoismaissa. Kuvan perusteella havaitaan, että suurin energiantuotantomuoto pohjoismaissa on vähäpäästöinen vesivoima, mikä selittyy Norjan ja Ruotsin vesivoimaintensiiteillä. Suomessa vesivoimaa tuotetaan pohjoismaalaista keskiarvoa vähemmän. Suomessa Nord Pooliin kuulumisen vähentää sähkömarkkinoilla syntyvän sähkön päästöjä verrattuna tilanteeseen, jossa Suomi muodostaisi omat markkinansa.

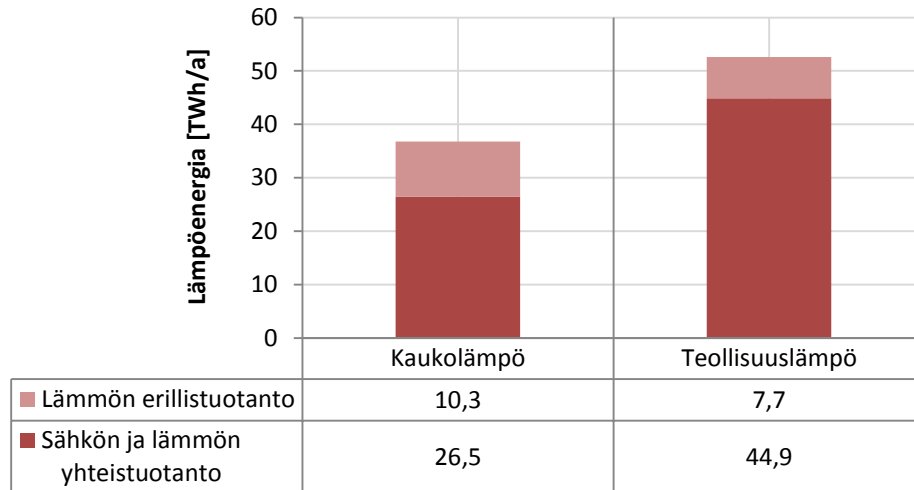


**Kuva 7.** Energiantuotanto Pohjoismaissa (Energieollisuus 2013b).

Nord Poolin Sähkötalukmarkkinoilla vallitsee vapaa kilpailu, joten sähkön hinnan määrittää kysynnän ja tarjonnan tasapaino. Tällöin myös kannattava sähkön tuotantotapa riippuu kysynnästä ja tarjonnasta. Käytännössä siis voimalaitoksen käyttökustannukset ratkaisevat sen, mikä voimalaitos on kannattavaa pitää käynnissä milläkin hetkellä. (Nord Pool Spot 2013.)

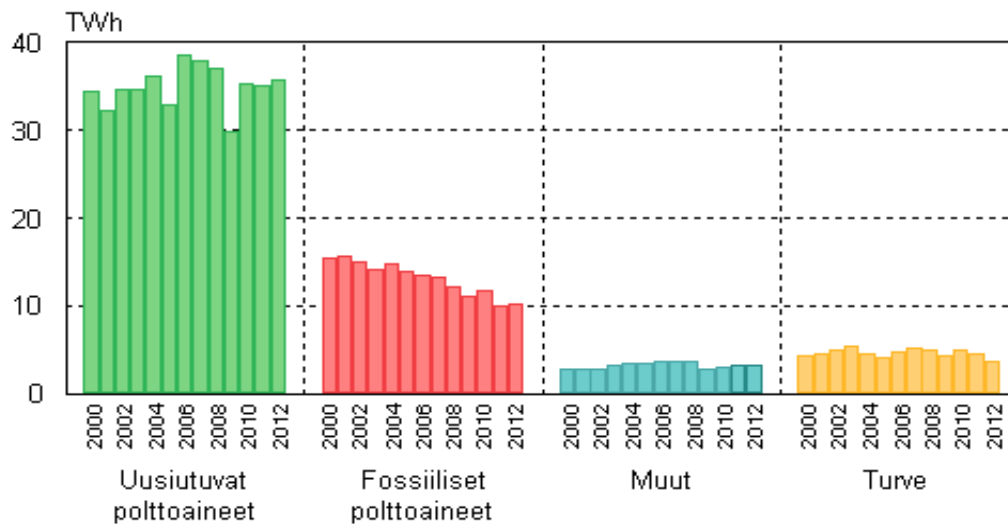
### Lämmöntuotanto

Lämmityksellä tuotetaan rakennusten tarvitsema lämpöenergia, joka koostuu rakennuksen johtumishäviöistä sekä ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksestä. Suomessa rakennuksen energiakulutuksesta jopa 50 prosenttia voi kulua lämmitykseen. (Motiva 2013a.) Kuvassa 8 on esitetty Suomen lämmöntuotanto vuonna 2012 jaoteltuna kaukolämmön ja teollisuuslämmön erillis- ja yhteistuotantoon. Vuonna 2012 kaukolämmön tuotannossa käytetyimmät polttoaineet olivat maakaasu, kivihiili ja puupolttoaineet, ja yli puolet kaukolämmöstä tuotettiin fossiililla polttoaineilla. (Tilastokeskus 2013b.)



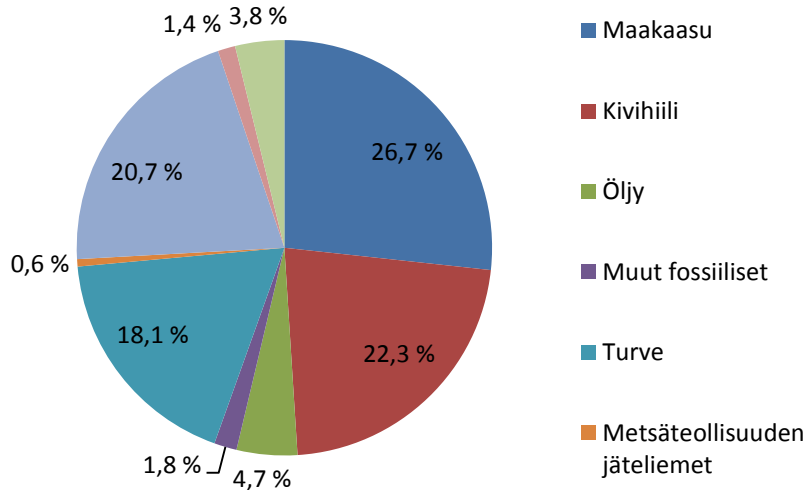
**Kuva 8.** Lämmöntuotanto vuonna 2012 (Tilastokeskus 2013b).

Kuvassa 9 on esitetty teollisuuslämmöntuotanto aikavälillä 2000–2012. Teollisuuslämpö tuotettiin yli 60 prosenttisesti uusiutuvilla polttoaineilla ja polttoaineista eniten käytettiin metsäteollisuuden jäteliemiä ja muita puupolttoaineita. (Tilastokeskus 2013c.) Muita teollisuuslämmön merkittäviä polttoaineita ovat fossiiliset polttoaineet ja turve.



**Kuva 9.** Teollisuuslämmöntuotanto aikavälillä 2000–2012 (Tilastokeskus 2013c).

Kuvassa 10 on puolestaan esitetty kaukolämmön tuotannon polttoaineet vuonna 2011. Kaukolämmön tuotanto vuonna 2011 oli yhteensä 34 029 GWh, josta fossiililla polttoaineilla, lähinnä maakaasulla ja kivihiilellä, tuotettiin noin 55 prosenttia ja uusiutuvilla noin 23 prosenttia. Turpeella tuotettiin noin 20 prosenttia kaukolämmön tuotannosta.



**Kuva 10.** Kaukolämmön tuotanto vuonna 2011 (Tilastokeskus 2012c).

Suomessa lämmöntuotanto on siis keskittynyt vahvasti sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sekä kaukolämmön että teollisuuslämmön kohdalla. Teollisuuslämmössä uusiutuvien polttoaineiden käyttö on yleisempää kuin kaukolämmön tuotannossa, jonka polttoainejakauma on painottunut fossiilisiin polttoaineisiin. Tulevaisuudessa todennäköisesti kaukolämmön tuotannossa uusiutuvien energiamuotojen osuus tulee kasvamaan ja fossiilisten vähenevän erilaisten kasvihuonekaasupäästötavoitteiden saavuttamisen vuoksi. Teollisuuden uusiutuvaan energiaan eli lähinnä metsäteollisuuden jäteliemiin ja muihin puupolttoaineisiin perustuvan lämmöntuotannon tulevaisuus on puolestaan hyvin riippuvainen suomalaisen metsäteollisuuden kannattavuudesta tulevaisuudessa.

## 2.2 Alueellinen energiantuotanto ja energiaverkot

Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan paikallista, lähellä käyttökohteita tapahtuvaa energiantuotantoa. Hajautettua energiantuotantoa ovat muun muissa aurinkopaneelit ja aurinkolämpökeräimet, lämpöpumput, pientuulivoimalat, biokaasulaitokset sekä puuhake- ja pellettikattilat. (Nystedt et al. 2012, 10; Kannonlahti & Sjöholm 2012, 49; Vanhanen 2008.) Suomessa hajautetuksi energiantuotannoksi on katsottu alle 10 MW:n uusiutuviin energialähteisiin tai pienimuotoiseen yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon perustuva tuotanto (Bergman et al. 2005, 9; Kannonlahti & Sjöholm 2012, 49). Alueellinen lämmöntuotanto voidaan toteuttaa joko alue-, taloryhmä- tai talokohtaisilla energiaratkaisuilla. Talokohtaisessa ratkaisussa jokaiselle talolle rakennetaan oma lämmöntuotantjärjestelmä,



joka tuottaa rakennuksen tarvitseman lämpöenergian. Taloryhmäkohtaisessa järjestelmässä taloryhmän lämmitystarve katetaan keskitetyllä energiantuotantoratkaisulla. Alueelle voidaan myös rakentaa oma aluelämpölaitos, josta lämpö jaetaan aluelämpöverkon kautta kuluttajille. (Nystedt et al. 2012, 24–25.) Alueellisista energiaratkaisuista seuraavaksi tarkastellaan tuulivoimaa, aurinkosähköä ja -lämpöä, vesivoimaa, maalämpöä, talokohtaisia kattiloita, lämpölaitosta ja CHP-laitosta. Muita alueellisia energiaratkaisuja ovat mm. ilmalämpö, vesistölämpö ja polttokennot, mutta nämä ratkaisut ovat yleensä täydentäviä menetelmiä tai niiden tekniikka on vasta kehitysvaiheessa. (Nystedt et al. 2012, 34.) Kuvassa 11 on esitetty yhteenveto edellä mainittujen energiajärjestelmien ominaisuuksista.

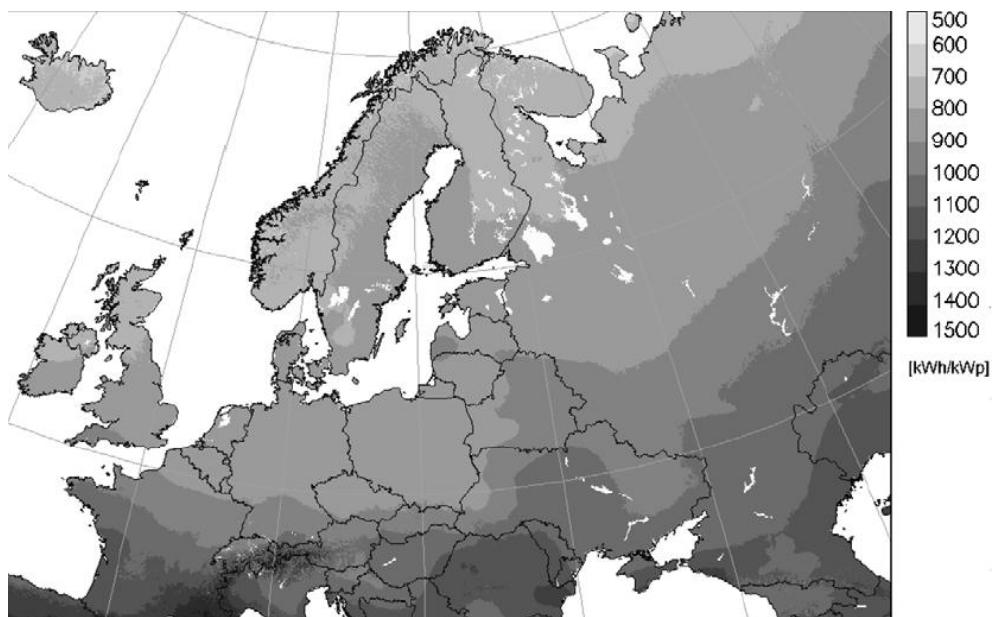
Energiamuoto	Kustannukset		Päästöt		SO <sub>2</sub> eqv	Hiukkaset	Yleistä
	Investointikustann	Käyttökustannukset	CO <sub>2</sub>	TOPP			
Kalliolämpö	****	**	**	*	*	*	Pohjavesi estää
Maalämpö	***	**	**	*	*	*	Kuiva maaperä estää
Vesistölämpö	****	**	**	*	*	*	
Hake	**	***	*	****	***	***	Hakevarasto vaatii tilaa
Pelletti	**	****	*	**	*	**	Pelletin varastointi vaatii tilaa
Aurinkolämpö	***	*	*	*	*	*	Täydentämään toista lämmitysmuotoa, sijoitus etelään 45 asteen kulmassa
Ilmalämpö	*	**	**	**	**	**	Täydentämään toista lämmitysmuotoa
Takka	**	*	*	***	***	****	Täydentämään toista lämmitysmuotoa, polttopuun oltava kuivaa
Aurinkosähkö	****	*	*	*	*	*	Sijoitus etelään 45 asteen kulmassa
Tuulisähkö	****	*	*	*	*	*	Kannattavuus riippuu tuuliolosuhteista
Polttokennot	*****	*	*	*	*	*	Voi käyttää eri polttoaineita, vaikuttaa päästöihin ja käyttökustannuksiin. Teknologia vielä kehitysvaiheessa
Biokaasu	****	**	*	***	**	**	Huolehdittava savukaasujen puhdistuksesta
Sähkölämmitys	**	*****	****	***	***	**	Hintakehitys epävakaa

**Kuva 11.** Yhteenveto eri energiajärjestelmien ominaisuuksista. Tähtien lukumäärä indikoi merkitystä, \*\*\*\*\* = kallis / paljon päästöjä, \* = halpa / vähän päästöjä. (Nystedt et al. 2012, 34.)

Kuvassa eri alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon menetelmät on luokiteltu kustannustan ja päästöjen perusteella. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkö ja polttokennot ovat investointikustannuksiltaan kalliita, mutta niiden käyttökustannukset ja päästöt ovat puolestaan vähäiset. Sähkölämmitys on puolestaan investointikustannuksiltaan vähäinen, mutta sen käyttökustannukset ja päästöt ovat korkeat.

## Aurinkosähkö ja -lämpö

Aurinkopaneelien asentaminen rakennusten katoille ja muihin rakenteisiin on kasvava kehityssuunta monissa kaupungeissa. Šúrin et al. (2007) tutkimuksen mukaan aurinkopaneelilla voidaan kattaa jopa 9–26 % kaupunkien sähköntuotannosta. Heidän mukaansa Etelä-Suomessa aurinkopaneelit tuottavat energiaa keskimäärin 700–800 kWh/kW<sub>p</sub> vuodessa. Sama määrä energiaa per kilowatti pystytään tuottamaan myös Etelä-Ruotsissa, Baltianmaissa, Luoteis-Euroopassa, Pohjois-Ranskassa, Pohjois-Saksassa, Pohjois-Puolassa, Benelux-maissa ja Tanskassa. Pohjois-Suomessa aurinkopaneelien energiantuotanto jää alle 700 kWh/kW<sub>p</sub>. Aurinkoenergian saatavuuden lisäksi, tuotettuun aurinkoenergian määrään vaikuttaa aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde. (Šúri et al. 2007.) Kuvassa 12 on esitettyä aurinkopaneelilla tuotettu energia [kWh/kW<sub>p</sub>] vuodessa Euroopassa.

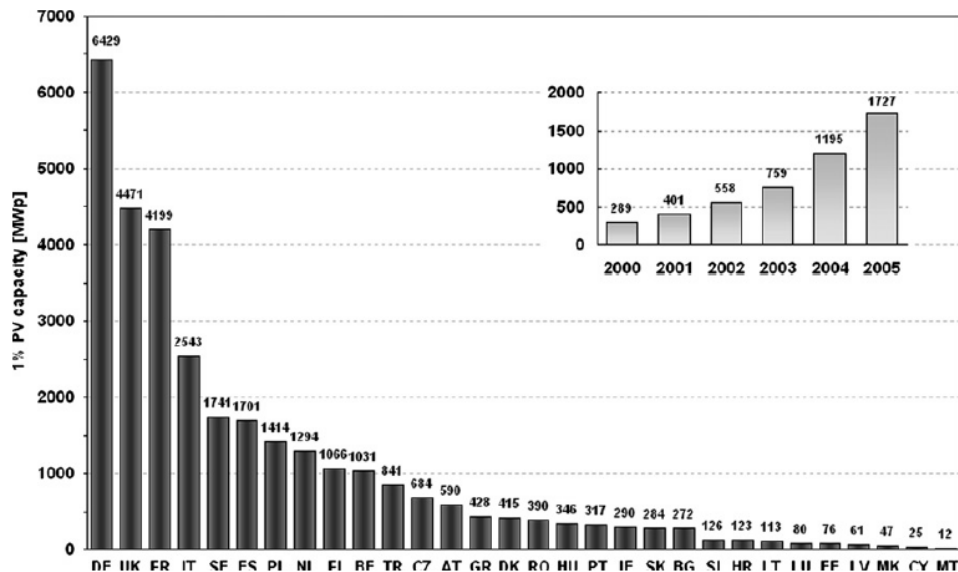


**Kuva 12.** Aurinkopaneelilla tuotettu energia [kWh/kW<sub>p</sub>] vuodessa Euroopassa (Šúri et al. 2007, 1298).

Aurinkosähköä käytetään tyypillisesti rakennusten katoilla ja julkisivuilla. Optimaalinen kallistuskulma esimerkiksi Helsingin leveysasteella aurinkopaneelille on 45 astetta vaakatasosta. Lisäksi aurinkopaneeleita käytetään tyypillisesti kesämökeillä sekä syrjäseutujen erikoissovelluksissa. (Vartiainen et al. 2002, 12–13.)

Kuvassa 13 on esitettyä aurinkopaneelikapasiteetti, joka tarvitaan kattamaan yksi prosentti tietyn maan sähkönkulutuksesta. Kuvasta voidaan havaita, että Suomen kohdalla aurin-

kopaneelikapasiteetti, jolla voidaan tuottaa yksi prosentti Suomen energiankulutuksesta, on 1 066 MW<sub>p</sub>.



**Kuva 13.** Aurinkopaneelikapasiteetti, joka tarvitaan kattamaan 1 % maan sähkönkulutuksesta. Yläkulmassa maailman aurinkopaneelituotannon kasvu vuosina 2000–2005 Euroopassa. (Šúri et al. 2007.)

Aurinkolämpöä käytetään tyypillisesti rakennusten lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen, maaseudun sovelluksissa, kuten viljan kuivauksessa, sekä osana aluelämpöjärjestelmää kesäajalla täydentävänä energianlähteenä. Aurinkolämpökeräinjärjestelmien hyötysuhde on noin 30–40 prosenttia ja niiden käyttöikä on parhaimmillaan noin 20 vuotta. (Vartiainen et al. 2002, 10–11.)

### Maalämpö

Maalämpöpumpuilla on mahdollista siirtää lämpöenergiaa, joka on varastoinut maahan, kalliioon tai veteen, rakennuksen ja käyttöveden lämmitykseen. Maalämpöpumppu on käyttökustannuksiltaan edullinen, mutta sen investointikustannukset ovat suuret. (Motiva 2011.) Maalämpöpumppujen siirtoputkistot voidaan asettaa maaperään porattuihin porakaivoihin. Porakaivojen tekeminen kuitenkin edellyttää maaperän koeporausta sekä tutkimusta maa-alan soveltuvuudesta maalämpökäyttöön. Maalämpöpumpun lämmönkeruuputkisto voidaan asentaa myös vaakaputkistoihin yhden metrin syvyyteen. Tämän ratkaisun soveltuvuuskeriteerinä on se, että maa-aines ei saa olla kuivaa. (Nystedt et al. 2012, 27, 33; IEA 2009, 81). Vesistölämmön hyödyntämiskriteerinä lämpöpumpuissa on se, että vesistö

on vähintään kaksi metriä syvä jo rannan läheisyydessä. Vesistöön asennettavalla putkistolla voidaan vuodessa saada lämpötehoa noin 70–80 kWh/metri putkea. (Motiva 2010.)

Maalämpöpumppujen lämpökerroin (COP-luku) eli tuotetun lämmön suhde käytettyyn sähköenergiaan, on Suomen oloissa tyypillisesti 2,6–3,6, mutta parhaimmillaan se voi olla jopa yli 4. (Vartiainen et al. 2002, 14.) Lämpöpumppuja ei kannata mitoitaa kattamaan koko huippukuorman aikaista lämmöntarvetta, sillä silloin maalämpöpumppujärjestelmän investointikustannukset ovat liian suuret. Lämpöpumput suunnitellaan sen sijaan kattamaan keskimääräinen lämmöntarve, jolloin maalämpöpumppu mitoitetaan kattamaan noin 60–80 % laskennallisesta huipputehontarpeesta. Tällöin maalämpöpumpulla tuotetaan noin 95–99 % vuotuisesta energiantarpeesta ja loput 1–5 % huippukulutuksen aikaisesta lämmöntarpeesta tuotetaan esimerkiksi sähkövastuksilla. (Nystedt et al. 2012, 27; Motiva 2013b.)

Luickx et al. (2008) tutkivat lämpöpumppujen käyttöä lämmitykseen Belgiassa, Alankomaissa, Saksassa ja Ranskassa, ja lämpöpumppujen oletettiin korvaavan joko fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa lämmittämistä tai sähkölämmitystä. Tutkimuksen mukaan lämpöpumppulämmitys vähensi kasvihuonekaasupäästöjä jokaisessa tutkitussa maassa. Lämpöpumppujen lisäämisen vaikutukset kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen riippuivat kuitenkin suuresti maiden käyttämän sähkön kasvihuonekaasupäästöintensiteetistä, ja esimerkiksi Luickxin mukaan Alankomaissa lämpöpumppuja tehokkaammaksi vaihtoehdoksi nähtiin maakaasu-kombivoimalaitosten lisääminen.

### Tuulivoima

Alueellisesti tuulivoimaa voidaan tuottaa joko suuremmissa yksiköissä tai pientuulivoimaloissa. Tuulivoimarakentamisen kannattavuus riippuu paljon paikallisista tuuliolosuhteista. Lisäksi Suomessa tuuliolosuhteet vaihtelevat paljon myös ajallisesti sekä vuorokaudessa että vuodessa. Esimerkiksi peräkkäisinä vuosina tuulivoiman tuotannossa voi olla jopa 40 prosentin eroja. Suomessa kuitenkin tuulen vuodenaikavaihtelut ovat yleensä suotuisia, sillä tuulisimmat päivät ovat yleensä kylmimpinä talvikuukausina. (Vartiainen et al. 2002, 8.)

IEA jakaa pienet tuulivoimat pientuulivoimaloihin (alle 100 kW) ja mikrotuulivoimaloihin (alle 2 kW). Mikrotuulivoimaloita käytetään yleensä veneissä ja asuntovaunuissa, mutta niitä käytetään yhä useammin myös yksittäisten asuntojen sähköntuotannossa. Pientuulivoimat sen sijaan soveltuvat paremmin kerrostalojen, toimistojen tai koko alueen sähköntuotantoon. Tuulivoimarakentamisessa on kuitenkin aina huomioitava melu- ja näköhaitat sekä alueen mahdolliset rajoitteet esimerkiksi rakenteiden korkeuden suhteen. (IEA 2009, 69.) Nystedt et al. (2012, 29) mukaan yksi vaihtoehto on myös ostaa osakkuus tuulipuistosta, jolloin alueelle ostettava sähkö on peräisin tuulivoimasta, mutta itse alueella ei sijaitse tuulivoimalaa.

Tuulivoimarakentamisen seurauksia arvioitaessa, täytyy se huomioida osana muuta energiasysteemiä. Holttinen & Tuhkanen (2004) osoittavat tutkimuksessaan, että 16–46 TWh/a tuulivoiman lisäys pohjoismaisille sähkömarkkinoille korvaa pääasiassa kivihiileen perustuvaa energiantuotantoa, jolloin CO<sub>2</sub>-päästövähennys olisi 700–620 g<sub>CO2</sub>/kWh. Mikäli oletetaan, että kivihiilen käyttö energiantuotannossa kielletään Kioton päästötavoitteisiin pääsemisen vuoksi, uusi tuulivoimakapasiteetti korvaisi tällöin pääasiassa maakaasulla toimivien kombivoimalaitosten kapasiteettia. Tällöin keskimääräinen päästövähennys olisi noin 300 g<sub>CO2</sub>/kWh. (Holttinen & Tuhkanen 2004.) Delarue et al. (2009) ovat puolestaan laskeet Belgian energiantuotannon tuulivoiman päästövähennykseksi 498 g<sub>CO2</sub>/kWh, kun tuulivoima korvaa sekä kivihiiltä että maakaasua.

### Pien- ja minivesivoima

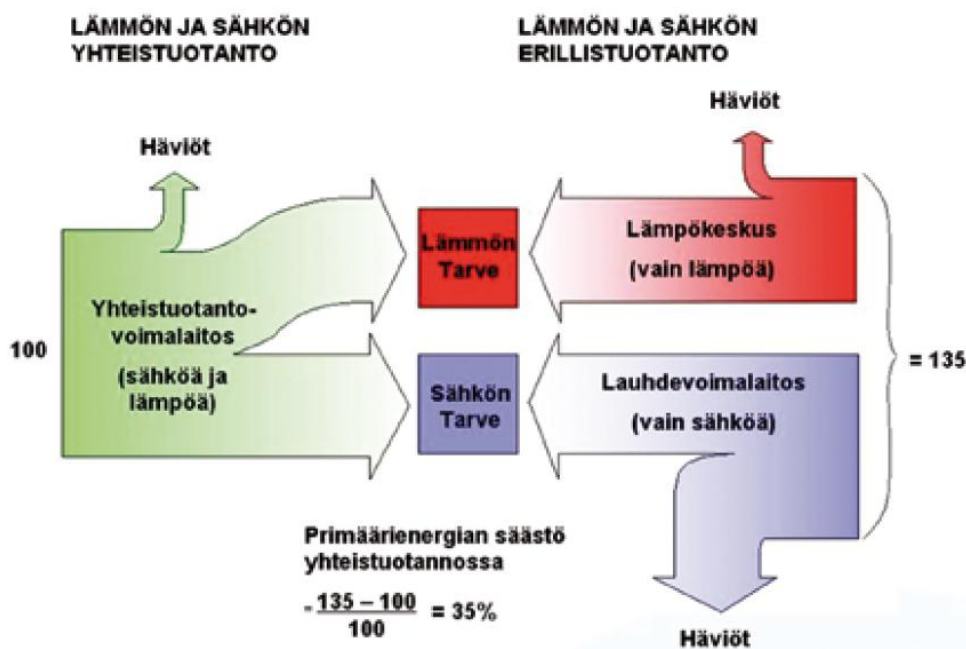
Pienvesivoimalla tarkoitetaan nimellistehoaltaan 1–10 MW:n tehoista vesivoimaa ja minivesivoimalla alle 1 MW:n tehoista. Suomessa pien- ja minivesivoiman rakentamispotentiiali suojelemattomissa vesistöissä on noin 460 MW, ja sitä voidaan rakentaa uusin kohteisiin, käytöstä poistettuihin kohteiden tilalle sekä vanhoja laitoksia voidaan tehostaa ja ohijouksutuksia hyödyntää. (Vartiainen et al. 2002, 10–11.)

### Bioenergia

Bioenergiaa voidaan tuottaa joko lämmön erillistuotannolla biomassakattiloissa tai lämmön ja sähkön yhteistuotannolla CHP-laitoksissa. Biomassakattiloita käytetään alue- ja kauko-

lämmityskattiloina, omakotitalokattiloina, kiinteistökattiloina sekä teollisuuskattiloina. Polttoaineena biomassakattilassa voidaan käyttää hakkuutähteitä, haketta, puun kuoria, sahanpurua, kutterilastua, pellettejä tai brikettejä sekä turvetta ja kierrätyspolttoainetta. Biomassakattiloiden kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi juuri polttoaineen saatavuus järkevän kuljetusmatkan päästä. Esimerkiksi jalostamattoman polttoaineen maksimikuljetusmatka on tyypillisesti alle 150 km. (Vartiainen et al. 2002, 15–16.)

Pien-CHP eli pienimuotoinen lämmön ja sähkön yhteistuotanto voidaan toteuttaa monilla eri tekniikoilla ja polttoaineilla. Yhteistuotannolla energiaa pystytään säästämään yli 30 % verrattuna tilanteeseen, jossa sähkö- ja lämpöenergia tuotettaisiin erikseen. (Berta et al. 2006; Rajala et al. 2010, 21; Lund & Andersen 2005.) Kuvassa 14 on esitetty CHP-tuotannossa syntyvä polttoaineen säästö.



**Kuva 14.** CHP-tuotannon polttoaineen säästö (Rajala et al. 2010, 21).

Bioenergialaitoksia ei kannata mitoittaa kattamaan koko alueen tehontarvetta, sillä laitoksen hyötysuhde on parhaimmillaan, kun laitosta voidaan ajaa koko ajan täydellä kapasiteetilla. Yleensä bioenergialaitokset mitoitetaan kattamaan noin 40–60 prosenttia verkon huipputehon tarpeesta. Tällöin alueen tarvitsemasta energiasta pystytään tuottamaan noin 80–90 prosenttia. Huipputehontarve eli noin 10–20 prosenttia energiantarpeesta täytetään esimerkiksi huippulämpölaitoksilla. (Energiateollisuus 2006, 322–323.)

Pien-CHP-laitoksia säädetään yleensä lämmöntarpeen mukaan. Pien-CHP-laitokset voidaan jakaa kokonsa perusteella mikro CHP -kokoluokkaan eli alle 10 kW<sub>e</sub> tehoisiin laitteisiin ja pien CHP -kokoluokan laitteisiin, jotka ovat teholtaan yli 10 kW<sub>e</sub>. Mikro CHP kokoluokan laitteita käytetään muun muassa maatiloilla ja yksittäisten asuinrakennusten energiantuotannossa. Pien CHP -kokoluokan laitteita käytetään puolestaan kortteleiden, suurkiinteistöjen ja teollisuuden energiantuotannossa sekä täydentämässä aluelämmitystä. (Karjalainen 2012, 10–12.) Kuvassa 15 on esitetty eri pien-CHP-laitosten tekniikoiden ominaisuuksia.

