

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

*Maija Leino*

**SÄHKÖ- JA LÄMPÖENERGIAN  
TUOTANTOMENETELMIEN YMPÄRISTÖLLISEN  
KILPAILUKYVYN MÄÄRITTÄMINEN ALUEELLISTA  
ENERGIAJÄRJESTELMÄÄ SUUNNITELTAESSA**

Työn tarkastajat:

Professori Risto Soukka  
Professori Jero Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Maija Leino

### **Sähkö- ja lämpöenergian tuotantomenetelmien ympäristöllisen kilpailukyvyn määrittäminen alueellista energiajärjestelmää suunniteltaessa**

Diplomityö

2014

124 sivua, 23 taulukkoa, 28 kuvaa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Professori Risto Soukka  
Professori Jero Ahola

Hakusanat: Sähköntuotanto, Lämmöntuotanto, Elinkaariarviointi, Ympäristövaikutukset, Nettoenergia

Keywords: Electricity production, Heat production, Life Cycle Assessment, Environmental impacts, Net energy

Työssä tarkasteltiin sähkö- ja lämpöenergian tuotantomenetelmien ympäristöllistä kilpailukykyä osana yhdyskunnan energiajärjestelmää. Sähkö- lämpöenergian tuotantomenetelmiä vertailtiin keskenään aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen perusteella. Tarkastelu toteutettiin elinkaariarviointimenetelmällä. Työssä mallinnettiin pääasiassa uusiutuviin energialähteisiin perustuvia menetelmiä yhdyskunnan vuotuisen sähkö- ja lämpöenergiatarpeen täyttämiseksi. Elinkaariarviointimallin avulla vertailtiin keskenään aurinko- ja tuulisähkötalotteista ja CHP-painotteista energiajärjestelmää. Lisäksi työssä arvioitiin aurinko- ja tuulisähköntuotantoa sekä CHP-tuotantoa nettoenergianäkökulmasta.

Työn tulosten pohjalta voidaan olettaa, että kokonaisvaltaisesti paras energianhankintavaihtoehto on usean eri sähkö- ja lämpöenergiantuotantomenetelmän yhdistelmä. Alhainen päästötaaso tietyssä kategoriassa on yhdentekevää, jos energiaa ei ole saatavissa silloin, kun sitä tarvitaan. Lisäksi on tärkeää huomata, että uusiutuvien energialähteiden hyödynnettävyys riippuu vahvasti alueellisista erityispiirteistä, kuten aurinko- ja tuuliolosuhteista. Tästä johtuen kestävä energiajärjestelmän suunnittelussa alueellisten ominaisuuksien huomiointi on tärkeää. Mikä tietyllä alueella osoittautuu parhaimmaksi ratkaisuksi, ei välttämättä ole sitä toisenlaisessa ympäristössä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Environmental Technology

Maija Leino

### **Environmental competitiveness evaluation of electricity and heat production methods in regional energy system planning**

Master's thesis

2014

124 pages, 23 charts, 28 pictures and 6 appendices

Examiner: Professor Risto Soukka  
Professor Jero Ahola

Keywords: Electricity production, Heat production, Life Cycle Assessment, Environmental impacts, Net Energy

The object of the thesis was to evaluate the environmental competitiveness of electricity and heat production methods in regional energy system planning. Electricity and heat production methods were compared based on their greenhouse gas emissions. The method used was life cycle assessment. The modelled methods for electricity and heat production were mainly based on renewable energy. The life cycle model was used to compare solar and wind electricity based scenario to scenario with combined heat and power (CHP) production from forest biomass. Also the net energy of the solar, wind and CHP production was evaluated.

This research concludes that the optimum energy system is often a combination of different electricity and heat production methods. Low emission level in some specific category is irrelevant if the energy supply system is not reliable. It is also important to notice that availability of renewable energy sources is extremely dependent on the location. Due to this when planning regional energy system it is important to take into account the regional characteristic.

## **ALKUSANAT**

Idea tämän diplomityön toteuttamiseksi on saanut alkunsa LUT Energian sähkötekniikan osastolta. Haluan kiittää kaikkia osallisia erittäin mielenkiintoisesta aiheesta ja työn mahdollistamisesta.

Kiitos Risto, Jero ja Simo työni ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Lämmin kiitos avusta myös monelle muulle LUT Energian ja erityisesti ympäristötekniikan henkilökunnan jäsenelle, joilta olen saanut neuvoja ja ohjausta diplomityöprojektin aikana.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja muita läheisiäni, erityisesti Mikkoa, tämän prosessin aikana saadusta valtavasta tuesta ja kannustuksesta.

Vantaalla 20.2.2014

Maija Leino

## SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO .....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Työn tavoitteet .....	10
1.2 Rakenne ja toteutus .....	12
2 NETTOENERGIATARKASTELU.....	15
2.1 Käytössä olevat laskentaperiaatteet.....	16
2.2 Fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien energiantuotantomuotojen nettoenergioita.....	21
3 YHDYSKUNNAN UUSIUTUVAAN ENERGIAAN PERUSTUVA ENERGIAJÄRJESTELMÄ.....	25
3.1 Yhdyskunnan lämmön- ja sähköntarve .....	26
3.2 Energiantuotanto .....	28
3.2.1 Aurinkoenergia.....	29
3.2.2 Tuulienergia .....	32
3.2.3 Bioenergia .....	34
3.2.4 Lämpöpumput .....	36
3.3 Energiansiirto ja -jakelu .....	37
4 UUSIUTUVIIN ENERGIANTUOTANTOMUOTOIHIN LIITETYT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET .....	39
4.1 Aurinkoenergian ympäristövaikutukset .....	39
4.2 Tuulienergian ympäristövaikutukset.....	41
4.3 Metsäenergian ympäristövaikutukset.....	43
4.3.1 Metsäpolttoaineiden tuotantoketjun ympäristövaikutukset .....	44
4.3.2 Metsäbiomassojen polton ympäristövaikutukset.....	44
4.3.3 Metsäbiomassojen energiahyötykäytön vaikutus metsän hiilivarastoille	45
4.4 Energian siirron ympäristövaikutukset.....	47
4.5 Uusiutuva energia ja materiaalitalous .....	48
5 ELINKAARIARVIOINTI.....	50
5.1 Elinkaariarvioinnin vaiheet.....	51
5.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely.....	52
5.1.2 Inventaarioanalyysi.....	53
5.1.3 Vaikutusarvointi .....	54
5.1.4 Tulosten tulkinta .....	56
5.2 Allokointimenettelyt.....	57
5.3 Elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen kartoitus .....	58
6 ELINKAARIARVIOINTIMALLI .....	60
6.1 Tavoitteet ja soveltamisala .....	60
6.1.1 Toiminnallinen yksikkö .....	60
6.1.2 Tarkastelun rajaukset .....	61
6.1.3 Tarkastelun toteuttaminen.....	62
6.2 Tuotejärjestelmän mitoittaminen .....	64
6.2.1 Tuulivoimantuotanto.....	65
6.2.2 CHP-laitos .....	66
6.2.3 Yhdyskunta .....	66

6.2.4	Aurinkosähköjärjestelmät .....	71
6.2.5	Aurinko- ja tuulivoimapainotteisen skenaarion lämmöntuotto.....	72
6.3	Elinkaariarviointimallin rakentaminen .....	73
6.3.1	Aurinkosähköntuotanto .....	73
6.3.2	Tuulisähköntuotanto .....	75
6.3.3	CHP-laitos.....	78
6.3.4	Polttoainehuolto .....	80
6.3.5	Maalämpöjärjestelmä .....	82
6.3.6	Lämpölaitos.....	84
6.3.7	Sähkön- ja lämmöntarve .....	84
6.3.8	Sähköverkko .....	85
6.3.9	Lämpöverkko .....	85
6.3.10	Energiantarpeen tasapainotus ja ylijäämäsähkön hyvittäminen.....	87
6.4	Nettoenergiatarkastelu.....	88
6.4.1	Aurinkosähkön EROI-arvo .....	89
6.4.2	Tuulisähkön EROI-arvo .....	89
6.4.3	CHP-tuotannon EROI-arvo.....	90
6.5	Herkkyystarkastelu .....	92
6.5.1	Lämmöntuotantotavan vaikutus syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin aurinko- ja tuulipainotteisessa skenaariossa .....	92
6.5.2	Aurinkopaneelitekniikan valinnan vaikutus syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin .....	94
7	TULOKSET .....	97
7.1	Energiajärjestelmien keskinäinen kilpailukyky yhdiskunnan energialähteenä kasvihuonekaasujen näkökulmasta .....	97
7.1.1	Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ilman maaperän hiilitaseen muutoksen huomiointia .....	97
7.1.2	Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt, kun muutokset maaperän hiilitaseessa huomioidaan .....	100
7.1.3	Ylijäämäsähkön hyvityskertoimen vaikutus energiajärjestelmien keskinäiseen kilpailukykyyn.....	102
7.2	Energiantuotantomuotojen nettoenergiat .....	105
7.3	Tulosten tulkinnan rajoitukset .....	106
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....	107
	LÄHTEET .....	112
	LIITTEET	

Liite 1. Yhdiskunnan rakennuskannan tehontarpeen ja pinta-alan määrittäminen

Liite 2. Lämpö- ja sähköenergiantarpeen kuukausittainen jakautuminen

Liite 3. Energiajärjestelmän prosessikaavio

Liite 4. Aurinkosähköjärjestelmä

Liite 5. Kaukolämpöverkon rakennusvaiheen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta

Liite 6. Ylijäämäsähkön hyvityspäästökertoimen herkkyystarkastelu

## LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

### Lyhenteet

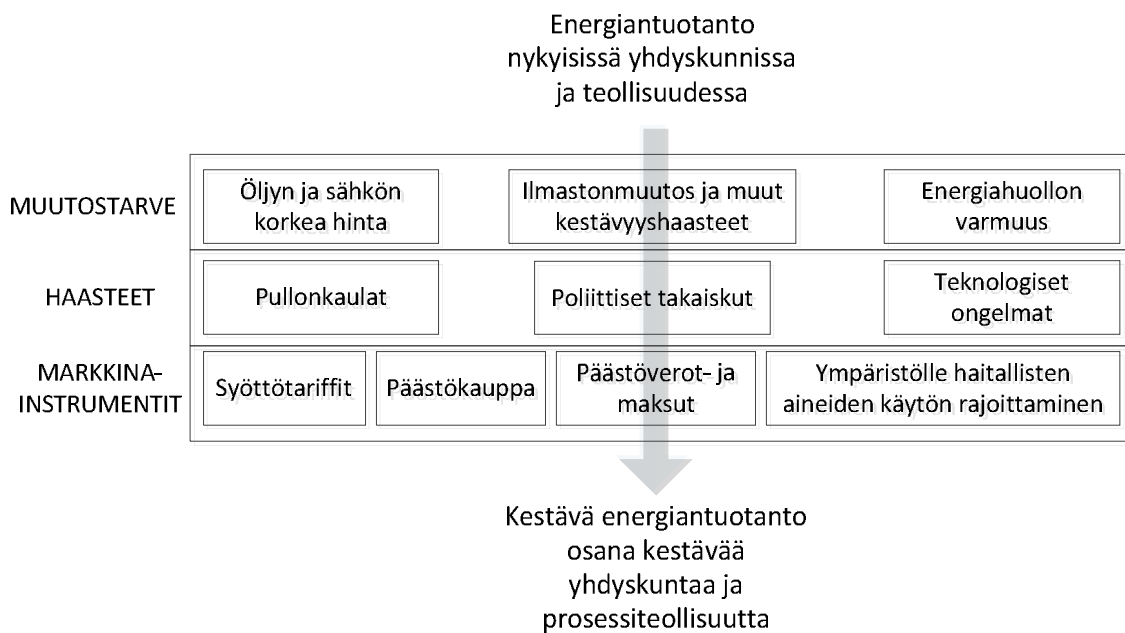
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto
EPBT	Energy Pay Back Time, Energian takaisinmaksuaika
EROI	Energy Return on Investment
GWP	Global Warming Potential
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
RakMk	Suomen rakennusmääräyskokoelma
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WRI	World Resources Institute

### Yhdisteet

CH <sub>4</sub>	metaani
CFC	kloorifluorihilivedyt
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
HFC	fluorihilivety-yhdisteet
NH <sub>3</sub>	ammoniakki
N <sub>2</sub> O	typpioksiduuli
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
O <sub>3</sub>	otsoni
PCF	perfluoratut yhdisteet
SO <sub>2</sub>	rikkidioksidi
SF <sub>6</sub>	rikkiheksafluoridi
VOC	haihtuvat hiilivedyt

# 1 JOHDANTO

Nykyinen energiajärjestelmä on kehittynyt vuosikymmenten aikana. Energiajärjestelmän tarkoitus on ollut sähkön, kaasun, lämmön ja liikennepolttoaineiden tehokas ja kustannus-  
tehokas jakelu ja tarvittavien energiapalveluiden tarjoaminen loppukäyttäjille. Uusiutuvien  
energiälähteiden laajamittainen hyödyntäminen tarkoittaa suuria muutoksia nykyiselle  
energiajärjestelmälle. Edellytysten luominen kestäväälle energiantuotannolle, energiasekto-  
reiden keskinäiselle yhteistyölle ja muutosten suunnitelmalliselle hallinnalle vaatii pitkän  
tähtäimen suunnittelua ja systeemitason tarkastelua. Ajan myötä toimitapa johtaa par-  
haimmillaan yhtenäiseen ja kestäväan energiajärjestelmään, joka tuottaa sähköä, lämpöä,  
jäähdytystä ja kuljetuspalveluita ilman, että tuotanto jakautuu sektoreihin. (Sims et al.  
2011, 619.) Tämän tavoitteen saavuttaminen edellyttää muun muassa kuvan 1 mukaisesti  
nykyisen toimintaympäristön tuntemista, muutoksen syiden ja haasteiden tunnistamista  
sekä markkina-instrumenttien hyödyntämistä (Soukka 2013).



**Kuva 1.** Kehitysreitti nykyisestä energiajärjestelmästä tavoitetilana pidettävään kestäväan energianjärjestelmään. (Mukaiillen Soukka 2013.)

Energiajärjestelmän muutostarve on seurausta monesta eri tekijästä. Suurin osa suorasti ihmistoiminnasta aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä on seurausta fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Globaalin ilmastonmuutoksen lisäksi energiantuotannosta aiheutuu nykyisellään monia muita kestävyysaasteita, kuten vesivarojen riittävyysaaste, polttoproses-



seista vapautuvat haitalliset päästöt, lisääntyvä maa-alan tarve ja muutokset nykyisessä maankäytössä. (IPCC 2012, 7–20.)

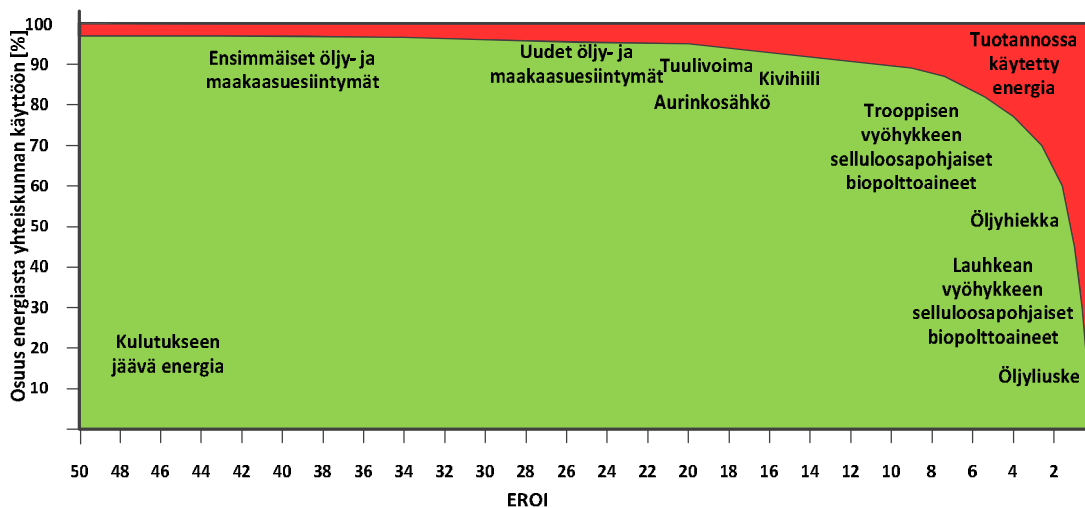
Energia ja vesi ovat tiukasti kytköksissä toisiinsa. Puhtaan veden tuotanto kuluttaa energiaa ja toisaalta energian tuotanto kuluttaa paljon vettä. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) on arvioinut energiantuotannon makean veden tarpeen kaksinkertaistuvan vuoteen 2035 mennessä. Veden kulutuksen nousun arvioidaan olevan seurausta muun muassa kivihii-lienergian sekä biopolttoaineiden, öljyn ja maakaasun tuotannon kasvusta. (Lavelle & Grosse 2013.) Vettä kuluttavia ja osittain saastuttavia vaiheita energiantuotantoketjussa ovat polttoaineiden hankinta, jalostus ja kuljetukset, energian tuotanto ja energiantuotannon päästöjen hallinta (Union of Concerned Scientists 2013).

Polttamisen yhteydessä syntyvät rikkidioksidi ja typen oksidit aiheuttavat maaperän ja vesistöjen happamoitumista. Maa-alasta on tullut rajallinen resurssi maa- ja metsätalouden, infrastruktuurin ja luonnon ekosysteemien keskinäisen kilpailun myötä. Maailman asukasluvun jatkuvan kasvun takia tuottavasta maa-alasta on tullut rajoittava tekijä biomassan tuotannossa. Maata tarvitaan ruuan-, rehun-, kuitujen ja polttoaineidentuotannon lisäksi monien ekosysteemipalveluiden, kuten puhtaan ilman ja veden, tuottamiseen (Ympäristöministeriö 2011a).

Fossiilisten polttoainevarojen ehtyessä ja jäljellä olevien varojen hyödyntämisen vaikeutuksessa energian, erityisesti öljyn ja sähkön, hinnan nousu sekä energiahuollon varmuuden turvaaminen ovat nousseet merkittäviksi ajureiksi nykyisen energiajärjestelmän uudistamiselle kestävyysaasteiden rinnalla. On esitetty arvioita, että nykyiset muutokset maailmantaloudessa ovat suoraan kytköksissä energiantuotantoketjun tuottavuuden heikentymiseen (Murphy & Hall 2010).

Energialähteen hyvyttä kuvaamaan on kehitetty yksikötön suhdeluku EROI (Energy Return on Investment), joka kuvaa tuotetun energian suhdetta energialähteen jalostusketjun energiankulutukseen. Polttoaineiden heikentyvän EROI-arvon vaikutusta voidaan havainnollistaa esittämällä energialähteen nettoenergia osuutena alkuperäisestä energiasisällöstä, joka jää yhteiskunnan hyödynnettäväksi. Kuvassa 2 on esitetty x-akselilla energialähteen

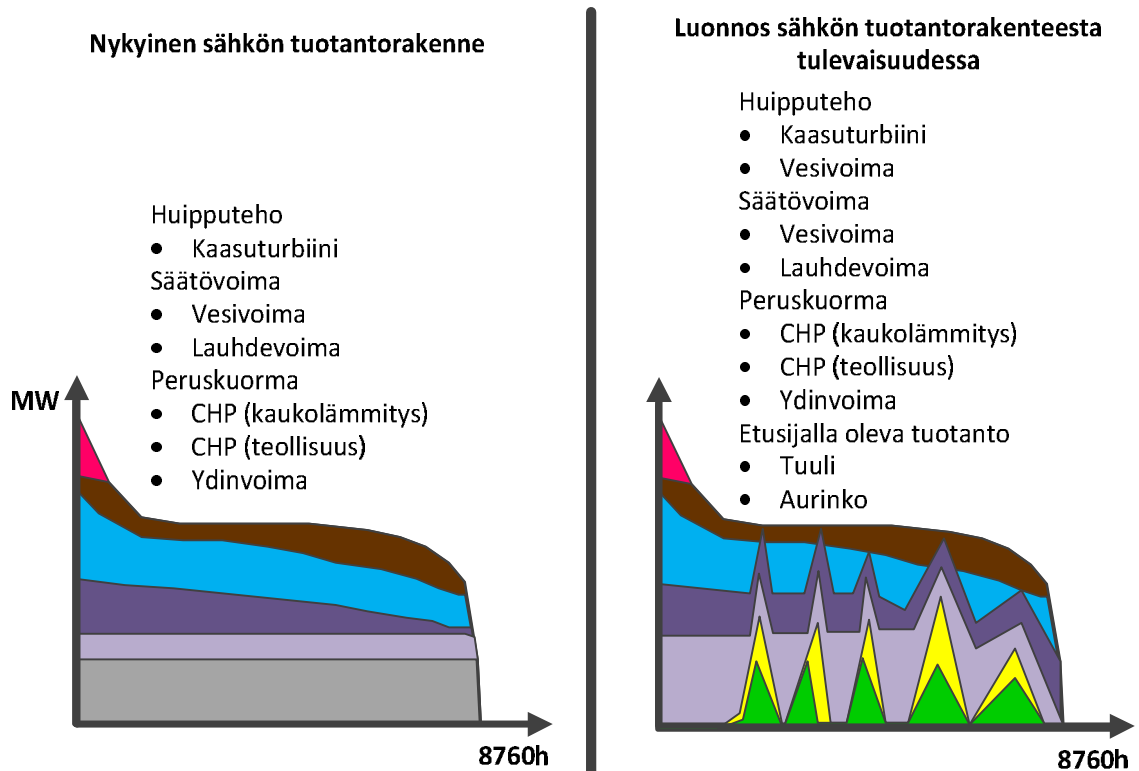
EROI-arvo ja y-akselilla yhteiskunnan käyttöön jäävä energiamäärä prosentteina. Käytet-  
täessä nettoenergiaa eri energiamuotojen vertailuun tulee ottaa huomioon, että esimerkiksi  
öljyn ja hiilen sekä sähkön ja öljyn EROI-arvot eivät välttämättä ole suoraan vertailukel-  
poisia keskenään. Kuvaajaa tarkastelemalla nähdään, että kun polttoaineen EROI-arvo las-  
kee arvosta 50 arvoon 40, on vaikutus yhteiskunnan käyttöön jäävän energian osuudessa  
paljon pienempi, kuin EROI-arvon laskiessa arvosta 5 arvoon 1. Tätä jyrkkää pudotusta  
nettoenergia-arvoissa kutsutaan Nettoenergia-jyrkänteeksi (Murphy & Hall 2010.) Mitä  
enemmän yhteiskunnan energiankäyttö keskittyy lisäenergian tuottamiseen, sitä vähemmän  
energiaa on muiden sektoreiden käytettävissä (Heinberg 2009, 24).



**Kuva 2.** Nettoenergia käyrä. (Lähde mukailten Murphy & Hall 2010.)

## 1.1 Työn tavoitteet

Sähkön tuotanto on perinteisesti koostunut kulutuksen mukaan säädettävissä olevaan kes-  
kitettyyn tuotantoon. Uusiutuvan energiantuotannon osuuden kasvattaminen muun muassa  
aurinko- ja tuulienergiantuotantoa lisäämällä tarkoittaa, että sellaisen sähköntuotannon  
osuus, jota ei voi säätää kulutuksen mukaan, tulee lisääntymään. Kuvassa 3 on esitetty yksi  
mahdollinen kehityssuunta sähkön tuotantorakenteessa. Kuvassa esitetystä luonnoksesta  
sähköntuotanto tulee tulevaisuudessa perustumaan sekä keskitettyyn että hajautettuun tuo-  
tantoon ja tuuli- ja aurinkosähköntuotanto ovat etusijalla olevaa tuotantoa. (Keronen 2013,  
48.)



**Kuva 3.** Nykyinen sähkön tuotantorakenne ja luonnos sähkön tuotantorakenteesta tulevaisuudessa. (Keronen 2013, 48.)

Työn tavoite on arvioida uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiantuotantomuotojen keskinäistä kilpailukykyä osana yhdiskunnan energiajärjestelmää. Tarkastelussa huomioidaan energiantuotannon lisäksi myös energian siirto. Tarkasteluissa keskitytään sähkön- ja lämmöntuotantoon liikennepolttoaineiden jäädessä hyvin vähälle huomiolle. Energiantuotantotapoja vertaillaan keskenään aiheutuvien ympäristövaikutusten perusteella.

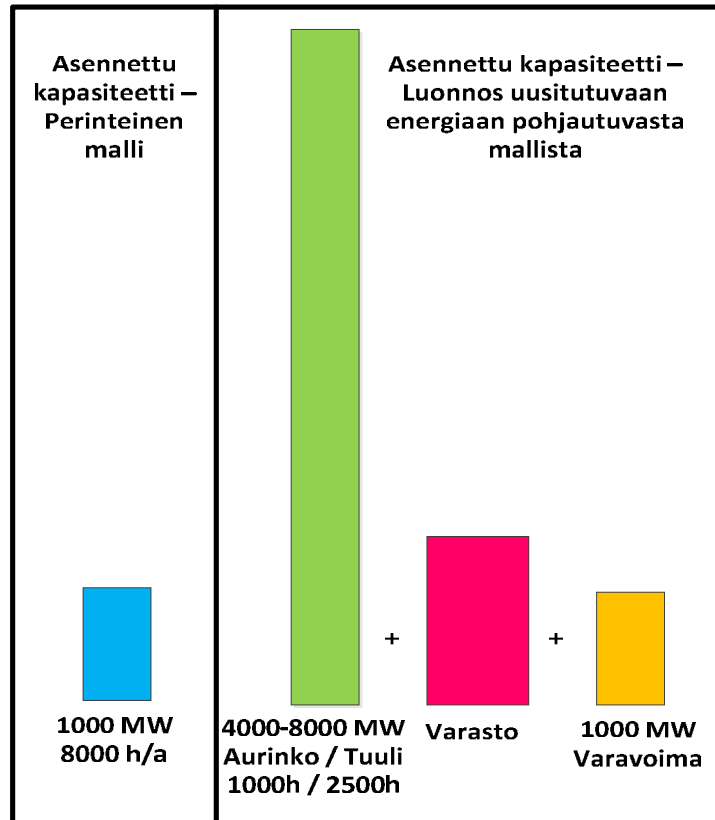
Tarkastelun pohjalta tunnistetaan tekijöitä, jotka vaikuttavat energiantuotantoketjujen keskinäiseen paremmuusjärjestykseen tarkasteluun valittujen näkökohtien kannalta. Lisäksi pohditaan ajattelumallin hyödyllisyyttä ja mahdollisuutta skaalata sitä suurempaan mittakaavaan. Työssä pyritään myös selvittämään eri energiantuotantotapojen nettoenergiat ja minkälainen suhde sillä on aiheutuviin ympäristövaikutuksiin.

## 1.2 Rakenne ja toteutus

Työn teoriaosuudessa tutustutaan ensin nettoenergia-ajatteluun, käytössä oleviin laskenta-periaatteisiin sekä fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvan energian nettoenergia-arvioihin. Tämän jälkeen käsitellään energiajärjestelmän osia, yhdyskunnan energian- ja tehontarpeen muodostumista sekä energiantuotantoa metsäbiomassoista, auringosta ja tuulesta. Työssä kartoitetaan myös mainittuihin energiantuotantotapoihin liitettyjä ympäristövaikutuksia sekä sähkönsiirron ympäristövaikutuksia.

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiantuotantomuotojen keskinäistä kilpailukykyä yhdyskuntien energialähteenä arvioidaan elinkaariarviointimenetelmällä, jonka lisäksi energiantuotantomuodoille suoritetaan nettoenergiatarkastelu. Elinkaariarvioinnissa tarkasteltava ympäristövaikutusluokka on ilmastonmuutos. Ensin tutustutaan elinkaariarvioinnin teoriaan, jonka jälkeen työn empiriaosuudessa laaditaan uusiutuvaan energiaan perustuvan energiajärjestelmän elinkaarimalli.

Yhdyskunnan sähkö- ja lämpöenergian tarvetta tarkastellaan kuukausitasolla, koska yksityiskohtaisempi tarkastelu ei ole mahdollista työn laajuuden puitteissa. Kuukausitason tarkastelulla saadaan kuitenkin hyödyllistä tietoa eri energiantuotantotavoista yksikkötasolla. Kuvan 4 mukaisesti uusiutuvan energian tuotannon lisääminen tarkoittaa suuremman sähköntuotantokapasiteetin rakentamista, kuin perinteinen sähkön tuotantorakenne on tarvinnut. Suurempi kapasiteettitarve johtuu suuremmasta sähköntuotannon kausittaisesta vaihtelusta ja vaikeasta säädettävyydestä. (Keronen 2013, 46–48.) Tässä työssä keskitytään kuvassa esitetyn vihreän palkin kuvaavan tuotannon keskinäisen kilpailukyvyn arviointiin. Energian varastointia ei tarkastella tämän työn puitteissa.



**Kuva 4.** Perinteinen malli ja uusiutuvaan energiaan pohjautuva sähköntuotantorakennemalli. (Keronen 2013, 48.)

Työssä luodaan erilaisia pääasiassa aurinko-, tuuli tai metsäbiomassaenergiaan perustuvia energiantuotantoratkaisuja suomalaiselle yhdyskunnalle. Mallinnetut tekniikat on valittu tarkoituksenmukaisuuden, yleisyyden ja realistisuuden perusteella. Lisäksi energiajärjestelmien laadinnassa tukeudutaan olemassa olevaan nettoenergiatietoon muun muassa elinmallinnettavan tuulivoimantuotantokapasiteetin kokoluokan valinnassa.

Aurinko- ja tuulisähkön tuotantoa tarkastellaan yhdessä molempien tuotantomuotojen sähköntuotantopotentiaalin suuren jaksottaisen vaihtelun vuoksi. Sähköntuotanto metsäbiomassoista on Suomessa pääasiassa sähkön- ja lämmön yhteistuotantoa (CHP). Jotta aurinko- ja tuulisähkön tuotantoa voidaan vertailla sähköntuotantoon metsäbiomassoista, suoritetaan elinkaariarvioinnissa tuotejärjestelmän laajennus lämmöntuotannon osilta. Tämän takia aurinko- ja tuulisähkön tuotannon rinnalle mallinnetaan myös lämmöntuotantoa ja työssä käsitellään yhdyskunnan lämmöntarpeen muodostumista ja CHP-laitoksen mitoittamista.

Elinkaariarviointi toteutetaan GaBi 5 –elinkaariarviointiohjelmistolla. Tarvittavat yksikköprosessit luodaan pääasiassa itse kirjallisuudesta hankittuihin lähtötietoihin pohjautuen. Työn puitteissa ei suoriteta mittauksia.

## 2 NETTOENERGIATARKASTELU

Energiajärjestelmää uudistettaessa päätöksenteon tueksi tarvitaan tietoa. Yksi mahdollinen kestävyuden mittari on energiatuotannosta saatava nettoenergia. Energiantuotantoprosessin on tuotettava keskimäärin enemmän energiaa, kuin sen rakentamiseen ja ylläpitämiseen kuluu. Nettoenergia on jäljelle jäävä erotus, kun energiantuotantoketjun tuotoksista vähennetään panokset. Energiantuotannossa energiaa kuluu muun muassa raaka-aineiden louhintaan, kuljetukseen, jalostukseen sekä tarvittavien laitteistojen ja infrastruktuurin, kuten aurinkopaneelien, tuuliturbiinien tai ydinreaktoreiden rakentamiseen. Lisäksi energiaa kuluu henkilöstön koulutukseen, tuotekehitykseen, tutkimukseen, myyntiin ja markkinointiin. Näiden energiantuotantoon käytettyjen panosten tarkka arviointi on haastavaa. (Heinberg 2009, 23.)

Nettoenergia ajattelumallina on ollut osa yhteiskuntatieteellistä ja taloudellisesta kirjallisuutta jo jonkin aikaa (Gupta & Hall 2011, 28). Yhteiskunnan energianmuuntoprosessien kuluttaessa vain vähän energiaa suhteessa yhteiskunnan käytettäväksi jäävään energiamäärään, suurin osa tästä tuotetusta energiasta voidaan käyttää muuhun, kuin lisäenergian tuotantoon. Tällöin kaikki yhteiskunnan energiavarat eivät kulu energian tuottamiseen, vaan energiaa on runsaasti energiaa kuluttavan toiminnan kuten ruuantuotannon ja liikenteen ylläpitämiseen. Nyky-yhteiskunta on tottunut tällaiseen tilanteeseen, koska vuosisadan ajan tarjolla on ollut runsaasti halpoja, fossiilisia polttoaineita. Energiantuotannon nettoenergia on pysynyt hyvällä tasolla suurimman osan 1900-lukua. (Heinberg 2009, 24.)