Tekniikka	Polttimoottorit	Mikroturbiinit	Stirling -moottorit	Polttokennot	Höyrykone ja -turbiini	ORC-prosessi
Typillinen koko	1 kW <sub>e</sub> – 1000 kW <sub>e</sub>	25 kW <sub>e</sub> – 250 kW <sub>e</sub>	10 – 150 kW <sub>e</sub>	1 kW <sub>e</sub> – 50 MWe	Höyrykoneella >100 V -turbiineilla >500 kW <sub>e</sub>	150 kW <sub>e</sub> – 1 MWe
Sähköhyötysuhde	25 – 40 %	25 -30 %	8 – 22 %			
Lämpöhyötysuhde	45 – 50 %	50 - 60 %	50 – 60 %			
Typillinen käyttöaika	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1 - 15 vuotta	15 vuotta	>20 vuotta
Kehitysaste	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa	Pilot -vaiheessa	Kehitysvaiheessa	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa
Tärkein tekninen vahvuus pien CHP -käytössä	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huollon tarve	Pieni huollon tarve	Korkea sähköhyötysuhde	Tekniikan todistettu toimivan	Hyvä sähköhyötysuhde myös osakuormalla
Suurin tekninen heikkous pien CHP -käytössä	Verrattain suuri huollon tarve	Polttoaineen oltava kaasumainen tai nestemäinen	Rajallinen sähköhyötysuhde	Lyhyt kestoikä	Sähköhyötysuhde osakuormalla	Rajallinen sähköhyötysuhde

**Kuva 15.** Pien-CHP-laitosten tekniikoiden ominaisuuksia (Karjalainen 2012, 10).

Kavvadias et al. (2010) ovat kirjallisuutta tutkimalla päätyneet siihen, että CHP-laitoksen toimintastrategiat voidaan koota viiteen eri luokkaan. Ensinnäkin laitos voi toimia niin, että se vastaa ensin lämmöntarpeen täyttämiseen, ja sen jälkeen myy tai ostaa sähkön integroidakseen loput energian kysynnästä tai tarjonnasta. Toinen vaihtoehto on se, että laitos kattaa ensin sähkötarpeen ja sen jälkeen tuottaa lämpöenergiaa. Kolmanneksi laitos voi olla jatkuvakäyttöinen eli systeemi toimii vain tietyn ennalta määrätyn ajan ja se ei huomioi energiantarvetta. Neljäntenä toimintatapana systeemi toimii vain rajoitetun ajan kattaakseen ennalta määrätyn osan sähkön huipputarpeesta. Viimeisenä vaihtoehtona on se, että systeemi on suunniteltu kattamaan vain tietty vakiomäärä sähkötarpeesta.

### Alueellisen energiantuotannon ongelmia

Tuuli- ja aurinkoenergian yhtenä ongelmana on niiden jaksottainen energiantuotanto. Tuulivoimala voi tuottaa energiaa vain kun tuulee ja aurinkopaneelit silloin kun aurinko paistaa. Tuuli- ja aurinkoenergian saatavuuden jaksottaisuus aiheuttaa ongelmia sekä siirtoverkossa että energiantuotantolaitoksissa. (Ipakchi & Albuyel 2009; Lew & Brinkman 2013; Katzenstein & Apt 2009.) Siitä, miten paljon tuuli- ja aurinkoenergian jaksottaisuus vaikuttaa kasvihuonekaasupäästöihin, on ristiriitaisia tutkimustuloksia. Katzenstein & Apt (2009) toteavat tutkimuksessaan, että hiilidioksidipäästöjen vähennys tuulivoiman tai aurinkopaneelien lisäämisen vaikutuksesta ovat oikeastaan 75–80 prosenttia niistä päästöistä, jotka päättäjät olettavat niiden olevan, juuri tuotannon jaksottaisuuden vuoksi. Lew & Brinkman (2013) puolestaan esittivät tutkimuksessaan, että jaksottaisuuden vaikutukset ovat hyvin vähäiset hiilidioksidipäästöjen osalta.

Lundin (2007) tutkimuksen mukaan Tanskassa vuonna 2020 jopa 8,4 TWh sähköä saateen tuottaa ylimääräisenä, koska suuri tuulivoiman lisäys tuo tuotannon tasapaino-ongelmia CHP-laitoksille, sillä CHP-laitoksia ei ole suunniteltu toimimaan tuulivoiman tuotannon epätasaisuuden kanssa. Lundin mukaan ongelmaa voisi korjata lisäämällä pien-CHP-tuotantoa sekä käyttämällä lämpöpumppuja, sillä näiden avulla voidaan säätää sähkön ja lämmön kysynnän suhdetta ja samalla säilyttää CHP-laitosten korkea polttoainetehokkuus. Toinen keino on lisätä systeemiin elektrolyysilaitoksia, jolloin ylijäämäenergiaa voidaan käyttää vedyn tuotantoon. (Lund 2007.) Zhang et al. (2012) puolestaan esittävät tutkimuksessaan, että lämpöpumput ja sähköautot pystyisivät käyttämään ylimääräistä aurinkopaneelien tuottamaa sähköä hyväkseen.

Lämpöpumppujen kohdalla ongelmia aiheuttavat lämpöpumppujen sähkönkulutuksen kasvihuonekaasupäästöt. Blum et al. (2010) osoittavat tutkimuksessaan, että maalämpöpumpun käyttämisestä johtuvat hiilidioksidipäästöt vaihtelevat tarkastellussa skenaariossa 149 ja 65 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh välillä riippuen käytetystä sähköenergianlähteiden yhdistelmästä. Tutkimuksessa saatiin 35 prosentin hiilidioksidipäästövähennys, kun käytettiin tavanomaista energialähteiden jakaumaa. Kun taas käytettiin alueellista energialähteiden yhdistelmää joka sisälsi paljon ydinvoimaa, hiilidioksidipäästöjen vähentymä oli tällöin 72 prosenttia. (Blum et al. 2010.) Samankaltaisiin tuloksiin päätyivät myös Kikuchi et al. (2009) tutkies-

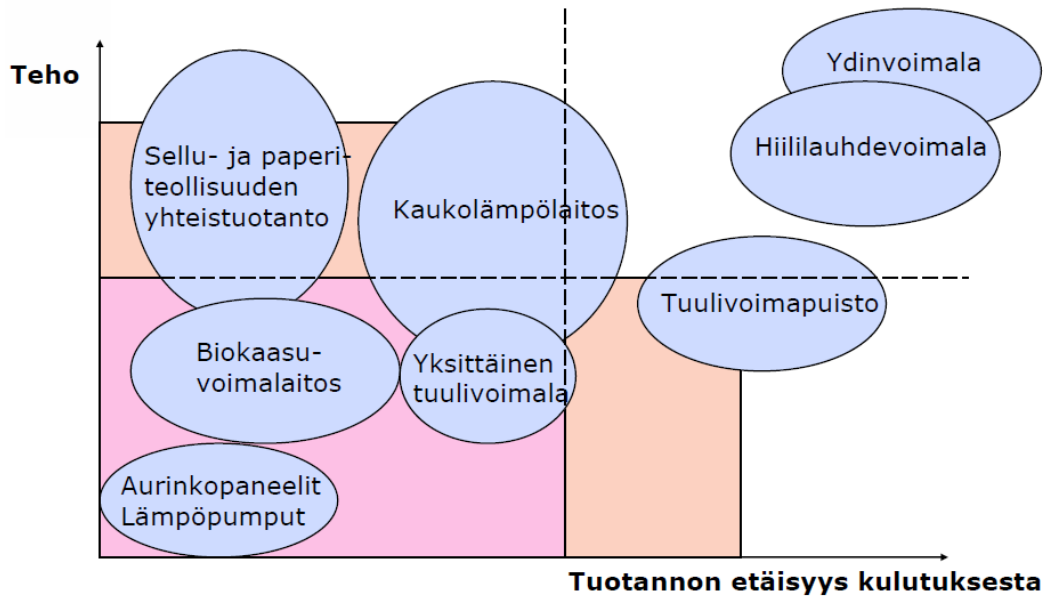


saan maalämpöpumppujen kasvihuonekaasupäästöjä Kanadalaisissa kaupungeissa. Heidän mukaansa maalämpöpumppujen käytöstä on sitä vähemmän hyötyä mitä suuremmat kasvihuonekaasupäästöt alueen sähköntuotannolla on. Heidän mukaansa alueilla, joissa suurin osa sähköntuotannosta tuotetaan fossiililla polttoaineilla, kannattaisi suosiakin lämpöpumppujen sijasta esimerkiksi aurinkopaneeleiden käyttöä.

Alueellisen energiantuotantotekniikoiden käyttöönotto ei ole siis täysin ongelmaton, vaikka ne onkin nähty tärkeänä keinona torjua ilmastonmuutosta. Alueellisen energiantuotannon kohdalla onkin syytä tarkastella energiantuotantotekniikkaa osana koko energiajärjestelmää, jolloin pystytään paremmin huomioimaan esimerkiksi jaksottaisuuden tuottamia ongelmia sekä sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen alueellisia eroja.

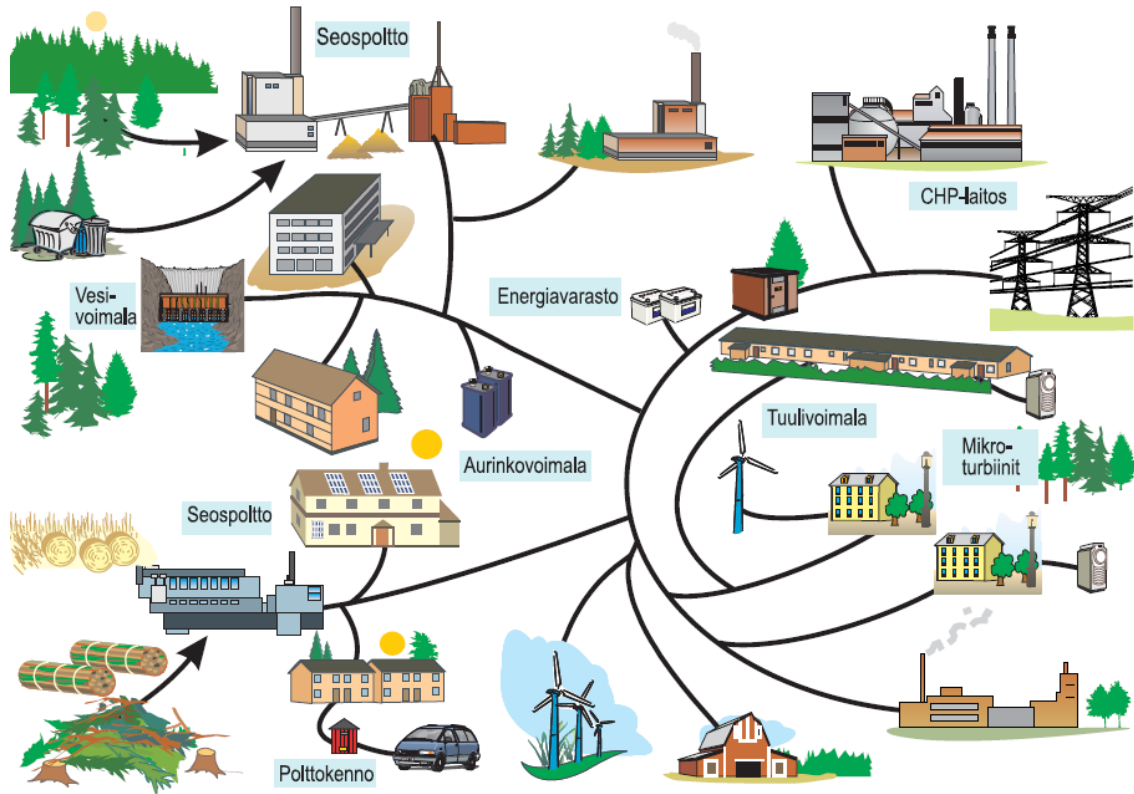
### Energiaverkot

Hajautetun ja keskitetyn energiantuotannon erolle ei ole selvää yhtenäistä määritelmää. Keskitetyllä energiantuotannolla tarkoitetaan yleensä teholtaan suuria tuotantoyksiköitä, jotka sijaitsevat kaukana kulutuksesta. Keskitettyä energiantuotantoa ovat siis esimerkiksi ydinvoimalat. Hajautetulla energiantuotannolla puolestaan tarkoitetaan teholtaan pienempiä yksiköitä, jotka sijaitsevat lähellä kulutusta. (Vanhanen 2008; Kannonlahti & Sjöholm 2012, 49.) Kuvassa 16 on esitetty hajautetun ja keskitetyn energiantuotannon jako. Kuvassa vaaleanpunaisella oleva alue kuvaa hajautettua energiantuotantoa, joka on siis teholtaan pientä ja sijainti on lähellä käyttökohdetta. Valkoisella oleva alue puolestaan kuvaa selkeästi keskitettyä energiantuotantoa, joka on siis teholtaan suurta ja sijaitsee kaukana käyttökohteesta. Kuvan oranssi alue taas kuvaa energiantuotantoa, joka on teholtaan ja etäisyydeltään hajautetun ja keskitetyn energiantuotannon välillä.



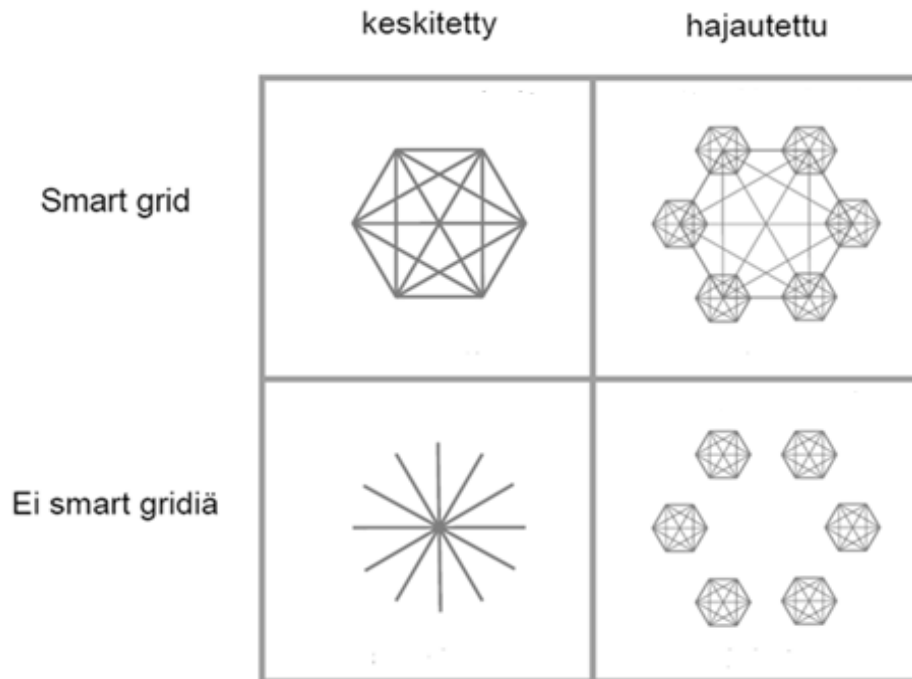
**Kuva 16.** Hajautetun ja keskitetyn energiantuotannon jako (Vanhanen 2008).

Erityisesti uusien hajautettujen energiamuotojen, kuten aurinkopaneelien ja pientuulivoiman, liittäminen energiaverkostoon vaatii nykyisen verkoston uudistamista. Uudet virtaamismallit vaativat muun muassa jakelun automatisointia ja yleistä valvontaa sekä uuden mikroverkoston rakentamista ja liittämistä vanhaan verkostoon. (Ipakchi & Albuyel 2009; Potter 2009; Lund 2007.) Kuvassa 17 on esitetty hajautetun energiantuotannon integrointi energiajärjestelmään. Kuvasta voidaan havaita, että hajautettua energiantuotantoa, kuten mikroturbiineja ja aurinkovoimaloita, pyritään tulevaisuudessa yhdistämään keskitetyn tuotannon, sähköautojen sekä energiavarastojen kanssa samaan energiajärjestelmään.



**Kuva 17.** Hajautetun energiantuotannon yhdistäminen energiajärjestelmään (Hirvonen (toim.) 2001, 9).

Tulevaisuudessa energiaverkostossa hajautetun energian rooli tulee todennäköisesti kasvamaan. Lisäksi nykyiseen sähköverkkoon ollaan yhdistämässä myös niin sanottuja älykkäitä sähköverkoja. (Lonka 2011.) Teknologiateollisuus (2013) määrittelee älykkäiksi sähköverkoiksi jakeluverkot, jotka hyödyntävät automaatio-, tieto- ja viestintäteknologiaa sekä sähkömarkkinoiden ja kuluttajan välistä tiedonkulkua. Kuvassa 18 on esitetty Lonkan (2011) näkemys eri energiaverkoista. Kuvassa energiaverkot on jaettu sekä keskitettyihin että hajautettuihin verkkoihin sekä verkkoihin, joissa on älykäs sähköverkko (smart grid) ja joissa sitä ei ole.



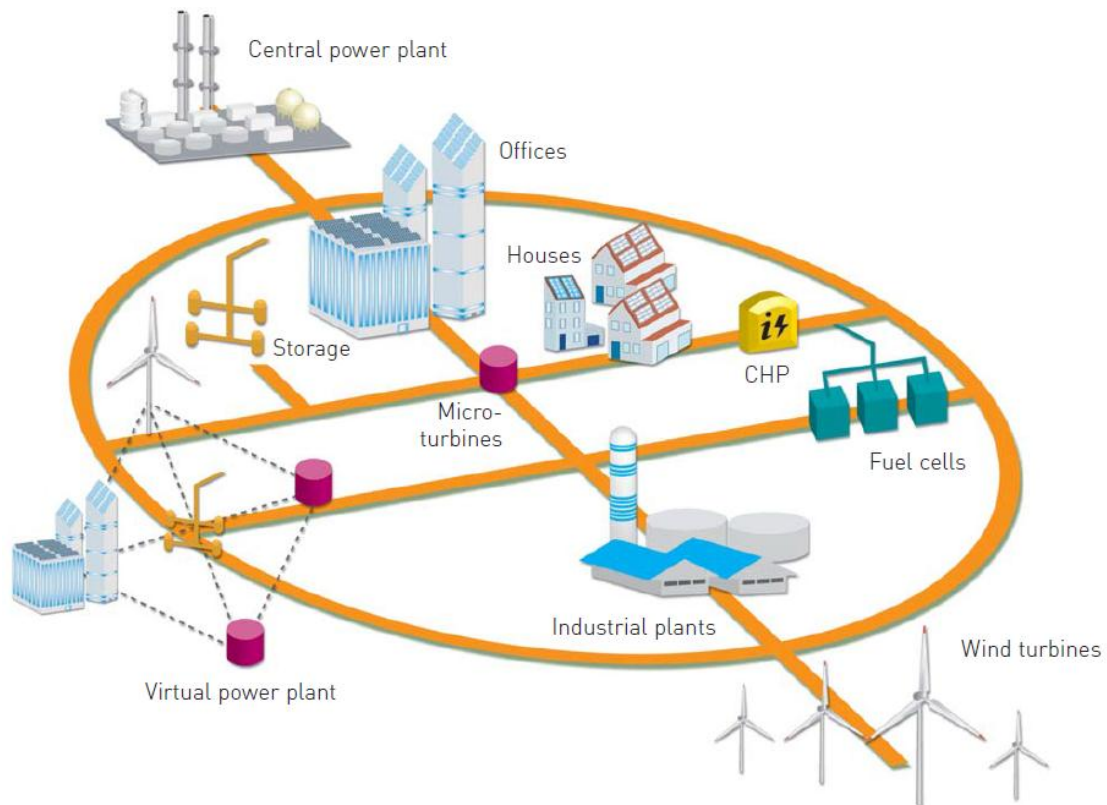
**Kuva 18.** Energiaverkkojen periaatekuvat (Mukaiillen: Lonka 2011).

Tällä hetkellä Suomen energiaverkostoa kuvaa hyvin alin laatikko vasemmalla, sillä suurin osa Suomen energiantuotannosta on tällä hetkellä keskitetysti tuotettua eivätkä verkostot ole vielä älykkäitä. Tulevaisuuden energiaverkostossa todennäköisesti yhdistyvät hajautettu ja keskitetty tuotanto, joiden energiavirtauksia säädellään älykkäillä sähköverkoilla eli kuvassa se tarkoittaisi ylintä lokeroa oikealla.

Brownin (2008) mukaan älykkään sähköverkon tärkeitä ominaisuuksia tulevaisuudessa ovat sen itsekorjautuvuus, korkea luotettavuus ja sähkön laatu, verkkohyökkäyksien kesto, erilaisten hajautetun tuotannon ja varastoinnin vaihtoehtojen integrointi, varojen käytön optimointi sekä toiminta- ja ylläpitokustannusten minimointi. Tutkimuksen mukaan ongelmana kuitenkin ovat jo olemassa olevat verkot, jotka ovat erilaisia kuin tulevaisuuden älykkäät sähköverkot, ja nykyisen systeemin liittäminen älykkääseen sähköverkkoon tulee viemään vuosikymmeniä.

EU:ssa on lisäksi nähty tarve parantaa Euroopan verkkoja niin, että ne voidaan liittää yhteen koko mantereen laajuisesti yhteiseksi energiainfrastruktuuriksi. Energiainfrastruktuurilla tarkoitetaan kaikkia fyysisiä laitteita, jotka on suunniteltu mahdollistamaan sähkön tai kaasun siirto ja jakelu, öljyn tai hiilidioksidin siirto taikka sähkön tai kaasun varastointi.

Yhtenäisen energiainfrastruktuurin luomiseksi Eurooppaan on kehitettävä sähkö-, kaasu- ja öljykäytäviä. Suurilla sähkönsiirron väylillä pyritään ensisijaisesti sopeutumaan lisääntyvään tuulivoiman ylijäämätuotantoon Pohjanmerellä ja Itämerellä ja niiden ympäristössä sekä lisääntyvään uusiutuvan energian tuotantoon Itä- ja Etelä-Euroopassa sekä Pohjois-Afrikassa. Näillä väylillä pyritään liittämään nämä uudet tuotantokeskukset tärkeimpiin varastointikapasiteetteihin sekä mukautumaan yhä vaihtelevampiin ja hajautetumpiin sähkötoimituksiin ja yhä joustavampaan sähkönkysyntään. (European commission 2011.) Kuvassa 19 on esitetty EU:n visio tulevaisuuden sähköverkosta. Järjestelmän toiminta jaetaan keskitettyyn ja hajautettuun tuotantoon.



**Kuva 19.** EU:n visio tulevaisuuden sähköverkosta (European commission 2006, 18). (central power plant = keskusvoimalaitos, offices = toimistot, houses = talot, storage = varastointi, micro-turbines = mikroturbiinit, virtual power plant = virtuaalinen voimalaitos, industrial plants = teollisuuden laitoksia, CHP = sähkön ja lämmön yhteistuotanto, fuel cells = polttokennoja, wind turbines = tuulivoimaloita).

Kaiken kaikkiaan osa suurista voimalaitoksista tullaan korvaamaan hajautetulla energiantuotannolla, uusiutuvilla energian lähteillä, kysynnän ja tarjonnan hallinnalla sekä energian varastoinnilla. Kuvassa näkyvä ”virtuaalinen voimalaitos” yhdistää eri energiantuotantolaitosten tietoliikennettä, ohjausta ja diagnostiikkaa, mikä on välttämätöntä järjestelmän toi-

mivuuden kannalta. Lisäksi älykkäät sähköverkot mahdollistavat verkon asiakkaille entistä aktiivisemmän roolin sähkön tuotannossa ja koko Euroopan kattava sähköverkko mahdollistaa uusia resursseja sekä entistä energiatehokkaamman energian siirron eri alueiden välillä. (European commission 2006, 18–19).

Suomen energiankulutus ja -tuotanto ovatkin uudistumassa radikaalisti seuraavina vuosikymmeninä. Energiankulutus muuttuu todennäköisesti niin, että sähkön kysyntä tulee tulevaisuudessa kasvamaan, kun taas lämmön kysynnän odotetaan vähenevän energiatehokkaanrakentamisen seurauksena. Energiantuotannon puolella keskitetystä tuotannosta ollaan siirtymässä hajautettuun tuotantoon ja fossiilisia polttoaineita korvataan uusiutuvilla polttoaineilla. Tämän lisäksi älykkäät ja integroidut sähköverkot tulevat korvaamaan vanhaa sähköverkkoa. Kaiken kaikkiaan nämä muutokset todennäköisesti lisäävät energiantuotannon energiatehokkuutta ja vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä.

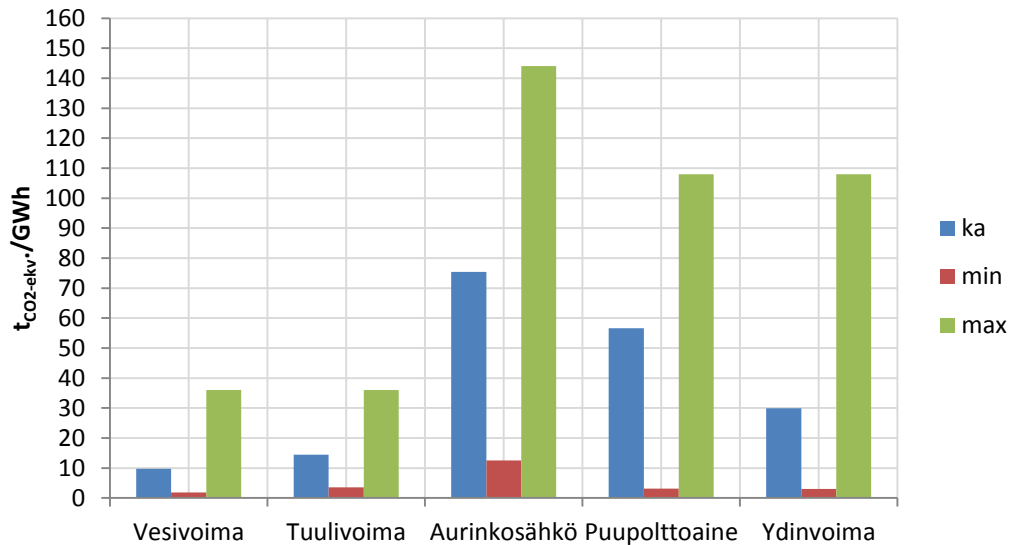
### 3 ENERGIANTUOTANNON ELINKAARENAIKAISET KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖKERTOIMET

Tässä luvussa tarkastellaan tässä työssä käytettävien energiantuotantotekniikoiden ja - polttoaineiden elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästökertoimia rakentamisen ja käytön osalta sekä niiden määrittämiseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Rakentamisen ja asentamisen osalta elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästöjä on selvitetty vain maalämpöpumpulle sekä kaukolämpöverkostolle, sillä näitä lämmöntuotantotekniikoita tullaan vertailemaan case-tarkastelussa. Kirjallisuudessa elinkaariset kasvihuonekaasupäästökertoimet samalle energiantuotantotekniikalle ja polttoaineelle vaihtelevat paljon, joten kertoimen valinnalla on merkittävä vaikutus kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin.

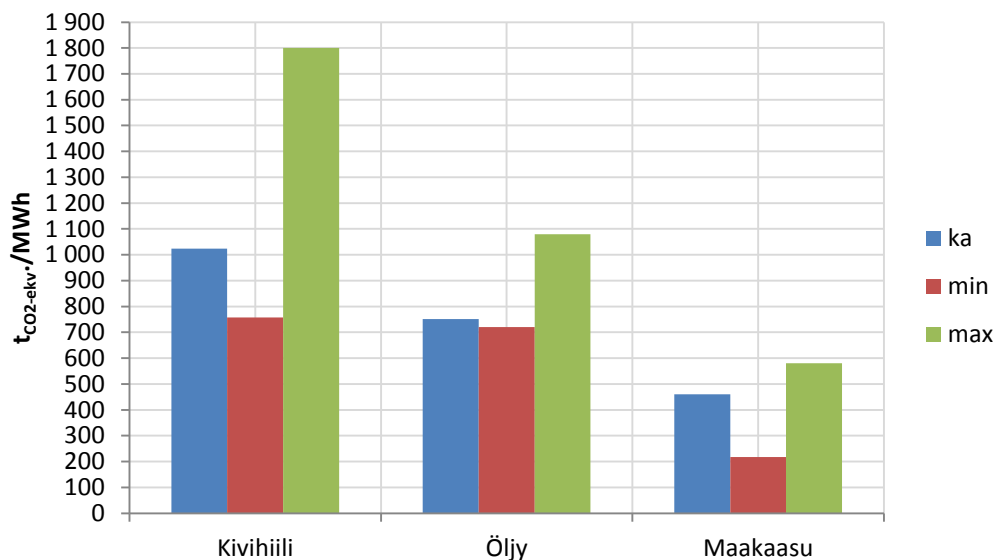
Kurnitskin ja Kedon (2010, 468–469) mukaan varsinaisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöt ovat seurausta polttoaineiden polttamisesta, jonka päästöihin vaikuttaa käytettyjen polttoaineiden lisäksi myös laitoksen hyötysuhde. Heidän mukaansa tarkastelussa voidaan lisäksi huomioida tuotantoyksiköiden ja verkostoiden rakentamisen, ylläpidon ja purkamisen päästöt. Rakennusten energiantuotannon kasvihuonekaasupäästövaikutukset voidaankin ulottaa käsittämään vaiheet aina valmistuksesta ja järjestelmien asentamisesta tai rakentamisesta käyttövaiheeseen ja lopulta loppukäsittelyyn.

IPCC:n (2006, 10–11) mukaan kasvihuonekaasupäästöjen inventaariossa epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä löydettiin kahdeksan. Ensimmäisenä mainitaan tietojen epätäydellisyys, joka johtuu siitä, että päästötietoja ei välttämättä ole saatavilla, koska prosessia ei tunnisteta tai soveltuvaa mittausmenetelmää ei ole olemassa. IPCC:n mukaan epävarmuutta aiheuttaa myös käytetyt mallit, jotka yksinkertaistavat todellisuutta käyttämällä keskiarvoja ja arvioita. Epävarmuutta aiheuttaa myös tietojen puute, sillä joissakin tapauksissa tietoja ei vain ole saatavilla, sekä edustavien tietojen puute, jolloin saatava tieto ei vastaa todellisen tilanteen tietoja. Tämä on esimerkiksi tilanne voimalaitoksissa, joissa päästötietoja kerätään vain tilanteissa, joissa laitosta ajetaan täydellä kapasiteetilla, mutta ei käynnistys- tai alasajovaiheessa. IPCC:n mukaan virhettä aiheuttavat myös tilastollinen satunnaisvirhe, virheellinen päästöluokittelu, mittausvirhe sekä mittauksista saadut puutteelliset tiedot, koska esimerkiksi mitattavat arvot voivat olla niin pieniä, että käytetty mittari ei niitä havaitse.

Energiantuotannon elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästöjä on laskettu paljon kirjallisuudessa. Kirjallisuudesta löydetyt arvot kasvihuonekaasupäästöille vaihtelivat paljon lähteestä riippuen. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty eri sähköntuotannon polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen minimi-, keski- ja maksimi-arvot. Käytetty aineisto ja aineistosta saadut arvot kasvihuonekaasupäästöille on esitetty tarkemmin liitteessä I.



**Kuva 20.** Uusiutuvan energian ja ydinvoiman elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelu kirjallisuudessa



**Kuva 21.** Fossiilisten polttoaineiden elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelu kirjallisuudessa.



Tässä työssä on päädytty käyttämään kirjallisuuskatsauksesta kerättyjen arvojen keskiarvoa laskennassa. Taulukossa 3 on esitetty tässä työssä käytettävät sähköntuotannon eri polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt.

**Taulukko 3.** Eri sähköntuotannon polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt kirjallisuuden keskiarvoina.

<b>Polttoaine / energiantuotantotekniikka</b>	<b>Kasvihuonekaasupäästö [tCO<sub>2</sub>-ekv./GWh]</b>
Vesivoima	10
Tuulivoima	14
Aurinkosähkö	75
Puupolttoaine	57
Ydinvoima	30
Kivihiili	1 024
Öljy	751
Maakaasu	461

Taulukossa 4 on puolestaan esitetty tässä työssä käytettävät lämmöntuotannon eri polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt

**Taulukko 4.** Eri lämmöntuotannon polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt kirjallisuuden keskiarvoina.

<b>Polttoaine / energiantuotantotekniikka</b>	<b>Kasvihuonekaasupäästö [tCO<sub>2</sub>-ekv./GWh]</b>			
	<b>Pehnt 2004</b>	<b>Cherubini 2009</b>	<b>WEC 2004</b>	<b>Keskiarvo</b>
Puupolttoaine (lämpölaitos)	21,6	45	-	<b>33,3</b>
Puupolttoaine (talokohtainen)	21,6	-	18,5	<b>20,1</b>
Jättepolttoaine	36,0	-	-	<b>36,0</b>
Aurinkolämpö	21,6	72,0	-	<b>46,8</b>
Hiili	-	468,0	529,3	<b>498,7</b>
Kevyt polttoöljy	-	-	354,2	<b>354,2</b>
Maakaasu	-	279,0	278,7	<b>278,8</b>
Teollisuuden puutähde	-	-	10,0	<b>10,0</b>

Kuvista ja taulukoista voidaan havaita, että kasvihuonekaasupäästöarvojen minimi- ja maksimi-arvot poikkeavat toisistaan paljon. Tämä johtuu käytettyjen lähteiden erilaisista lähtötiedoista, rajauksista ja oletuksista, kasvihuonekaasupäästöjen maantiellisestä rajauksesta, eri laskenta valinnoista sekä erilaisten elinkaarianalyysimetodien käytöstä. Elinkaarisen kasvihuonekaasupäästöarvon valinta vaikuttaakin paljon eri energiantuotantotapojen kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin.

### Kaukolämmön rakentamisaikaiset kasvihuonekaasupäästöt

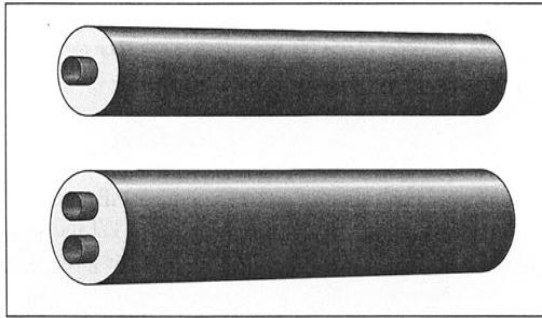
Kaukolämmön rakennusvaiheen elinkaari-päästöt riippuvat kaukolämpöverkoston ja -laitteiden tuotannosta ja verkoston rakentamisesta. Käytön elinkaaren aikaiset päästöt puolestaan riippuvat ennen kaikkea kaukolämpöä tuottavan laitoksen käyttämästä polttoaineesta. Ristimäki et al. (2013) tekemässä tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin asuinalueen energiantuotannon vaihtoehtoja LCC ja LCA näkökulmasta, kaukolämmön rakentamisaikaisen LCA päästöt olivat noin 20 prosenttia kaukolämmön kokonaispäästöistä. Persson et al. (2006) ovat ruotsalaiseen kaukolämmön tuotantoon perustuen määrittäneet, että kaukolämpöverkoston ja -laitteiden tuotannon ja verkon rakentamisen kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 20 prosenttia koko kaukolämmön kasvihuonekaasupäästöistä. Kaukolämmön putkistotuotannon elinkaarenaikaisia päästöjä on selvitetty Fröling et al. (2004) tekemässä tutkimuksessa. Taulukossa 5 on esitetty tutkimuksen tulokset kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Kaukolämpöverkoston rakennusvaiheen elinkaarenaikaisia päästöjä on puolestaan laskettu Fröling & Svanström (2005) tekemässä tutkimuksessa. Tutkimuksen tulokset kasvihuonekaasupäästöjen osalta on esitetty taulukossa 6. Kuvassa 22 on puolestaan esitetty taulukoissa esiintyvät putkityypit.

**Taulukko 5.** Kaukolämpöverkoston putkien tuotannon päästöt (Fröling et al. 2004).

Putkityyppi	Tuotetun putken pituus [m]	Päästö [ $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-eq.}}/\text{tuotettu putki}$ ]
DN25, kaksiputkijohto	12	160
DN25, yksiputkijohto	12	88
DN100, yksiputkijohto	12	380
DN500, yksiputkijohto	16	4 300

**Taulukko 6.** Kaukolämpöverkoston rakennusvaiheen päästöt kaupunkialueella eri putkityypeittäin per 100 m asennettua putkityyppiä (Fröling & Svanström 2005).

Putkityyppi	Päästö [ $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/\text{100 m}_{\text{putki}}$ ]
DN25, kaksiputkijohto	910
DN25, yksiputkijohto	1 300
DN100, yksiputkijohto	2 200
DN500, yksiputkijohto	7 200



**Kuva 22.** Kaukolämpöputkityypit: ylempänä yksiputkijohto ja alempana kaksiputkijohto (Fröling et al. 2004).

Kaukolämpöputkityypeistä yksijohtoputkityyppiä tarvitsee aina asentaa kaksi rinnakkaista putkea lämpimälle menovedelle ja kylmälle tulovedelle. Kaksiputkijohtotyypissä sekä men- että tulovesi virtaavat samassa putkistossa.

#### Maalämpöpumpun rakentamisaikaiset kasvihuonekaasupäästöt

Lämpöpumpun elinkaaripäästöt riippuvat sekä rakentamisen aikaisista päästöistä että käytönaikaisista päästöistä. Käytön aikaiset päästöt riippuvat lähinnä käytetyn sähkön elinkaarenaikaisista päästöistä. Genchi et al. (2002) osoittavat tutkimuksessaan, että suurin päästö maalämpöpumpun rakennusvaiheessa syntyy maanalaisten putkien asennusprosessissa. Tutkimuksen mukaan putkien asennus voi kattaa noin 90 prosenttia maalämpöpumpun rakennusvaiheen kasvihuonekaasupäästöistä. (Genchi et al. 2002.) Ristimäki et al. (2013) tekemässä tutkimuksessa maalämpöpumpun rakennusvaiheen kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 35 prosenttia koko maalämpöpumpun elinkaaren päästöistä. Greening & Azapagic (2012) ovat tutkimuksessaan laskeneet maalämpöpumpun elinkaarenaikaisiksi kasvihuonekaasupäästövaikutuksiksi  $0,189 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{kWh}$ , josta sähköntuotannon osuus on 95 prosenttia, kun toiminnallinen yksikkö on yhden lämpöenergia kWh tuottaminen. Tällöin maalämpöpumpun muut elinkaarenaikaiset päästöt kasvihuonekaasupäästöjen osalta ovat

siis viisi prosenttia eli  $0,00945 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{kWh}$ . Tutkimuksessa Iso-Britannia toimi tarkaste-  
lukohteena ja COP-lukuna käytettiin arvoa 3,9, joka on Suomen olosuhteisiin liian korkea.  
Maalämpöjärjestelmälle, jonka COP-luku on 3, muusta kuin sähköntuotannosta aiheutuvat  
kasviuonekaasupäästöt vastaavilla oletuksilla ovat  $0,0123 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{kWh}$ .

## 4 KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖLASKENNAN LASKENTAMENETELMÄVALINNAT

Tässä luvussa perehdytään kasvihuonekaasupäästölaskennan eri laskentamenetelmävalintoihin. Luvussa tarkastellaan lähemmin sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästökertoimen eri mahdollisuuksia sekä CHP-laitoksen lämmön- ja sähköntuotannon päästöjen allokointimenetelmiä. Alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan osalta on tärkeää tietää, minkälaisia eri laskentamenetelmävaihtoehtoja on olemassa, missä eri tilanteissa on hyväksyttävää käyttää mitäkin laskentatapaa sekä ymmärtää, miten eri laskentamahdollisuudet vaikuttavat kasvihuonekaasupäästölaskennan lopputuloksiin.

Kasvihuonekaasupäästölaskennan laskentamenetelmävalintoja on myös tutkittu kirjallisuudessa. Huijbregts (1998) nostaa elinkaarilaskennan yhdeksi epävarmuudeksi ja tuloksiin vaihtelevuutta aiheuttavaksi tekijäksi päätöksistä johtuvat valinnat, kuten usean tuotoksen prosessin allokointitavan. Lähienergian tuotannossa tämä ongelma koskettaa lämmön- ja sähkön yhteistuotannon polttoaineiden ja päästöjen allokointia eri tuotoksille. Huijbregtsin tutkimuksen mukaan myös alueellinen vaihtelu vaikuttaa elinkaarilaskennan tuloksiin esimerkiksi päästöjen alueellisten erojen vuoksi. Lähienergiaratkaisujen osalta ongelma tulee esille, kun määritellään sähköntuotannon maantieteellistä rajausta. Björklund (2002) on löytänyt tutkimuksessaan samat elinkaarilaskennan epävarmuuteen vaikuttavat tekijät kuin Huijbregtskin, mutta hän lisää päätöksistä johtuviin epävarmuuksiin myös valinnan keskiarvoisen ja marginaalisen tiedon väliltä. Energiaratkaisujen näkökulmasta ongelma marginaalisen vai keskiarvo tiedon välillä nousee esiin sähköntuotannon päästöjen kohdalla. Curran et al. (2005) puolestaan käsittelevät tutkimuksessaan elinkaarianalyysin tämänhetkisiä keskeisiä kysymyksiä. Heidän tutkimuksensa nostaa tärkeimpinä keskustelunaiheina sen, pitäisikö sähköntuotannon päästöjen laskennassa käyttää keskiarvo- vai marginaalitietoja, yhteistuotannon päästöjen allokoinnin, systeemin rajojen määrittelyn, siirron ja jakelun sekä uusien ja ei-perinteisten teknologioiden mallinnuksen.

### 4.1 CHP-tuotannon päästöjen allokoiminen

Allokointimenettelyllä tarkoitetaan menettelyä, jossa prosessin tai tuotejärjestelmän syöte- ja tuotosvirrat jaetaan tutkittavan tuotejärjestelmän ja yhden tai useamman muun tuotejär-

jestelmän välillä. Allokointi tulisi toteuttaa niin, että järjestelmän syötteet ja tuotokset ositetaan sen eri tuotteiden ja toimintojen välillä tavalla, joka heijastaa niiden välillä vallitsevia fysikaalisia suhteita. Toisin sanoen niiden tulisi kuvastaa tapaa, jolla järjestelmän tuottamien tuotteiden ja toimintojen määrälliset muutokset muuttavat syötteitä ja tuotoksia. Jos fysikaalisia suhteita ei voida käyttää allokoinnin perustana, syötteet tulisi allokoida tuotteiden ja toimintojen välillä käyttäen muita niiden välisiä suhteita, kuten taloudellista arvoa. Kaiken kaikkiaan allokointimenettelyjen olisi kuvattava alkuperäisiä syöte-tuotos -suhteita ja perusominaisuuksia siinä määrin kuin mahdollista. Tämän lisäksi, mikäli useat allokointimenettelyt vaikuttavat sovelialta, tulee toteuttaa herkkyysanalyysi, jolla osoitetaan valitusta lähestymistavasta poikkeamisen seuraukset. (ISO 14044.)

Allokointia tulisi kuitenkin mahdollisuuksien mukaan välttää esimerkiksi jakamalla allokoitava yksikköprosessi kahteen tai useampaan alaprosessiin ja keräämällä näihin alaprosesseihin liittyvät syöte- ja tuotostiedot tai laajentamalla tuotejärjestelmä kattamaan rinnakkaistuotteisiin liittyvät lisätoiminnot. Näissä tilanteissa pitää ottaa huomioon erilaiset korvaushyödyt, kuten tuotejärjestelmässä syntyneistä sivutuotteista saadut hyödyt. (ISO 14044.) Tässä työssä systeemin rajojen laajentaminen ei kuitenkaan ole järkevää, joten työssä käytetään sähkön- ja lämmönyhteistuotannon päästöihin allokointimenettelyä.

Euroopan Unionin uusiutuvan energian direktiivin eli RES-direktiivin mukaan uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian kasvihuonekaasupäästöjä laskettaessa olisi otettava huomioon myös polttoaineiden tuotannon ja käytön sivutuotteet. Direktiivin mukaan korvausmenetelmää voidaan käyttää toimintapoliittisessa analysoinnissa, mutta ei yksittäisten talouden toimijoiden ja yksittäisten liikenteen polttoaine-erien sääntelyssä. Näissä tapauksissa tarkoituksenmukaisin menetelmä on energia-allokointimenetelmä, koska sitä on helppo soveltaa, se toimii ennakoitavasti, minimoi ei-toivotut kannustimet ja tuottaa tuloksia, jotka ovat yleisesti vertailukelpoisia korvausmenetelmän tuottamien tulosten kanssa. (2009/28/EY.)

Yhteistuotantolaitos (CHP-laitos) tuottaa sekä sähkö- että lämpöenergiaa hyötykäyttöön. Sähkön ja lämmön polttoaineiden ja päästöjen jakamiseen on olemassa useita vaihtoehtoisia menetelmiä. Eri menetelmillä lasketut päästöt eroavat toisistaan, joten käytetty allokointitapa on merkittävä tekijä yhteistuotannon lämmön ja sähkön päästölaskennassa. (Lii-

kanen 1999, 15.) Tässä työssä käytettävät menetelmät on valittu siten, että ne soveltuvat lähtötietojen saannin perusteella vertailtaviksi menetelmiksi. Vertailtaviksi allokointimenetelmiksi valittiin hyödynjakomenetelmä, energiamenetelmä, lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä sekä sähkön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä. Muita Liikanen (1999, 18–35) mainitsevia menetelmiä ovat eksergiamenetelmä, suhdemenetelmä, työmenetelmä ja hintaperusteinen menetelmä. Tämän lisäksi muun muassa Helsingin Energialla on käytössä menetelmä, joka perustuu SFS-EN 15316-4-5: 2007 standardiin (Helsingin Energia 2013).

### Hyödynjakomenetelmä

Hyödynjakomenetelmässä polttoaineet ja päästöt jaetaan vaihtoehtoisten hankintamuotojen polttoainekulutusten suhteessa.

- Sähkölle lauhdetuotanto (hyötysuhde 39 %).
- Lämmölle vesikattilalämpö (hyötysuhde 90 %).

Hyödynjakomenetelmässä lasketaan ensin vaihtoehtoisten hankintamuotojen polttoaineiden kulutukset. Sen jälkeen toteutunut polttoaineen kulutus jaetaan vaihtoehtoisten hankintojen kulutusten suhteessa, jolloin saadaan polttoaineiden kulutus sähkölle ja lämmölle. (Liikanen 1999, 30–31.)

Laskennassa selvitetään ensin vaihtoehtoisten hankintamuotojen polttoaineen kulutukset yhtälöillä 1 ja 2

$$F'_e = \frac{E_e}{\eta_e} \quad (1)$$

$$F'_h = \frac{E_h}{\eta_h} \quad (2)$$

joissa

$F'_e$  = vaihtoehtoisen sähkön erillistuotannon polttoainekulutus

$F'_h$  = vaihtoehtoisen lämmön erillistuotannon polttoainekulutus

$E_e$  = tuotettu sähkö yhteistuotannossa

$E_h$  = tuotettu lämpö yhteistuotannossa

$\eta_e$  = sähkön erillistuotannon hyötysuhde (39 %)

$\eta_h$  = lämmön erillistuotannon hyötysuhde (90 %)

Sen jälkeen toteutunut polttoaineen kulutus jaetaan vaihtoehtoisten hankintojen kulutusten suhteessa yhtälöillä 3 ja 4

$$F_e = \frac{F'_e}{F'_e + F'_h} F \quad (3)$$

$$F_h = \frac{F'_h}{F'_e + F'_h} F \quad (4)$$

joissa,

$F_e$  = laskennallinen sähkön polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa

$F_h$  = laskennallinen lämmön polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa

$F$  = polttoaineiden kulutus yhteistuotannossa

Hyödynjakomenetelmässä painotukset perustuvat siis erillistuotannon hyötysuhteisiin. Tämä laskentamenettely antaa hyvän kuvan yhteistuotannon eduista verrattuna erillistuotannon energialaitoksiin.

### Energiamenetelmä

Energiamenetelmässä polttoaineet ja päästöt jaetaan tuotettujen energioiden suhteessa. Esimerkiksi, mikäli laitos tuottaisi kaukolämpöä 700 GWh ja sähköä 300 GWh, niin 30 % käytetystä yhteistuotannon primäärienergiasta jyvitetään sähkölle ja 70 % lämmölle. Kaikille tuotteille kohdistuu polttoaineita laitoksen kokonaishyötysuhteen mukaan. (Liikanen 1999, 17.) Polttoaineiden jakaminen energiamenetelmällä tapahtuu yhtälöillä 5 ja 6

$$F_e = \frac{E_e}{E_e + E_h} \cdot F \quad (5)$$



$$F_h = \frac{E_h}{E_e + E_h} \cdot F \quad (6)$$

Tässä menetelmässä lämpöön kohdistuu ylimääräisiä päästöjä lämmön erillistuotantoon verrattuna, sillä lämmön erillistuotannon hyötysuhde on parempi kuin yhteistuotannon hyötysuhde.

#### Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä

Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmäksi valitaan joko lämmön tai sähkön vaihtoehtoisen hankintamenetelmä. Menetelmässä valitaan siis toinen yhteistuotannon tuotteista tuotteeksi sille tyypillisellä erillistuotantomuodolla, joka lämmölle on erillislämpökattila ja sähkölle lauhdelaitos. Saatu vaihtoehtoisen hankinnan polttoainekulutus vähennetään CHP-laitoksen polttoainekulutuksesta ja jäljelle jäävä osuus polttoaineista ja päästöistä kohdistetaan toiselle tuotteelle. (Liikanen 1999, 23–25.)

Lämmön vaihtoehtoisessa hankintatavan menetelmässä lasketaan ensin vaihtoehtoisen lämmöntuotannon polttoaineenkulutus yhtälöllä 7

$$F_h = \frac{E_h}{\eta_h} \quad (7)$$

Tämän jälkeen loput polttoaineesta kohdistetaan sähkölle yhtälöllä 8

$$F_e = F - F_h \quad (8)$$

Sähkönvaihtoehtoisessa hankintatavan menetelmässä puolestaan lasketaan ensin vaihtoehtoisen sähköntuotannon energiankulutus yhtälöllä 9

$$F_e = \frac{E_e}{\eta_e} \quad (9)$$

Tämän jälkeen loput polttoaineesta kohdistetaan lämmölle yhtälöllä 10

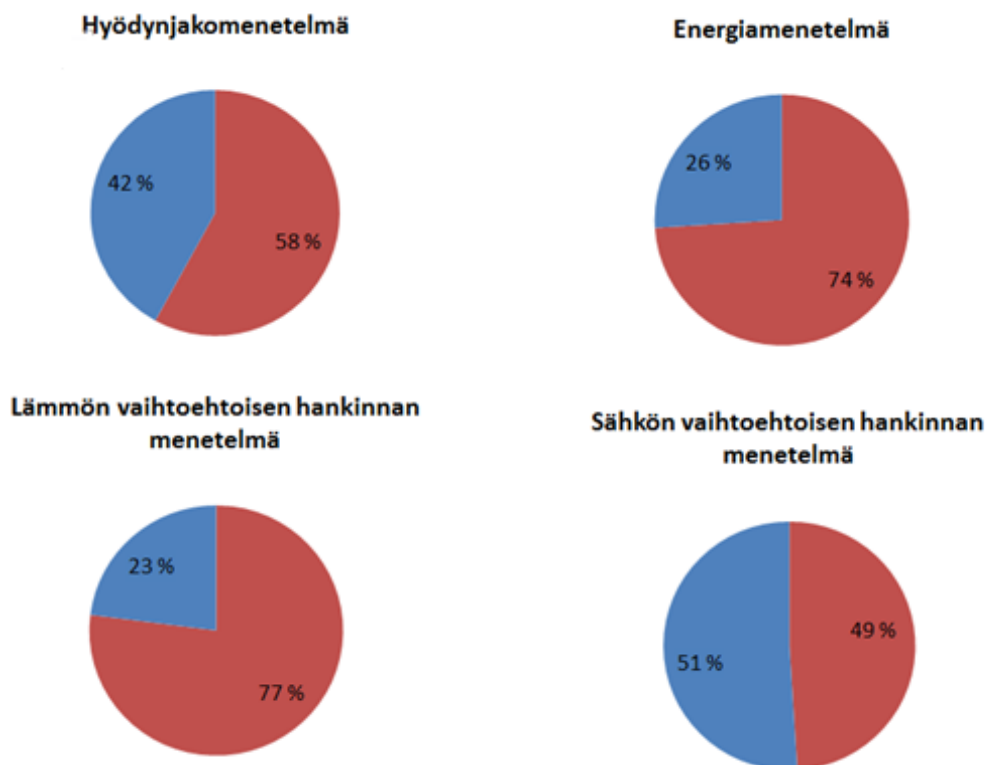
$$F_h = F - F_e \quad (10)$$

Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä yhteistuotannon hyöty kohdistetaan vain toiselle tuotteelle eli kokonaan lämmölle sähkön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä tai kokonaan sähkölle lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä.

### Menetelmien vertailua

Edellä esitellyistä menetelmistä hyödynjakomenetelmää käytetään esimerkiksi Motivan laskentaohjeissa, WWF:n ilmastolaskurissa sekä HSY:n ilmastoveivissä (Motiva 2004; Ilmastolaskuri 2011; Ilmastoveivi). RES-direktiivissä suositellaan käytettäväksi energiamenetelmää, kuten luvussa aiemmin kävi ilmi. Energiamenetelmä on ollut käytössä myös Tilastokeskuksessa vuodesta 2000 alkaen. Sen lisäksi Tilastokeskus dokumentoi tilastojaan myös hyödynjakomenetelmällä. Ennen vuotta 2000 Tilastokeskus käytti jakomenetelmänä lämmön vaihtoehtoista hankintatavan menetelmää. (Tilastokeskus 2012d.) Energiamenetelmä on myös käytössä KASVENER-mallissa eli alueellinen kasvihuonekaasupäästöjen arviointimallissa, mutta mallin muutostarpeina on nähty muiden jakomenetelmien, kuten hyödynjakomenetelmän tuonti laskuriin (Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu 2013).

Eri allokointimenetelmien käyttö tuottaa erilaisia tuloksia lämmön ja sähkön päästöjen jakautumiselle. Kuvassa 23 on esitetty eri jakotapojen vertailu perustuen esimerkkilaitokseen.

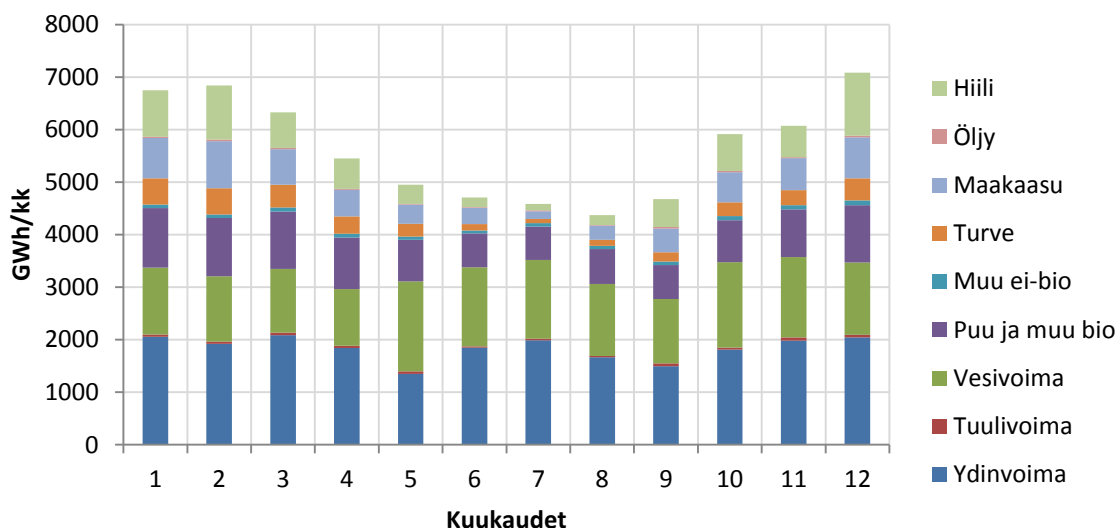


**Kuva 23.** Eri jakomenetelmien vertailu perustuen esimerkkilaitokseen (Liikanen 1999, 37). Sektoreiden punainen osuus kuvaa lämmön osuutta ja sininen sähkön osuutta.

Hyödynjakomenetelmässä laskennan painotukset perustuvat erillistuotannon hyötysuhteisiin, joten sillä pystytään vertailemaan hyvin CHP-laitosta erillistuotantolaitoksiin. Energiamenetelmä taas jakaa päästöt suoraan tuotettujen energioiden suhteessa, jolloin kaukolämmölle tulee suurin osa päästötaakasta. Vaihtoehtoisen hankinnan menetelmän jakotavassa puolestaan yhteistuotannon hyöty kohdistetaan vain toiselle tuotteelle, jolloin koko päästötaakka kohdennetaan taas toiselle tuotteelle.

## 4.2 Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt

Sähkö eroaa muista energialähteistä siinä mielessä, että sitä ei voi varastoida, vaan se on käytettävä silloin kun se tuotetaan. Sähköä voidaan myös kuljettaa pitkiä matkoja sähkölinjoja ja -johtoja pitkin. Sähkönkulutus ja -tuotanto vaihtelevat vuoden, vuodenajan ja päivän ajankohdan mukaan. Lisäksi sähköntuotanto vaihtelee eri energiaverkoittain. (Soimakallio et al. 2011.) Kuvassa 24 on esitetty esimerkkinä Suomen sähköntuotannon vaihtelu energialähteittäin vuonna 2012.



**Kuva 24.** Suomen sähköntuotannon kuukausitilasto energialähteittäin vuonna 2012 (Energiateollisuus 2013c).

Näin ollen ei ole olemassa yhtä yleisesti hyväksyttyä tapaa, kuinka sähköntuotannon päätöt tulisi laskea. Currannin et al. (2005) mukaan yksi elinkaarimallintamisen keskeisiä keskustelun aiheita onkin kysymys siitä, pitäisikö sähköntuotannon päästöjen laskennassa käyttää keskiarvo- vai marginaalitietoja.

Weidema et al. (1999) määrittelee marginaaliksi teknologioiksi teknologiat, joihin pienet kysynnän muutokset vaikuttavat. Pitkän aikavälin marginaaliseksi tekniikaksi on puolestaan määritelty teknologia, joka on lisätty tai purettu pitkän aikavälin kysynnän muutoksen vuoksi. Lyhyen aikavälin marginaalinen tekniikka on taas olemassa olevaa tekniikkaa jonka tuotanto muuttuu lyhyen aikavälin kysynnän vuoksi. (Weidema et al. 1999.) McCarthy & Yangin (2010) mukaan sähköntuotannossa marginaalinen teknologia tarkoittaa viimeistä voimalaitosta, joka tuottaa sähköenergiaa tietyllä tunnilla. Heidän mukaansa marginaalinen sähköntuotantoyhdistelmä tarkoittaa silloin voimalaitosten joukkoa, joista viimeisinä toimitetaan sähköä verkkoon.

Weidema et al. (1999) toteavat tutkimuksessaan, että keskiarvotiedot verrattuna marginaalitietoihin ovat epävarmempia. Tämä johtuu ajallisen vaihtelun lisäksi niiden luontaisesta epävarmuudesta, mikä johtuu suurista määristä yhdistettyjä tietoja eri teknologioista, olosuhteista ja usein eri lähteistä. Heidän tutkimuksensa mukaan marginaalitieto kuvastaa paremmin päätösten todellisia seurauksia, eikä keskiarvotietoja tulisi käyttää juuri ollen-

kaan vertailevassa LCA:ssa. Kurnitski & Keto (2010, 471) toteavat myös tutkimuksessaan, että sähköntarpeen kasvaessa keskimääräinen päästö ei kuvaa kulutuksen kasvun päästövaikutuksia. Heidän mukaansa kulutuksen kasvua kuvaa sen sijaan hyvin marginaalinen tuotanto, joka määräytyy jokaisella ajanhetkellä sähkömarkkinoiden mukaan.

Soimakallio et al. (2011) on vertaillut tutkimuksessaan haitanjaollisen lähestymistavan (attributional LCA) ja seurausvaikutuksellisen tarkastelun (consequential LCA) sähköntuotannon päästöjen määrittämistä. ALCA on ns. peruselinkaariarviointi, joka kuvaa asioita niin kuin ne ovat nyt, eikä sillä siis pyritä kuvaamaan muutosta. ALCA:ssa käytetään tuotteiden keskiarvotietoja, koska ALCA ei kuvasta sähkönkulutuksen muutoksen kasvihuonekaasupäästöjen vaikutuksia. CLCA sen sijaan taas kuvaa prosessin muutosta ja sen seurauksia. CLCA:ssa käytetään keskiarvotietojen sijasta marginaalisia tietoja, koska sen tavoitteena on nimenomaan kuvata jonkin päätöksen aiheuttamaa kasvihuonekaasupäästöjen muutosta. ALCA:n ongelmana sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen määrittämisessä on valita alueellisesti ja ajallisesti sopiva sähköntuotannonyhdistelmä. Lisäksi on vaikea määrittellä objektiivisesti oikea markkina-alue ja ajallinen jakso sähköntuotannolle. CLCA:ssa taas suurin ongelma on tunnistaa marginaalitekniologia, sekä muutoksen aiheuttamat seuraukset. (Soimakallio et al. 2011.) Suomessa marginaalisähkö on pääosin konventionaalisilla hiililauhdevoimalaitoksilla tuotettua sähköä (Pöyry Oy 2010).

Sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen valinnalla keskiarvoisen ja marginaalisen tiedon välillä on suuri vaikutus kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin. Kirjallisuudessa on esitetty paljon perusteluita kummankin tiedon käytöistä tietyissä tilanteissa. Koska kuitenkin ei ole olemassa mitään yhteistä metodologiaa sähkönpäästöjen laskemiseen, tulokset voivat vaihdella suurestikin eri laskelmien ja tutkimusten välillä.