Charles Hallin 1970-luvulla keksimä yksikötön suhdeluku, EROI-arvo, kuvaa tuotetun energian suhdetta sen tuotantoon kuluneeseen energiaan (Gupta & Hall 2011, 28). EROI ilmoitetaan yleensä tuotantona yhtä energiasyötettä kohden, esimerkiksi 10:1 tai 10/1 (Heinberg 2009, 23). Käytössä on myös lyhenne EROEI (Energy Returned on Energy Invested). Tässä työssä käytetään lyhennettä EROI. 1980-luvulla käsite yhdistettiin öljyn ja muiden polttoaineiden hankintaan (Gupta & Hall 2011, 28). Viime aikoina kiinnostus polttoaineiden ja energiantuotantoketjujen EROI-arvoihin on kasvanut huomattavasti fossiilisten polttoaineiden hinnan noustessa. EROI-arvoja on ehdotettu hyödynnettäväksi vaihtoehtoisten energiantuotantomuotojen keskinäisessä vertailussa. (Hall et al. 2009.)

EROI-arvo kertoo, kuinka helppoa käytössä olevien primäärienergiaresurssien hyödyntäminen on energianäkökulmasta. EROI-arvo on siis eräänlainen energioresurssin laadun mittari. EROI-arvo antaa oletusarvon hyödyille, jonka yhteiskunta voi saavuttaa valitsemalla tietyn primäärienergianlähteen hyödyntämistekniikan. Oletusarvo on suhteessa primäärienergianlähteen runsauteen. EROI-arvo suosii systeemejä, jotka tuottavat eniten vastinetta suhteessa energialähteen jalostamisen ja voimalaitoksen rakentamiseen ja käytöstä poistoon liittyvään energiankäyttöön. EROI-arvo ei suoraan kerro kuinka paljon systeemi vaatii energiaa yhtä tuotettua energiayksikköä kohden. Tämän lisäksi EROI-arvo ei erottele uusiutuvia tai uusiutumattomia primäärienergianlähteitä toisistaan. EROI-arvo ei kerro, kuinka suuri osuus energiayksikön tuotantoon kuluneesta energiasta on uusiutumattomista primäärienergianlähteistä. Tämä tarkoittaa sitä, että EROI-arvosta ei käy ilmi, kuinka nopeasti energiantuotantosysteemi kuluttaa loppuun uusiutumattomia primäärienergiaressseja, johon sen tuotanto perustuu. (Raugei et al. 2012, 578.) Nämä rajoitukset huomioon ottaen ei ole suositeltavaa tukeutua ainoastaan EROI-arvoihin pitkän tähtäimen energiapoliittisessa päätöksenteossa.

## **2.1 Käytössä olevat laskentaperiaatteet**

Nettoenergia- ja EROI-laskentamenettelyt eroavat fossiilisten- ja uusiutuvien energiantuotantomuotojen osalta. Metodologian on oltava johdonmukainen laskennan toistettavuuden ja edelleen tieteellisyyden saavuttamiseksi. Joustavuus taas mahdollistaa erilaisten energian hankinta- ja jalostusketjujen vertailun. (Murphy et al. 2011, 9.) EROI-arvojen laskennan kannalta ero primäärienergianlähteen ja sekundäärienergianlähteen välillä on tärkeä. Primäärienergianlähte on luonnossa esiintyvää jalostamatonta energiaa, kuten auringon säteily, fossiiliset polttoaineet ja vesiputoukset. Primäärienergianlähteitä voidaan käyttää edelleen sekundäärienergianlähteen, kuten sähkön, bensiinin tai höyryn valmistamiseen. (Raugei et al. 2012, 576–577.)

Fossiilisista energialähteistä jalostettujen polttoaineiden EROI-arvot lasketaan jalostetun sekundäärienergianlähteen energiasisällön ja valmistukseen kuluneen energian suhteena. (Raugei et al. 2012, 576.)



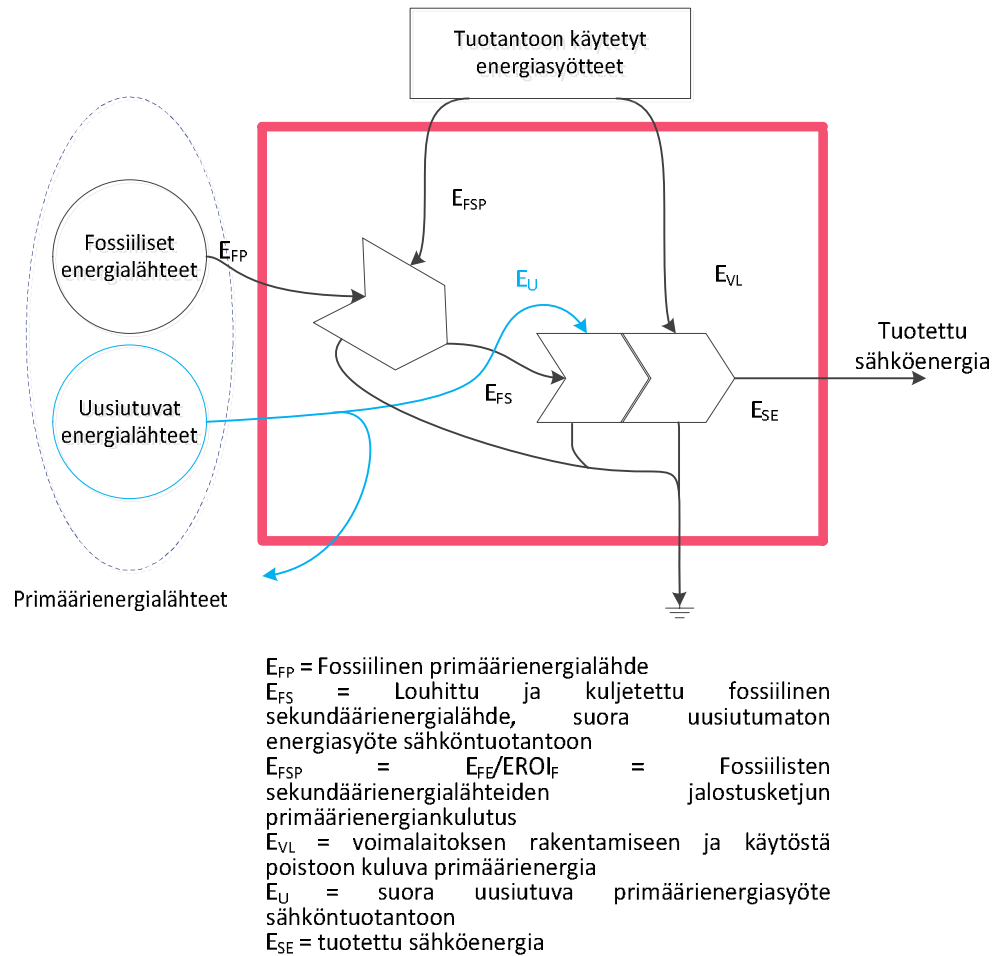
$$EROI_F = \frac{E_{FS}}{E_{FSP}} \quad (1)$$

$EROI_F$  = Fossiilisten polttoaineiden EROI

$E_{FS}$  = Louhittu ja jalostettu fossiilinen sekundäärienergiälähde

$E_{FSP}$  = Fossiilisen sekundäärienergiälähteen jalostusketjun primäärienergiankulutus

EROI-laskenta vaatii selkeän ja yksikäsitteisen määrittelyn laskentaan sisällytettävistä systeemin elinkaarenaikaisista energiasyötteistä. Luokittelu perustuu systeemin paikka- ja ajanjaksorajauksiin. Kun tarkoitus on vertailla erilaisia systeemejä, rajojien yhdenmukaisuus on ensiarvoisen tärkeää. Monista sähköntuotannosta julkaistuista EROI-tutkimuksista puuttuu selkeä systeemin rajojen kuvaus. Tutkimuksissa, joiden rajaukset on raportoitu, yleinen käytäntö on sisällyttää laskentaan energiasyötteinä voimalaitoksen rakentamisen ja käytöstä poiston vaatima energia. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 5, jossa on esitetty EROI-arvojen laskennan rajaus keskitetylle sähköntuotannolle. (Raugei et al. 2012, 577.)



**Kuva 5.** Sähköntuotannon EROI-laskennan rajaukset. (Raugei et al. 2012, 577.)

Laskentaan sisällytetyt energiasyötet lasketaan energiaketjun koko elinkaaren ajalta. Ku-  
vassa 5 esitettyä laskentamenettelyä voidaan käyttää sähköntuotannolle sekä fossiilisista  
että uusiutuvista energialähteistä. Kun EROI-arvo lasketaan fossiilisiin energialähteisiin  
perustuvalla sähköntuotannolla,  $E_{FS}$  on louhittu ja jalostettu sekundäärienergiälähde ja  $E_U$   
on tuuli, joka tarvitaan levittämään polton savukaasut. Laskettaessa EROI-arvo uusiutuval-  
le energialle  $E_U$  on suora uusiutuva primäärienergiasyöte sähköntuotantoon ja  $E_{FS}$  ja  $E_{FSP}$   
saavat arvon nolla.

Yleisesti hyväksytty kaava sähköntuotannon EROI laskentaan on

$$EROI_{\text{sähkö}} = \frac{E_{SE}}{E_{\text{kulutettu}}} = \frac{E_{SE}}{(E_{FSP} + E_{VL})} \quad (2)$$

$EROI_{\text{sähkö}}$  = Sähköntuotannon EROI-arvo

$E_{SE}$  = tuotettu sähköenergia

$E_{\text{kulutettu}}$  = tuotantoon käytetyt energiasyötteen

$E_{FSP} = E_{FS}/EROI_F$  = Fossiilisten energialähteiden jalostusketjun primäärienergiankulutus

$E_{VL}$  = voimalaitoksen rakentamiseen, huoltoon ja käytöstä poistoon kuluva primäärienergia

Fossiilisten sekundäärienergiälähteiden ( $E_{FS}$ ) ja tuotantoon käytettyjen energiasyötteen ( $E_{FSP}$  ja  $E_{VL}$ ) ero on tulkinnanvarainen. Molemmat ovat merkityksellisiä panoksia systeemin toiminnassa sen elinkaaren aikana. Sekä energiatuotteet että energiasyötteen tuodaan systeemiin systeemirajojen ulkopuolelta. Fossiilisten polttoaineiden louhinta- ja jalostusvaiheprosessi on systeemirajojen sisällä, mutta itse polttoaineen primäärienergiasyöte ( $E_{FP}$ ) on jätetty systeemirajojen ulkopuolelle. Tästä johtuen EROI-arvo ei kerro sähköntuotannon kokonaisprimäärienergiantarvetta. EROI-arvon määritelmän mukaan kahta suurinta energiasyötettä ( $E_{FS}$  ja  $E_U$ ) ei sisällytetä nimittäjään. Nimittäjä sisältää ainoastaan primäärienergian, joka on kulunut polttoaineen jalostamiseen ( $E_{FSP}$ ) ja voimalaitokseen rakentamiseen, käyttöön ja käytöstä poistoon ( $E_{VL}$ ). (Raugei et al. 2012, 578.)

Uusiutuvan energian EROI-laskenta perustuu energian takaisinmaksuajan (EPBT) laskentaan. Energian takaisinmaksuaika on aika, joka systeemille kestää tuottaa energiamäärä, joka kuluu sen rakentamiseen, huoltoon ja käytöstä poistoon. (Gupta & Hall 2011, 34.)

Energian takaisinmaksuaika voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä (Raugei et al. 2012, 578.):

$$EPBT = \frac{E_{VL}}{E_{ulos,PE-ekv}} \quad (3)$$

$EPBT$  = Energian takaisinmaksuaika

$E_{VL}$  = voimalaitoksen rakentamiseen, huoltoon ja käytöstä poistoon kuluva primäärienergia

$E_{ulos, PE-ekv}$  = Vuosittainen sähköntuotanto primäärienergiaekvivalentteina

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvissa prosesseissa lopputuotteena on usein sähköenergia. Voimalaitoksen sähköenergian vuosituotanto muutetaan yleensä primäärienergiayksiköiksi käyttämällä keskimääräistä sähköntuotannon hyötysuhdetta primäärienergiasta sähköksi. Tämä hyötysuhde on Euroopassa keskimäärin 0,29. (Raugei et al. 2012, 578.) Energian takaisinmaksuajan avulla lasketaan edelleen EROI-arvo seuraavan kaavan mukaisesti:

$$EROI_{PE-ekv} = \frac{T}{EPBT} = T \left( \frac{E_{ulos,PE-ekv}}{E_{VL}} \right) = \frac{T E_{ulos,vuotuinen}}{E_{VL} \eta_{verkko}} = \frac{E_{ulos}}{E_{VL} \eta_{verkko}} \quad (4)$$

$EROI_{PE-ekv}$  = Systemin EROI energiamuotojen laatukorjauksella

$T$  = systeemin elinikä

$\eta_{verkko}$  = keskimääräinen sähköntuotannon hyötysuhde

Kaava 2 eroaa kaavasta 4 siten, että tuotettu nettoenergia voimalaitoksen elinkaarenajalta on esitetty primäärienergiaekvivalentteina eikä sähköenergiana. Jos kaikki muu laskennassa säilyy ennallaan, kaavan 4 mukaan laskettu EROI on  $1/\eta_{verkko}$  kertaa suurempi kuin kaavan 2 mukainen EROI. Tiedemaailmassa ei ole vakiintunutta kantaa siitä, kummalla tavalla uusiutuvan energian EROI tulisi laskea. Laskettaessa EROI kaavan 2 mukaan saadaan selville, kuinka paljon primäärienergiaa palautuu yhteiskunnan käyttöön sähköntuotantoon investoitua primäärienergiayksikköä kohden. Yleinen kanta on, että primäärienergiaekvivalenteiksi normalisoitu sähköntuotannon EROI-arvo uusiutuvalle energialle ei ole vertai-

lukelpoinen fossiilisista polttoaineista tuotetun sähkön EROI-arvojen kanssa. Sen sijaan kaavan 4 mukaan lasketut EROI-arvot koetaan yleisesti vertailukelpoisiksi kaavan 1 mukaisten fossiilisille polttoaineille tehtyjen EROI-laskelmien kanssa olettaen, että jalostettujen polttoaineiden energiasisältö eroaa vain hieman primäärienergiälähteiden energiasisälöstä. Tätä oletusta pidetään hyväksyttävänä, koska EROI-arvo on kvantitatiivinen arvio ja sisältää lähtökohtaisesti paljon vaihtelevuutta ja epävarmuutta. (Raugei et al. 2012, 578.)

## **2.2 Fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien energiantuotantomuotojen nettoenergioita**

EROI-arvolaskelmista voidaan muodostaa kehityskaari laskemalla tietylle energiantuotantomuodolle EROI-arvo eri ajankohtina. Tästä kehityskaaresta voidaan arvioida lähteen laadun kehittymistä ajan myötä. EROI-arvon lasku viittaa myös resurssin laadun laskuun eli joko raaka-aineen jalostaminen vaatii enemmän energiaa tai resurssi vähenee. (Murphy et al. 2011, 8.) Tällä hetkellä näyttää siltä, että fossiilisten polttoaineiden EROI-arvo laskee ja uusiutuvien energialähteiden EROI-arvo nousee tekniikan kehittyessä ja tuotannon lisääntyessä. Uusiutuvan energian EROI-arvoissa esiintyy usein suhteellisen paljon vaihtelua energialähteittäin. Vaihtelua EROI-arvoihin tuo muun muassa voimalaitosten komponenttien valmistusmaa ja valmiin laitoksen maantieteellinen sijainti. Erityisesti uusiutuvien energialähteiden kohdalla voimalaitoksen maantieteellinen sijainti voi vaikuttaa oleellisesti tuotettavan energian määrään. (Gupta & Hall 2011, 34.) Taulukkoon 1 on koottu kirjallisuudesta EROI-arvoja yhdelletoista polttoaineelle ja energiantuotantomuodolle (Gupta & Hall 2011, 28–38). Tilastoituja arvoja sekä eri polttoaineiden ja energiantuotantomuotojen EROI-laskennan nykytilaa, ominaispiirteitä ja haasteita on käsitelty taulukon jälkeen.

**Taulukko 1.** Polttoaineiden ja energiantuotantomuotojen EROI-arvoja. (Gupta & Hall 2011.)

	<b>EROI</b>	<b>Alue</b>
<b>Öljy ja maakaasu *</b>	11–18:1	Yhdysvallat
<b>Öljy ja maakaasu</b>	18:1	Maailma
<b>Kivihiili</b>	20–80:1	Yhdysvallat
<b>Öljyhiikka</b>	3–9:1	Kanada**
<b>Kiviöljy</b>	1.5–4:1	Maailma
<b>Ydinvoima</b>	5–8:1	Maailma
<b>Tuulivoima</b>	18.1–24.6:1	Maailma
<b>Aurinkosähkö</b>	3–10:1	Maailma
<b>Vesivoima</b>	11.2–267:1	Maailma
<b>Geoterminen energia</b>	6–39:1	Maailma
<b>Maissietanoli</b>	0.8–2:1	Yhdysvallat
* Öljyn ja maakaasun EROI-laskenta on usein yhdistetty, koska niiden tuotanto tapahtuu samoilla kentillä ja valmistusprosessit sekä niiden raportointi ovat osittain päällekkäisiä. ** 80 % maailman öljyhiikoista sijaitsee Kanadassa.		