## 5 CASE: HÄRMÄLÄNRANTA

Tässä luvussa esitellään case-kohteeksi valittu Tampereen Härmälänrannan uudisrakennusalue, case-alueeseen liittyvä aiempi tutkimus sekä perehdytään Tampereen energiantuotantoon. Tämän lisäksi luvussa esitellään ja analysoidaan alueellisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskemista ja siinä tehtäviä laskentamenetelmävalintoja. Tässä luvussa esitetään myös kasvihuonekaasupäästölaskenta case-alueella esitetyn alueellisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan periaatteiden mukaisesti. Laskennan ja sen tulosten avulla pyritään vastamaan kysymykseen, miten laskentamenetelmävalinnat vaikuttavat alueellisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöihin ja voivatko nämä menetelmävalinnat vaikuttaa kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin enemmän kuin itse energiatekniikan valinta.

Härmälänranta sijaitsee Tampereella Pyhäjärven etelärannalla noin viiden kilometrin päästä ydinkeskustasta. Alue on entisen lentokonetehaan aluetta, joka on nyt muutettu asuinalueeksi. Alueen kaavoitus on valmistunut vuonna 2013 ja rakentaminen alkoi vuoden 2013 lopussa. Alueen arvioidaan olevan rakennettu vuonna 2024. (Tampereen kaupunki 2013b.) Kuvassa 25 on esitetty Härmälänrannan sijainti.



**Kuva 25.** Härmälänranta (Skanska 1/2011).

Härmälänranta on osa Tampereen kaupungin ECO2 ja Tampereen Kaukolämpö Oy:n yhdessä VTT:n ja Skanskan kanssa kehittämää Co-ZED-hanketta (Constructing zero energy districts). Hankkeen tavoitteena on suunnitella lähes nollaenergia-asuinalue Härmälänrantaan (Tampereen kaupunki 2013b).

Härmälänrannan tutkimuskohteena oleva case-alue koostuu seitsemästä samankaltaisesta 6-kerroksisesta kerrostalosta. Kussakin kerrostalossa on 28 asuntoa ja asuntojen koot ovat 46,0–100,5 m<sup>2</sup>. (Skanska 5/2011.) Case-alueen sijainti on esitetty kuvassa 26.



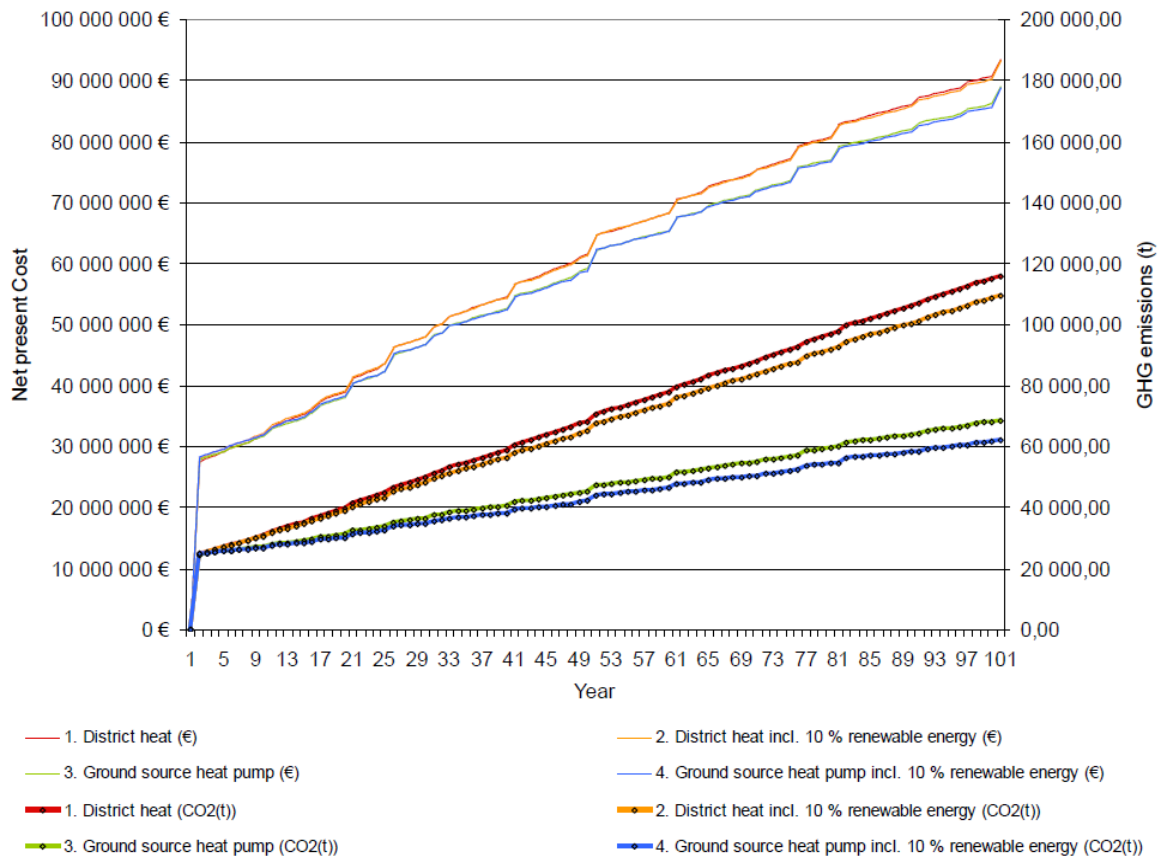
**Kuva 26.** Härmälänrannan case-alue (Skanska 5/2011).

Case-alueella suoritetaan vertailu kahden eri lämmöntuotantomahdollisuuden välillä. Vertailtavat lämmöntuotantovaihtoehdot ovat kaukolämpö ja maalämpöpumppu. Sähkön tarve täytetään sähköverkosta saatavalla sähköenergialla, jonka tuotanto on rajattu Suomeen. Aiemmassa case-tutkimuksessa alueen kasvihuonekaasupäästöjä on vertailtu tietyillä laskentamenetelmävalinnoilla (Ristimäki et al. 2013). Tässä diplomityössä case-alueen energiantuotantomuotojen vertailussa pyritään selvittämään, kuinka näiden energiamuotojen eri laskentamenetelmävalinnat vaikuttavat energiantuotantotekniikoiden kasvihuonekaasupäästöihin.

#### Aikaisempi tutkimus case-kohteesta

Ristimäki et al. (2013) ovat tehneet aiempaa tutkimusta samalla case-alueella Tampereen Härmälänrannassa. Tutkimuksessa kuvan 26 mukaisen alueen mahdollisia energiantuotantotarkoituksia on tarkasteltu elinkaarikustannusanalyysillä (LCC) sekä elinkaarianalyysillä (LCA). Vertailtavia energiantuotantovaihtoehtoja tutkimuksessa olivat kaukolämpö, kaukolämpö ja aurinkopaneelit, maalämpöpumppu sekä maalämpöpumppu ja aurinkopaneelit. (Ristimäki et al. 2013.)

Ristimäen et al. (2013) tutkimuksessa energiamuotojen kasvihuonekaasupäästöt kyseisellä alueella on jaettu rakennusvaiheen ja käyttövaiheen päästöihin. Kuvassa 27 on esitetty Ristimäen et al. (2013) case-tutkimuksen LCC- ja LCA-analyysien tulokset.



**Kuva 27.** Ristimäki et al. (2013) laatiman tutkimuksen tulokset. (District heat = kaukolämpö, Ground source heat pump = maalämpöpumppu, renewable energy = uusiutuva energia, GHG emissions = kasvihuonekaasupäästöt, Net present Cost = nettonykyarvokustannukset, Year = vuosi)

Kuten kuvasta 27 huomataan, tutkimuksessa kasvihuonekaasuja vähiten tuottava vaihtoehto on maalämpöpumppu yhdistettynä aurinkopaneeleihin. Toiseksi paras vaihtoehto oli pelkän maalämpöpumpun käyttö. Kolmanneksi tullut vaihtoehto oli kaukolämpö yhdistettynä aurinkopaneeleihin. Huonoin vaihtoehto kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta on puolestaan pelkän kaukolämmön käyttö. Tutkimuksen perusteella kaukolämpö on selkeästi maalämpöä huonompi vaihtoehto kasvihuonekaasupäästönäkökulmasta.



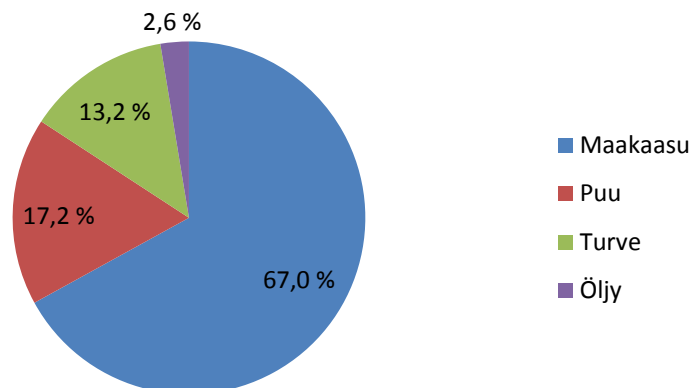
## Sähkön- ja lämmöntuotanto Tampereella

Tampereen paikallinen energianyhtiö on Tampereen Sähkölaitos. Tampereen Kaukolämpö Oy on osa Tampereen Sähkölaitos -yhtiöitä. Kaukolämmön jakeluverkosto kattaa Tampereen, Pirkkalan ja Ylöjärven taajamat. (Tampereen sähkölaitos 2012.) Taulukossa 7 on esitetty Tampereen sähkön- ja lämmöntuotannon jakautuminen eri voimalaitoksissa vuonna 2012.

**Taulukko 7.** Tampereen sähkön- ja lämmöntuotannon jakautuminen eri voimalaitoksissa vuonna 2012 (Tampereen sähkölaitoksen vuosiraportti 2012, 17).

	Voimalaitokset	Sähkö [GWh/a]	[%]	Lämpö [GWh/a]	[%]
CHP-tuotanto	Naistenlahti 1	419	33,4	572	23,8
	Naistenlahti 2	334	26,6	733	30,5
	Lielähti	414	33,0	560	23,3
	<b>CHP-tuotanto</b>	<b>1 167</b>	<b>93,1</b>	<b>1 865</b>	<b>77,5</b>
Erillistuotanto	Vesivoima	86,5	6,9	-	-
	Lämpökeskukset	-	-	540	22,5
	<b>Yhteensä</b>	<b>1 253,5</b>	<b>100 %</b>	<b>2 405</b>	<b>100 %</b>

Taulukosta voidaan havaita, että CHP-laitoksissa tuotettiin noin 93 % alueen sähköstä sekä noin 78 % alueen kaukolämmöstä. Loput alueen energiasta tuotettiin erillistuotannolla, sähkö pääasiassa vesivoimalla ja kaukolämpö erillisissä lämpökeskuksissa. Kuvassa 28 on esitetty Tampereen kaukolämmön polttoainejakauma vuonna 2012.



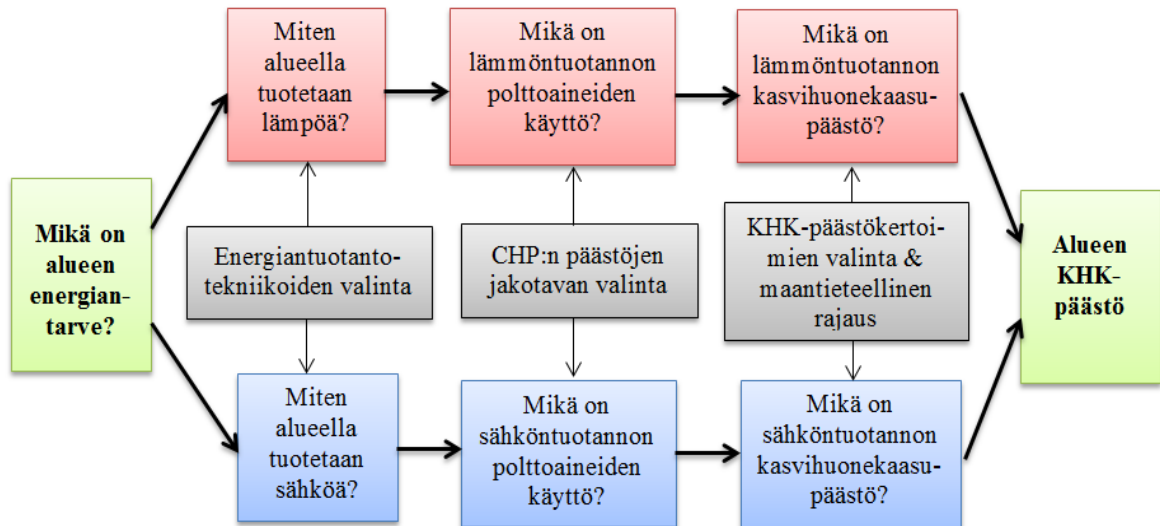
**Kuva 28.** Tampereen kaukolämmön polttoainejakauma vuonna 2012 (Tampereen sähkölaitoksen vuosiraportti 2012, 18).

Lähes 70 prosenttia Tampereen kaukolämmöstä tuotetaan maakaasulla. Lisäksi energiantuotantoon käytetään polttoaineena uusiutumaton turvetta, uusiutuvaa puuta sekä öljyä. Turvetta ja puupolttoaineita käytetään Naistenlahti 2:ssa ja maakaasua pääasiassa Naistenlahti 1:ssä ja Lielahdessa. Öljyä käytetään pääasiassa lämpökeskuksissa. (Heinonen 2013.) Tampereen Sähkölaitoksen tavoitteena on nostaa uusiutuvien energianlähteiden osuus energiantuotannossa 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä, ja vähentää näin maakaasun käyttöä polttoaineena (Tampereen sähkölaitoksen vuosiraportti 2012, 4).

## 5.1 Laskentaperiaatteet

Kasvihuonekaasupäästölaskennassa tuloksiin vaikuttavat energiantuotantotekniikan lisäksi myös laskentamenetelmävalinnat. Näitä ovat energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennassa kirjallisuuskatsauksen perusteella maantieteellinen rajaus, sähkön ja lämmön yhteistuotannossa polttoaineiden ja päästöjen jakotapa sekä sähköntuotannon päästöjen määrittäminen joko marginaalisiksi tai keskiarvoisiksi. Nämä laskentamenetelmävalinnat vaikuttavat tuloksiin, mutta ei ole olemassa yhtä oikeaa tapaa valita sopiva menetelmä.

Alueellisen energiantuotannon laskenta lähtee yleensä alueen energiatarpeen laskemisesta. Tämän jälkeen valitaan energiantuotantotekniikat, joilla alueen energiantarpeeseen pyritään vastaamaan. Seuraavaksi pitää selvittää energiantuotantotekniikoiden mahdollisesti käyttämien polttoaineiden määrät, joihin vaikuttavat eri tekniikoiden hyötysuhteet ja lämmön ja sähköntuotannon polttoaineiden allokoititapa. Kun tiedetään käytetyt energiatekniikat ja polttoaineet, voidaan alueen kasvihuonekaasupäästö laskea kertomalla eri tekniikoiden energiankulutus tai polttoaineenkulutus kasvihuonekaasupäästökertoimella. Kasvihuonekaasupäästökertoimien arvot saattavat vaihdella paljonkin eri lähteistä riippuen, ja tämä johtuu muun muassa erilaisista epävarmuuksista ja menetelmävalinnoista kuten luvussa 3 on todettu. Kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttaa myös kasvihuonekaasupäästöjen synnyn maantieteellinen rajaus, jolla tarkoitetaan energiantuotannon eli lämmön- ja sähköntuotannon maantieteellistä rajausta. Kuvassa 29 on esitetty alueellisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskennan periaatekuva.



**Kuva 29.** Periaatekuva alueellisen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskemisesta.

### Alueen energiantarve

Rakennusten energiantarve koostuu rakennusten tilojen tarvitsemasta lämmityksestä, käyttöveden lämmityksestä, laitesähköstä sekä mahdollisesti jäähdytyksestä (RakMK D5 2007). Rakennuksen energiantarve voidaan laskea Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 -osan (2007) mukaan. Rakennusten tilojen lämmitykseen kuluva energia voidaan laskea, kun tiedetään rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia, vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia sekä ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia. Rakennusalueen lämpimän käyttöveden lämmitysenergiantarve voidaan laskea, kun tiedetään lämpimän käyttöveden ja kylmän veden lämpötilat sekä lämpimän käyttövedenkulutus, joka voidaan laskea joko ominaiskulutuksena henkilöä tai pinta-alaa kohti. Rakennuksen laitteiden sähköenergiankulutus voidaan määrittää, kun tiedetään valaistuksen sähköenergiankulutus, ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus sekä muiden laitteiden sähköenergiankulutus. Mikäli rakennusta jäähdytetään, niin jäähdytykseen kuluva energia tulee myös määrittää rakennuksen energiankulutuslaskelmissa. Rakennuksen jäähdytysenergiankulutus voidaan määrittää jäähdytysenergiantarpeen ja jäähdytysjärjestelmän hyötysuhteen avulla.

Rakennusten lämmityksen energiantarve vaihtelee ilman lämpötilan mukaan, joten alueen kuukausittainen lämmitysenergiavaihtelu saadaan selville lämmitystarvelukujen avulla (Rakennusten lämmitysenergiankulutuksen normitus 2010, 2). Alueen sähkön- ja lämpi-

mänkäyttövedentarve oletetaan olevan sama kuukaudesta riippumatta. Kuukausittaiset lämmitysenergiantarpeet voidaan laskea yhtälöllä 11

$$E_{kk} = E_{lä} S_N + \frac{E_{lkv}}{t} \quad (11)$$

jossa,

$E_{kk}$  = kuukausittainen lämpöenergiantarve [GWh/kk]

$E_{lä}$  = vuosittainen lämmitysenergiantarve [GWh/a]

$S_N$  = lämmitystarveluku [%]

$E_{lkv}$  = vuosittainen lämpimänkäyttövedentarve [GWh/a]

$t$  = aika [kk]

### Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt

Sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen määrittäminen on yksi kasvihuonekaasupäästö-laskennan laskentamenetelmävaihtoehto. Sähkötarpeen lisääntymisen päästövaikutukset eivät ole yksiselitteisiä kuten luvussa 4.2 käy ilmi. Näin ollen myös sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskeminen joko marginaalisesti tai keskiarvoisesti on yksi laskennassa tehtävistä valinnoista.

Marginaalisilla tiedoilla laskettaessa sähkön kasvihuonekaasupäästöt ovat yleensä paljon suuremmat kuin keskiarvoisilla tiedoilla laskettaessa. Tämän lisäksi sähköntuotannon tavat vaihtelevat ajallisesti jopa tunneittain, näin ollen vaihtelevat myös keskiarvo- ja marginaalisähköarvot. Esimerkiksi lämpöpumpun sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa, lämpöpumpun kannattavuuteen voi merkittävästi vaikuttaa se, onko sähkön kasvihuonekaasupäästölaskenta tehty keskiarvo- vai marginaalitietoon perustuen.

### Allokointimenetelmät lämmön ja sähkön yhteistuotannolle

Toinen merkittävä laskentavaihtoehto liittyy sähkön ja lämmön yhteistuotannon (CHP) kasvihuonekaasupäästöjen allokointiin kummallekin energiatuotannolle. Tämä allokointiongelma syntyy, koska sama järjestelmä tuottaa useampia lopputuotteita, tässä tapauksessa sähkö ja lämpöä, eikä näin ollen pystytä yksiselitteisesti osoittamaan kuinka suuren osan

päästöistä on aiheuttanut tietty lopputuote. CHP-laitoksen tapauksessa ei siis tiedetä tarkasti kuinka suuri osa päästöistä pitäisi jakaa sähkölle ja kuinka suuri osa lämmölle. Lämmön ja sähkön yhteistuotannolle onkin kehitetty erilaisia allokointitapoja, jotka jyvittävät polttoaineet ja päästöt eri perustein lämmölle ja sähkölle. Näitä menetelmiä on esitelty tarkemmin luvussa 4.1.

Se mikä jakomenetelmä yhteistuotannon päästöjen allokoinnille valitaan, vaikuttaa merkittävästi kasvihuonekaasupäästölaskennan lopputuloksiin. Päästölaskennassa menetelmän valinnalla nimenomaan vaikutetaan siihen, miten suuri osa päästöistä allokoidaan lämmölle ja miten suuri osa sähkölle. Tämä saattaa ratkaisevasti vaikuttaa siihen mikä, energiamuoto tai -tekniikka on kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta vähäpäästöisin. Tämän vuoksi onkin tärkeää tunnistaa yhteistuotannon päästöjen jakotavan vaikutus laskennan lopputuloksiin.

### Maantieteellinen raja

Maantieteellisellä rajauksella tarkoitetaan energiantuotannon eli lämmön- ja sähköntuotannon maantieteellistä rajausta. Lämpöverkostojen osalta maantieteellinen raja on yleensä yksinkertaisempaa tehdä kuin sähköverkostojen, sillä lämpöverkostot käsittävät yhden tai useamman alueellisen laitoksen ja niiden verkoston. Sähköntuotannossa maantieteellinen raja on olennainen laskentavalinta, sillä sähköverkostot ja -markkinat ovat monimutkaisia ja maiden rajojen ylittäviä systeemejä, joten rajauksen tekeminen ei ole yksiselitteistä.

Sähköverkosto voidaan rajata esimerkiksi sähkömarkkinoiden, valtion rajojen tai alueellisten rajojen, kuten kaupungin tai maakunnan, mukaan. Sähköverkoston maantieteellinen raja onkin yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasupäästölaskentaan vaikuttavista valinnoista. Sähkön kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset saattavat vaihdella hyvinkin paljon eri maantieteellisten rajauksien mukaan, kuten luvun 2.2 Alueellisen energiantuotannon ongelmia -kohdassa on todettu. Rajauksen tekeminen on ongelmallista esimerkiksi niissä tapauksissa, kun jonkin alueen sähköntuotanto rakenne poikkeaa paljon keskimääräisestä rakenteesta. Tällöin esimerkiksi paljon tuulivoimaa tuottava alue hyötyy aluerajan mukaisesta rajauksesta ja vastaavasti saa haittaa, mikäli sähköntuotannon rajoja laajennetaan esimerkiksi valtakunnallisiksi. Mikäli alueella taas on paljon fossiilisiin polttoaineisiin

perustuvaa sähköntuotantoa, alue puolestaan hyötyy valtakunnallisesta rajauksesta. Kuten johdannon rajauksissa todettiin, tässä työssä sähköntuotanto on maantieteellisesti rajattu Suomessa tuotettuun sähköön, joten tässä työssä maantieteellisten rajausten vaikutuksia ei käsitellä laskennassa.

## 5.2 Laskenta

### Alueen lämmön- ja sähköntarve

Case-alueen lämmön- ja sähkönkulutus- ja neliömetritiedot saatiin suoraan alueen rakennuttajalta Skanska Oy:ltä. Case-alueen laajuus on 21 546 m<sup>2</sup>. Taulukossa 8 on esitetty Härmälänrannan case-alueen energiantarve. Kyseiset tiedot koskevat Pyry-kerrostaloa, joten koko alueen tiedot on saatu kertomalla tiedot seitsemällä.

**Taulukko 8.** Härmälänrannan asuinalueen lämmön- ja sähköntarvetarve. Sinisellä värillä on merkitty sähköntarvetta ja punaisella värillä lämmöntarvetta.

<b>Lämmön- ja sähköntarve</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup>/a</b>	<b>MWh/a</b>	<b>GWh/a</b>
Laitteet	1,7	256	
Valaistus	3,3	498	
Puhaltimet	9,3	1 403	2,16
Lämmin käyttövesi	42	6 334	
Lämmitys	37,3	5 626	11,96
<b>Yhteensä</b>	<b>93,6</b>	<b>14 117</b>	<b>14,12</b>

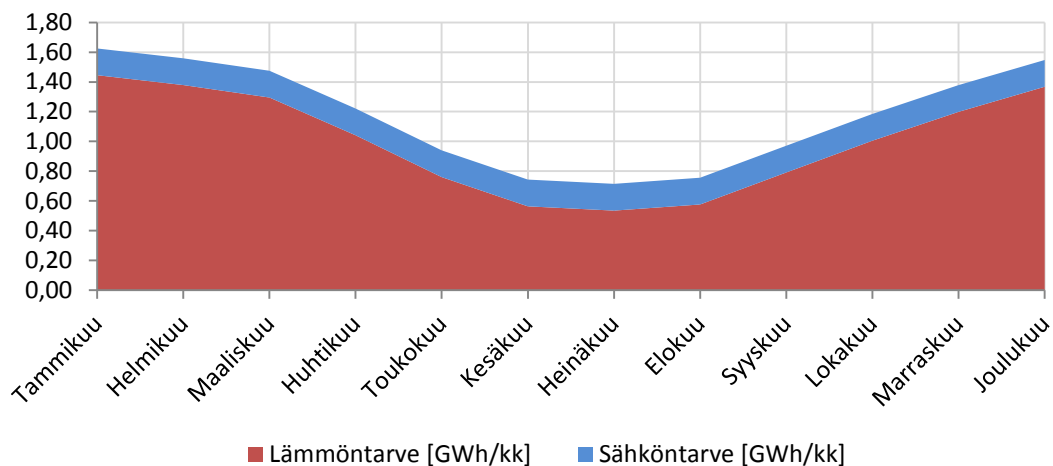
Alueen vuotuinen lämmöntarve on taulukon parusteella 11,96 GWh ja sähköntarve 2,16 GWh. Sähköntarpeeseen on laitteiden osalta huomioitu asuntojen rakennuttajan vastuulla olevat sähkölaitteet eli uuni, jääkaappipakastin ja astianpesukone. Huoneistoissa on myös sauna, (Skanska 5/2011.) Asuntojen sähkönkulutuksen osalta ei siis todennäköisesti ole huomioitu pyykinpesua ja kuivausta, televisioita ja lisälaitteita, tietokonetta ja lisälaitteita sekä muita sähkölaitteita. Motivan Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 -tutkimuksen (2013, 24) perusteella laitesähkönkulutus lisääntyisi kaksinkertaiseksi, mikäli rakentajan vastuulla oleviin sähkölaitteiden kulutukseen lisätään vielä asukkaan omien sähkölaitteiden kulutus.

Alueen kuukausittainen energiantarve voidaan laskea yhtälöllä 11. Liitteessä III on esitetty Tampereen vuosien 1971–2000 lämmitystarveluvut. Lasketaan esimerkkinä tammikuun

lämmitysenergiantarve sijoittamalla arvot lämmitystarveluvut ja lämmitysenergiantarpeet yhtälöön 11

$$E_{\text{kk}} = 5,626 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} \cdot 16,30 \% + \frac{6,334 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}}{12 \frac{\text{kk}}{\text{a}}} = 1,45 \frac{\text{GWh}}{\text{kk}}$$

Kuvassa 30 on esitetty alueen kuukausittainen lämmön- ja sähköntarve lämmitystarvelukujen perusteella laskettuna.



**Kuva 30.** Alueen lämmöntarve sekä sähköntarve.

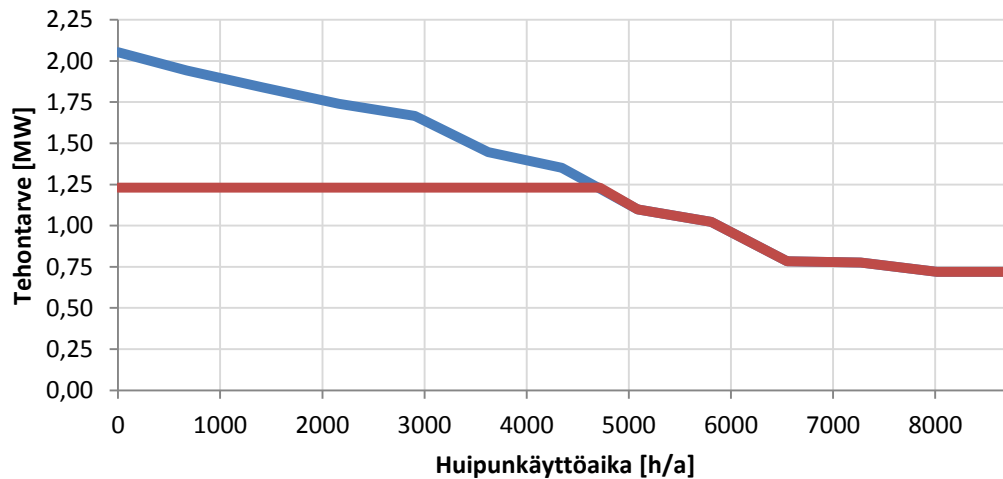
### Energiantuotantotekniikoiden valinta

Laskennassa vertaillaan Härmälänrannan kahden eri lämmöntuotantovaihtoehdon kasvi-huonekaasupäästöjä. Vertailtavat vaihtoehdot ovat

- vaihtoehto 1. kaukolämpö
- vaihtoehto 2. maalämpöpumppu.

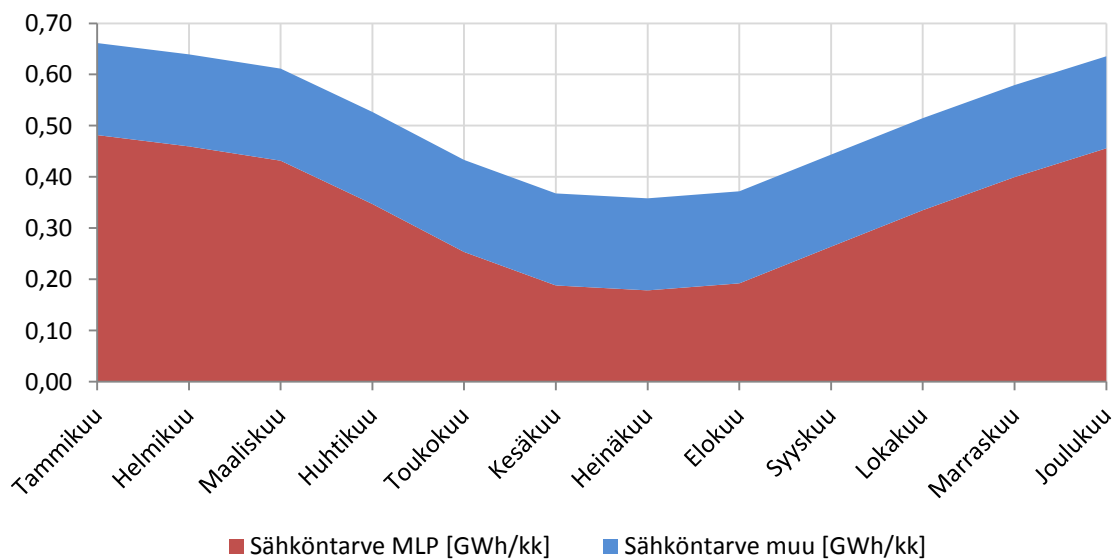
Kaukolämmöllä ei yleensä pyritä kattamaan alueen koko tehontarvetta. Oletetaan, että kaukolämmöllä tuotetaan alueen huipputehontarpeesta 60 prosenttia. Alueen kuukausittaisen lämmöntarpeen perusteella, kuva 30, voidaan määrittää kaukolämmön pysyvyyskäyrä, jossa alueen kaukolämpöverkon vuosittain tarvitsema lämpöteho on ajan suhteen graafisesti esitettyä. Kaukolämmön pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 31. Kaukolämmöllä tuote-

taan siis 60 prosenttia huipputehontarpeesta, mikä on noin 80 prosenttia eli 9,5 GWh/a alueen lämmöntarpeesta. Oletetaan, että loput noin 2,5 GWh/a lämmöntarpeesta tuotetaan kevyellä polttoöljyllä erillisessä huippulämpölaitoksessa.