Öljyn ja maakaasun EROI-arvojen laskenta on usein yhdistetty, koska niiden tuotanto tapahtuu samoilla kentillä sekä valmistusprosessit ja niiden raportointi ovat osittain päällekkäisiä. Öljyn ja maakaasuun EROI-arvot ovat laskeneet maailmanlaajuisesti 1950-luvun 30:1 tasosta noin 18:1 2000-luvulle tultaessa. Öljyhiikkakentiltä tuotetun öljyn EROI on 3–9:1 ja kiviöljyn vielä alhaisempi, 1.5–4:1. (Gupta & Hall 2011.)

Kivihiilen EROI-arvojen suuri vaihteluväli on seurausta erilaisista oletuksista laskennan alkuarvoissa ja tuotejärjestelmän rajoissa. Kivihiilelle eri yhteyksissä lasketut EROI-arvot noudattavat samanlaista kehityskaarta tarkasteltaessa niiden muutoksia 1930-luvulta 1990-luvulle. 30-luvulta 60-luvulle asti EROI-arvot pysyivät verrattain tasaisena, nousivat hieman 60-luvulla, mutta putosivat jälleen 70-luvulla alle aikaisempien vuosien tason. EROI-arvon romahduksen syynä on pidetty Yhdysvalloissa louhitun kivihiilen laadun laskua. Kivihiilen EROI-arvoja ei ole tutkittu laajasti vuoden 1987 jälkeen. Voidaan kuitenkin arvioida, että kivihiilivarantojen ehtyessä ja ympäristölainsäädännön kiristyessä kivihiilen EROI-arvot laskevat. (Gupta & Hall 2011.) Esimerkiksi hiilidioksidin talteenottojärjestelmän liittäminen kivihiililauhdevoimalaan voi laskea voimalaitoksen hyötysuhdetta jopa 25 % ja alentaa tätä kautta hiilen EROI-arvoa (Goto et al. 2013). Toisaalta tuotantotekni-

kan tehostuminen siirryttäessä umpilouhoksista avolouhoksiin saattaa nostaa EROI-arvoja (Gupta & Hall 2011).

Tällä hetkellä parhaana arviona ydinvoiman EROI-arvolle pidetään 5–8:1. Joissakin tutkimuksissa EROI-arvo on kuitenkin ollut pienimmillään alle 1:1 ja suurimmillaan jopa 60:1. Arvojen suuri vaihtelu on seurausta tutkimuksien rajauksista, käytetyistä tekniikoista tai erittäin pessimistisistä tai vastaavasti optimistisistä oletuksista. Uusien tutkimusten tueksi tarvittaisiin lisää empiiristä tietoa ydinvoima-alalta. (Gupta & Hall 2011.)

Tuulivoiman EROI-arvo saa arvoja 18.1–24.6:1 väliltä. Tehtyjen tutkimusten pohjalta tiedetään, että EROI-arvo kasvaa tuulivoimalan turbiinikoon kasvaessa. Pienet turbiinit ovat usein suunnittelultaan vanhempia ja niiden hyötysuhde on huonompi, koska tuuliolosuhteet heikkenevät lähestyttäessä maan pintaa. Suuremmilla voimalatyypeillä on myös suuremmat roottorin halkaisijat ja näin voimalaitos voi hyödyntää myös alhaisempia tuulennopeuksia ja tuottaa enemmän tuulienergiaa paremmalla hyötysuhteella, kuin pienet laitokset. Korkeutensa puolesta suuremmat voimalaitokset ylettyvät hyödyntämään korkeammalla virtaavia nopeampia ilmavirtauksia. (Gupta & Hall 2011.)

Aurinkosähkön EROI-arvot ovat keskimäärin 3-10:1 väliltä. Aurinkosähkön EROI-arvoihin vaikuttavat aurinkosähköjärjestelmän komponenttien valmistusmaan ja asennuspaikan lisäksi erityisesti käytetyt materiaalit ja niiden puhtaus, materiaalien ja komponenttien tuotantoprosessin tehokkuus, moduulityyppi ja sähköntuotannon kausittaisuus. (Gupta & Hall 2011.)

Uusiutuvista energiantuotantomuodoista etenkin vesivoiman ja geotermisen energian EROI-arvot vaihtelevat paljon. Vesivoimalle lasketut EROI-arvot vaihtelevat välillä 11.2–267:1 ja geotermisen energian EROI-arvot välillä 6–39:1. Vesivoiman kohdalla erot selittyvät osittain pinnanmuotojen ja tekniikan tason vaihtelevuudella. EROI-arvojen laskennassa ei huomioida ympäristöllisiä ja sosiaalisia kuluja, jotka erityisesti vesivoiman kohdalla voivat olla huomattavia. Suuret EROI-arvojen vaihtelut geotermisen energian kohdalla johtuvat pääasiassa yhtenäisen laskentametodologian puuttumisesta ja eroista tarkastelun rajauksissa. (Gupta & Hall 2011.)

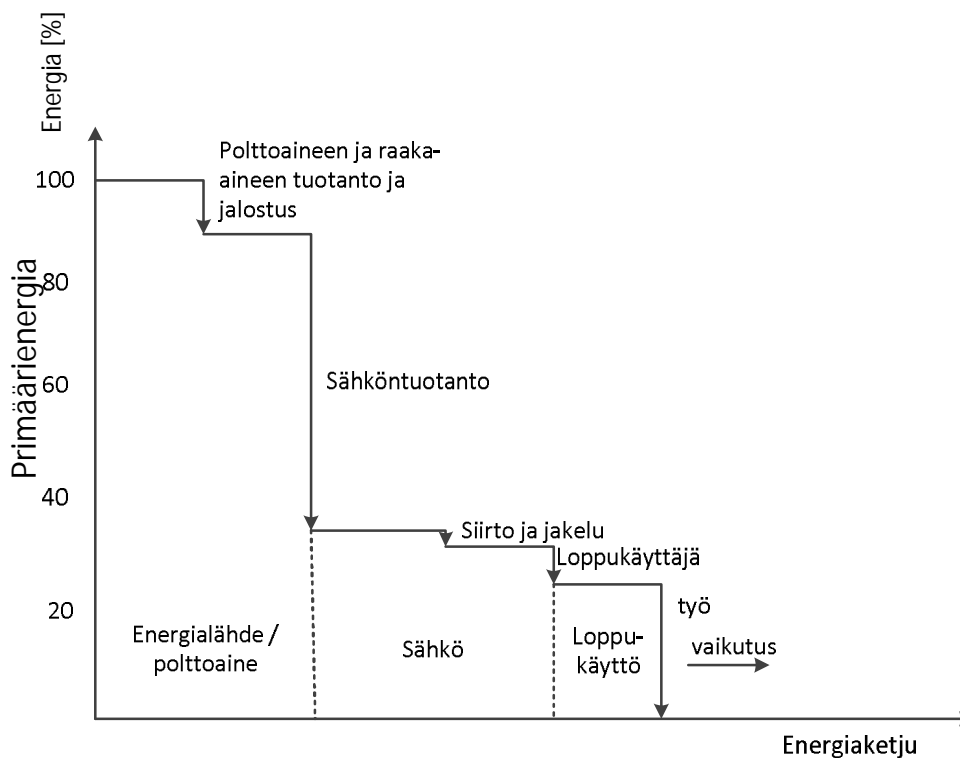
Maissietanolin nettoenergia ja EROI-arvot ovat herättäneet paljon keskustelua Yhdysvalloissa. Maissietanolin EROI-arvot ovat keskimäärin 0.8-2:1. Joissain tapauksissa maissietanolin valmistus siis vie enemmän energiaa, kuin lopputuotteesta saadaan yhteiskunnan käyttöön. Parhaimmassakin tapauksessa saatu hyöty jää alhaiseksi. (Gupta & Hall 2011.)



### 3 YHDYSKUNNAN UUSIUTUVAAN ENERGIAAN PERUSTUVA ENERGIAJÄRJESTELMÄ

Yhdyskunta tarvitsee energiaa toimiakseen. Energiajärjestelmä koostuu energiantuotannosta, siirrosta ja jakelusta. Energiantuotanto perustuu energiantarpeeseen. Suomessa energian loppukäytöstä teollisuuden osuus on noin 44 %, liikenteen 17 % ja rakennusten lämmityksen osuus 25 %. Loppu 14 % energian loppukäytöstä käsittää kotitalouksien, julkisen ja yksityisen sektorin, maa- ja metsätalouden sekä rakennustoiminnan sähkön ja polttoaineiden käytön. (Tilastokeskus 2012a, 41.)

Energian jalostuksessa, siirrossa ja jakelussa tapahtuu kuitenkin aina häviöitä, joten kuvan 6 mukaisesti energian loppukäytön määrä ei vastaa käytetyn primäärienergian määrää. Kuvassa asiaa on havainnollistettu sähköenergiaketjun näkökulmasta.



**Kuva 6.** Sähköverkon energiatehokkuus. (Kaipia 2013.)

Tässä osiossa kartoitetaan, mistä rakennusten, erityisesti kotitalouksien, lämmitys- ja sähköenergian tarve muodostuu sekä energiantuotantoa, -siirtoa ja -jakelua yhdyskunnan tarpeisiin. Energiantuotannon osalta keskitytään erityisesti uusiutuvan energian tuotantoon.

### 3.1 Yhdyskunnan lämmön- ja sähköntarve

Sekä sähkön- että lämmöntarpeessa on periaatteessa kaksi osatekijää: teho ja energia. Teho tarvitaan, jotta energian loppukäyttäjä saa kullakin hetkellä tarvitsemansa sisäilman ja käyttöveden lämpötilan tai pystyy käyttämään samanaikaisesti haluamaansa määrää sähkölaitteita. Energia kuluu, kun tehoa ylläpidetään kulutustarpeen mukaan jonakin ajanjaksona.

Rakennuksen nettoenergiankulutus muodostuu tilojen lämmityksen nettoenergiantarpeesta, lämpimän käyttöveden lämmityksen ominaisenergiantarpeesta sekä sähkön ominaiskulutuksesta. Tilojen lämmityksen nettoenergiantarve muodostuu edelleen rakennuksen lämpöhäviöenergiasta, joista vähennetään henkilöistä, valaistuksesta, sähkölaitteista tuleva energia ja ikkunoista tuleva auringon säteilyenergia. (RIL 2009, 24–31.)

Rakennuksen lämmitystehontarve muodostuu tilojen lämmitystehosta, ilmanvaihdon lämmitystehosta sekä käyttöveden lämmitystehosta. Tilojen lämmitystehontarve muodostuu edelleen rakenteiden johtumistehosta sekä vuoto-, tulo- ja korvausilman lämmitystehosta. Ilmanvaihdon lämmityksen vaatima teho muodostuu rakennukseen tuotavan ilman lämmitystarpeesta. Lämpimän käyttöveden lämmitystarve perustuu lämpimän käyttöveden tarpeeseen, joka erityisesti asuinrakennuksissa vaihtelee suuresti kulutustottumusten mukaan. (Energiateollisuus 2006, 51–53.)

Asuinrakennusten lämmöntarpeen vuosivaihtelu on voimakasta, koska se perustuu ulkoilman lämpötilamuutoksiin. Kesällä lämmöntarve muodostuu lähes kokonaan lämpimän käyttöveden lämmityksestä. Talvella ulkolämpötilan laskiessa tilojen lämmitystarve kasvaa ja käyttöveden lämmitystarpeen suhteellinen osuus laskee. Vuosivaihtelun lisäksi esiintyy hetkellistä tehontarpeen vaihtelua, joka voidaan jaotella viikko- ja tuntivaihteluun. Asuinrakennuksien lämmöntarpeessa ei viikkotasolla tyypillisesti esiinny kovin suurta vaihtelua, mutta tuntitasolla lämmöntarpeessa on selvät huippukohdat sekä aamulla että illalla. Vaihtelu johtuu pääasiassa lämpimän veden käytöstä ja ilmanvaihdon päivärytmistä. (Energiateollisuus 2006, 41–42, 59.)

Asuinrakennuksen ominaissähkön kulutus muodostuu kiinteistö- ja kotitaloussähkön kulu-  
tuksesta. Kiinteistösähkön kulutus sisältää pientalossa kiinteän valaistusjärjestelmän, talo-  
tekniikan pumppujen, puhaltimen automaattilaitteiden, saunan sekä rakennuksen ulko-  
puolella valaistuksen ja kohdelämmitysten kuten autopaikkojen kuluttaman sähköenergian.  
Kotitaloussähkön kulutus sisältää valaistuksen, kotitalouslaitteiden ja kotielektroniikkalait-  
teiden ja muiden vastaavien sähkölaitteiden sähkönkulutuksen. (RIL 2009, 24–31.)

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on määritelty vähimmäisarvot rakennusten koko-  
naisenergiankulutukselle, E-luvulle. E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu ra-  
kennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus RakMK:n osan D3 mukaisilla lähtöarvoilla las-  
kettuna lämmitettyä nettoalaa kohden. (Ympäristöministeriö 2012, 8.) Rakennus voidaan  
suunnitella myös rakentamismääräyksiä energiatehokkaammaksi. Yleisesti energiatehok-  
kaaksi voidaan kutsua rakennusta, joka kuluttaa vähintään puolet vähemmän energiaa kuin  
rakentamismääräysten minimivaatimukset täyttävä rakennus. Energiatehokkaan talon ra-  
kentaminen onnistuu yleisesti käytössä olevilla ratkaisuilla, eikä näin vaadi erityisratkaisu-  
ja. Matalaenergiataloksi kutsutaan rakennusta, jonka laskennalliset lämpöhäviöt ovat ra-  
kentamismääräysten ohjeiden mukaan enintään 85 % rakennukselle määritellyistä lämpö-  
häviöistä. Energiatehokkaan rakentamisen hyötyjä ovat muun muassa pienempi energiaku-  
lutus ja sitä kautta saavutetut ympäristölliset ja taloudelliset hyödyt sekä terveellinen ja  
viihtyisä sisäilmasto tarpeenmukaisen ilmastoinnin ja vedon tunteen vähenemisen myötä.  
(Energiatehokas koti 2013.)

### 3.2 Energiantuotanto

Yhdyskunnan asuinrakennusten energiankulutuksen kattamiseen voidaan käyttää seuraavia energiantuotantotapoja tai niiden yhdistelmiä (RIL 2009, 37–38):

- kiinteistössä tuotettu uusiutuva energia
- kiinteistössä uusiutuvilla tai uusiutumattomilla polttoaineella tuotettava ostoenergia
- alueellinen energia, joka tuotetaan ja jaetaan kuhunkin tapaukseen soveltuvalla tavalla
- yhdyskunnan kaukolämpö- ja sähkölaitosten tuottama ja jakelema lämpö- ja sähköenergia
- valtakunnallinen ja kansainvälinen energiantuotanto

Kiinteistöllä hyödynnettävissä olevia uusiutuvan energian tuotantotapoja ovat muun muassa aurinkokeräimet- ja paneelit, lämpöpumput, tuulivoimalat sekä puuta, puupellettiä, puuhaketta tai bioöljyä käyttävät lämpökattilat tai takat. Lämpökattiloissa voidaan käyttää myös uusiutumattomia polttoaineita, kuten öljyä tai turvetta. Alueellisella energiantuotannolla tarkoitetaan uusiutuvista tai uusiutumattomista energialähteistä tapahtuvaa energiantuotantoa, esimerkiksi lämmöntuotantoa alueellisella lämpölaitoksella. Yhdyskunnan kaukolämpö- ja sähkölaitosten hyödyntäminen tarkoittaa alueellista energiantuotantoa suuremman mittakaavan energiantuotantoa, kuten energiantuotanto CHP-laitoksella paikalliseen kaukolämpöverkkoon ja valtakunnalliseen sähköverkkoon. Valtakunnallisella ja kansainvälisessä energiantuotannolla tarkoitetaan muun muassa yleisessä sähköverkossa jaettavaa sähköntuotantoa ja maakaasuverkossa jaettavaa maakaasuntuotantoa. (RIL 2009, 37–38.)

Seuraavaksi käsitellään mainittuja uusiutuvan energian tuotantotapojen hyödyntämistä yhdyskuntien energiantuotantolähteenä. Erityisesti keskitytään tekniikoihin, joita voidaan hyödyntää yhdyskunnan pääasiallisina sähkön- tai lämmöntuotantotapoina.