**Kuva 31.** Kaukolämmön pysyvyysskäyrä (sininen käyrä) sekä 60 % osuus tehontarpeesta, joka on tuotetaan CHP-laitoksella (punaisen viivan alapuolinen osa). Loput 40 % tuotetaan huippulämpölaitoksella (punaisen viivan yläpuolinen osa).

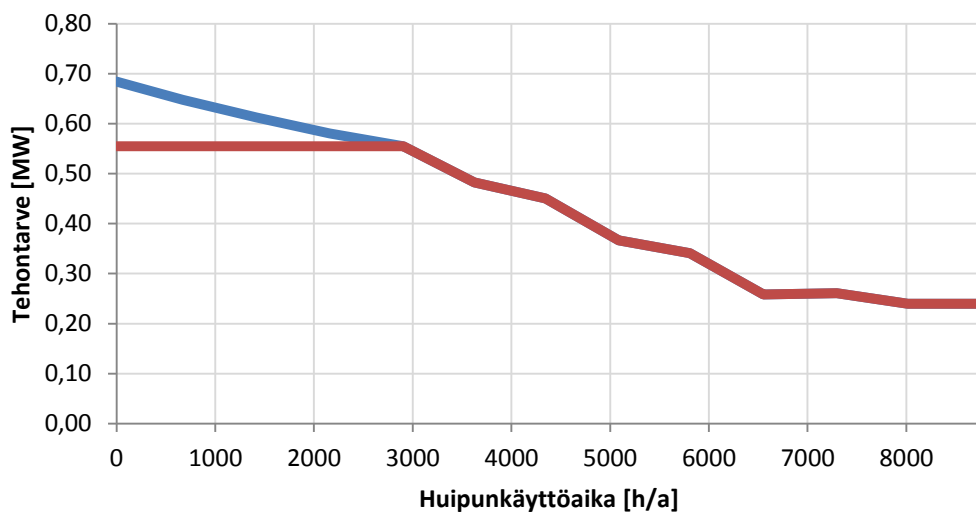
Oletetaan maalämpöpumpun lämpökertoimeksi eli COP-luvuksi 3,0. Tällöin maalämpöpumpun vuotuinen sähköntarve on 3,99 GWh. Kuvassa 32 on esitetty alueen kuukausittainen maalämpöpumpun sähköntarve sekä muu sähköntarve. Myös maalämpöpumpun kuukausittainen sähköntarve on laskettu yhtälön 11 avulla.



**Kuva 32.** Maalämpöpumpun sähköntarve sekä alueen muu sähköntarve.

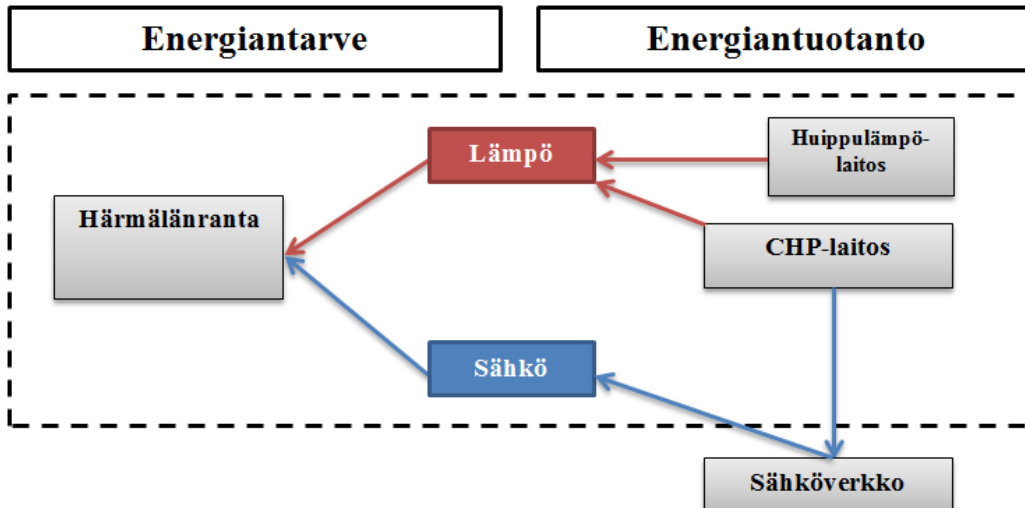


Maalämmöllä ei ole järkevää tuottaa koko lämmityskauden vaatimaa tehontarvetta. Oletetaan, että maalämpöpumpulla tuotetaan 80 prosenttia huipputehontarpeesta. Maalämpöpumpun kuukausittaisen sähköntarpeen perusteella voidaan määrittää maalämpöpumpun pysyvyyskäyrä, jossa maalämpöpumpun vuosittain tarvitsema teho on ajan suhteen graafisesti esitettyä. Kuvassa 33 on esitetty maalämpöpumpun pysyvyyskäyrä. Maalämpöpumpulla tuotetaan siis 80 prosenttia huipputehontarpeesta, mikä on noin 95 prosenttia eli 3,78 GWh/a maalämpöpumpun sähköntarpeesta. Oletetaan, että loput 0,21 GWh/a sähköntarpeesta tuotetaan rakennuskohtaisilla sähkövastuksilla.



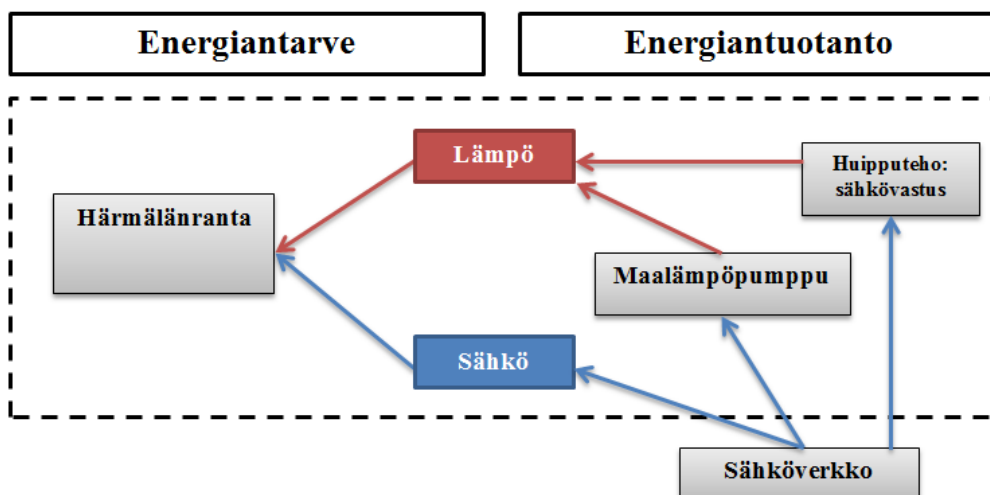
**Kuva 33.** Maalämpöpumpun pysyvyyskäyrä (sininen käyrä) sekä 80 % osuus tehontarpeesta, joka on tuotetaan maalämpöpumpulla (punaisen käyrän alapuolinen osa). Loput 20 % tuotetaan sähkövastuksilla (punaisen käyrän yläpuolinen osa).

Case-alueella lähisin CHP-laitos on Naistenlahti 1 -voimalaitos, joka käyttää polttoaineenaan maakaasua. Kuvassa 34 on esitetty Härmälänrannan vaihtoehto 1. energiantarpeen ja -tuotannon tässä työssä käytetty taseraja. Oletetaan, että Härmälänrannassa tarvittava lämpö tuotetaan lähimmässä CHP-laitoksessa ja huipputehontarve huippulämpölaitoksessa. Härmälänrannan tarvittava sähkö puolestaan ostetaan sähköverkosta, jonne myös CHP-laitoksen tuottama sähköenergia myydään.



Kuva 34. Vaihtoehto 1. energiantarpeen ja -tuotannon taseraja.

Kuvassa 35 on puolestaan esitetty vaihtoehto 2. energiantarpeen ja -tuotannon tässä työssä käytetty taseraja. Tässä vaihtoehdossa Härmälänrannan lämmöntarve tuotetaan maalämpöpumpulla ja huipputehontarve tuotetaan sähkövastuksilla. Härmälänrannan tarvitsema muu sähköntarve ostetaan myös sähköverkosta.



Kuva 35. Vaihtoehto 2. energiantarpeen ja -tuotannon taseraja.

### CHP-tuotannon päästöjen allokointi

CHP-laitoksen päästöjen allokointitavoista vertaillaan hyödynjakomenetelmää, energianmenetelmää, lämmön vaihtoehtoista hankintatavan menetelmää sekä sähkön vaihtoehtoista hankintatavan menetelmää.

Taulukon 7 perusteella nähdään, että vuonna 2012 Naistenlahti 1:sen lämmöntuotto oli 572 GWh/a ja sähköntuotto 419 GWh/a. Alueen vuotuinen kaukolämmöntarve on 11,96 GWh, joten CHP-laitoksen lämmöntuotto case-alueen kaukolämpöverkkoon liittämisen jälkeen on 584 GWh/a. Oletetaan, että CHP-laitoksen sähköntuotanto kasvaa samassa suhteessa lämmöntuotannon kasvun kanssa. Tällöin CHP-laitoksen kasvanut sähköntuotanto on 427 GWh/a. Taulukossa 9 on esitetty CHP-tuotannon päästöjen allokointilaskennan alkuarvoja.

**Taulukko 9.** Laskennan alkuarvoja

	Arvo	Yksikkö
<b>Hyötysuhteet</b>		
CHP-laitos	0,85	-
Sähkön erillistuotanto	0,39	-
Lämmön erillistuotanto	0,90	-
<b>Vanha tuotanto</b>		
CHP: lämmöntuotanto	572	GWh/a
CHP: sähköntuotanto	419	GWh/a
CHP: polttoaineen kulutus	1 166	GWh/a
<b>Uusi tuotanto</b>		
CHP: lämmöntuotanto	581	GWh/a
CHP: sähköntuotanto	426	GWh/a
CHP: polttoaineen kulutus	1 190	GWh/a
Kevyen polttoöljyn tarve (20 %)	2,5	GWh/a
<b>Sähköntarve</b>		
Muu: Sähköntarve	2,2	GWh/a
COP-luku	3	-
MLP: sähköntarve (95 %)	3,78	GWh/a
Sähkövastusten sähköntarve (5 %)	0,21	GWh/a

Lasketaan esimerkkinä CHP-laitoksen vanhan eli vuoden 2012 mukaisen tuotannon polttoaineiden allokointi eri jakotavoilla. Samalla tavoin voidaan laskea myös alueen uuden energiantarpeen polttoaineen allokointi sähkölle ja lämmölle. Vanhan ja uuden energiantuotannon erotuksena saadaan laskettua polttoaineen käytön kasvu ja sitä kautta kasvihuonekaasupäästöjen kasvu alueella.

Hyödynjakomenetelmässä CHP-tuotannon polttoaineet jaetaan ensin vaihtoehtoisten hankintamuotojen polttoaineiden kulutusten mukaan sijoittamalla taulukon 9 arvot yhtälöihin 1 ja 2.

$$F_e = \frac{419 \text{ GWh/a}}{0,39} = 1074 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

$$F_h = \frac{572 \text{ GWh/a}}{0,90} = 636 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Tämän jälkeen jaetaan toteutunut polttoaineen kulutus vaihtoehtoisten hankintojen kulutus-  
ten suhteessa yhtälöiden 3 ja 4 mukaan

$$F_e = \frac{1074 \text{ GWh/a}}{1074 \text{ GWh/a} + 636 \text{ GWh/a}} \cdot 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 733 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

$$F_h = \frac{636 \text{ GWh/a}}{1074 \text{ GWh/a} + 636 \text{ GWh/a}} \cdot 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 433 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Polttoaineiden jakaminen energiamenetelmällä tapahtuu sijoittamalla taulukon 9 alkuarvot  
yhtälöihin 5 ja 6

$$F_e = \frac{572 \text{ GWh/a}}{419 \text{ GWh/a} + 572 \text{ GWh/a}} \cdot 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 493 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

$$F_h = \frac{419 \text{ GWh/a}}{419 \text{ GWh/a} + 572 \text{ GWh/a}} \cdot 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 673 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Lämmön vaihtoehtoisessa hankintatavan menetelmässä lasketaan ensin vaihtoehtoisen  
lämmöntuotannon polttoaineenkulutus sijoittamalla taulukon 9 arvot yhtälöön 7

$$F_h = \frac{572 \text{ GWh/a}}{0,90} = 636 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Tämän jälkeen loput polttoaineesta kohdistetaan sähkölle yhtälöllä 8

$$F_e = 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} - 636 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 530 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Sähkönvaihtoehdoissa hankintatavan menetelmässä puolestaan lasketaan ensin vaihtoehdoisen sähköntuotannon energiankulutus sijoittamalla alkuarvot yhtälöön 9

$$F_e = \frac{419 \text{ GWh/a}}{0,39} = 1074 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Tämän jälkeen loput polttoaineesta kohdistetaan lämmölle yhtälöllä 10

$$F_h = 1166 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} - 1074 \frac{\text{GWh}}{\text{a}} = 93 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$$

Uusi polttoaineen kulutus lasketaan samoilla yhtälöillä kuin vanha polttoaineen kulutus ja sen alkuarvot on esitetty taulukossa 9. Polttoaineen kulutuksen kasvu lasketaan vähentämällä uudesta polttoaineen kulutuksesta vanha polttoaineen kulutus. Taulukossa 10 on esitetty eri allokointimenetelmillä CHP-laitoksen vanha polttoaineen kulutus, uusi polttoaineen kulutus sekä polttoaineen kulutuksen muutos.

**Taulukko 10.** Eri allokointimenetelmillä laskettu CHP-laitoksen vanha ja uusi polttoaineen kulutus sekä polttoaineen kulutuksen kasvu.

	Vanha pa:n kulutus [GWh/a]			Uusi pa:n kulutus [GWh/a]			Pa:n kulutuksen kasvu [GWh/a]		
	Lämpö	Sähkö	Yht.	Lämpö	Sähkö	Yht.	Lämpö	Sähkö	Yht.
Hyödynjakomenetelmä	433	733	1 166	441	745	1 185	8	12	19
Energiamenetelmä	673	493	1 166	684	501	1 185	11	8	19
Lämmön vaiht. hankintatavan menetelmä	636	530	1 166	646	539	1 185	10	9	19
Sähkön vaiht. hankintatavan menetelmä	92	1 074	1 166	93	1 092	1 185	1	18	19

Taulukon perusteella huomataan, että energiamenetelmällä ja lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmällä lämmölle kohdistuu suurempi osa polttoaineesta kuin sähkölle. Hyödynjakomenetelmässä puolestaan sähkölle allokoidaan hieman suurempi osa polttoaineesta kuin lämmölle, kun taas sähkön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä sähkölle allokoidaan lähes koko polttoaineen kulutuksen kasvu.

#### Kasviuonekaasupäästökertoimet

Sähköntuotanto kasviuonekaasupäästöjen laskennassa vertaillaan keskiarvoiseen ja marginaaliseen tietoon perustuvaa sähkön kasviuonekaasupäästökerrointa. Energian käytöstä johtuvat kasviuonekaasupäästöt voidaan nyt laskea kertomalla polttoaineen kulutuksen kasvu kasviuonekaasupäästökertoimella. Keskiarvoisena sähkön kasviuonekaasupäästökertoimena käytetään arvoa 260 t<sub>CO2-ekv.</sub>/GWh. Arvo perustuu Tilastokeskuksen vuosien 2008–2012 Suomen energiantuotannon jakautumiseen sekä aiemmin luvun 3 taulukossa 3 esitettyihin eri sähköntuotannon polttoaineiden ja energiantuotantotekniikoiden elinkaaren aikaisiin kasviuonekaasupäästöjen arvoihin. Liitteessä II on taulukoitu tarkemmin sähkön keskiarvoisen kasviuonekaasupäästökertoimen laskentatiedot. Toinen huomioitava sähköntuotannon kasviuonekaasupäästökerroin on marginaaliseen tietoon perustuva kerroin. Marginaalisena sähkön päästöarvona on tässä laskennassa käytetty WEC:n (2004, 41) kiiviille ilmoittamaa 1 102 t<sub>CO2-ekv.</sub>/GWh arvoa. CHP-laitoksen polttoaineena käyttämän

maakaasun kasvihuonekaasupäästökertoimena käytetään  $461 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{GWh}$  ja kevyen polttoöljyn kasvihuonekaasupäästökertoimena  $354 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{GWh}$  luvussa 3 esitettyjen taulukoiden 3 ja 4 perusteella.

### Alueen kasvihuonekaasupäästöt

Kaukolämmön ja maalämpöpumpun rakentamisaikaiset kasvihuonekaasupäästöt voidaan laskea luvussa 3 esitettyjen arvojen mukaan, kun tiedetään kaukolämpöverkon pituudeksi 420 m Tampereen Sähkölaitoksen mittaustyökalun perusteella ja maalämpöpumpun vaatima energia taulukon 9 perusteella. Kaukolämmön rakentamisen aikaisiksi päästöiksi saadaan  $9,42 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{a}$  ja maalämpöpumpun  $46,4 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{-ekv.}}/\text{a}$ .

Alueen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöt voidaan laskea kertomalla taulukon 10 CHP-laitoksen polttoaineen kasvun arvot eri allokointimenetelmillä sekä kevyen polttoöljyn tarve, maalämmön sähköntarve, muun sähkön tarve ja sähkövastusten sähkötarve taulukon 9 perusteella valituilla kasvihuonekaasupäästökertoimilla. Taulukossa 11 on esitetty case-alueen käytönaikaiset kasvihuonekaasupäästöjen laskentatulosten erot eri laskentamenetelmävalinnoilla kaukolämmölle sekä maalämpöpumpulle.

**Taulukko 11.** Case-alueen lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt [ $t_{CO_2-ekv}/a$ ] eri laskentamenetelmävalinnoilla, kun lämmöntuotanto toteutetaan kaukolämmöllä (vaihtoehto 1) ja maalämmöllä (vaihtoehto 2.). Kuvien 34 ja 35 mukaan CHP-laitoksen sähköntuotanto on rajattu tasealueen ulkopuolelle.

<b>Vaihtoehto 1: Lämmöntuotanto kaukolämmöllä</b>		
Hyödynjakomenetelmä	Keskiarvoinen sähkö	Marginaalinen sähkö
CHP: kaukolämmön päästöt	3 317	3 317
CHP: sähkön päästöt (tasealueen ulkopuolella)	5 607	5 607
Kevyen polttoöljyn päästöt	969	969
Muu: sähkön päästöt	561	2 377
Yhteensä:	10 454	12 270
Energiamenetelmä	Keskiarvoinen sähkö	Marginaalinen sähkö
CHP: kaukolämmön päästöt	5 151	5 151
CHP: sähkön päästöt (tasealueen ulkopuolella)	3 773	3 773
Kevyen polttoöljyn päästöt	969	969
Muu: sähkön päästöt	561	2 377
Yhteensä:	10 454	12 270
Lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä	Keskiarvoinen sähkö	Marginaalinen sähkö
CHP: kaukolämmön päästöt	4 864	4 864
CHP: sähkön päästöt (tasealueen ulkopuolella)	4 059	4 059
Kevyen polttoöljyn päästöt	969	969
Muu: sähkön päästöt	561	2 377
Yhteensä:	10 454	12 270
Sähkön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä	Keskiarvoinen sähkö	Marginaalinen sähkö
CHP: kaukolämmön päästöt	701	701
CHP: sähkön päästöt (tasealueen ulkopuolella)	8 223	8 223
Kevyen polttoöljyn päästöt	969	969
Muu: sähkön päästöt	561	2 377
Yhteensä:	10 454	12 270

<b>Vaihtoehto 2: Lämmöntuotanto maalämpöpumpulla</b>		
	Keskiarvoinen sähkö	Marginaalinen sähkö
CHP: kaukolämmön päästöt	0	0
CHP: sähkön päästöt (tasealueen ulkopuolella)	0	0
MLP: sähkön päästöt	982	4 162
Muu: sähkön päästöt	615	2 608
Yhteensä:	1 597	6 770

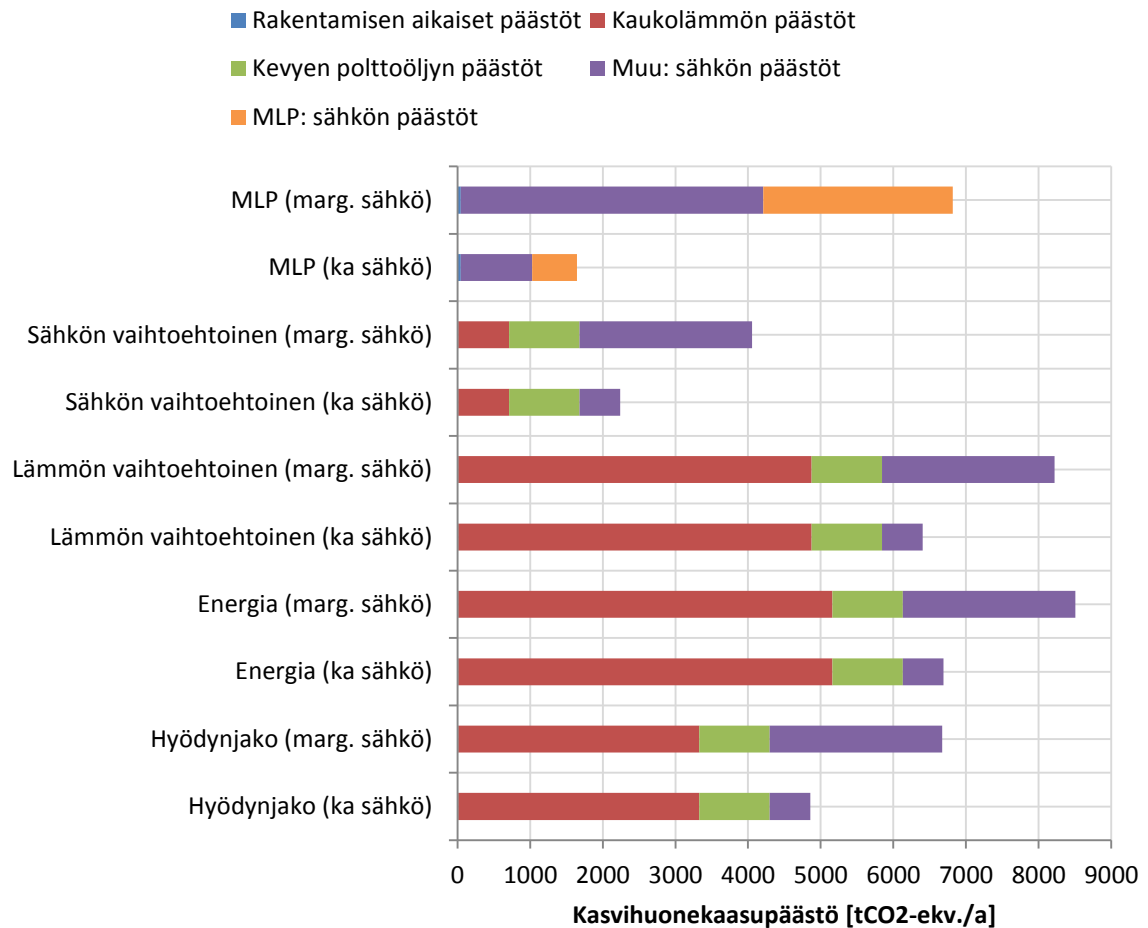
Taulukosta nähdään case-alueen lämmön- ja sähkötarpeen aiheuttama kasvihuonekaasupäästö sekä vaihtoehdolle 1 että vaihtoehdolle 2 eri laskentamenetelmävalinnoilla. Kaukolämmölle laskentamenetelmävalintoja ovat CHP-laitoksen päästöjen allokointimenetelmät



sekä sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästökerroin ja maalämpöpumpulle sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästökerroin. Näiden laskentamenetelmävalintojen vuoksi taulukon arvot eroavat toisistaan myös kahden eri vaihtoehdon sisällä.

### 5.3 Case-tarkastelun tulokset

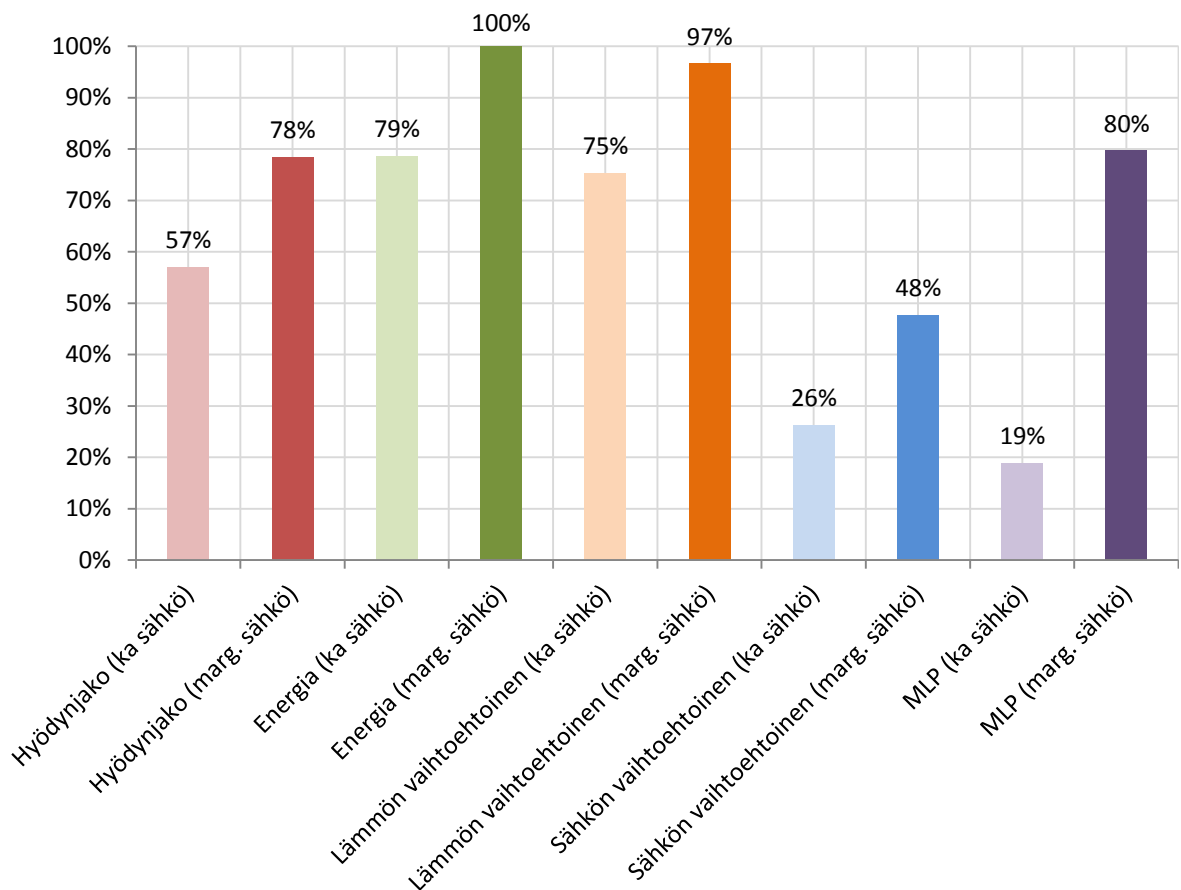
Case-alueen energiantuotantovaihtoehtojen eli kaukolämmön ja maalämmön rakentamisen ja käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt eri laskentamenetelmävalinnoilla on esitetty kuvassa 36.



**Kuva 36.** Kaukolämmön ja maalämmön kuvien 34 ja 35 taserajojen mukaiset kasvihuonekaasupäästöt eri laskentamenetelmävalinnoilla.

Kuvan perusteella huomataan, että sekä CHP-laitoksen päästöjen allokoitavalla että sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella on selkeä vaikutus kaukolämmön ja maalämmön

kasvihuonekaasupäästöihin. Case-tarkastelussa pienimmät päästöt tuottaa maalämpöpumpu, kun laskentamenetelmävalintana on keskiarvoinen sähkön kasvihuonekaasupäästökerroin. Suurimmat päästöt puolestaan syntyvät kaukolämmöllä, kun laskentamenetelmävalintoina toimivat energiamenetelmä ja marginaalinen sähkön kasvihuonekaasupäästökerroin. Muuttamalla kuvan 36 pylväät prosenttiosuuksiksi niin, että suurimman kasvihuonekaasupäästön tuottava energiamenetelmä marginaalisella sähkön päästökertoimella edustaa 100 prosenttia ja suhteuttamalla muut päästöarvot tähän, saadaan havainnollisempi diagrammi eri laskentamenetelmävalintojen vaikutuksista tuloksiin. Eri menetelmien prosentuaaliset erot on esitetty kuvassa 37.



**Kuva 37.** Kaukolämmön ja maalämmön kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaaliset erot eri laskentamenetelmävalinnoilla.

Kuvan perusteella huomataan, että kun vertaillaan eri CHP-laitoksen päästöjen allokointitapoja, kaukolämpö saa suurimmat kasvihuonekaasupäästöt energiamenetelmällä. Lähes yhtä suuret päästöt allokoitetaan kaukolämmölle, kun käytetään lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmää. Hyödynjakomenetelmää käytettäessä kaukolämmön kasvihuo-

nekaasupäästöt ovat keskitasoa ja sähkön vaihtohtoisen hankintatavan menetelmässä kaukolämmön päästöt ovat selkeästi pienimmät, ne eroavat energiamenetelmästä 52 prosenttiyksikköä, kun sähkön päästökerroin on sama, ja 81 prosenttiyksikköä, kun sähkön päästökerroin on energiamenetelmällä marginaalinen ja sähkön vaihtohtoisen hankintatavan menetelmällä keskiarvoinen. Kun verrataan keskiarvoisella ja marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettuja arvoja keskenään, huomataan, että kaukolämmityksellä näiden laskentamenetelmien ero on 21 prosenttiyksikköä jokaisen eri allokointimenetelmän kohdalla, kun taas maalämpöpumppulämmityksellä ero on 61 prosenttiyksikköä. Maalämpöpumpun kohdalla ero keskiarvoisen ja marginaalisen sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen välillä onkin paljon suurempi kuin kaukolämmön kohdalla.

## 6 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa käydään läpi ja analysoidaan tutkimuksesta saatuja tuloksia. Lisäksi luvussa laajennetaan case-tarkastelua CHP-laitoksen polttoaineen osalta ja analysoidaan tämän muutoksen aiheuttamia seurauksia case-alueen kasviuonekaasupäästöihin. Luvussa pohditaan myös laskennan epävarmuuksia sekä saatujen tulosten käytettävyyttä.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella havaitaan, että energiantuotannon kasviuonekaasupäästölaskennalle on olemassa paljon erilaisia laskentamenetelmävaihtoehtoja, mutta vaihtoehtojen valinnalle ei ole olemassa yhdenmukaisia säädöksiä. Laskentamenetelmät valitaankin yleensä tapauskohtaisesti, ja eri laskentamenetelmävalintoja ei usein vertailla keskenään laskennassa, vaan tulokset perustuvat yksittäisiin menetelmävalintoihin.

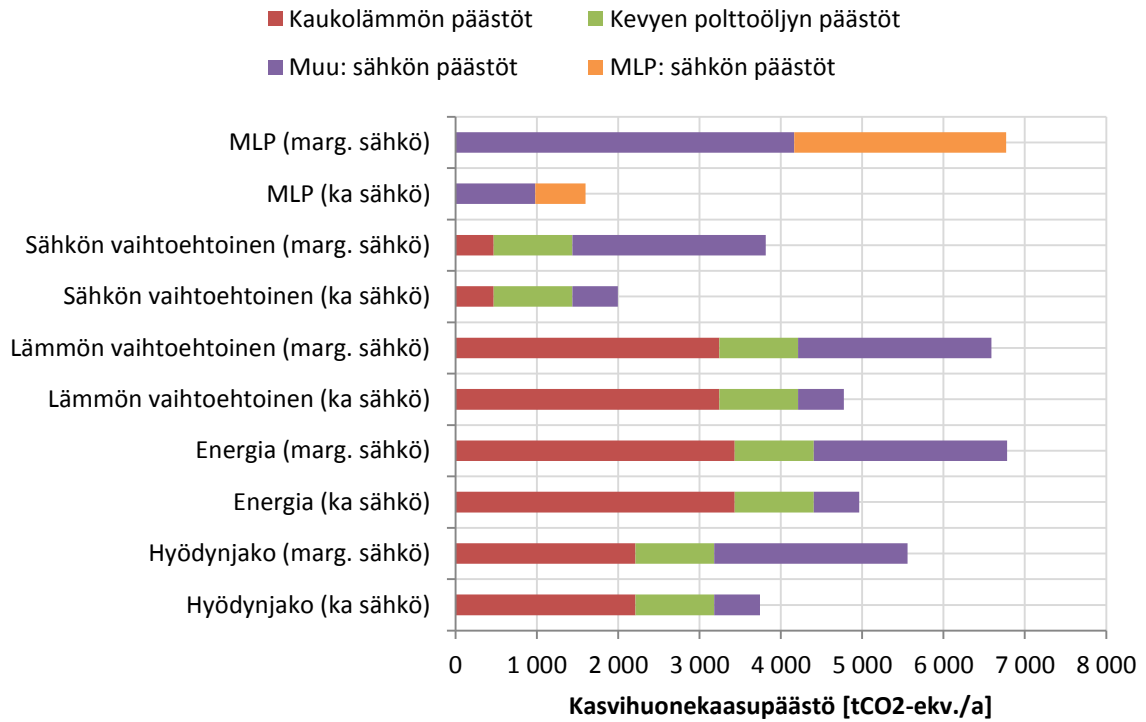
Case-laskennan tulosten perusteella huomataan, että case-alueen tapauksessa kasviuonekaasupäästölaskennassa laskentamenetelmävalinnoilla on suurempi vaikutus kuin itse energiatekniikan valinnalla. Tulosten yleistettävyyttä arvioidaan myöhemmin johtopäätöksissä. Taulukossa 12 on esitetty kaukolämmön ja maalämmön vähäpäästöisyysjärjestys kasviuonekaasupäästöjen mukaan keskiarvoisella ja marginaalisella sähkön kasviuonekaasupäästökertoimella.

**Taulukko 12.** Kaukolämmön ja maalämmön vähäpäästöisyysjärjestys kasviuonekaasupäästöjen mukaan keskiarvoisella ja marginaalisella sähkön kasviuonekaasupäästökertoimella. Taulukossa järjestysnumero 1. tarkoittaa vähäpäästöisintä vaihtoehtoa ja 5. vaihtoehtoa, jonka kasviuonekaasupäästöt ovat suurimmat.

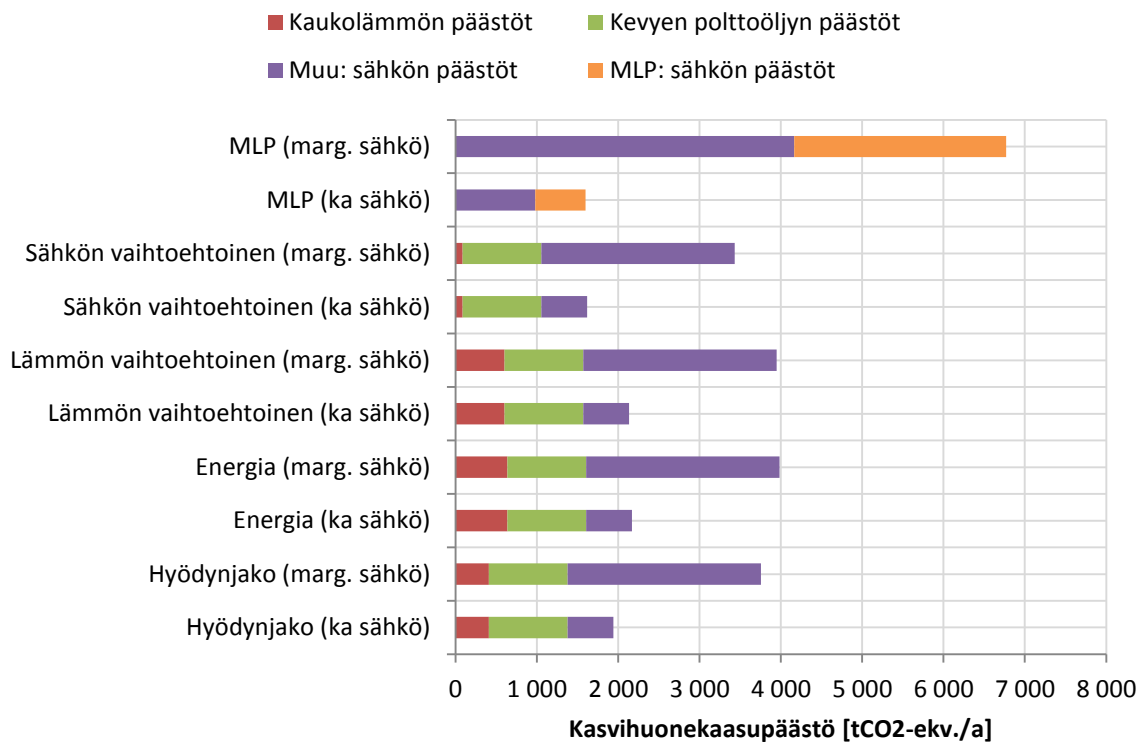
	Keskiarvosähkö	Marginaalisähkö
Maalämpöpumppu	1.	3.
KL: Hyödynjakomenetelmä	3.	2.
KL: Energiamenetelmä	5.	5.
KL: Lämmön vaiht. hankintatavan menetelmä	4.	4.
KL: Sähkön vaiht. hankintatavan menetelmä	2.	1.

Case-laskennan tulosten mukaan keskiarvoisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettaessa maalämpöpumppu on selkeästi paras vaihtoehto tarkastellulla alueella, mutta kun vaihtoehtoja tarkastellaan marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettuna, maalämpöpumppu ei olekaan enää paras vaihtoehto, vaan kaukolämpö sähkönvaihtoehtoisen tuotantotavan menetelmällä ja hyödynjakomenetelmällä laskettuina ajavat sen ohi. Eri vaihtoehtojen vähäpäästöisyysjärjestys kasvihuonekaasujen suhteen riippuu siis siitä, että käytetäänkö sähkön päästöjen laskennassa marginaalista vai keskiarvoista sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimista sekä marginaalisen päästökertoimen kohdalla, mitä allokointitapaa käytettiin kaukolämmön kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa.

Tilanne saattaisi muuttua vieläkin selkeämmin laskentamenetelmistä riippuvaiseksi, mikäli vertailussa olisi maalämpöpumppu sekä uusiutuvalla polttoaineella osittain tai kokonaan toimiva CHP-laitos. Seuraavana tehdäänkin teoreettinen case-tarkastelun laajennus, jossa tarkastellaan vain käytönaikaisia kasvihuonekaasupäästöjä. Oletetaan, että tarkasteltava CHP-laitos käyttäisi maakaasun lisäksi polttoaineenaan uusiutuvaa energiaa Tampereen Sähkölaitoksen tavoitteen mukaisesti 38 prosenttia. Oletetaan sen lisäksi vielä tilanne, jossa CHP-laitos käyttäisikin pelkästään uusiutuvaa energiaa polttoaineenaan. Kuvassa 38 on esitetty laskennan tulos, mikäli CHP-laitos käyttäisi 38 prosenttia puupolttoainetta ja 62 prosenttia maakaasua ja kuvassa 39 on taas tilanne, jossa CHP-laitos käyttäisi 100 prosenttisesti puupolttoainetta.

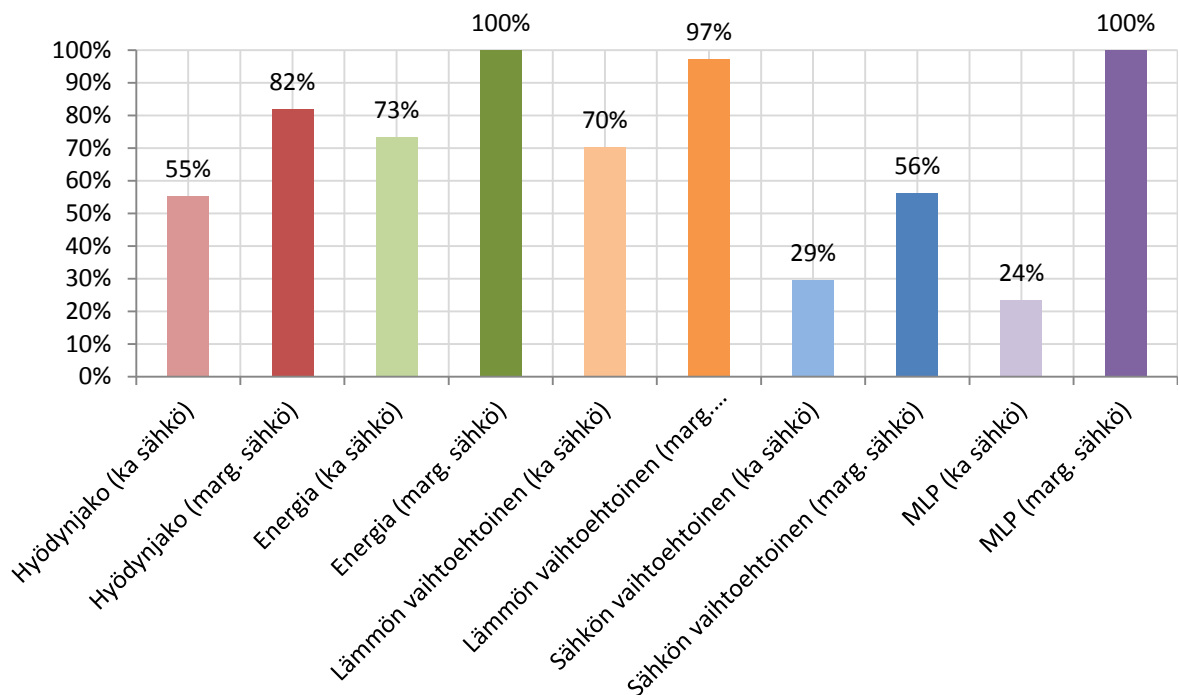


**Kuva 38.** Kasvihuonekaasupäästöjen kasvu, mikäli CHP-laitoksen polttoaineena käytetään 38 % puupolttoainetta ja 62 % maakaasua.

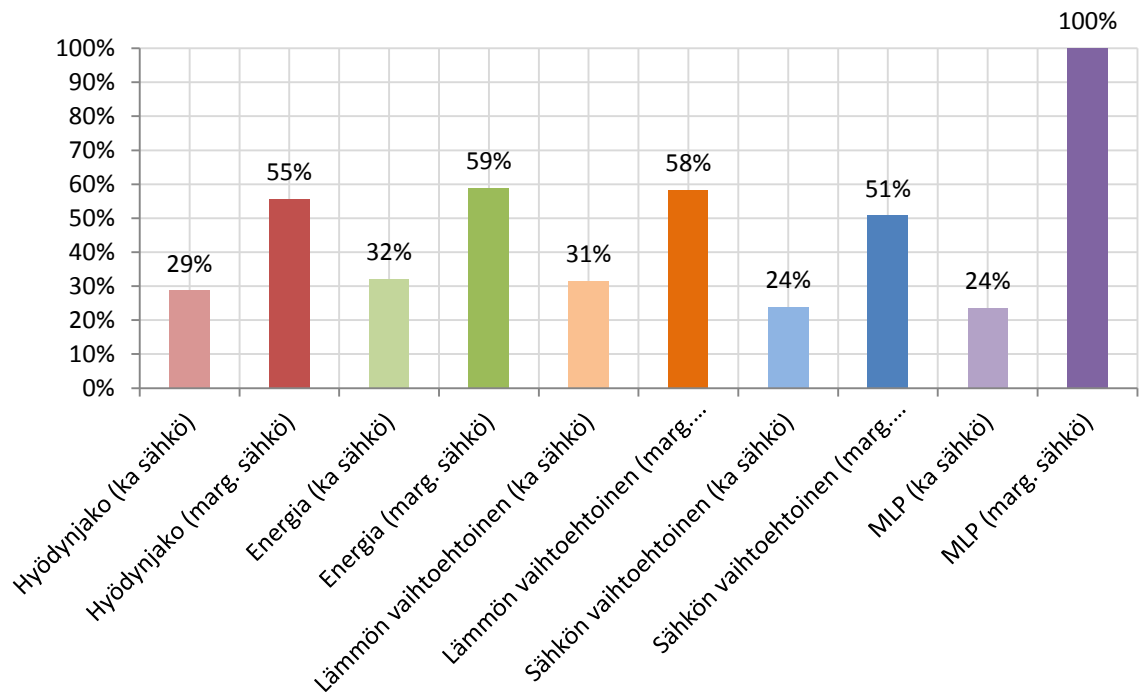


**Kuva 39.** Kasvihuonekaasupäästöjen kasvu, mikäli CHP-laitoksen polttoaineena käytetään 100 % puupolttoainetta.

Kuvasta 38 voidaan havaita, että kun uusiutuvan polttoaineen määrää lisätään CHP-laitoksessa, laskentamenetelmävaihtojen vaikutus laskennan tuloksiin on selkeämpi verrattuna case-alueen nykytilanteeseen. Kuvan 39 perusteella voidaan havaita, että uusiutuvan polttoaineen käytön nostaminen 100 prosenttiin, lisää edelleen laskentamenetelmävaihtojen merkitystä tuloksiin. Laajennetun tarkastelun kaukolämmön ja maalämmön kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaaliset erot eri laskentamenetelmävaihtojen kanssa on esitetty kuvissa 40 ja 41. Kuvassa 40 suurimman kasvihuonekaasupäästön tuottava energiamenetelmä marginaalisella sähkön päästökertoimella edustaa 100 prosenttia ja muiden laskentamenetelmävaihtojen kasvihuonekaasupäästöt on suhteutettu tähän arvoon. Kuvassa 41 taas suurimman kasvihuonekaasupäästön tuottaa maalämpöpumppu marginaalisella sähkön päästökertoimella, joten se edustaa 100 prosenttia ja muut kasvihuonekaasupäästöt on suhteutettu siihen.



**Kuva 40.** Kaukolämmön ja maalämmön kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaaliset erot eri laskentamenetelmävaihtojen kanssa, mikäli CHP-laitoksen polttoaineena käytetään 38 % puupolttoainetta ja 62 % maakaasua.



**Kuva 41.** Kaukolämmön ja maalämmön kasvihuonekaasupäästöjen prosentuaaliset erot eri laskentamenetelmävälinoilla, mikäli CHP-laitoksen polttoaineena käytetään 100 % puupolttoainetta.

Kuvan 40 perusteella voidaan havaita, että tilanteessa, jossa CHP-laitos käyttäisikin maakaasun lisäksi puupolttoainetta, laskentamenetelmävälinoilla on vielä selkeämpi vaikutus laskennan tuloksiin, kun vertaillaan saatuja tuloksia marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettuna. Tässä tilanteessa maalämpöpumpun ja energiamenetelmällä lasketun kaukolämmön kasvihuonekaasupäästöt ovat suurimmat ja nämä kasvihuonekaasupäästöt ovat 18 prosenttiyksikköä suuremmat kuin kaukolämmöllä hyödynjakomenetelmällä laskettaessa ja sähkön vaihtoehtoisen hankintamenetelmällä laskettaessa eroa syntyy jo 44 prosenttiyksikköä.

Kuvasta 41 taas käy ilmi, että mikäli CHP-laitos käyttäisi 100 prosenttia puupolttoainetta, laskentamenetelmävälinoilla on selkeä vaikutus sekä marginaalisen että keskiarvoisen sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen osalta. Keskiarvoisen sähkön päästökertoimen osalta suurimman kasvihuonekaasupäästön aiheuttaa jälleen kaukolämpö energiamenetelmällä ja pienimmän päästön maalämpöpumppu, mutta näiden menetelmien ero on enää vain kahdeksan prosenttiyksikköä. Tämän lisäksi keskiarvoisella sähkön päästökertoimella laskettaessa maalämmön ja kaukolämmön päästöt hyödynjakomenetelmällä eroavat toisistaan vain viisi prosenttiyksikköä. Marginaalisen sähkön päästökertoimen tapauksessa maa-



lämpöpumppu on selkeästi eniten kasvihuonekaasupäästöjä tuottava vaihtoehto ja sen ero kaukolämmön päästöihin energiamenetelmällä, joka tuottaa kaukolämmölle suurimmat päästöt, on jo 41 prosenttiyksikköä. Taulukossa 13 on esitetty laajennetun tarkastelun vähäpäästöisyysjärjestys kasvihuonekaasupäästöjen mukaan keskiarvoisella ja marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella.

**Taulukko 13.** Laajennetun tarkastelun maalämpöpumpun ja kaukolämmön vähäpäästöisyysjärjestys keskiarvoisella ja marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella. Taulukossa 1. tarkoittaa vähäpäästöisintä vaihtoehtoa ja 5. vaihtoehtoa jonka kasvihuonekaasupäästöt ovat suurimmat.

	Puupolttoaine 38 % ja maakaasu 62 %		Puupolttoaine 100 %	
	Keskiarvosähkö	Marginaalisähkö	Keskiarvosähkö	Marginaalisähkö
Maalämpöpumppu	1.	4.	1.	5.
KL: Hyödynjako-menetelmä	3.	2.	3.	2.
KL: Energiamenetelmä	5.	5.	5.	4.
KL: Lämmön vaihtoehtoinen hankintatavan menetelmä	4.	3.	4.	3.
KL: Sähkön vaihtoehtoinen hankintatavan menetelmä	2.	1.	2.	1.

Koska case-tarkastelun CHP-laitoksen tapainen voimalaitos on yleinen Suomessa, laajennetun tarkastelun perusteella voidaan todeta, että mitä suurempi osuus CHP-laitoksessa tuotetaan uusiutuvalla energialla, sitä suurempi on myös laskentamenetelmän valinnan merkitys tarkasteluissa, joissa vertaillaan maalämpöpumpun ja kaukolämmön kasvihuonekaasupäästöjä.

Tutkimustulosten perusteella kumpikin energiantuotantoratkaisu voidaan nähdä vähäpäästöisempänä vaihtoehtona valituista laskentamenetelmävalinnoista riippuen. Kuten aiemmin todettiin, tällä hetkellä ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä ohjeistusta siitä, mitä laskentamenetelmävalintoja tulisi käyttää, vaan laskentamenetelmät valitaan tapauskohtaisesti.

Tämän tutkimuksen tapauksessa vertailluista CHP-laitoksen päästöjen allokointitavoista hyödynjakomenetelmä kuvaa hyvin case-alueen CHP-laitoksen energiantuotannon tilannetta, sillä jos alueella ei olisi CHP-laitosta, lämpöenergia tuotettaisiin lämmön erillistuotannolla, ja samoilla perusteilla hyödynjakomenetelmässä jaetaan päästöt lämmölle. Hyödynjakomenetelmä on lisäksi tällä hetkellä yleisesti hyväksytty CHP-tuotannon päästöjen allokointimenetelmä ja sitä käytetään esimerkiksi Motivan ohjeistuksissa. Euroopan Unionin RES-direktiivissä energiamenetelmää suositellaan käytettävänä allokointimenetelmänä sen tuottamien tulosten, jotka ovat vertailukelpoisia korvausmenetelmän tulosten kanssa, ja sen helpon sovellettavuuden vuoksi. Energiamenetelmässä päästöt jaetaan tuotoksille tuotettujen energioiden suhteessa, ja tämä johtaa siihen, että kaukolämmölle tulee suurin päästötaakka vertailluista allokointimenetelmistä. Mikäli lämpö kuitenkin tuotettaisiin erillisessä lämpölaitoksessa, sen hyötysuhde olisi paljon parempi kuin erillisen sähköntuotannon, joten energiamenetelmä kuvaa case-tapauksen tilannetta huonosti. Myös lämmön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä kaukolämpö saa suuret päästöt, kuten case-laskennan tulokset osoittavat, sillä kaikki yhteistuotannon hyödyt osoitetaan tuotetulle sähkölle. Sähkön vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä taas kaukolämmön päästöt ovat selkeästi pienimmät verratuista menetelmistä, sillä tässä menetelmässä kaukolämmölle osoitetaan kaikki yhteistuotannon hyödyt. Tämä menetelmä ei kuitenkaan kuvaa kovinkaan hyvin CHP-laitoksia, joissa ensisijainen tarkoitus on kuitenkin täyttää jokin tietty lämmöntarve, joka case-alueen tapauksessa on selkeästi suurempi kuin sähköntarve.

Keskiarvoista kasviuonekaasupäästöä sähkölle käytetään yleensä elinkaariarvioinnissa, joissa tarkastellaan tämän hetkistä tilannetta eikä sillä pyritä kuvaamaan jonkin asian muutoksesta aiheutuvia kasviuonekaasupäästöjä. Marginaalista sähkön kasviuonekaasupäästöä taas käytetään perinteisesti kuvaamaan nimenomaan jonkin päätöksen aiheuttamaa muutosta kasviuonekaasupäästöissä. Tämän työn case-tarkastelun tarkoitus ei ollut tuottaa tietoa suoraan päätöksentekoon, joten eri lämmitysvaihtoehtojen vertailu oli haitanjaollisen lähestymistavan elinkaariarvioinnin mukaista eli keskiarvotietojen perusteella saadut tulokset kuvaavat tässä mielessä paremmin tutkimuksen tarkoitusta.

Työssä esiintyvät epävarmuudet jakautuvat rajauksista johtuviin, valinnoista johtuviin, käytettävästä tiedosta johtuviin sekä tutkimusmenetelmästä johtuviin epävarmuuksiin. Tämän työn case-laskentaosuudessa on myös otettu tutkitun alueen sähkönkulutus (kerros-

talojen laitteet, valaistus ja puhaltimet) mukaan laskentaan, vaikka se ei vaikuta tulosten keskinäiseen järjestykseen, sillä sähkönkulutuksen oletettiin pysyvän samana kummassakin energiantuotantovaihtoehdossa, ja tämä sähkönkulutus katettiin kummassakin tapauksessa ostoähköllä. Kyseinen sähköntarve haluttiin kuitenkin pitää mukana laskennassa, sillä se havainnollistaa paremmin case-alueen lämpö- ja sähköenergian tarvetta sekä niiden kasvi-huonekaasupäästöjen suhteita.

Tässä työssä sähköntuotanto on rajattu käsittämään vain Suomessa tuotettua sähköä, kuten työn Johdannossa todettiin. Suomi kuuluu kuitenkin sähkömarkkinoiden osalta Nord Poolin eli todellisuudessa sähköä ostetaan myös Suomen rajojen ulkopuolelta. Tämä rajaus vaikuttaa osaltaan saatuihin tuloksiin, ja kuten luvussa 2.1 esitetystä kuvasta 7 voidaan havaita, Suomessa tuotetaan vähemmän energiaa vesi- ja tuulivoimalla ja enemmän energiaa lämpö- ja ydinvoimalla kuin Pohjoismaissa keskimäärin. Näin ollen tarkastelun ulottaminen koko Nord Poolin alueella laskisi todennäköisesti sähköntuotannon keskimääräisiä kasvihuonekaasupäästöjä. Laskennan tuloksia tämä muuttaisi niin, että keskiarvoisella sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettuna maalämpöpumppuratkaisusta tulisi kannattavampi suhteessa jo laskettuihin tuloksiin. Työhön epävarmuutta tuovat myös laskennan rajaus esitettyjen kuvien perusteella sekä laskennan suorittaminen ilman laskentamalleja. Lisäksi elinkaarinäkökulman rajaukset tuovat työhön epävarmuutta.

Epävarmuutta laskentaan tuo myös CHP-laitoksen päästöjen allokointimenetelmien valinnat. Jos kasvihuonekaasupäästöjen allokointiin olisi käytetty muita allokointimenetelmiä, saattaisivat eri laskentamenetelmävalinnoilla saatu tulosten vähäpäästöisyysjärjestys muuttua. Myöskään marginaalisähkön teknologian määrittäminen kivihiililauhdesähköksi ei ole yksiselitteistä, vaan marginaalisähkön määrittäminen yhden tuotantotekniikan perusteella tuottaa myös epävarmuutta laskentaa. Kuten jo aiemmin luvussa 4.1 todettiin, marginaalisen sähkön määrittely on yksi CLCA:n ongelmakohtista. Mathiesen et al. (2009) kritisoiivat tutkimuksessaan tapaa käyttää vain yhtä teknologiaa marginaalitekniikana varsinkin pitkäaikavälin päätöksenteossa. Samaa kritiikkiä esittävät myös Lund et al. (2010). He ehdottavatkin elinkaariarvioinnin ja energiajärjestelmäanalyysin yhdistelmää monimutkaisen marginaalitekniikajoukon selvittämiseksi. Tässä työssä marginaalisen sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimena käytettiin hiililauhteen kerrointa. Hiililauhteen päästökerroin tuottaa eri energiatekniikoista suurimmat kasvihuonekaasupäästöt, joten kivihiileen perus-

tuvan marginaalisen kasvihuonekaasupäästökertoimen korvaaminen eri energiatekniikoiden yhdistelmästä syntyvällä kertoimella laskisi marginaalisen sähkön kasvihuonekaasupäästöarvoa. Näin ollen tehdyn laskennan tuloksia se muuttaisi niin, että marginaalisella sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimella laskettaessa maalämpöpumppuratkaisusta tulisi vähäpäästöisempi suhteessa jo laskettuihin tuloksiin.

Epävarmuutta työn tuloksiin tuovat myös kasvihuonekaasupäästöjen elinkaariset päästökertoimet, joiden arvot vaihtelevat kirjallisuudessa paljon. Esimerkiksi tätä työtä varten läpi käydyssä kirjallisuudessa maakaasun elinkaarenaikainen kasvihuonekaasupäästöarvo vaihteli 217–720  $t_{CO_2ekv./GWh}$  välillä. Tätä epävarmuutta pyrittiin poistamaan käyttämällä laajaa ja asianmukaista lähdeaineistoa ja käyttämällä lähdeaineistosta saatujen arvojen keskiarvoa laskennassa. Epävarmuutta tuovat myös case-laskennassa käytetyt Skanska Oy:ltä saadut tiedot alueen energiantarpeesta, jotka ovat arvioita vasta rakenteilla olevan alueen energiankulutuksista. Erityisesti sähkönkulutusta on vaikea arvioida etukäteen. Lisäksi sähkönkulutusluvuissa ei todennäköisesti ole huomioitu asukkaiden omien sähkölaitteiden sähkönkulutusta. Toisaalta sähkön kulutuksen muutos, ei vaikuttaisi tulosten keskinäiseen suhteeseen.

Käytettyjen tutkimusmenetelmien teoreettiset epävarmuudet tuovat myös epävarmuutta tuloksiin. Kirjallisuuskatsauksen kohdalla epävarmuutta voi ilmetä siinä, ettei kaikkia oleellisia tieteellisiä lähteitä ole saatavilla tai niitä ei löydetty. Tapaustutkimuksessa epävarmuutta tuottaa se, että tutkimuskohteiden edustavuus ja erilaisuus eivät ole vertailukelpoisia yleisellä tasolla. Myös itse tapaustutkimuksen kohde tuo epävarmuutta tuloksiin. Ensinnäkin kohde itsessään ei välttämättä ole tarpeeksi edustava, ja näin ollen sama laskenta jollakin muulla samankaltaisella alueella samoilla energiatekniikoiden vertailuilla saattaisi tuoda täysin erilaiset tulokset. Toisekseen case-kohteessa tutkittiin vain kahta eri energiantuotantotekniikkaa, joten muiden energiantuotantotekniikoiden mukaan tuominen saattaisi myös muuttaa tuloksia.

Vaikka tällä hetkellä kaukolämpöä suositetaan lämmöntuotantomenetelmänä, tulevaisuudessa kaukolämmön tuottamisen mielekkyys saattaa vähentyä, kun rakennusten lämmöntarve vähenee passiivirakentamisen ynnä muun energiatehokkaan rakentamisen seurauksena. Sähkön käytön ennustetaan sen sijaan lisääntyvän (ks. taulukko 2) tulevaisuudessa sähkö-

autojen ja muiden sähkölaitteiden käytön lisääntyessä. Tulevaisuudessa CHP-laitosten sijaan saattaa olla järkevämpää suosia lämpöpumppuratkaisuja pienen lämmöntarpeen ja todennäköisesti kasvavan jäähdytystarpeen täyttämiseen, sekä muita lähienergiaratkaisuja, kuten aurinkopaneeleita ja tuulivoimaa.

Koska case-tapauksen tilanne sekä tulevaisuuden skenaariot ovat hyvin tyypillisiä Suomessa, tulokset ovat todennäköisesti sovellettavissa myös muihin tilanteisiin, jossa vertaillaan maalämpöpumppua ja kaukolämpöä lämmitysvaihtoehtoina. Aiempi tutkimus myös osittain tukee tehtyjä havaintoja. Huijbregts (1998), Björklund (2002) ja Curran et al. (2005) tekemät tutkimukset ovat osoittaneet, että LCA laskelmien allokatiovalinnat, alueellinen vaihtelu ja valinta keskiarvoisen ja marginaalisen tiedon väliltä ovat tärkeitä tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi Luickx et al. (2008), Blum et al. (2010) ja Kikuchi et al. (2009) ovat tutkineet sähkötuotanto vaikutuksia maalämpöpumpun kasvihuonekaasupäästöihin. He kaikki päätyivät siihen tulokseen, että sähköntuotannolla on tärkeä rooli siinä, miten paljon maalämpöpumppu todella vaikuttaa kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin. Tässä tutkimuksessa sähkön kasvihuonekaasupäästöjen on osoitettu olevan tärkeä tekijä kasvihuonekaasupäästölaskelmissa, joissa vertaillaan kaukolämpöä ja maalämpöpumppua.