### 3.2.1 Aurinkoenergia

Auringon säteilyä voidaan hyödyntää sekä lämmön että sähkön tuottamiseen. Aurinkolämmön ensisijainen käyttökohde on pientalojen käyttöveden lämmitys, mutta sitä voidaan käyttää myös rakennusten huoneilman lämmittämiseen. Aurinkolämpöjärjestelmät ovat useimmiten talokohtaisia, mutta myös laajempia aluelämpöjärjestelmiä voidaan toteuttaa. Yksinkertaisimmillaan aurinkolämpöä voidaan hyödyntää passiivisesti sijoittamalla lämmitettäviä kohteita aurinkoon. Aktiivisen aurinkolämpöjärjestelmän pääkomponentit ovat aurinkokeräin, varaaja, pumppu ja ohjausyksikkö. Yleisesti aurinkolämmön ajatellaan soveltuvan erityisen hyvin vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän päälämmitysmuodon tueksi. (Motiva 2010b, 17.)

Aurinkosähköä voidaan tuottaa joko muuntamalla auringon säteilyenergia suoraan aurinkopaneelien avulla sähköksi tai hyödyntämällä keskittävää tekniikkaa, jossa auringonsäteet heijastetaan kiiltävien pintojen avulla lämmittämään keräinputken sisällä kulkevaa väliainetta. Väliaine höyrystää kiertovettä, joka johdetaan edelleen höyryturbiiniin. Keskitetyn aurinkosähkön tuotanto ei toistaiseksi ole Suomen oloissa teknis-taloudellisesti kannattavaa. (Motiva 2010b, 15–16.)

Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentteja ovat aurinkopaneelit, asennustelineet, invertteri sekä tarvittavat säätimet, kytkimet, mittarit ja sulakkeet. Aurinkosähköjärjestelmään voidaan myös liittää energiavarasto, johon energiaa voidaan varastoida silloin, kun tuotanto ylittää tarpeen. Varastoitua energiaa voidaan edelleen hyödyntää silloin, kun tuotanto alittaa tarpeen. (Thorpe 2011, 137.) Kuvassa 7 on esitetty omakotitalon katolle asennettu, julkiseen verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä.



**Kuva 7.** Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä. Kuvassa A = Aurinkopaneeli, B = Aurinkopaneelin kiinnikkeet, C = Inverteri, D = Tuotetun sähkön mittari, E = sähkön kulutusmittari. (Sharp Electronics Europe, 2012.)

Aurinkokennot ovat puolijohteita, jotka muuntavat auringon valon suoraan sähköksi metalleissa tapahtuvan valosähköisen ilmiön avulla. Auringon säteily synnyttää kennon ala- ja yläpinnan välillä jännitteen. Kun aurinkokennot kytketään piiriin, syntyy sähkövirta. Kytkeväällä tarpeellinen määrä aurinkokennoja sarjaan saadaan haluttu jännitteen taso. Yhteinliitetyjä aurinkokennoja kutsutaan aurinkopaneeliksi. Aurinkokennon tuottama teho riippuu siihen osuvan valon määrästä. Aurinkokennon teho on suurin, kun se on suunnattu suoraan kohti aurinkoa kirkkaassa ja selkeässä säässä. Aurinkokennosta testiolosuhteissa saavutettavissa olevaa suurinta tehoa kutsutaan huipputehoksi. Aurinkokennon hyötysuhde riippuu muun muassa siitä, kuinka suurta osaa auringon säteilyn spektristä se pystyy hyödyntämään sähköntuotannossa. (Thorpe 2011, 127–130.)

Aurinkokennoteknologiat jaetaan usein niin sanottuihin sukupolviin, joista ensimmäisen muodostavat kiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot ja toisen sukupolven ohutkalvoteknologialla valmistetut kennot. Kolmannen sukupolven aurinkokennoihin kuuluvat muun muassa väriherkistetyt ja orgaaniset aurinkokennot. (U.S. Department of Energy 2012.) Kiteisestä piistä valmistettujen aurinkokennojen markkinaosuus on tällä hetkellä suurin, noin 80 % ja ohutkalvokennojen noin 10 % (Breyer 2013). Kolmannen sukupolven aurin-

kokennot eivät ole vielä laajassa teollisessa tuotannossa ja niiden hyötysuhteet ovat selvästi pii- ja ohutkalvoteknologioita alhaisempia. Sekä väriherkistettyjen että orgaanisten aurinkokennojen hyvinä puolina tulevaisuutta ajatellen nähdään materiaalien runsaat raaka-ainevarat ja laajan tuotannon myötä mahdollistuvat alhaiset tuotantokustannukset verrattuna ensimmäisen ja toisen sukupolvien paneeliteknologioihin. (U.S. Department of Energy 2012.)

Ensimmäisen sukupolven aurinkokennojen pääraaka-aine on kiteinen pii. Pii on yksi maailman yleisimmistä alkuaineista. Sitä käytetään aurinkokennoissa joko yksikiteisenä, monikiteisenä tai amorfisena. Perinteinen piistä valmistettu aurinkokenno koostuu kahdesta kerroksesta. Aurinkokennon yläosaan lisätään fosforia negatiivisen varauksen aikaansaamiseksi ja alaosaan booria positiivisen jännitteen aikaansaamiseksi. Ohutkalvokennot toimivat samalla tavalla kuin perinteiset piistä valmistetut aurinkokennot, mutta niiden valmistustekniikka on erilainen. Ohutkalvokennot valmistetaan latomalla äärimmäisen ohuita kerroksia valoherkkää materiaalia edullisen tukimateriaalin kuten lasin, ruostumattoman teräksen tai muovin päälle. Ohutkalvokennot ovat helposti liitettävissä erilaisiin kuluttajatuotteisiin kuten kännyköihin. Tällä hetkellä suuressa mittakaavassa valmistettavia kennotyyppejä ovat kiteytymättömästä piistä, kadmium-telluuri sekä kupari-indium-seleeni seoksista valmistetut kennot. (Thorpe 2011, 128–139.)

Aurinkosähköjärjestelmän sähköenergiantuotantopotentiaalia voidaan arvioida kaavalla 5.

$$Tuotettu\ sähkö\ [kWh] = \text{paneelin hyötysuhde} * \text{auringon säteily} \left[ \frac{kWh}{m^2} \right] * \text{paneelin ala} [m^2] * \text{kapasiteettikerroin} \quad (5)$$

Aurinkopaneelien hyötysuhteet vaihtelevat paljon eri aurinkokennoteknologioiden välillä. Teollisessa tuotannossa olevien kiteisestä piistä valmistettujen aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat tällä hetkellä parhaimmillaan 18–24 % ja ohutkalvokennojen 10–13 % (U.S. Department of Energy 2012).

Auringonsäteilyn määrä riippuu leveysasteesta ja vuorokauden ajasta. Aurinkoenergian tuotantopotentiaaliin vaikuttavat myös pilvisyysolosuhteet ja kasvillisuuden määrä. Paras

potentiaali aurinkosähköntuotantoon on pohjoisella pallonpuoliskolla Saharassa, Lähi-idässä ja Pohjois-Amerikan länsiosissa. Eteläisellä pallonpuoliskolla paras energiantuotantopotentiaali on Afrikan eteläosissa, lähes koko Australiassa ja Etelä-Amerikassa Atacaman autiomaassa. (Bryer 2013.) Auringon säteilypotentiaali on Saharassa noin 2500 kWh/m<sup>2</sup>/a, Keski-Euroopassa noin 1400 kWh/m<sup>2</sup>/a ja Etelä-Suomessa noin 1100 kWh/m<sup>2</sup>/a (PVGIS 2013).

Aurinkosähköjärjestelmän sähköntuotantopotentiaalia arvioidessa paneelin ala tarkoittaa asennettujen paneelien yhteispinta-alaa. Aurinkopaneeleja voidaan asentaa periaatteessa yhtä paljon, kuin asennustilaa on, johtuen niiden modulaarisuudesta. Käytännössä asennettavien aurinkopaneelien ala määräytyy muun muassa optimaalisen asennuspinnan määrän ja rakennuksen energiatarpeen perusteella. Aurinkopaneelit kannattaa suunnata etelään. Lisäksi paneeleja ei kannata asentaa varjoisiin kohtiin, kuten puiden varjostamalle alueelle. Kapasiteettikertoimella katetaan systeemihäviöt, ajanjaksot, jolloin paneeli toimii optimilämpötilasta poikkeavissa olosuhteissa ja aurinkopaneelin suuntauksesta aiheutuvat häviöt. Hyvin asennetuissa verkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä kapasiteettikerroin on yleensä luokkaa 0,7-0,8. (Thorpe 2011, 137.)

### 3.2.2 Tuulienergia

Tuulen hyödyntäminen energialähteenä perustuu ilman molekyylien liikkeen hyödyntämiseen. Molekyylien liike-energia muutetaan pyörimisenergiaksi tuulivoimalan siipien avulla ja siivet pyörittävät edelleen generaattoriin kytkettyä akselia. Generaattori muuntaa pyörimisenergian sähköksi. (Huhtinen et al. 2008, 280–281.)

Tuulivoiman tuottama energia riippuu tuulivoimalan lapojen piirtämällä alueella vallitsevasta tuulen nopeudesta ja sen jakaumasta. Isojen voimaloiden tyypillinen toiminta-alue on tuulen nopeuksilla 5-25 m/s. Tuulivoimalat eivät tuota energiaa tätä heikommilla tai kovemmilla tuulilla. Tuulivoimapotentiaalin arviointi perustuu tuuliolosuhteiden tarkkaan tuntemiseen. Maailman tuulivoimapotentiaali on erittäin suuri, mutta tarkkojen arvioiden esittäminen on vaikeaa ilman tarkkaa tietoa tuuliresursseista. Voidaan kuitenkin olettaa, että lähes kaikilla alueilla on suuri tuulivoimatuotantopotentiaali, vaikka tuuliresurssit eivät aina jakaudu tasaisesti ja sijoitu lähelle energian tarvetta. Euroopan tuuliolosuhteita on kar-



toitettu Euroopan Unionin (EU) toimesta 1980-luvun loppupuolelta. Parhaat tuuliolosuhteet ovat Brittein saarilla, jossa tuulen keskinopeus on rannikolla yli 9 m/s, mäillä ja harjanteilla 11 m/s. (STY 2013.)

Suomen tuuliolosuhteita on kartoitettu muun muassa Suomen Tuuliatlas palveluun. Suomessa tuulee eniten talvikuukausina ja selvästi vähemmän kesäkuukausina. Talviajan keskituulennopeus on noin 10 prosenttia korkeampi kuin kesällä. Parhaimmat tuuliolosuhteet ovat merialueilla, Ahvenanmaalla ja Varsinais-Suomen saaristossa. Tuuliolosuhteet heikenevät vähitellen itää ja pohjoista kohti mentäessä. Tuulisähkön tuotanto vaihtelee päivittäin ja tunneittain tuulisuuden mukaan. Yleensä yöaikaan tulee hieman enemmän, kuin päiväaikaan. (Hynynen et al. 2012, 10–16; Motiva 2013.)

Tuulivoimalatyyppejä on useita erilaisia. Eniten käytettyjä malleja ovat kolmilapaiset vaakakseliset laitokset. Näiden lisäksi käytössä on muun muassa pystyakselisiä kuppi-, Savonius- ja spiraaliroottorilaitoksia. Näistä ainoastaan potkurimallisilla voimaloilla on nykyään käytännön merkitystä laajemmassa sähkötuotannossa. Potkurin merkittävin etu on, että se peittää omaan pinta-alaansa nähden huomattavan suuren pinta-alan. Tämän ansiosta potkurimallinen voimalaitos pystyy tuottamaan omaan painoonsa nähden huomattavan paljon tehoa. Kolmilapaiset voimalaitokset ovat tasapainoisemman pyörimisensä vuoksi syrjäyttäneet yksi- ja kaksilapaiset laitokset. Lapojen lisäksi potkurimallisen tuulivoimalan pääosiin kuuluu napa, päälakeri, akseli, kääntömoottori, vaihde, levyjarru, kytkin ja generaattori sekä pohjarakenne ja runko. (Huhtinen et al. 2008, 280–283.)

Tuulivoimalat luokitellaan nimellistehonsa mukaan. Tuulivoimaloiden nimellisteho, roottorin halkaisija ja napakorkeus ovat kasvaneet parinkymmen vuoden aikana huomattavasti ja ne tulevat edelleen kasvamaan. Nykyään rakennetaan eniten 2-3 MW:n suuruisia laitoksia, mutta suurempien, noin 5 MW:n laitosten osuus on kasvussa. Lisäksi testikäytössä on jopa 8 MW:n laitoksia. Laitosten käyttöikä on noin 20–40 vuotta. (Energiateollisuus 2014; Suomen tuuliatlas 2012; Wind Power Monthly 2014.)

Tuulienergian laajamittainen hyödyntäminen tapahtuu tuulipuistoissa. Tuulipuistossa jopa kymmeniä tai satoja tuulivoimaloita on pystytetty yhdelle suppealle alueelle. Tuulivoima-

loita ei kannata kuitenkaan rakentaa liian lähelle toisiaan, koska tuulivoimala aiheuttaa häiriöitä ilman virtaukseen kauas roottorin takapuolelle. Voidaan arvioida, että yksittäisten voimaloiden väliin tulisi jättää noin viisi kertaa roottorin halkaisijan verran tilaa. Hyvin suurissa tuulipuistoissa etäisyyksien on oltava suuremmat ja vastaavasti yhdessä rivissä tai kaaressa sijaitsevat tai hyvin pienen ryhmän muodostavat voimalat voivat olla lähempänä toisiaan. (STY 2013.)

Rakennettavan tuulivoimakapasiteetin määrään vaikuttavia tekijöitä tuuliolosuhteiden lisäksi ovat tuulivoimarakentamiseen soveltuvan maa-alan määrä, sähköverkkoon liittämisestä aiheutuvat näkökohdat sekä erilaiset taloudelliset näkökohdat. Suomessa alueen soveltuvuus tuulivoimaloiden sijoituspaikaksi ratkaistaan ensisijaisesti, hankkeen koosta riippuen, joko maakunta-, yleis- tai asemakaavassa. (STY 2013.)

### **3.2.3 Bioenergia**

Suomessa yhdyskuntien sähkö- ja lämpöenergiantuotannon kannalta merkittävimmät bioenergianlähteet ovat metsä- ja peltobiomassat, joista erityisesti metsäenergian merkitys on nykyiselläänkin suuri (Antikainen et al. 2007, 18). Metsäbiomassoja energialähteenä voidaan hyödyntää yhdyskunnan kaukolämmön sekä sähköntuotannossa CHP-laitoksissa, mutta myös pienessä mittakaavassa suoraan kiinteistöllä sekä lämmön- että sähköntuotannossa.

Aiemmin osiossa 3.1. todettiin asuinrakennusten lämmöntarpeen vaihtelevan vuosi-, viikko- sekä tuntitasolla. Lämmöntuotannon on pystyttävä vastaamaan lämmöntarpeeseen joka hetki. Keskitetyssä lämmitysjärjestelmässä on yleensä edullisinta jakaa hankinta eri tuotantomuotojen kesken, jolloin päästään taloudellisesti edullisimpaan lopputulokseen. Lämmöntuotantokapasiteetti jaetaan neljään tehoryhmään: perustehoon, keskitehoon, huipputehoon ja varatehoon. Perus- ja huipputeho kannattaa yleensä tuottaa erillisillä yksiköillä. Pienissä järjestelmissä ei ole teknisesti järkevää jakaa kapasiteettia kovin moneen tuotantoyksikköön. (Energiateollisuus 2006, 259.)

Suunniteltaessa voimalaitosta aluelämpöverkon perusenergian tuottajaksi aluksi mitoitetaan tämän tuotantotavan teho- ja energiaosuudet. Voimalaitoksen hyötysuhde on paras,

kun sähköntuotantoa voidaan ajaa täydellä teholla. Peruskuormalaitosta ei siis kannata mitoitaa tuottamaan verkon koko tehontarvetta. Peruslämmityslaitokseksi mitoitettavan laitoksen tehosta tulisi olla 40–60 prosenttia lämpöverkon mitoitustehosta. Peruslämmityslaitoksella tuotettavan energian osuus kokonaisenergiasta on tällöin 80–90 prosenttia. Peruslämpöä tuottavan laitoksen huipun käyttöajan suositellaan olevan vähintään 4000–5000 h/a. (Energieateollisuus 2006, 322–323.) Lähtökohta hyvälle CHP-kohteelle on riittävä lämpö- ja sähköenergian tarve. Tämän lisäksi oleellista on kohtuullinen lämmönsiirtoetäisyys ja polttoaineiden saatavuus. (Ali-Löytty et al. 2011, 111–112.)