Härmälänrannan case-alueelle aiemmin tehdyn tutkimuksen, joka esiteltiin luvussa 5, perusteella maalämpöpumppu oli selkeästi kaukolämpöä parempi lämmitysratkaisu kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella ei kuitenkaan ole yksiselitteistä kumpi ratkaisusta, maalämpö vai kaukolämpö, on vähäpäästöisempi, vaan saadut tulokset ovat sidoksissa laskentamenetelmävalintoihin. Näin ollen myös muissa tutkimuksissa, joissa on vertailtu CHP-laitoksessa tuotettua kaukolämpöä ja maalämpöpumppua lämmitysmenetelminä, saattaa olla myös samanlainen tilanne, jossa lämmitysmenetelmien vähäpäästöisyysjärjestys on laskentamenetelmävalinnoista riippuvainen.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksessa saatuja tuloksia ja havaintoja ja verrataan niitä tutkimuskysymykseen, joka esitettiin johdannon tavoitteissa. Lisäksi luvussa käsitellään tarkastellun teorian ja saatujen tulosten yhteensopivuutta. Kappaleen lopussa pohditaan jatkotutkimusmahdollisuuksia sekä käsitellään tulosten hyödyntämismahdollisuutta.

Energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin vaikuttavat energiatekniikan valinnan lisäksi myös eri laskentamenetelmävalinnat. Näin ollen kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset samalla alueella ja samoilla energiantuotantotekniikoilla saattavat vaihdella merkittävästikin riippuen valituista laskentamenetelmistä. Tämän vuoksi onkin olennaista ymmärtää näiden laskentamenetelmien vaikutukset kasvihuonekaasupäästölaskennasta saatuihin tuloksiin.

Tämän työn tutkimuskysymys oli

- Missä tilanteissa laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla?

Tutkimuskysymykseen vastattiin kartoittamalla kirjallisuuskatsauksessa eri laskentamenetelmävalintoja kasvihuonekaasupäästölaskennassa ja tutkimalla case-tutkimuksessa näiden laskentamenetelmävalintojen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksiin. Kirjallisuuskatsauksessa tärkeimmiksi laskentamenetelmävalinnoiksi nousivat energiantuotannon maantieteellinen rajaus, CHP-laitoksen päästöjen allokointitavan sekä sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen valinta. Tässä työssä laskentamenetelmistä tutkimuksen kohteeksi valittiin CHP-laitoksen päästöjen allokointitapa sekä sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen valinta.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta vastauksena tutkimuskysymykseen, että tietyissä tapauksissa laskentamenetelmän valinnalla oli suurempi vaikutus alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla. Tämän lisäksi huomattiin, että laskentamenetelmävalinnoilla on sitä suurempi merkitys, mitä enemmän CHP-laitoksessa käytetään uusiutuvaa polttoainetta, niin kuin tulevaisuudessa todennäköisesti tulee käymään. Case-tutkimuskohteen mukainen tilanne, jossa vertaillaan maalämpöä ja kaukoläm-

pöä alueen lämmitysratkaisuina, on Suomen näkökulmasta hyvin yleinen. Näin ollen tämän tutkimuksen tulokset ovatkin yleistettävissä moneen samankaltaiseen tilanteeseen Suomessa.

Sähkön- ja lämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennassa onkin syytä huomioida eri laskentamenetelmävalintojen vaikutus esitettyihin tuloksiin. Kasvihuonekaasupäästölaskentaa tehdessä sekä erilaisia laskentatuloksia arvioitaessa on tärkeää ymmärtää perustellut eri laskentamenetelmävalintojen käytön takana, ja ymmärtää se, että eri perusteluilla myös laskennan tulokset saattaisivat olla toisenlaiset. Laskentamenetelmien valinta ilman yhtenäistä kriteeristöä saattaa johtaa myös siihen, että laskentamenetelmiä saatetaan valita tarkoituksenhakuisesti tai ammattitaidottomasti. Energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennassa onkin tärkeää, että varsinkin päätöksenteon tueksi ja suositusten antamiseksi tehtyjen laskelmien takana on asiantuntijoita, jotka osaavat suhteuttaa laskentamenetelmävalinnat tutkimuskysymykseen ja tutkimuskysymyksen ja tutkimusmenetelmän välille.

Tässä tutkimuksessa tutkimuskysymyksen ja tutkimuksen tarkoituksen mukaista tilannetta parhaiten kuvaavat laskentamenetelmävalinnat olisivat hyödynjakomenetelmä sekä keskiarvotiedon käyttö sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimenä. Tällöin maalämpöpumppu olisi sekä case-tarkastelun että laajennetun tarkastelun perusteella kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta vähäpäästöisin ratkaisu. Jos tätä tutkimusta kuitenkin käytettäisiin päätöksen tekoon eli keskiarvoisen sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimenä sijasta käytettäisiin marginaalista päästökerrointa, niin hyödynjakomenetelmää käytettäessä kaukolämpö olisi vaihtoehtoista vähäpäästöisempi ratkaisu sekä case-tarkastelussa että laajennetussa tarkastelussa.

Suomen energiasektori tulee todennäköisesti uudistumaan seuraavien vuosikymmenien aikana. Sähkön- ja lämmöntuotannossa keskitetystä tuotannosta ollaan siirtymässä hajautettuun tuotantoon ja fossiilisia polttoaineita korvataan yhä enemmän uusiutuvilla polttoaineilla. Tulevien vuosikymmenien aikana tullaankin siis todennäköisesti tekemään niin valtakunnallisia kuin alueellisia päätöksiä, siitä minkälaista lämmön- ja sähköntuotantotekniikkaa alueelle rakennetaan. Nämä päätökset taas perustuvat useasti erilaisiin tutkimuksiin ja laskelmiin. Kuten tämä tutkimus osoittaa, olisikin tärkeää ymmärtää näiden laskelmien rajoitukset ja heikkoudet. Esimerkiksi päätöksenteossa käytettävässä laskennas-

sa suositellaan käytettäväksi marginaalisia tietoja, ja muun muassa sähköenergiaa käyttävä maalämpöpumppu saa näissä laskelmissa yleensä suuret kasvihuonekaasupäästöt. Näin ollen olisikin syytä pohtia, onko päätöksenteossa käytettävissä laskennassa aina järkevää käyttää marginaalisia tietoja.

Tätä tutkimusta ja tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennan tuloksia, joita saadaan esimerkiksi erilaisten laskureiden, kuten johdannossa mainitun KEKO-laskurin, tuloksina. Laskurin käyttäjän on tärkeää ymmärtää, että laskurissa on tehty tietyt laskentamenetelmävalinnat energiantuotannon maantieteellinen rajauksen, CHP-laitoksen päästöjen allokointitavan sekä sähkön kasvihuonekaasupäästökertoimen osalta. Laskentamenetelmävalintojen vaikutusten merkittävyyden ymmärtäminen auttaa eri energiantuotantotekniikoiden arviointitilanteissa esimerkiksi kaavoittajaa tiedostamaan kasvihuonekaasupäästölukujen taakse sijoittuvat valinnat.

Tutkimusta voisi tulevaisuudessa laajentaa koskemaan myös muita CHP-laitoksen allokointitapoja, jotka tässä tutkimuksessa jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Erityisesti SFS-EN 15316-4-5: 2007 standardiin perustuvan menetelmän, joka on käytössä esimerkiksi Helsingin Energialla, käytöstä saatavat vastaavanlaiset tulokset voisivat olla kiinnostava lisä laskentamenetelmien vaikutuksen arvioinnissa.

Toinen suunta, jonne tutkimusta voisi laajentaa, olisi marginaalisen kasvihuonekaasupäästökertoimen laskeminen sähkölle monen eri energiantuotantotekniikan yhdistelmänä. Tätä ongelmaa voisi lähestyä esimerkiksi Lundin et al. (2010) tutkimuksessa esitetyn elinkaariarvioinnin ja energijärjestelmäanalyysin yhdistelmällä, ja mukaan voisi tuoda myös marginaalitekniologioiden ajallista muutosta, ja sen suhtautumista lämmöntarpeen muutokseen lämpötilan mukaan.

Tulevaisuudessa energiantuotantosektori tulee todennäköisesti muuttumaan melko radikaalisti uusiutuvan hajautetun energiantuotannon lisääntyessä ja sähköverkkojen muuttuessa kohti älykkäitä sähköverkoja. Tulevaisuudessa uusiutuvan energian osuus tulee kasvaamaan ja energiankultusta ja -tuotantoa pystytään ohjaamaan yhä tehokkaammin. Näiden kehitysnäkymien tuomien muutoksien tutkiminen alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon



kasvihuonekaasupäästönäkökulmasta on myös yksi suunta, jonne tutkimusta voisi tulevaisuudessa kehittää.

## 8 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää alueellisen lämmön- ja sähköntuotannon laskentamenetelmävalintojen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin. Työn tutkimusky-symyksenä oli, missä tilanteissa laskentamenetelmän valinnalla on suurempi vaikutus alu-  
een kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla. Työssä sähköntuotanto rajattiin koskemaan vain Suomessa tuotettua sähköä ja kasvihuonekaasupäästökertoimina käytettiin elinkaarisia kasvihuonekaasupäästökertoimia, jotka määritettiin kirjalli-  
suuden perusteella.

Työn tutkimusmetodeina käytettiin kirjallisuuskatsausta ja tapaustutkimusta. Kirjallisuus-  
katsauksen perusteella löydettiin kasvihuonekaasupäästölaskennan kannalta merkittävim-  
mät laskentamenetelmävalinnat. Tapaustutkimuksessa puolestaan tutkittiin näiden lasken-  
tamenetelmävalintojen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin yksittäisen kohteen näkö-  
kulmasta.

Työn tuloksena oli, että joissakin tilanteissa laskentamenetelmävalinnoilla on suurempi  
merkitys alueen kasvihuonekaasupäästöihin kuin energiantuotantotekniikan valinnalla.  
Tämän lisäksi todettiin, että mitä suurempi osuus CHP-laitoksen energian tuotetaan uusiu-  
tuvalla energian, sitä suurempi on myös laskentamenetelmävalintojen vaikutus tuloksiin  
case-tarkastelun mukaisessa tilanteessa.

Työn johtopäätöksenä todettiin, että energiantuotannon kasvihuonekaasupäästölaskennassa  
on syytä huomioida eri laskentamenetelmävalintojen vaikutus esitettyihin tuloksiin ja ym-  
märtää perustelut eri laskentamenetelmävalintojen käytön takana sekä ymmärtää se, että eri  
perusteluilla myös laskennan tulokset saattaisivat olla toisenlaiset. Erityisesti muuttuvan  
energiasektorin ja lisääntyvän lähienergian käytön myötä tämän asian tärkeys tulee koros-  
tumaan erityisesti päätöksenteossa.

Jatkossa tutkimukseen voisi tuoda lisäksi muiden sähkön ja lämmön yhteistuotannon allo-  
kointitapojen vertailua, erityisesti SFS-EN 15316-4-5: 2007 standardiin perustuvan jakota-  
van. Tämän lisäksi sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästön marginaalisen kertoimen  
laskemista voisi kehittää monen eri marginaalitekniikan yhdistelmäksi. Tulevaisuudessa

muuttuvan energiantuotantosektorin muutokset olisivat myös mielenkiintoinen tutkimuskohde alueellisen lämmön- ja sähkötuotannon kasvihuonekaasupäästönäkökulmasta.

## LÄHTEET

- 2006/32/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 5.4.2006 energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta. EUVL 114/6 27.4.2006.
- 2009/28/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. 23.4.2009 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. EUVL 140/16 5.6.2009.
- Bauer, Christian. 2008. Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. Paul Scherrer Institut. 68 s. ISSN 1019-0643.
- Bergman, Jukka-Pekka; Lankila, Mika & Kässi, Tuomo. 2005. Teknologiaohjelma DEN-SY - Hajautetun energiantuotannon tulevaisuuskenaariot ja vaikutukset liiketoimintamalleihin. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology. 85 s. ISBN 952-214-008-2.
- Berta, Gian Luigi; Prato, Alessandro Pini & Garbarino, Luca. 2006. Design criteria for distributed cogeneration plants. *Energy* 2006: 31. 1403–1416 s.
- Bin, Shui & Dowlatabadi, Hadi. 2005. Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy* 2005: 33. 197–208 s.
- Björklund, Anna. 2002. Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *Int J LCA* 2002: 7 (2). 64–72 s.
- Blum, Philipp; Campillo, Gisela; Münch, Wolfram & Kölbl, Thomas. 2010. CO<sub>2</sub> savings of ground source heat pump systems – A regional analysis. *Renewable Energy* 2010: 35. 122–127 s.
- Brown, Richard. 2008. Impact of Smart Grid on Distribution System Design. IEEE: 2008.
- C40 Cities. 2011. Why cities? [C40 Cities www-sivuitla]. Päivitetty 2011. [viitattu 22.10.2013]. Saatavissa: <http://www.c40cities.org/whycities>
- Cherubini, Francesco; Bird, Neil D.; Cowie, Annette; Jungmeier, Gerfried; Schlamadinger, Bernhard & Woess-Gallasch, Susanne. 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 2009: 53. 434–447 s.
- Creswell, John W. 2009. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 3<sup>rd</sup> edition. Los Angeles: Sage. 260 s. ISBN 978-1-4129-6556-9.
- Curran, Mary Ann; Mann, Margaret & Norris, Gregory. 2005. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production* 2005: 13. 853–862 s.
- da Graça Carvalho, Maria. 2012. EU energy and climate change strategy. *Energy* 2012: 40. 19–22 s.

- Delarue, Erik D.; Luickx, Patrick J. & D'haeseleer, William D. 2009. The actual effect of wind power on overall electricity generation costs and CO2 emissions. *Energy Conversion and Management* 2009: 50. 1450–1456 s.
- Eisenhardt, Kathleen & Graebner, Melissa. 2007. *Academy of Management Journal* 2007: Vol. 50, No. 1. 25–32 s.
- Energiateollisuus. 2010. Haasteista mahdollisuuksia – sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050. Helsinki: Energiateollisuus. [verkkodokumentti]. 67 s. ISBN 978-952-5615-31-9.
- Energiateollisuus. 2013b. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. [Energiateollisuuden www-sivuilta]. [verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/hyva\\_tietaa\\_sahkomarkkinoista\\_2013.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/hyva_tietaa_sahkomarkkinoista_2013.pdf)
- Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.
- Energiateollisuus. 2013a. Sähköntuotanto. [Energiateollisuuden www-sivuilta]. Päivitetty 21.1.2013. [viitattu 25.9.2013]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>
- Energiateollisuus. 2013c. Sähköntuotanto energialähteittäin. [Energiateollisuuden www-sivuilta]. Päivitetty 17.10.2013. [viitattu 22.10.2013]. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/a\\_sahkontuotannon\\_kk\\_polttoaineet\\_new\\_2.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/a_sahkontuotannon_kk_polttoaineet_new_2.pdf)
- Erikson, Ola; Finnveden, Görän; Ekvall, Tomas & Björklund, Anna. 2007. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion. *Energy Policy* 2007: 35. 1346–1362 s.
- Eskeland, Gunnar; Rive, Nathan & Mideksa, Torben. 2011. Europe's climate goals and the electricity sector. *Energy policy* 2012: 41. 200–211 s.
- Euroopan komissio. Eurooppa 2020 -tavoitteet. [Euroopan komission www-sivuilta]. Päivitetty 21.1.2013. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_fi.htm)
- European commission. 2010. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION. EUROPE 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. [verkkodokumentti.] 34 s. Saatavissa: <http://eurllex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN: EN:PDF>
- European commission. 2006. European Smartgrids Technology platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. [verkkodokumentti.] 44 s. ISBN 92-79-01414-5. Saatavissa: [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_en.pdf)
- European commission. 2011. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS Euroopan laajuisten energiainfrastruktuurien suuntaviivoista ja päätöksen N:o 1364/2006/EY kumoamisesta. KOM(2011) 658. Bryssel 19.10.2011.

- Fink, Arlene. 2010. *Conducting Research Literature Reviews: from the Internet to Paper*. 3. painos. Thousand Oaks: Sage Publications, Inc. 253 s. ISBN 978-4129-7189-8.
- Flyvbjerg, Bent. 2006. Five Misunderstandings About Case-Study Research. *Qualitative Inquiry* 2006: 12. 219–245 s.
- Fröling, Morgan; Holmgren, Camilla & Svanström, Magdalena. 2004. Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System. Part 1: Pipe Production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2004: 9. 130–136 s.
- Fröling, Morgan & Svanström, Magdalena. 2005. Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System. Part 2: Network Construction. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2005: 10. 425–435 s.
- Genchi, Yutaka; Kikegawa, Yukihiro & Inaba, Atsushi. CO<sub>2</sub> payback-time assessment of a regional-scale heating and cooling system using a ground source heat-pump in a high energy-consumption area in Tokyo. *Applied Energy* 2002: 71. 147–160 s.
- Greening, Benjamin & Azapagic, Adisa. 2012. Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy* 2012: 39. 205–217 s.
- Heinonen, Soile. 2013. Riskienhallintapäällikkö, Tampereen Sähkölaitos -yhtiöt. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Pluuman, Karoliina. Lähetetty 25.11.2013 klo 10:39 (GMT +0200).
- Helsingin Energia. Energian alkuperä. [Helsingin Energian www-sivuilta]. Päivitetty 2013. [viitattu 11.1.2014]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/Energiantuotanto/Energian-alkupera/>
- HINKU-foorumi. Kohti hiilineutraalia kuntaa. [HINKU-foorumin www-sivuilta]. [viitattu 12.11.2013]. Saatavissa: <http://www.hinku-foorumi.fi/>
- Hirvonen, Ritva (toim.). 2011. Suomen energiavisio 2030. Suomenkielinen tiivistelmä. Espoo: VTT. [verkkodokumentti.] 30 s. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/files/projects/energy\\_book\\_series/ev\\_2030\\_tiivistelma.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf)
- Holtinen, Hannele & Tuhkanen, Sami. 2004. The effect of wind power on CO<sub>2</sub> abatement in the Nordic Countries. *Energy Policy* 2004: 32. 1639–1652 s.
- Hondo, Hiroki. 2005. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* 2005: 30. 2042–2056 s.
- Hoornweg, Daniel; Sugar, Lorraine & Trejos Gomez, Claudia Lorena. 2011. Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. *Environment and Urbanization* 2011: 23. 207–227 s.
- Huijbregts, Mark A. J. 1998. Application of Uncertainty and Variability in LCA. Part I: A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. *Int. J. LCA* 1998: 3 (5). 273–280 s.

IEA. 2009. Cities, Towns & Renewable Energy. Yes in My Front Yard. Paris: IEA Publications. [verkkodokumentti.] 186 s. ISBN: 978-92-64-07687-7. Saatavissa: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3858,en.htm>

Ilmastolaskuri. 2011. Ilmastolaskurissa käytetyt oletuskertoimet ja -arvot. WWF. [verkkodokumentti]. 16 s. Saatavissa: [http://ilmastolaskuri.fi/web/storage/files/21112011\\_oletuskertoimet\\_ja\\_arvot.pdf](http://ilmastolaskuri.fi/web/storage/files/21112011_oletuskertoimet_ja_arvot.pdf)

Ilmastoveivi. Tietoa palvelusta. [HSY:n www-sivuilta]. [viitattu 11.1.2014]. Saatavissa: <http://ilmastoveivi.fi/app/>

Ipakchi, Ali & Albuyel, Farrokh. 2009. Grid of the Future. Are We Ready to Transition to a Smart Grid? IEEE power and energy magazine: March/April 2009. 52–64 s.

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Chapter 3. Uncertainties. [verkkodokumentti]. 66 s. Saatavissa: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1\\_Volume1/V1\\_3\\_Ch3\\_Uncertainties.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf)

ISO 14040. 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1997. 48 s.

ISO 14044. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1997. 96 s.

Kannonlahti, Jouni & Sjöholm, Patrik. 2012. Tuulivoimatuotannon ympäristövaikutukset sekä keskitetyn ja hajautetun energiantuotannon rajapinnan määrittely. Vaasan yliopiston Levón-instituutin palvelututkimukset 8/2012. 66 s. ISSN 2243-2078.

Kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. 2013. Työ- ja elinkeinoministeriö. 55 s. 978-952-227-749-7.

Karjalainen, Timo. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulu: Cemis-Oulu. [verkkodokumentti]. 23 s. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen\\_lammon\\_ja\\_sahkon\\_yhteistuotannon\\_tilannekatsaus\\_laitteet\\_ja\\_niiden\\_kayttoonotto.pdf](http://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen_lammon_ja_sahkon_yhteistuotannon_tilannekatsaus_laitteet_ja_niiden_kayttoonotto.pdf)

Katzenstein, Warren & Apt, Jay. 2009. Air Emissions Due To Wind And Solar Power. Environ. Sci. Technol. 2009: 43. 253–258 s.

Kaupunkien ja kuntien alueellinen ekolaskuri - KEKO B. [wiki.aalto www-sivuilta]. Päivitetty 28.11.2013. [viitattu 23.11.2013]. Saatavissa: <https://wiki.aalto.fi/display/KEKO/Kaupunkien+ja+kuntien+aluetasoiset+ekolaskurit+-+KEKO>

Kavvadias, K. C.; Tosios, A. P. & Maroulis, Z. B. 2010. Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis. *Energy Conversion and Management* 2010: 51. 833–845 s.

Kikuchi, Emi; Bristow, David & Kennedy, Christopher. 2009. Evaluation of region-specific residential energy systems for GHG reductions: Case studies in Canadian cities. *Energy Policy* 2009: 37. 1257–1266 s.

Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011. 2013. Motivan Tutkimusraportti. [verkkodokumentti]. 52 s. Saatavissa:  
[http://www.motiva.fi/files/8300/Kotitalouksien\\_sahkonkaytto\\_2011\\_Tutkimusraportti.pdf](http://www.motiva.fi/files/8300/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_Tutkimusraportti.pdf)

KURKE. Kunnallisen rakentamisen kestävät energiaratkaisut. [Aalto-yliopiston www-sivut]. Päivitetty 25.11.2013. [viitattu 23.1.2014]. Saatavissa:  
[http://energytech.aalto.fi/fi/research/energy\\_efficiency\\_and\\_systems/heating\\_ventilating\\_and\\_air\\_conditioning/kurke/](http://energytech.aalto.fi/fi/research/energy_efficiency_and_systems/heating_ventilating_and_air_conditioning/kurke/)

Kurnitski, Jarek & Keto, Matias. 2010. Rakennusten energiakäytön aiheuttamat päästöt ja primäärienergiankäyttö. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy & Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. [verkkodokumentti]. 468–478 s. Saatavissa:  
[https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A\\$47\\$RK100601\\$46\\$pdf/RK100601.pdf](https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A$47$RK100601$46$pdf/RK100601.pdf)

Lenzen, Manfred; Dey, Christopher & Foran, Barney. 2004. Energy requirements of Sydney households. *Ecological Economics* 2004: 49. 375–399 s.

Lew, Debra & Brinkman, Greg. 2013. The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2: Executive Summary. Denver: National Renewable Energy Laboratory. [verkkodokumentti]. 29 s. Saatavissa: <http://www.osti.gov/bridge>

Liikanen, Juha. 1999. Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon päästöjen jakaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 19/1999. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö. 76 s. ISBN 951-739-513-2.

Lonka, Heikki. 2011. Energiatohokkaat alueet Suomessa. Esitys energiatohokkuutta käsittelevässä seminaarissa energiatohokkaista alueista, Helsingissä, 7.7.2011. Saksalais-Suomalainen Kauppakamari ja FCG Oy. Saatavissa:  
[http://www.renewablesb2b.com/data/ahk\\_finland/publications/files/Lonka\\_Energiatohokkaat\\_alueet\\_7.6.2011\\_HL.pdf](http://www.renewablesb2b.com/data/ahk_finland/publications/files/Lonka_Energiatohokkaat_alueet_7.6.2011_HL.pdf)

Luickx, Patrick; Helsen, Lieve & D'haeseleer, William. 2008. Influence of massive heat-pump introduction on the electricity-generation mix and the GHG effect: Comparison between Belgium, France, Germany and The Netherlands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008: 12. 2140–2158 s.

Lund, Henrik. 2007. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 2007: 32. 912–919 s.



Lund, H. & Andersen A. N. 2005. Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices. *Energy Conversion and Management* 2005: 46. 893–904 s.

Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Christensen, Per & Schmidt, Jannick Hoejrup. 2010. Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA. *Int J Life Cycle Assess* 2010: 15. 260–271 s.

Martinkauppi, Kirsi (toim.). 2010. ERA17 Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017. Helsinki: Ympäristöministeriö, Sitra ja Tekes. [verkkodokumentti]. 90 s. 978-952-11-3791-4 (PDF). Saatavissa: [http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/ERA17\\_loppuraportti.pdf](http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/ERA17_loppuraportti.pdf)

Mathiesen, Brian Vad; Münster, Mariw & Fruergaard, Thilde. 2009. Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production* 2009: 17. 1331–1338 s.

McCarthy, Ryan & Yang, Christopher. 2010. Determining marginal electricity for near-term plug-in and fuel cell vehicle demands in California: Impacts on vehicle greenhouse gas emissions. *Journal of Power Sources* 2010: 195. 2099–2109 s.

Motiva. 2013a. Lämmönkulutus. [Motivan www-sivuilta]. Päivitetty 29.11.2013. [viitattu 10.12.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/mihin\\_energiaa\\_kuluu/lammonkulutus](http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/mihin_energiaa_kuluu/lammonkulutus)

Motiva. 2011. Lämpöpumput. [Motivan www-sivuilta]. Päivitetty 17.8.2011. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampopumput](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput)

Motiva. 2013b. Maalämpöpumput. [Motivan www-sivuilta]. Päivitetty 6.5.2013. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/eri\\_lammitysmuodot/maalampopumppu](http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/eri_lammitysmuodot/maalampopumppu)

Motiva. 2010. Vesistölämpö. [Motivan www-sivuilta]. Päivitetty 11.1.2010. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/vesistolampo](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/vesistolampo)

Motiva. 2004. Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. [verkkodokumentti]. 15 s. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje\\_CO2\\_kohde\\_040622.pdf](http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf)

Nord Pool Spot. The power market - how does it work. [Nord Pool Spotin www-sivuilta]. Päivitetty 2013. [viitattu 4.11.2013]. Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/>

Nystedt, Åsa; Sepponen, Mari & Virtanen, Mikko. 2012. Ekotaajaman suunnitteluperiaatteet. Espoo: VTT. 50 s. ISBN 978-951-38-38-7838-2.

- Pehnt, Martin. 2004. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 2006: 31. 55–71 s.
- Persson, Camilla; Fröling, Morgan & Svanström, Magdalena. 2006. Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System. Part 3: Use Phase and Overall Discussion. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2006: 11. 437–446 s.
- Potter, Cameron. 2009. Building a Smarter Smart Grid Through Better Renewable Energy Information. *IEEE* 978-1-4244-3811-2/09/.
- Pyykkönen, Anna-Leena. 2008. Kasvihuonekaasupäästöjen erilaiset laskutavat hämmentävät. *Helsingin Sanomat* 20.1.2008. [verkkolehti]. Viitattu 21.2.2014. Saatavissa: <http://www.hs.fi/kaupunki/artikkeli/Kasvihuonekaasup%C3%A4%C3%A4st%C3%B6jen+-erilaiset+laskutavat+h%C3%A4mment%C3%A4v%C3%A4t/HS20080120SI1KA01is2>
- Pöyry Oy. 2010. Laskelma lämmityksen päästöistä. Loppuraportti 60K30031.02-Q210-001D. [verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://www.oil.fi/sites/default/files/sivut/sisaltosivu/liitetiedostot/7\\_3\\_2\\_lammitysmuotojen\\_paastot\\_lyhennelma.pdf](http://www.oil.fi/sites/default/files/sivut/sisaltosivu/liitetiedostot/7_3_2_lammitysmuotojen_paastot_lyhennelma.pdf)
- Rajala, Pasi; Hirvonen, Heikki; Perttula, Sampo; Lähde, Elisa; Pulkka, Perttu; Jarmala, Leo; Laukkanen, Jouni; Patronen, Jenni; Jokinen Minna; Rintala, Timo; Rajakallio, Karoliina & Kauppinen, Tiina. 2010. Sitran selvityksiä 41. Energiatohokkuus kaavoituksessa. Helsinki: Sitra. [verkkodokumentti]. 152 s. 978-951-563-742-0 (URL:<http://www.sitra.fi>).
- Rakennusten lämmitysenergiankulutuksen normitus. 2010. Punamusta Oy. [verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/2840/Rakennusten\\_lammitysenergiankulutuksen\\_normitus.pdf](http://www.motiva.fi/files/2840/Rakennusten_lammitysenergiankulutuksen_normitus.pdf)
- RakMK D5. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. 72 s.
- Reinders, A. H. M. E.; Vringer, K. & Block, K. 2003. The direct and indirect energy requirement of households in the European Union. *Energy Policy* 2003: 31 (2). 139–153 s.
- Ristimäki, Miro; Säynäjoki, Antti; Heinonen, Jukka & Junnila, Seppo. 2013. Combining Life Cycle Costing and Life Cycle Assessment for an Analysis of a New Residential District Energy System Design.
- Saaranen-Kauppinen, Anita & Puusniekka, Anna. 2006. Tapaututkimus. KvaliMOTV - Menetelmäopetuksen tietovaranto. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. [verkkopublication]. [Viitattu 20.12.2013]. Saatavissa: [http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L5\\_5.html](http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/kvali/L5_5.html)
- Skanska 1/2011. Härmälänrannan alue-esite: Koti järven rannalla hyvän olon Härmälänrannassa Tampereella. 2011. [verkkodokumentti]. 20 s. Saatavissa: [http://skanska.smartpage.fi/fi/esitteet/harmalanrannanalue/pdf/Skanska\\_Harmalanrannan\\_alue-esite.pdf](http://skanska.smartpage.fi/fi/esitteet/harmalanrannanalue/pdf/Skanska_Harmalanrannan_alue-esite.pdf)

Skanska 5/2011. Hyvän olon järvenrantakoti Härmälänrannan Pyry, Viima ja Tuisku Tampere. 2011. [verkkodokumentti]. 16 s. Saatavissa: [http://skanska.smartpage.fi/fi/esitteet/pyry-viima-tuisku/files/Skanska\\_Pyry\\_Viima\\_Tuisku.pdf](http://skanska.smartpage.fi/fi/esitteet/pyry-viima-tuisku/files/Skanska_Pyry_Viima_Tuisku.pdf)

Soimakallio, Sampo; Kiviluoma, Juha & Saikku, Laura. 2011. The complexity and challenges of determining GHG (greenhouse gas) emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA (life cycle assessment) - A methodological review. *Energy* 2011: 36. 6705–6713 s.