Suomessa metsäbiomassojen energiahyötykäyttö on vahvasti linkittynyt metsäteollisuuden puunjalostuksen kanssa. Metsäteollisuuden puunkäytön ja tuotannon yhteydessä syntyy energijakeita ja näiden lisäksi metsästä saadaan energiakäyttöön metsähaketta. Energiakäyttöön tarkoitettua puuta tai puutavarasta käytetään termiä energiapuu. Suomessa ei kasvateta varsinaisia energiapuumetsiä, vaan energiapuu on yleensä metsäteollisuuden ainespuuksi kelpaamatonta puuta, kuten karsimatonta kokopuuta, karsittuja rankoja, raivauspuuta tai päätehakkuaalojen latvus- ja oksamassoja. Lisäksi hakkuualoilta ja tienrakennustyömailta nostetaan lisääntyvässä määrin kantoja, jotka aumakuivauksen jälkeen murskataan. Metsähake on yleisnimitys suoraan metsästä energiakäyttöön tuleville hakkeille hakeutuspaikasta riippumatta. (Motiva 2013.)

Energiapuun hyödynnys edellyttää tehokasta ja toimivaa korjuuta ja kuljetuksia. Energiapuun korjuuketju muodostuu hakkuusta metsäkoneella, metsäkuljetuksesta metsätraktorilla, energiapuun muokkaamisesta polttoon sopivaan muotoon ja kaukokuljetuksesta kuorma-autolla polttolaitokselle. Suurin osa energiapuusta välivarastoidaan tienvarsivarastoissa vähintään yhden kesän ajan ja haketetaan varastopaikalla suoraan hakeauton kuormatilaan. Metsäbiomassa työstetään polttokelpoiseen muotoon joko hakkurilla tai murskaimella. Hakkuria käytetään usein latvusmassoille sekä pienpuulle ja murskainta erikokoisille ja epäpuhtauksia sisältäville jakeille kuten kannoille sekä ruokohelvelle ja runkopuulle. (Motiva 2013.)

### 3.2.4 Lämpöpumput

Lämpöpumppujen avulla voidaan hyödyntää maaperään, veteen tai ilmaan varastoitunutta lämpöenergiaa rakennusten tilojen, sekä eräillä lämpöpumpputekniikoilla myös käyttöveden lämmittämiseen. Lämpöpumppua pystytään käyttämään myös tilojen jäähdyttämiseen. Lämpöpumput luokitellaan usein lämpöenergian ottotavan mukaan ilmalämpöpumppuihin, maalämpöpumppuihin, poistoilmalämpöpumppuihin ja ilma-vesilämpöpumppuihin. (Motiva 2010b, 12.) Luetelluista lämpöpumpputeknologioista maalämpöpumpulla voidaan kattaa lähes kokonaan rakennuksen vuotuinen lämmöntarve.

Rakennuksen lämmitykseen suunniteltu maalämpöjärjestelmä koostuu maalämpöpumpusta, lämmönkeruupiiristä ja lämmönjakoverkosta. Maalämpö sopii erinomaisesti matalalämpöisen lämmönjakojärjestelmän, kuten vesikiertoisen lattialämmityksen, yhteyteen. Porakaivo on nykyään yleisin lämmönlähde ja sopii tarvittaessa pienille tonteille. Lämpöpumpun tehokkuutta kuvaa lämpökerroin, joka kertoo kuinka paljon pumppu tuottaa lämpöä verrattuna sen käyttämään sähköenergiaan. Maalämpöpumpun lämpökertoimen keskiarvo vuositasolla on noin kolme. (Motiva 2012, 2-4.)

Kallioperään poratuissa keruuputkistoissa kiertää jäätymätön neste, joka lämpenee muutama asteen kierron aikana. Keruupiirin nesteestä saatava lämpö höyrystää lämpöpumpussa kiertävään kylmäaineeseen, jonka jälkeen höyrystyneen kylmäaineen painetta nostetaan kompressorilla. Höyryn paineen noustessa myös sen lämpötila nousee. Kylmäaine lauhtuu lämpöpumpun lauhttimessa jälleen nesteeksi, jolloin se luovuttaa lämpöä rakennuksen lämmönjakoverkkoon. Maalämpöpumppua voidaan käyttää myös käyttöveden lämmitykseen. (Motiva 2012, 3.)

Lämmönkeruuputkisto mitoitetaan rakennuksen tilojen ja käyttöveden lämmitysenergian tarpeen perusteella. Maalämpöpumppu mitoitetaan joko täys- tai osateholle. Osateholle mitoitettu lämpöpumppu kattaa 60–80 % lämpötehon huipputarpeesta ja kattaa vuotuisesta lämpöenergian tarpeesta 95–99%. Huipputeho tuotetaan usein lämpöpumpun varaajaan asennetulla sähkövastuksella. Täysteholla mitoitettu lämpöpumppu kattaa kaiken energiantarpeen kovimmillakin pakkasilla ilman varaajaan asennettuja lisävastuksia. Lämmönkeruuputkisto kannattaa mitoittaa hieman suuremmaksi kuin laskennallinen minimitarve.

Tämä nostaa lämmönkeruunesteen lämpötilaa ja lämpöpumpun hyötysuhdetta sekä vähentää lämpökaivoa käytettäessä kaivoveden jäätymisriskiä. (Motiva 2011a.)

### 3.3 Energiansiirto ja -jakelu

Energian siirtotavat riippuvat siirrettävästä energialajista ja sen jalostusasteesta. Tässä osiossa käsitellään jo tuotetun sähkön ja lämmön siirtoa sekä jakelua yhdyskunnan asuinrakennusten tarpeisiin. Lämmön siirron osilta käsitellään kaukolämmön siirtoa tuotantolaitokselta kulutuspaikalle. Sähkön siirto jaotellaan perinteisesti kahteen kokonaisuuteen, sähkön siirtoon ja jakeluun. Sähkön siirrolla tarkoitetaan sähkön siirtoa tuotantolaitoksilta jakelulaitoksille ja sähkön jakelulla sähkön siirtoa jakelulaitoksilta kuluttajille. (Hellgren et al. 1996, 123.)

Suomalaisessa kaukolämpöjärjestelmässä lämpö jaetaan asiakkaille yleensä lämpimänä vetenä. Kaukolämpöverkko on lämmöntuotantolaitoksen ja asiakkaan välillä kulkeva putkiverkko, jonka avulla tuotettu lämpö siirretään kuluttajan lämmönjakolaitteisiin. Yleensä lämmönsiirtoon käytetään yhtä meno- ja yhtä paluuputkea. Putket ovat samankokoisia ja muodostavat yhdessä kaukolämpöjohdon. Kaukolämpövettä kierrätetään putkistossa kiertopumppujen avulla. Jakeluverkossa pidetään yllä riittävän korkeaa keskipainetta, jotta vesi ei pääse höyrystämään missään kaukolämpöverkoston osassa. (Energiateollisuus 2006, 43–44.) Kaukolämmön siirtohäviöt ovat Suomessa keskimäärin 10 % (Vehviläinen et al. 2010, 37).

Suomen nykyinen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, valtakunnallisesta kantaverkosta, erillisistä alueverkoista, paikallisten verkkoyhtiöiden hallitsemista jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. Suomen sähköjärjestelmä on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää, johon kuuluvat Suomen lisäksi Ruotsin, Norjan ja Tanskan järjestelmät. Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa sähköverkon tehotasapainosta eli tuotannon ja kulutuksen hetkellisestä tasapainosta. (Kara et al. 2004, 78.)

Kantaverkko on valtakunnallinen suurjännitteinen sähkönsiirtoverkko, johon kuuluvat 400 kV:n ja 220 kV:n sekä tärkeimmät 110 kV:n johdot. Alueverkko muodostuu kantaverk-

koon kuulumattomista vähintään 110 kV:n johdoista. Jakeluverkko on paikallisten verkko-yhtiöiden hallussa oleva alle 110 kV:n jännitteinen sähköverkko, joka sisältää keskijännite- ja pienjänniteverkon. Eri jännitteille toimivat verkot on liitetty toisiinsa sähköasemien välityksellä. (Kara et al. 2004, 78.)

Suurjännitteinen kantaverkko on rakennettu pääasiassa ilmaeristeisinä eli sähköasemat ovat ulosasennettuja ja lähes kaikki siirtojohdot päällystämättömiä avojohtoja. Avojohtoverkossa on suurien jännitteiden takia suuret eristysvälit ja turvallisuussyistä johtojen on sijaittava korkealla ja verkon ympärille tarvitaan iso suoja-alue. Kantaverkon voimajohdot rakennetaan yleensä käyttäen harustettuja pylväitä. 400 kV:n johdoilla pylväiden materiaalina käytetään terästä ja 110 kV:n johdoilla puuta. Kantaverkossa kaapeleiden käyttö on vähäistä, koska ne ovat pitkillä siirtoetäisyyksillä kohtuuttoman kalliita. Jakeluverkossa keskijännitejohdot rakennetaan yleensä maaseudulla avojohtoina puupylväin ja teräsalumiinijohtimin. Kaupungeissa ja muissakin taajamissa keskijänniteverkko muodostuu maakaapeleista. (Kara et al. 2004, 79–82.) Sähkönsiirron häviöt ovat keskimäärin alle 4 %. (Vehviläinen et al. 2010, 37).

## **4 UUSIUTUVIIN ENERGIANTUOTANTOMUOTOIHIN LIITETYT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

Fossiilisten polttoaineiden käytöstä on siirryttävä uusiutuvien energialähteiden käyttöön niiden rajallisuudesta ja erityisesti haitallisista ympäristövaikutuksista johtuen. Yksikään energiantuotantotapa ei kuitenkaan ole vailla haitallisia ympäristövaikutuksia. Näiden ympäristövaikutusten huomioitta jättäminen voi vaarantaa koko liiketoiminnan menestyksen ja edelleen kestäväen energiajärjestelmän luomisen. Tässä osiossa kartoitetaan aurinko- ja tuulienergiantuotannon sekä metsäbiomassojen energiahyötykäytöstä aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Osiossa kartoitetaan myös energiansiirron ympäristövaikutuksia sekä uusiutuvan energian tuotannon mittavasta kasvusta aiheutuvia haasteita materiaalitaloudelle.

Aurinkoenergian ympäristövaikutusten kartoituksessa keskitytään yleisimpiin paneelitekniikoihin ja verkkoon kytkettyihin aurinkosähköjärjestelmiin. Tuulienergian tuotannon ympäristövaikutusten osalta keskitytään mantereelle pystytettyihin voimalaitoksiin. Metsäenergian ympäristövaikutusten osalta keskitytään metsätähteen polttolaitoksissa tapahtuvan energiahyötykäytön ympäristövaikutuksiin. Energiaketjun haitallisia ympäristövaikutuksia tarkastellaan huomioiden energiantuotantotapojen koko elinkaari. Energiansiirron osalta keskitytään lämmön ja sähkön siirron ympäristövaikutuksiin. Lopuksi nostetaan esille näkökulmia ja haasteita, joita on liitetty uusiutuvan energian tuotantokapasiteetin kasvuun ja materiaalitalouteen.

Tuuli- ja aurinkosähköntuotannolle on ominaista suuri kausittainen vaihtelu. Tästä kausittaisesta vaihtelevuudesta ja tuotannon rajallisesta ennustettavuudesta mahdollisesti aiheutuvia haasteita ja ympäristövaikutuksia ei käsitellä tässä työssä.

### **4.1 Aurinkoenergian ympäristövaikutukset**

Suurin osa aurinkosähköntuotannon ympäristövaikutuksista aiheutuu aurinkopaneelien tuotantovaiheessa energiantensiivisistä tuotantovaiheista johtuen. Aurinkopaneelien tuotantoprosesseissa tarvitaan myös myrkyllisiä ja räjähdysherkkiä kaasuja, kasvihuonekaasuja ja erilaisia syövyttäviä kemikaaleja. On kuitenkin arvioitu, että näiden mahdollisesti haitallis-

ten aineiden päästöjä voidaan minimoida tehokkaasti huolehtimalla tuotantoprosessien turvallisuudesta. (IPCC 2012, 370.)

Aurinkopaneelien valmistuksen energiantarve täytetään yleensä fossiilisiin energialähteisiin perustuvalla energiantuotannolla. Fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaa muun muassa luonnonvarojen ehtymistä sekä kasvihuonekaasujen ja happamoittavien yhdisteiden päästöjä. Energiaintensiivisin vaihe aurinkopaneelin valmistuksessa on kiteisen tai monikiteisen piin tuotanto. Puolijohdemateriaalin valmistamisen lisäksi energiaa kuluu paneelin kokoonpanoon, lasin, kehyksen ja muiden materiaalien valmistamiseen. Aurinkopaneelien valmistuksen energiatehokkuutta parantamalla voidaan pienentää aurinkopaneelin elinkaaren merkittävimpiä ympäristövaikutuksia. (Alsema & de Wild-Scholten 2005.)

Muita aurinkosähköjärjestelmiin liittyviä ympäristönäkökohtia ovat raaka-aineiden saataavuus sekä maan käyttö. Uusiutuvan energian tuotannon materiaalitarvetta on käsitelty enemmän osiossa 4.5. On arvioitu, että noin 80–96 % aurinkosähköjärjestelmissä käytettyä lasista, eteenivinyylisetaattipolymeereistä, telluurista, seleenistä ja lyijystä tullaan kierrättämään, kun tällä hetkellä käytössä olevat aurinkopaneelit tulevat elinkaarensa päähän. Näiden materiaalien kierrättäminen on jo nykyisellään taloudellisesti kannattavaa. Muiden metallien, kuten kadmiumin, tinan, nikkelin, alumiinin ja kuparin kierrätystä tulisi myös lisätä. (IPCC 2012, 370.)

Aurinkosähköntuotannon vaikutus maankäyttöön on riippuvainen järjestelmän sijainnista ja asennustavasta. Jos aurinkopaneelit asennetaan olemassa olevan tai uudisrakennuksen katolle ja kytketään suoraan verkkoon, eivät järjestelmät tarvitse yhtään maa-alaa. Rakennuksiin integroituja aurinkosähköjärjestelmiä varten ei tarvitse rakentaa uutta sähkönsiirtoverkostoa. Aurinkopaneelien valmistuksen vaikutus maankäyttöön on arvioitu hyvin vähäiseksi (Fthenakis & Kim 2009).

Käytön aikana aurinkosähköjärjestelmistä ei aiheudu mitään kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia päästöjä. Aurinkosähköjärjestelmät eivät myöskään aiheuta melua eivätkä kuluta uusiutumattomia luonnonvaroja käyttövaiheensa aikana. (IPCC 2012, 370.)



## 4.2 Tuulienergian ympäristövaikutukset

Tuulienergian tuotantoon liitettyjä ympäristövaikutuksia aiheutuu erityisesti sekä valmistus- että käyttövaiheessa. Valmistusvaiheen ympäristövaikutukset ovat suurimmaksi osaksi peräisin raaka-aineiden ja komponenttien valmistusprosesseista. Lisäksi rakentamis- ja erityisesti käyttövaiheessa tuulivoiman tuotannosta saattaa aiheutua haitallisia ympäristövaikutuksia, kuten muutoksia eri eläin- ja kasvilajien elinympäristössä sekä meluhaittoja. Tuulivoimalan elinkaaren kuuluvien kuljetusten aiheuttamat ympäristövaikutukset koetaan vähäisiksi. Elinkaaren aikana aiheutuviin haihtuvien hiilivetyjen (VOC)- ja typen oksidipäästöjen ( $\text{NO}_x$ ) synnyssä kuljetuksilla on kuitenkin suurempi rooli. (Arvesen & Hertwich 2012.)

Tuulivoimalan valmistusvaiheen merkittävimpiä ympäristövaikutuksia ovat kasvihuonekaasupäästöt ja materiaaliresurssien kulutus. Tuuliturbiinin ja perustusten valmistamisen kasvihuonekaasupäästöjen osuus voi olla 75–95% koko elinkaaren kasvihuonekaasupäästöistä. Kuljetuksesta, asennuksesta, verkkoon kytkennästä, käytöstä ja huollosta ja lopulta käytöstä poistosta aiheutuvien kasvihuonekaasujen osuus on tällöin suhteessa vähäinen. Materiaalien kierrätyksen elinkaaren loppuvaiheessa on arvioitu vähentävän tuulivoimalan elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä noin 19 prosenttia.

Tuulivoimarakentamisessa käytetään raaka-aineena paljon eri metalleja ja perustuksissa sementtiä. Tuulivoimarakentamiselle tärkeitä metalleja ovat erityisesti rauta, kupari, alumiini ja nikkeli. Tuulivoimaloiden generaattorien kestopagneeteissa käytetään yhä useammin neodyymiä, joka kuuluu harvinaisten maametallien ryhmään. Neodyymin saatavuus voi tulevaisuudessa osoittautua haasteelliseksi. Kierrätyksen arvellaan kuitenkin lieventävän rajoituksia primääriraaka-aineiden saatavuudessa tulevaisuudessa. (Arvesen & Hertwich 2012; Kleijn et al. 2011.) Uusiutuvan energian materiaalientarvetta on käsitelty enemmän osiossa 4.5.