Šúri, Marcel; Huld, Thomas A.; Dunlo, Evan D. & Ossenbrink, Heinz A. 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy* 2007: 81. 1295–1305 s.

Tampereen kaupunki. 2013b. Co-ZED - Constructing zero energy districts. [Tampereen kaupungin [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 8.10.2013. [Viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/tampereinfo/projektit/kaupunkikonserninhankeet/eco2-hanke/hankeet/cozed.html>

Tampereen kaupunki. 2013a. ECO2 - Ekotehokas Tampere 2020. [Tampereen kaupungin [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 14.10.2013. [Viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/tampereinfo/projektit/kaupunkikonserninhankeet/eco2-hanke.html>

Tampereen sähkölaitoksen vuosiraportti 2012. 2013. Tampere: Tampereen sähkölaitos. [verkkodokumentti]. 27 s. Saatavissa: [https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysajamparisto/toimintamme/tunnusluvut/Documents/S%C3%A4hk%C3%B6laitos\\_vuosiraportti\\_2012.pdf](https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysajamparisto/toimintamme/tunnusluvut/Documents/S%C3%A4hk%C3%B6laitos_vuosiraportti_2012.pdf)

Tampereen sähkölaitos. Kaukolämpöverkosto. [Tampereen sähkölaitoksen [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 2012. [Viitattu 29.10.2013]. Saatavissa: <http://tsvpalvelu.tampere.fi:88/IMS/>

Teknologiateollisuus. Älykkäät sähköverkot. [Teknologia teollisuuden [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 2013. [Viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: <http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/alykkaat-sahkoverkot.html>

Tilastokeskuksen katsauksia 2013/1. Helsinki. [verkkodokumentti]. 57 s. ISBN 978–952–244–438–7. Saatavissa: [http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/suominir\\_2013.pdf](http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/suominir_2013.pdf)

Tilastokeskus. 2013a. Energian hankinta ja kulutus. Liitekuvio 14. [Tilastokeskuksen [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 22.3.2013. [Viitattu 16.9.2013]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehk/2012/04/ehk\\_2012\\_04\\_2013-03-22\\_kuv\\_014\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2012/04/ehk_2012_04_2013-03-22_kuv_014_fi.html)

Tilastokeskus. 2012d. Energiatilasto. Vuosikirja 2011. [verkkodokumentti]. 151 s. ISBN 978–952–244–369–4 (pdf). Saatavissa: [http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/yene\\_enev\\_201100\\_2012\\_6164\\_n et.pdf](http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/yene_enev_201100_2012_6164_n et.pdf)

Tilastokeskus. 2012c. Kaukolämmön tuotanto, GWh. Liitetaulukko 4. [Tilastokeskuksen [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 18.10.2012. [Viitattu 2.10.2013]. Saatavissa: [http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo\\_2011\\_2012-10-16\\_tau\\_004\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo_2011_2012-10-16_tau_004_fi.html)

Tilastokeskus. 2013b. Polttoaineiden käyttö tuotantomuodoittain sähkön ja lämmön tuotannossa 2012. Liitekuvio 9. [Tilastokeskuksen www-sivuilta]. Päivitetty 5.11.2013. [Viitattu 10.12.2013]. Saatavissa:

[https://www.tilastokeskus.fi/til/salatuo/2012/salatuo\\_2012\\_2013-11-05\\_kuv\\_009\\_fi.html](https://www.tilastokeskus.fi/til/salatuo/2012/salatuo_2012_2013-11-05_kuv_009_fi.html)

Tilastokeskus. 2012a. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2011. Liitekuvio 1. [Tilastokeskuksen www-sivuilta]. Päivitetty 18.10.2012. [Viitattu 25.9.2013]. Saatavissa:

[http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo\\_2011\\_2012-10-16\\_kuv\\_001\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo_2011_2012-10-16_kuv_001_fi.html)

Tilastokeskus. 2012b. Sähkön tuotanto tuotantomuodoittain 2000–2011. Liitekuvio 3. [Tilastokeskuksen www-sivuilta]. Päivitetty 18.10.2012. [Viitattu 25.9.2013]. Saatavissa:

[http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo\\_2011\\_2012-10-16\\_kuv\\_003\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2011/salatuo_2011_2012-10-16_kuv_003_fi.html)

Tilastokeskus. 2013c. Teollisuuslämmön tuotanto 2000–2012. Liitekuvio 8. [Tilastokeskuksen www-sivuilta]. Päivitetty 5.11.2013. [Viitattu 10.12.2013]. Saatavissa:

[http://www.stat.fi/til/salatuo/2012/salatuo\\_2012\\_2013-11-05\\_kuv\\_008\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatuo/2012/salatuo_2012_2013-11-05_kuv_008_fi.html)

UN. 2007. City planning will determine pace of global warming. IN UNITED NATIONS, N. Y. (Ed.) General Assembly - GA/EF/3190 - city planning will determine pace of global warming. UN Sixty-second General Assembly, Second committee.

UNFCCC. Background on the UNFCCC: The international response to climate change. [UNFCCC:n www-sivuilta]. Päivitetty 2013. [Viitattu 18.9.2013].

Saatavissa: [http://unfccc.int/essential\\_background/items/6031.php](http://unfccc.int/essential_background/items/6031.php)

Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Alueellinen kasvihuonekaasupäästöjen arviointimalli (KASVENER). [Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelun www-sivuilta]. Päivitetty 24.4.2013. [viitattu 11.2.2014]. Saatavissa: <http://www.syke.fi/hankkeet/kasvener>

Vanhanen, Juha. 2008. Hajautetun energiatuotannon edistäminen. Helsinki: Gaia Group Oy. [verkkodokumentti]. 12 s. Saatavissa:

[http://www.tem.fi/files/19381/Hajautetun\\_tuotannon\\_edistaminen\\_Juha\\_Vanhanen\\_29.2.2008.pdf](http://www.tem.fi/files/19381/Hajautetun_tuotannon_edistaminen_Juha_Vanhanen_29.2.2008.pdf)

Vartiainen, Eero; Luoma, Päivi; Hiltunen, Jari & Vanhanen, Juha. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Helsinki: Gaia Group Oy. 90 s. ISBN 952-91-4465-2

Vattenfall. 2012. LCA Vattenfall's electricity generation in the Nordic countries. [verkkodokumentti]. 26 s. Saatavissa:

[http://corporate.vattenfall.com/Global/corporate/sustainability/Reports/life\\_cycle\\_assessment.pdf](http://corporate.vattenfall.com/Global/corporate/sustainability/Reports/life_cycle_assessment.pdf)

Vehviläinen, Iivo; Pesola, Aki; Heljo, Juhani; Vihola, Jaakko; Jääskeläinen, Saara; Kalenoja, Hanna; Lahti, Pekka; Mäkelä, Maisa & Ristimäki, Mika. 2010. Sitran selvityksiä 39: Rakennetun ympäristön energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt. Helsinki: Sitra. [verkkodokumentti]. 125 s. ISBN 978-951-563-739-0 (URL:<http://www.sitra.fi>).

Vringer, Kees & Blok, Kornelius. 1995. The direct and indirect energy requirements of households in the Netherlands. *Energy Policy* 1995: 23 (10). 893-910 s.

WEC. 2004. Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment. A Special Report of the World Energy Council. London: World Energy Council. 61 s. ISBN 0 946121 16 8.

Weidema, Bo; Frees, Niels & Nielsen, Anne-Merete. 1999. Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories. *Int. J. LCA* 1999: 4 (1). 48–56 s.

Weisser, Daniel. 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 2007: 32. 1543–1559 s.

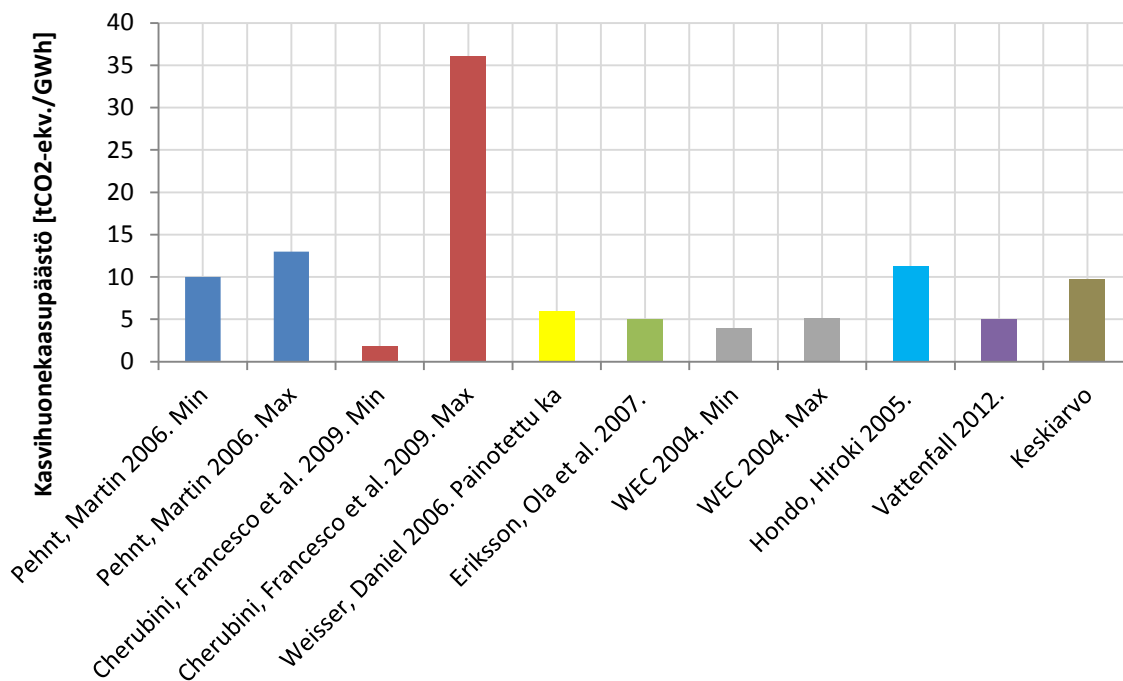
World Energy Outlook. 2008. Paris: OECD/IEA. 569 s. ISBN-13: 978 92 64 04560-6.

Yin, Robert. 1994. *Case Study Research Design and Methods*. Second edition. USA: International Educational and Professional Publisher. 171 s. ISBN 0-8039-5662-2.

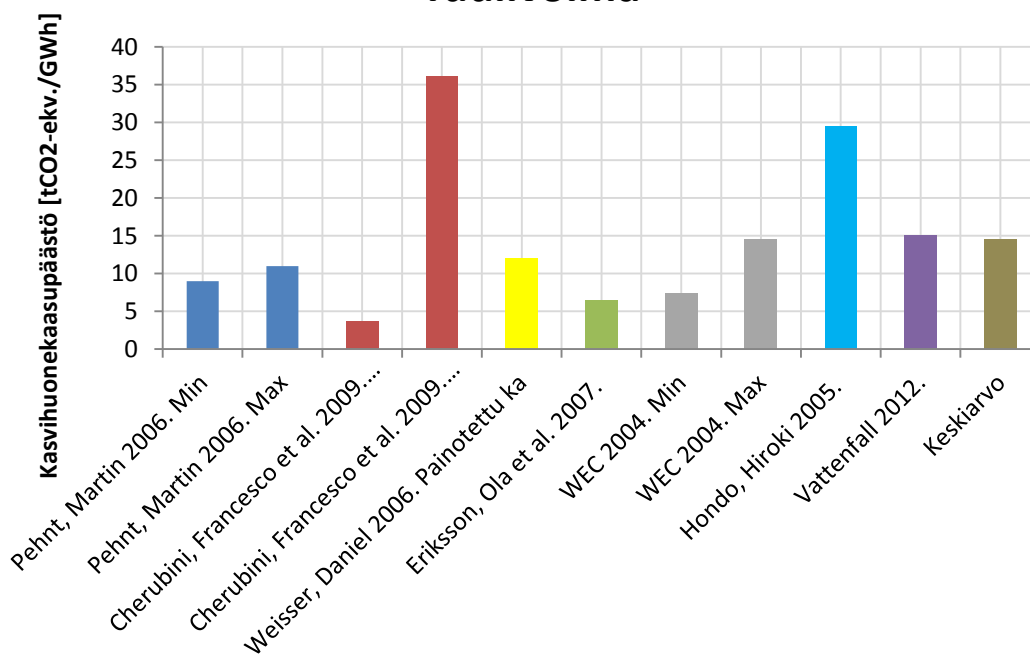
Zhang, Qi; Tezuka, Tetsuo; Ishira, Keiichi & Mclellan, Benjamin. 2012. Integration of PV power into future low-carbon smart electricity systems with EV and HP in Kansai Area, Japan. *Renewable Energy* 2012: 44. 99–108 s.

## Sähköntuotannon energiamuotojen elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt kirjallisuuden perusteella

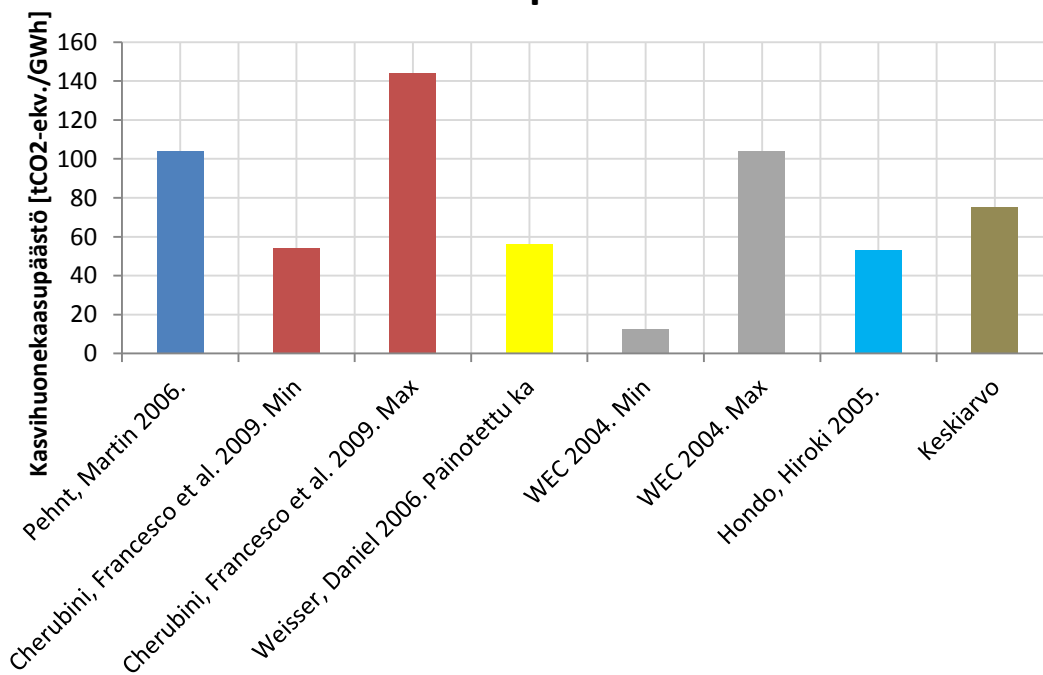
### Vesivoima



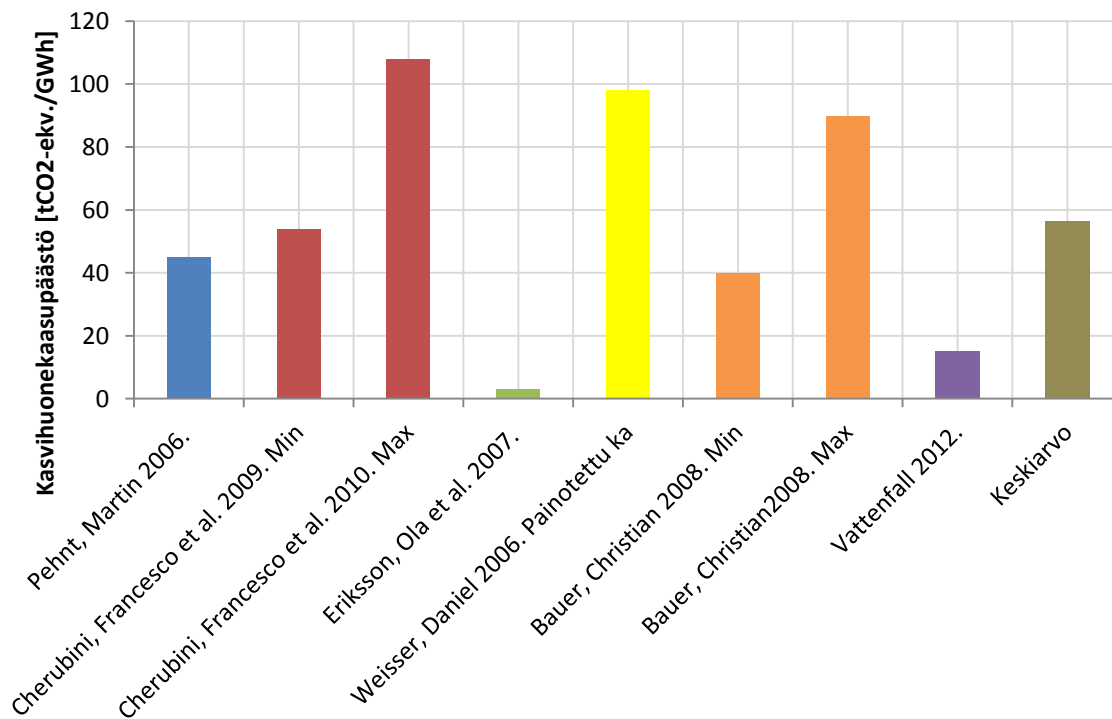
### Tuulivoima



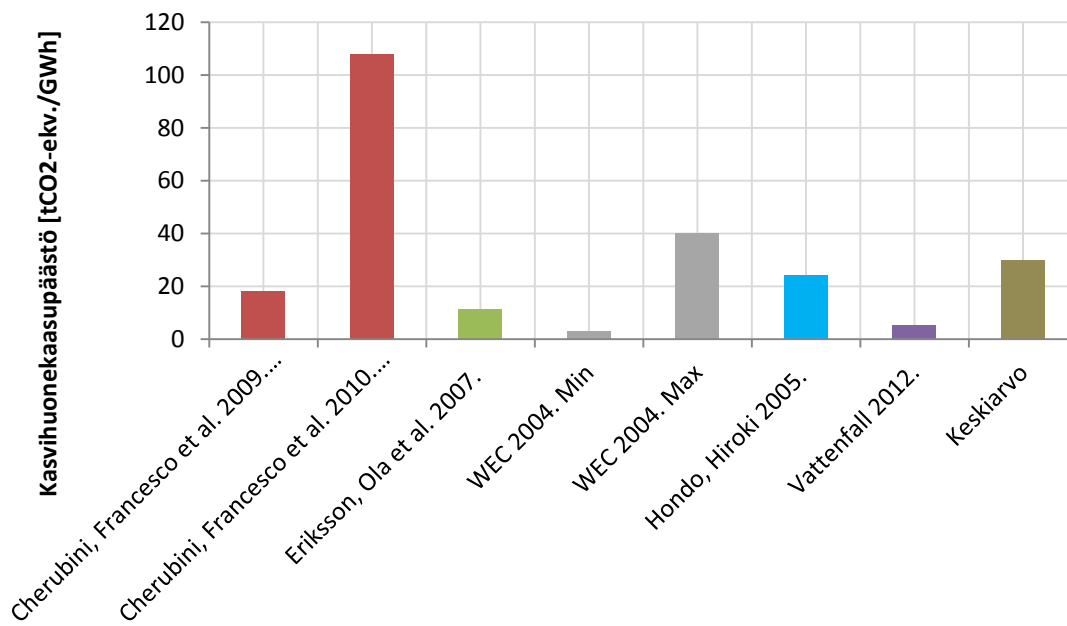
## Aurinkopaneelit



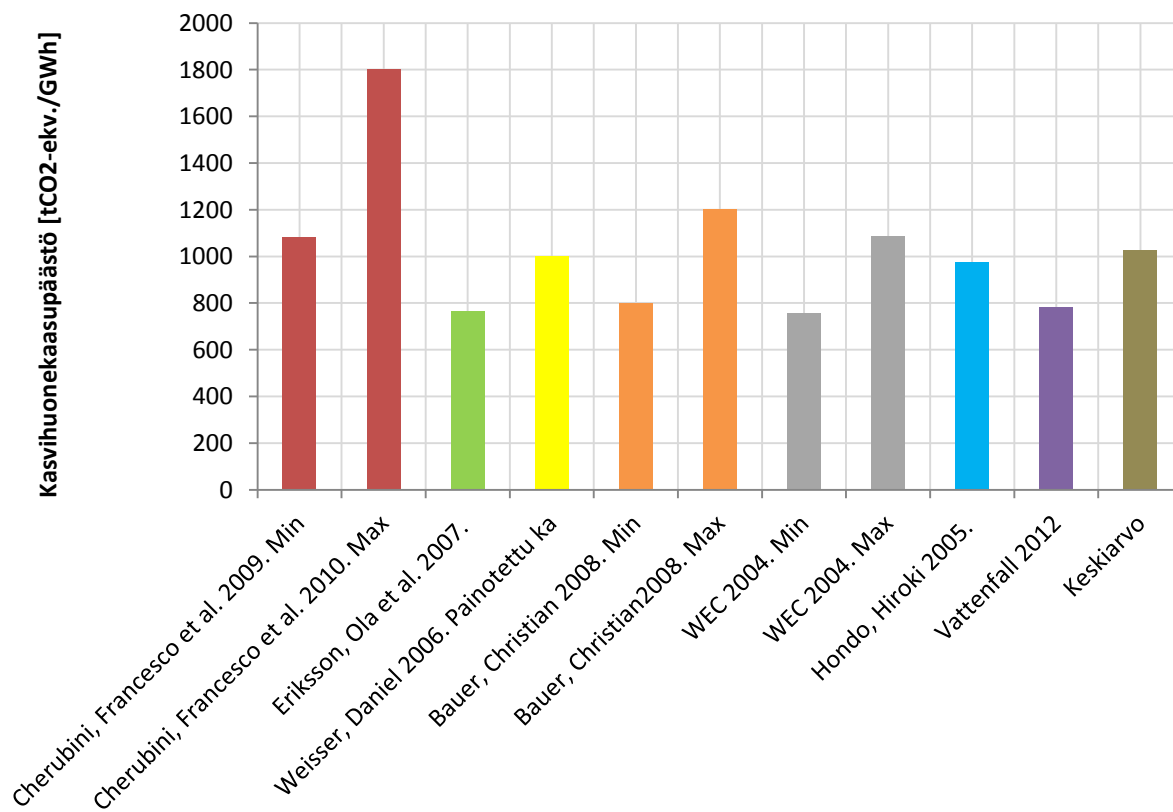
## Puupolttoaine



## Ydinvoima

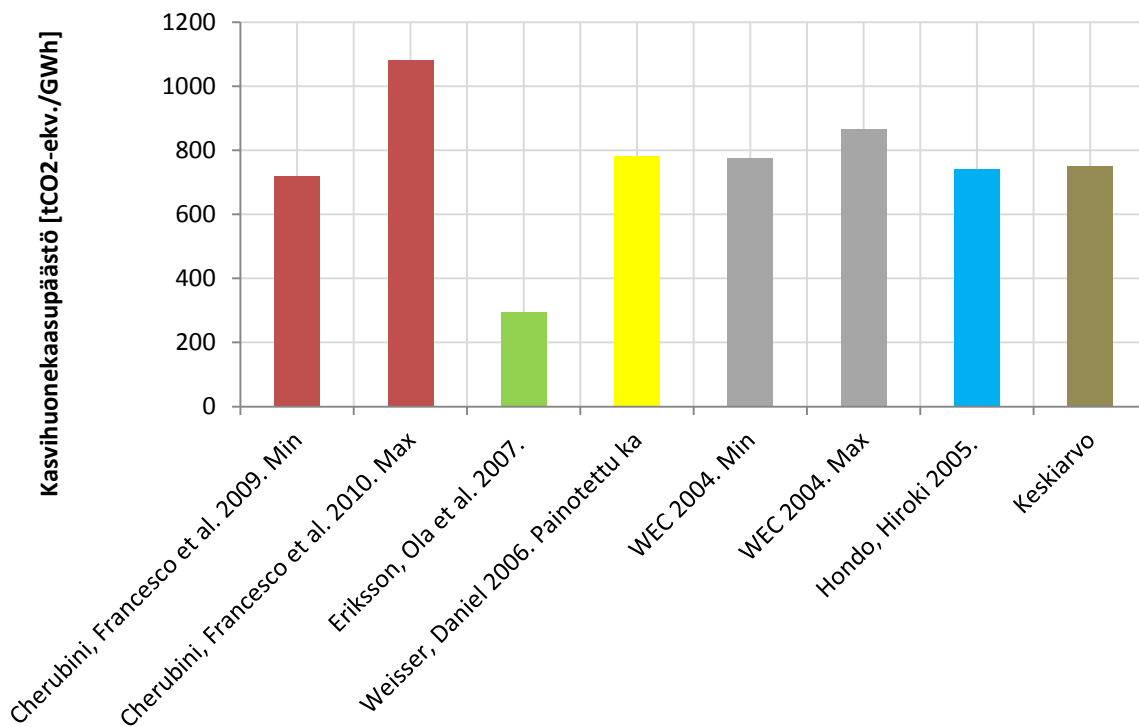


## Kivihiili

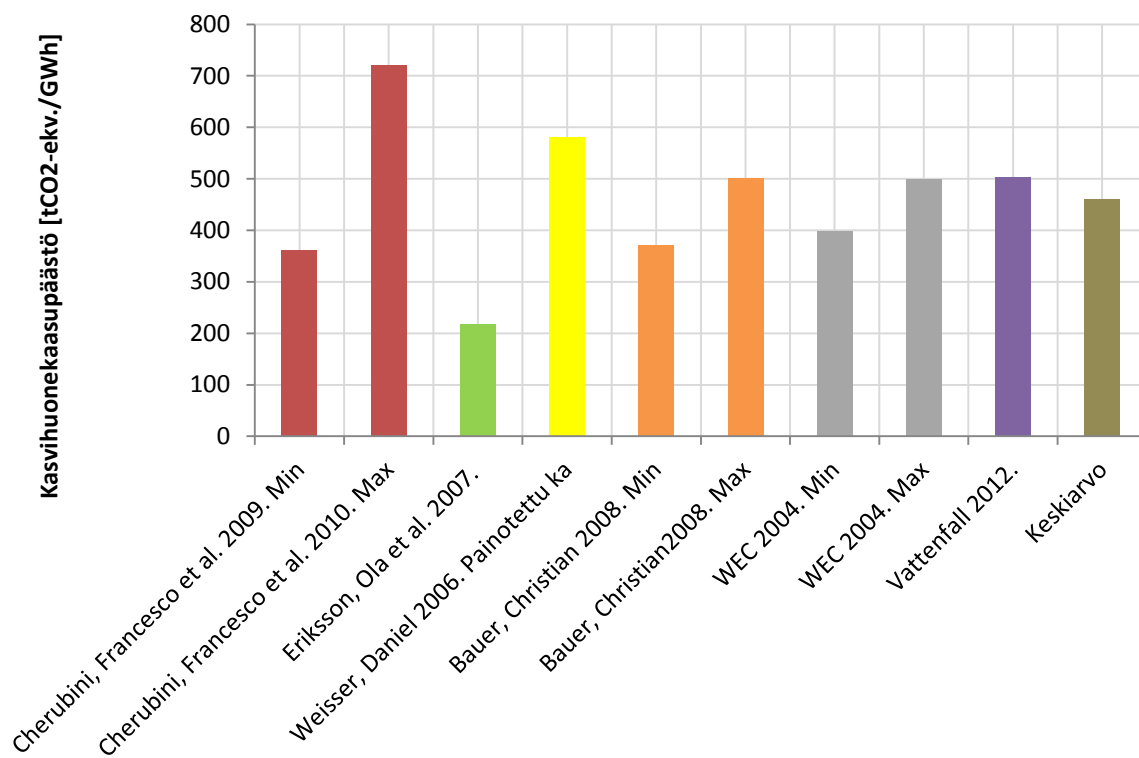




## Raskas polttoöljy



## Maakaasu



## Sähkötuotannon keskiarvoisen kasvihuonekaasupäästökertoimen laskenta

### Sähkötuotannon päästöt

[lähde: kirjallisuus katsaus]

### Suomen sähkötuotannon jakautuminen [lähde: Tilastokeskuksen Suomen

energiantuotannon jakautumisen tilastot vuosilta 2008–2012]

Polttoaineet/ tekniikat	Kasvihuonekaasu- päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh]	Sähkö 2012 [%]	Päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh]	Sähkö 2011 [%]	Päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh]	Sähkö 2010 [%]	Päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh ]	Sähkö 2009 [%]	Päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh ]	Sähkö 2008 [%]	Päästö [t <sub>CO2</sub> - ekv./GWh]
Vesivoima	10	0,25	2,4	0,17	1,7	0,17	1,7	0,18	1,8	0,23	2,2
Tuulivoima	14	0,01	0,1	0,01	0,1	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Aurinkosähkö	75	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Puupolttoaine	57	0,15	8,4	0,14	7,9	0,13	7,4	0,11	6,2	0,13	7,4
Ydinvoima	30	0,33	9,8	0,32	9,6	0,28	8,4	0,33	9,9	0,3	9,0
Kivihiili	1 024	0,10	104,5	0,13	133,1	0,18	184,3	0,16	163,9	0,11	112,7
Öljy	751	0,01	3,8	0,01	7,5	0,01	7,5	0,01	7,5	0,01	7,5
Maakaasu	461	0,09	42,9	0,13	59,9	0,14	64,5	0,14	64,5	0,15	69,1
Turve	516	0,06	32,0	0,07	36,1	0,08	41,3	0,06	31,0	0,06	31,0
		0,99	204	0,98	256	0,99	315	0,99	285	0,99	239
		<b>Keski- arvo:</b>	<b>260</b>		<b>t<sub>CO2</sub>-ekv./GWh</b>						

**Lämmitystarveluvut Tampereella 1971-2000**

<b>Lämmitystarveluvut 1971–2000 Tampere</b>	<b>Tammikuu</b>	<b>Helmikuu</b>	<b>Maaliskuu</b>	<b>Huhtikuu</b>	
	734	681	614	411	
	16,30 %	15,13 %	13,64 %	9,13 %	
	<b>Toukokuu</b>	<b>Kesäkuu</b>	<b>Heinäkuu</b>	<b>Elokuu</b>	
	186	29	6	39	
	4,13 %	0,64 %	0,13 %	0,87 %	
	<b>Syyskuu</b>	<b>Lokakuu</b>	<b>Marraskuu</b>	<b>Joulukuu</b>	<b>Yhteensä</b>
	211	382	537	672	4502
	4,69 %	8,49 %	11,93 %	14,93 %	100 %