Tuulivoimaloiden vaikutukset lintuihin ja lepakoihin ovat herättäneet maailmanlaajuisesti paljon huomioita (IPCC 2012, 573). Tuulivoiman linnustovaikutukset voidaan jakaa kahteen tekijään: törmäysriski ja rakentamisen aiheuttama ympäristömuutosriski. Suomessa

tehdyn selvityksen mukaan lintujen törmäysriski tuulivoimaloihin on pieni. Kartoittamalla tuulivoimarakentamisen vaikutukset lintujen elinympäristöön ja edelleen rakennuspaikan huolellisella valinnalla voidaan minimoida vaikutukset linnustoon. Tuulivoimarakentamisen ajoittaminen pesimäkauden ulkopuolelle pienentää paikallista populaatoriskiä. (Koistinen 2004, 30–31.)

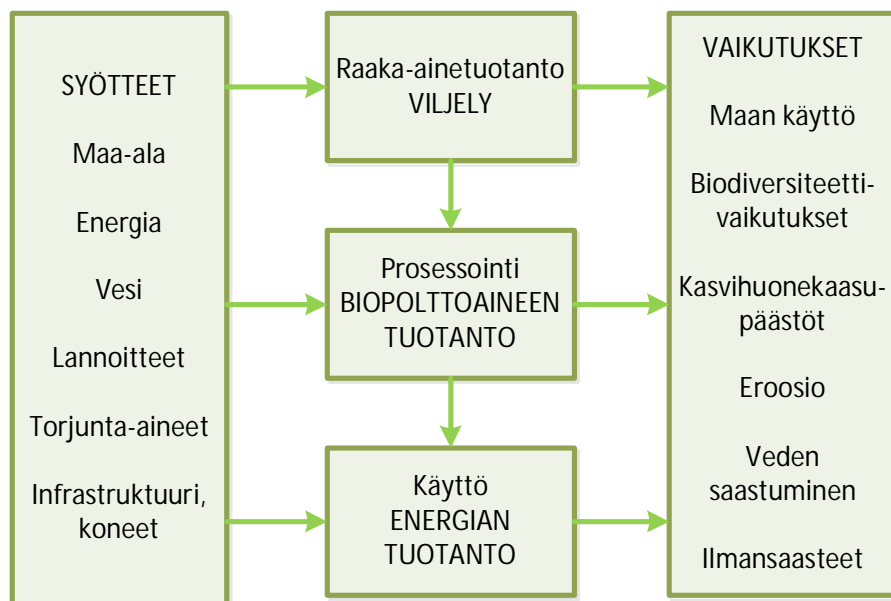
Tuulivoimaloiden sijoituspaikalla voi olla vaikutusta myös laajemmin kasvi- ja eläinlajistoon. Tällaisia vaikutuksia ovat esimerkiksi alueen välttely, poismuutto alueelta ja häiriöt lisääntymisessä. Näiden vaikutusten merkityksellisyydestä on vielä suhteellisen vähän tietoa verrattuna linnustovaikutuksiin. Elinympäristönmuutoksesta aiheutuvat vaikutukset ovat kuitenkin hyvin laji- ja paikkasidonnaisia, joten haitalliset vaikutukset voidaan minimoida välttämällä tuulivoimarakentamista ekologisesti herkille alueille. (IPPC 2012, 573.)

Tuulivoiman merkittävimpiä käytönaikaisia ympäristövaikutuksia ovat meluhaitat. Tuulivoimalan aiheuttama melu voidaan jakaa mekaaniseen ja aerodynaamiseen meluun. Mekaaninen melu syntyy tuuliturbiinin liikkuvissa osissa kuten vaihdelaatikossa, generaattorissa ja laakereissa. Mekaanisen melun syntyyn vaikuttaa normaali kuluminen, huono komponenttisuunnittelu ja ennalta ehkäisevän huollon puute. Aerodynaaminen melu syntyy ilmavirran liikkussa tuulivoimalan lapojen yli ja ohitse. Aerodynaamista melua aiheutuu yleensä sitä enemmän, mitä nopeammin roottori pyörii. Mitä hitaammin lapojen kärjet liikkuvat, sitä vähemmän melua aiheutuu. Lapojen reagointi ilmakehän turbulenssien kanssa aiheuttaa suihkivan äänen, joka koetaan erityisen häiritseväksi. Mekaanisen melun syntyyn voidaan vaikuttaa eniten komponenttien suunnitteluvaiheessa ja lisäämällä melueristystä turbiinikoteloinnin sisään ja asentamalla värähtelyä vaimentavat tuet laitteistolle. Aerodynaamista melua voidaan pyrkiä vähentämään asiantuntevalla lapasuunnittelulla. (Saidur et al. 2011, 2428.)

Meluhaittojen lisäksi tuulivoimalan pyörivistä lavoista aiheutuu aurinkoisella säällä liikkuvia varjoja, jotka saattavat häiritä tuulivoimalan lähellä asuvia. Asiantuntevalla tuulivoimarakentamisen suunnittelulla voidaan välttää tuulivoimantuotannon sijoittaminen liian lähellä asutusta, katuja, rautateitä ja lentokenttiä sekä pyrkiä minimoimaan vaikutukset linnustoon ja muuhun kasvi- ja eläinlajistoon. (IPPC 2012, 576–577.)

### 4.3 Metsäenergian ympäristövaikutukset

Metsäbiomassan tuotannon kannalta merkittävänä ympäristövaikutusluokkina pidetään luonnon monimuotoisuutta, maaperän tuottokykyä ja eroosiota sekä rehevöitymistä. Käyttövaiheessa olennaisia ympäristövaikutuksia ovat polton päästöt ilmaan ja edelleen vesistöihin ja maaympäristöön. Lisäksi ilmastonmuutos ja kokonaisenergiatase ovat metsäenergian elinkaaren kokonaisuuden kannalta ratkaisevia. Aurinko- ja tuulienergian ohella metsäenergian käyttöä fossiilisten polttoaineiden sijaan pidetään yhtenä keinona hillitä ilmastonmuutosta. Metsäenergian ja aiheutuvien ilmastovaikutusten suhde ei kuitenkaan ole yksinkertainen. Erityisen suuri merkitys metsäenergiantuotantoketjussa on sillä, miten tuotantoketju vaikuttaa metsien hiilivarastoon. (Hildén et al. 2013, 138.) Metsäenergiantuotannon kestävyysnäkökohtia ja tärkeimpiä ympäristövaikutuksia on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8.** Metsäbiomassojen energiahyötykäytön kestävyysarvioinnissa huomioon otettavia seikkoja ja tuotantoketjun tärkeimpiä ympäristövaikutuksia. (Hildén et al. 2013, 188.)

Metsäenergiantuotannossa kasvihuonekaasupäästöjä syntyy monessa vaiheessa energiatuotantoketjua. Eniten kasvihuonekaasupäästöjä syntyy metsien hiilitalouden muutoksista ja metsähakkeen poltosta. Biomassan korjuussa ja kuljetuksessa käytettävien koneiden päästöjen osuus on vain muutamia prosentteja kokonaispäästöistä. Metsäbiomassaa varastoitaessa voi syntyä biologisesta hajoamisesta tai materiaalihävikistä johtuvia huomattaviakin

kasvihuonekaasupäästöjä. Nämä päästöt tunnetaan kuitenkin vielä verrattain huonosti. (Hildén et al. 2013, 140, 190.)

#### **4.3.1 Metsäpolttoaineiden tuotantoketjun ympäristövaikutukset**

Suomessa metsäenergiantuotannosta aiheutuvaksi merkittäväksi ongelmaksi on koettu erityisesti vesistöjen rehevöityminen. Metsäenergiantuotannosta aiheutuvat rehevöittävät päästöt ovat seurausta erityisesti tuotantovaiheessa korjuusta, polttoaineen kuljetuksista ja työkoneiden käytöstä. Metsänhakkuiden ja maanmuokkauksen jälkeen pohjaveden nitraatipitoisuus voi kohota hieman. Lisäksi turvemaiden fosforilannoitusalan kasvun on arvioitu lisäävän jonkin verran metsätalouden aiheuttamaa fosforikuormitusta ja uudishakkuualueilla on todettu muutamia vuosia kestävästä fosforin huuhtouman lisääntymistä. (Antikainen et al. 2007, 50–51.)

Metsätalouden asiantuntijat ovat olleet huolissaan siitä, että hakkuutähteiden mukana metsistä viedään pois ravinteita. Tämä saattaa johtaa lannoituksen lisäämiseen, mikä aiheuttaa riskin ravinnekuormituksen lisääntymisestä. Lannoitteiden tarpeen lisääntyessä myös niiden tuotannon ja levityksen energiankulutus kasvaa. Kantojen noston vaikutuksia erityisesti eroosioon ja partikkeleihin sitoutuneen fosforin osalta pidetään merkittävämpänä kuin uudishakkuista ja oksien ja latvusten poistosta aiheutuvia vaikutuksia. Esimerkiksi Suomessa metsätalous on yksi tärkeimpiä luonnon monimuotoisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Suuri osa suomalaisista metsälajeista on riippuvainen lahoppuusta, jonka määrä on vähentynyt metsätalouden vuoksi ja energiapuun korjuussa tämän monimuotoisuudelle tärkeän resurssin määrä vähenee edelleen. Suunnitelmat lisätä merkittävästi hakkuutähteiden korjuuta aiheuttavat lisäpainetta metsäluonnon monimuotoisuuskehitykselle. (Antikainen et al. 2007, 51–56.)

#### **4.3.2 Metsäbiomassojen polton ympäristövaikutukset**

Metsäpolttoaineiden poltosta aiheutuvat rikkidioksidipäästöt ilmaan ovat pääsääntöisesti alhaisemmat verrattuna vastaaviin fossiilisiin polttoaineisiin, koska metsäpolttoaineiden rikkipitoisuus on hyvin pieni. Esimerkiksi puun rikkipitoisuus on alle 0,02 % kun taas kivihien rikkipitoisuus on noin 1 %. Voimalaitosmittakaavassa vertailtuna metsäpolttoai-

neen tuotannon ja polton aikaiset SO<sub>2</sub>-päästöt ovat noin kymmenen kertaa pienemmät kuin turpeen ja kivihiilen tuotannon ja polton. Metsäpolttoaineiden NO<sub>x</sub>-päästöt voimalaitoksista eivät merkittävästi eroa vastaavista fossiilisten polttoaineiden aiheuttamista päästöistä.

Metsäbiomassoista tuotetun energian vaikutukset yläilmakehän otsonin vähenemiseen ovat vähäiset. Voimalaitosmittakaavassa sekä puun tuotannon että polton vaikutus alailmakehän otsonin muodostumiseen on alhaisempi kuin maakaasulla ja kivihiilellä. Metsäpolttoaineiden käyttö suurissa voimalaitoksissa ei myöskään aiheuta merkittävästi PAH-, dioksiini- tai raskasmetallipäästöjä. Voimalaitoskokuoluokassa puupolttoaineiden polton pienhiukkaspäästöt ovat samaa suurusluokkaa kuin vastaavien kiinteiden fossiilisten polttoaineiden polton pienhiukkaspäästöt, kun voimalaitokset on varustettu asianmukaisilla savukaasujen puhdistuslaitteistoilla. (Antikainen et al. 2007, 46–52.)

#### **4.3.3 Metsäbiomassojen energiahyötykäytön vaikutus metsän hiilivarastoille**

Metsien hiilivarastot ovat syntyneet, kun yhteyttävät kasvit ovat sitoneet ilmakehästä hiilidioksidia biomassansa ja maaperään. Hiilivarasto kasvaa silloin, kun puustoa tulee lisää tai maaperään kertyy lisää hiiltä. Kun metsä sitoo enemmän hiiltä kuin siitä vapauttaa, sitä kutsutaan hiilinieluksi. Kaikki metsästä korjattu biomassa vähentää metsien hiilivarastoa verrattuna tilanteeseen, jossa tämä aines jätettäisiin korjaamatta. Metsät muodostavat huomattavan osan maaekosysteemin hiilinieluista. Suomessakin metsät toimivat hiilinieluinä. Nielu voimistuu, jos metsänkasvu kiihtyy, maaperän hajotustoiminta hidastuu tai metsistä korjataan aiempaa vähemmän puita. Päinvastaisissa tilanteissa hiilinielu heikkenee. Hiilivarstojen ja -nielujen kehittyminen on kiinni sekä luontaisista tekijöistä että metsien käsittelystä. (Hildén et al. 2013, 139.)

Metsäenergian rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä perustuu fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen. Metsästä korjatun biomassan ajatellaan korvautuvan uudella biomassalla, jonka kasvu sitoo ilmakehästä hiiltä. Fossiilisten polttoaineiden varastot eivät uusiudu eivätkä täten sido hiiltä. Koska metsillä ja metsämailla on tärkeä osa hiilen kierrossa ja maapallon ilmastojärjestelmässä, puupohjaisen energian käyttöä ilmastonmuutoksen hillintäkeinona on syytä arvioida sekä energiantuotannon päästöjen että metsien hiilinielujen kaut-

ta. Lisäksi on otettava huomioon päästö- ja nieluvaikutusten ajoittuminen, koska vain kokonaisvaltaisella tarkastelulla voidaan arvioida metsäenergian todellista ilmastovaikutusta. (Hildén et al. 2013, 139.)

Kuten aiemmin todettiin, energiantuotantoon Suomessa käytetään pääasiassa sellaista puubiomassaa, joka ei kelpaa metsäteollisuudelle. Energiantuotantoon käytetty metsähake tehdään pääasiassa hakkuutähteistä, kuten puiden oksista ja latvoista, hakkuualalta nostettavista kannoista, hakkuualojen viallisista puista sekä nuorten metsien ensiharvennuksista saatavasta pienikokoisesta puusta. Jos tähdepuuta ei korjattaisi pois, jäisi sen täydentämään metsän hiilivarastoa, kunne se vähitellen lahoaisi vapauttaen siihen sitoutuneen hiilen hiilidioksidina ilmakehään. Kun tähdepuu haketetaan ja poltetaan, siihen sitoutunut hiili vapautuu välittömästi ilmakehään hiilidioksidina. Tähdepuun energiakäyttö pienentää metsän hiilivarastoa. (Hildén et al. 2013, 140.)

Metsäenergian tuotannolla saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset vaihtelevat hakkeen raaka-aineen, siitä mahdollisesti tuotettavan polttoaineen, tarkastelujakson pituuden ja korvattavan polttoaineen mukaan. Kun energiantuotanto metsähakkeesta aloitetaan, ilmakehään vapautuu saatua energiamäärä kohden suurin piirtein saman verran hiilidioksidia kuin poltettaessa kivihiiltä. Kun energian tuottamista metsähakkeesta jatketaan, kertynyttä energiamäärää kohti lasketut hiilidioksidipäästöt vähenevät, koska hiilidioksidia vapautuisi tähdepuusta metsässäkin lahoamisen seurauksena. Fossiilisilla polttoaineilla luontaista lahoamista ei tapahdu, joten päästöt ovat yhtä suuret tarkastelujaksosta riippumatta. Puun hajoamisnopeuteen vaikuttavat Suomessa eniten lahoavan puukappaleen koko, ilmasto-olot ja puulaji. Näistä tärkein vaikuttava tekijä on puukappaleen koko. Oksat hajoavat huomattavasti nopeammin kuin kannot ja Pohjois-Suomessa lahoaminen tapahtuu viileämmän ilmaston takia hitaammin verrattuna muuhun Suomeen. (Hildén et al. 2013, 141–142.)

On arvioitu, että jos metsäenergia tuotetaan hakkuutähteiden oksista, päästöt putoavat öljyn ja maakaasuun päästöjä pienemmiksi muutamassa vuodessa. Kantoja käytettäessä tähän päästöjen putoamiseen kuluu 20–40 vuotta. Sadan vuoden tasaisena jatkuvan käytön jäl-

keen oksaenergian päästöt jäävät noin viidesosaan kivihiilen käytön päästöistä kantoenergian päästöjen jäädessä noin puoleen kivihiilen päästöistä. (Hildén et al. 2013, 142.)

#### **4.4 Energian siirron ympäristövaikutukset**

Energian siirron ympäristövaikutusten tunteminen on tärkeä osa kestävän energiajärjestelmän luomista. Sähköverkolla ja sähköverkon älykkäällä käytöllä on tärkeä rooli uusiutuvan energian tuotantomäärien lisäämisessä ja liikenteen sähköistämässä. Älykkään sähköverkon luomiseksi nykyistä sähköverkkoa täydennetään muun muassa tietoliikenneverkolla ja älykkäällä energiankäytön seurannalla (Energiateollisuus 2014). Vaikka sähkönsiirto- ja jakeluverkon toiminta tulee muuttumaan ja kehittymään, tulevat verkot edelleen koostumaan voimajohdoista ja -kaapeleista, sähköasemista ja jakelumuuntamoista. Älykkään sähköverkon potentiaalinen kokonaisvaltainen ymmärtäminen osana kestävää energiajärjestelmää edellyttää nykyisen sähköverkon ympäristövaikutusten kattavaa tuntemista. (Edgar & Hertwich 2013.)

Sähkön ja lämmön siirron ympäristövaikutuksia ovat muun muassa siirron ja jakelun häviöiden aiheuttama energiankulutus ja siitä aiheutuvat päästöt, siirto- ja jakelujärjestelmien maa-alan tarve sekä rakentamisen ja kunnossapidon välillinen ja välitön energiankulutus ja päästöt. Lämmön siirrossa ympäristövaikutuksia aiheutuu vielä lisäksi lämpöverkon veden pumppauksen energiankulutuksesta. (Hellgren et al. 1996, 127–128.)

Norjan kantaverkolle (Sentralnett) laaditussa elinkaariarvioinnissa havaittiin, että haitalliset ympäristövaikutukset aiheutuvat pääasiassa käyttövaiheen aikaisista siirtohäviöistä. Tutkimuksessa havaittiin myös muiden elinkaaren vaiheiden, kuten laitteiston asennuksen, huollon ja purkamisen, vaikuttavan merkittävästi tiettyjen ympäristövaikutusten syntymiseen. Norjan arvioinnissa noin puolet kaikista ympäristövaikutuksista aiheutuu siirtohäviöiden takia lisääntyneestä energiantuotannosta ja puolet sähkönsiirtoinfrastruktuurin valmistamisesta, asentamisesta ja purkamisesta. (Jorge & Hertwich 2013.)

Siirtohäviöiden merkitys kokonaisuuden kannalta on riippuvainen sähköntuotannon päästöistä. Euroopan keskimääräisillä sähköntuotannon päästöillä siirtohäviöistä johtuvien ym-

päristövaikutusten osuus kokonaisvaikutuksista on 94 %. Euroopan sähköntuotannon päästöprofiililla siirtohäviöiden merkitys on suuri muun muassa seuraavissa ympäristövaikutusluokissa: ilmastonmuutos, fossiilisten polttoaineiden ja vesivarojen ehtyminen, rehevöityminen, humaanitoksisuus, otsonikato, pienhiukkasten muodostuminen sekä maaperän happamoituminen. Jos siirtohäviöitä ei huomioida, kantaverkon infrastruktuurin valmistuksen, käytön ja purkamisen kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat pääasiassa maanpäällisten voimalinjoiden valmistuksesta, kaasueristeisten muuntoasemien SF<sub>6</sub>-päästöistä sekä muuntajien valmistuksesta. (Jorge & Hertwich 2013.)

Sähkönsiirron- ja jakeluverkon ja niiden varusteiden maankäyttövaikutukset aiheutuvat pääasiassa ilmajohtojen vaatimien johtokadujen raivaamisesta metsäalueille. Johtokadun leveys riippuu verkon jännitteestä, johdintyyppistä ja käytettävistä pylväsrakenteista. Kanta- ja jakeluverkon ympärille metsäalueille vaadittu johtokadun leveys on luokkaa 26–43 m kantaverkolle ja 10 m jakeluverkolle. (Hellgren et al. 1996, 127.)

Suurin osa lämmön siirron ympäristövaikutuksista aiheutuu lämmön siirtoverkoston käytön aikana lämmön siirtohäviöistä ja lämmön tuotannon päästöistä. Toiseksi merkittävin elinkaaren vaihe on valmistusvaihe ja erityisesti lämmönsiirtoputkien valmistus. (Persson et al. 2006.) Lämpöverkot rakennetaan, toisin kuin sähköverkko, yleensä pääosin jo rakennetuille teialueille tai niiden välittömään läheisyyteen. Tästä johtuen lämpöverkkojen maa-alan tarve on kohtalaisen pieni. Lämpöverkoston veden pumppaamiseen on arvioitu kuluvan noin 0,7 % siirretystä lämpöenergiasta. (Hellgren et al. 1996, 129.)

## **4.5 Uusiutuva energia ja materiaalitalous**

Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä siihen liittyvien laitteiden, koneiden ja järjestelmien raaka-aineiden, erityisesti metallien kulutukseen, on alettu kiinnittää huomiota. Metallien käyttöön liittyy useita kestävyysnäkökohtia, kuten raaka-aineiden riittävyys, kaivostoiminnan ympäristövaikutukset ja vaihtelevat markkinahinnat. Raaka-ainehintojen vaikea ennustettavuus vaikuttaa uusiutuvaan energiatuotantoteknologioihin tehtäviin investointeihin. (Schelter 2012.)



Metallien käyttöä raaka-aineena voidaan lähestyä kahdesta näkökulmasta. Osa uusiutuvan energian tuotantoteknologioista käyttää raaka-aineenaan metalleja, joiden saatavuus on haasteellista lähinnä maantieteellisesti epätasaisesti jakautuneen tuotannon takia. Näihin metalleihin kuuluviksi luetaan usein muun muassa kaikki lantanoidit, skandium sekä yttrium ja niihin viitataan usein nimellä harvinaiset maametallit. Näiden metallien käyttöön liittyy monia kestävyysnäkökohtia, kuten kaivostoiminnan ympäristövaikutukset ja kapeasta tuottajakentästä johtuvat vaihtelevat markkinahinnat. Suuri osa näiden metallien tuotannosta tapahtuu Kiinassa, jossa kaivosteollisuuden aiheuttamien ympäristövaikutusten tiedetään olevan mittavia. Raaka-ainehintojen vaikea ennustettavuus vaikuttaa uusiutuvaan energia-tuotantoteknologioihin tehtäviin investointeihin. (Schelter 2012.)

Toinen näkökulma on, että uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä kaikkien materiaalien tarve kasvaa merkittävästi. Uusiutuviin energialähteisiin perustuvan energian tuotantokapasiteetin merkittävä kasvu nykyiseen nähden tarkoittaa myös merkittävää raaka-ainetarpeen kasvua. Energiantuotannon materiaalitarve riippuu suuresti siitä, mitä teknologista sovellusta tarkastellaan. Esimerkiksi yksi- ja monikidepiikkenojen yleistyminen lisää hopeantarvetta ja uusien, tehokkaampien ja vähän huoltoa vaativien tuulivoimaloiden suora- käyttöturbiinien kestopagneeteissa käytetään neodyymia. Neodyymi luokitellaan usein harvinaiseksi maametalliksi. (Klejin et al. 2011.)

Uusiutuvasta energiantuotannosta materiaalitaloudelle mahdollisesti aiheutuvat haasteet ovat riippuvaisia monesta tekijästä. Yksi merkittävä tekijä on se, pystytäänkö materiaalin saatavuuden kannalta kriittisimpiä raaka-aineita korvaamaan toisilla. Raaka-aineiden korvattavuudella on kuitenkin rajansa ja siirtyminen materiaalista toiseen saattaa vain siirtää niukkuus- tai ympäristöongelman sektorilta toiselle tai laskea sovelluksen kokonaishyötysuhdetta. Energiantuotantosektorin lisäksi energiajärjestelmän muutos tulee vaikuttamaan myös muiden sektoreiden, kuten autoteollisuuden, materiaalitarpeisiin. (Klejin et al. 2011.) Materiaalien tehokkaamman kierrättämisen on arvioitu tapapainottavan materiaalitaloutta, mutta on selvää, että helpon energian aika on ohi myös materiaalitalouden näkökulmasta ja myös tämä haaste on huomioitava kestävän energiajärjestelmän luomisessa.

## 5 ELINKAARIARVIOINTI

Elinkaariajattelua voidaan käyttää tuotteiden ja palveluiden elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten tai materiaalien ja energiankulutuksen vähentämiseen. Tavoitteena on välttää tilanne, jossa haitalliset ympäristövaikutukset tai materiaalien tai energian kulutus lisääntyisivät jossain kohtaa tuoteketjua, kun niitä toisaalla yritetään vähentää. Elinkaariarviointia (Life Cycle Assessment, LCA) pidetään erilaisista elinkaarimenetelmistä tieteellisimpänä. Lisäksi elinkaariarviointi mahdollistaa kattavimmin erilaisten vaikutusten huomioon ottamisen. Elinkaariarviointi kattaa täydellisimmillään kaikki tuotteen tai palvelun edellyttämät toiminnot raaka-aineiden hankinnasta tuotteiden hylkäämiseen asti. Koko elinkaaren käsittävää tarkastelua kutsutaan kehdosta hautaan tarkasteluksi. (Antikainen 2012, 10, 16: ISO 14044, 8.)

Tietoa tuotteen tai palvelun elinkaarivaikutuksista voidaan käyttää moniin tarkoituksiin, kuten ympäristösuorituskyvyn parantamismahdollisuuksien tunnistamiseen, teollisuuden, julkishallinnon tai järjestöjen päätöksenteon tukena, olennaisten ympäristösuorituskyvyn indikaattorien ja niiden mittausmenetelmien valinnassa sekä tuotteiden markkinoinnissa. Tarpeet tiedon laajuudesta, tarkkuudesta ja määrästä vaihtelevat käyttökohteen mukaisesti. (ISO 14044, 8.)

Kansainvälisen standardointijärjestön ISO:n 14040-sarjan standardit antavat kehykset elinkaariarvioinnille. Lisäksi elinkaariarvioinnin käytännön toteutuksen tueksi on laadittu kansainvälisiä ohjeistuksia. Euroopan komission johdolla on laadittu kattava International Reference Life Cycle Data System eli niin kutsuttu ILCD handbook -käsikirja. Kansainvälinen kehitystyö elinkaariarvioinnin parissa jatkuu edelleen muun muassa Yhdistyneiden kansakuntien UNEPin ja SETACin eli Society of Environmental Toxicology and Chemistryn yhteistyönä. Lisäksi muun muassa Euroopan yhteisö on perustanut elinkaarifoorumin, jonka tarkoituksena on parantaa elinkaaritiedon saatavuutta ja ohjeistaa edelleen hyviä elinkaariarvioinnin käytäntöjä. (Antikainen et al. 2012, 13–16.)

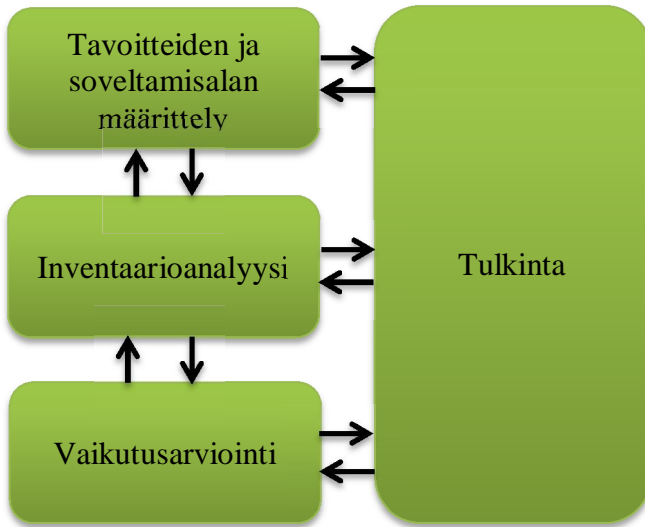
Elinkaariarvioinnin lähestymistavat ovat jakaantuneet kahteen pääasialliseen linjaan, haitanjaolliseen ja seurausvaikutukselliseen elinkaariarviointiin. Haitanjaollisessa elinkaariarvioinnissa huomioidaan kaikki tuotteeseen liittyvät energia- ja materiaalivirrat kaikissa

elinkaaren vaiheissa ottamatta huomioon niiden merkitystä, mikäli tuotejärjestelmässä tapahtuu muutoksia. Haitanjaollisella lähestymisellä tehty elinkaariarviointi edustaa muuttumatonta tuotejärjestelmää keskimääräisessä toimintatilanteessa. Seurausvaikutuksellisella lähestymistavalla pyritään selvittämään mahdollisten päätösten vaikutus tuotejärjestelmän energia- ja materiaalivirtoihin. Tämän takia seurausvaikutukselliseen elinkaariarviointiin sisällytetään ainoastaan ne tekijät, joihin tarkasteltavat päätöksentekotilanteet vaikuttavat. (Plevin et al. 2014.)

Haitanjaollista elinkaariarviointia käytetään tyypillisesti tuotteen merkittävimpien ympäristövaikutusten selvittämisessä, ympäristötuoteselosteiden laadinnassa ja yleisen tuoteinformaation laadinnassa. Seurausvaikutuksellista elinkaariarviointia käytetään mahdollisten tuotejärjestelmässä tapahtuvien muutosten aiheuttamien vaikutusten selvittämiseen, jolloin tyypillisiä sovelluskohteita ovat esimerkiksi tuotekehitysprosessit ja poliittinen päätöksenteko. (Weidema 2003, 11.)

## **5.1 Elinkaariarvioinnin vaiheet**

Standardisarja ISO 14040 mukaisesti elinkaariarvioinnin vaiheet ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulkinta. Kaikki elinkaariarvioinnin vaiheet ovat iteratiivisia prosesseja, jolloin on aina mahdollista palata aiempiin vaiheisiin ja tarkistaa niiden lähtökohtia. (Antikainen 2010, 16.) Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta ja niiden keskinäiset suhteet on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta ja niiden keskinäiset suhteet. (ISO 14044 2006.)

### 5.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Elinkaariarvioinnin tavoitteet ja soveltamisala tulee määritellä selkeästi ja niiden tulee olla yhteensopivia aiotun soveltamiskohteen kanssa. Elinkaariarvioinnin tavoitteisiin kirjataan sen aiottu käyttötarkoitus, selvityksen tekemisen syyt, aiottu kohdeyleisö ja onko tuloksia tarkoitus käyttää julkisesti esitettävissä vertailuväitteissä. Elinkaariarvioinnin iteratiivisen luonteen takia selvityksen tavoitteet ja soveltamisala saattavat tarvita tarkennusta selvityksen aikana. Tällaiset muutokset perusteluineen tulee dokumentoida elinkaariarvioinnista laadittavaan raporttiin. (ISO 14044 2006, 22–23.)

Elinkaariarvioinnin soveltamisalassa määritellään selkeästi järjestelmän toiminnot ja toiminnallinen yksikkö. Toiminnallisen yksikön valinta edellyttää tutkittavan tuotejärjestelmän tai -järjestelmien perusteellista tuntemusta ja ymmärrystä. Toiminnallisen yksikön valintaan on kiinnitettävä erityisesti huomiota, koska se vaikuttaa olennaisesti saataviin tuloksiin. Toiminnallinen yksikkö muodostaa vertailuyksikön, jonka suhteen syöte- ja tuotos-tiedot voidaan normalisoida. Tämän takia toiminnallisen yksikön tulee olla selvästi määriteltä ja mitattavissa. (Antikainen et al. 2012, 34; ISO 14044 2006, 22–24.)

Elinkaariarvioinnissa tuotetta tai palvelua käsitellään omana tuotejärjestelmänä. Tuotejärjestelmä suorittaa yhden tai useamman toiminnon. Tuotejärjestelmä koostuu yksikköpro-

sesseista. Yksikköprosessit yhdistetään toisiinsa välivalmistevirroilla, jätteenkäsittelyyn johtavilla virroilla tai molemmilla. Toisiin tuotejärjestelmiin yksikköprosessit yhdistetään tuotevirroilla ja ympäristöön perusvirroilla. Perusvirtoja ovat tarkasteltavaan prosessiin ympäristöstä tuleva materiaali tai energia, jota ihminen ei ole vielä jalostanut tai tarkasteltavasta järjestelmästä ympäristöön lähtevä materiaali tai energia, jota ihminen ei enää käsittele. (ISO 14040 2006, 16, 26.)

Tuotejärjestelmän rajauksen valintaan vaikuttavat ennen kaikkea tavoitteen asettelu ja elinkaariarviointiin valittu lähestymistapa. Haitanjaollisissa elinkaariarvioinneissa tuotejärjestelmään sisällytetään yleensä kaikki tuotteen elinkaaren vaiheet. Seurausvaikutuksellisissa elinkaariarvioinneissa, joissa tarkastellaan yleensä jonkin päätöksen seurauksena tapahtuvaa muutosta, tuotejärjestelmään sisällytetään ne prosessit, joihin päätöksenteko vaikuttaa. Yksikköprosesseja, joihin muutos ei vaikuta, voidaan rajata tuotejärjestelmän ulkopuolelle. (Plevin et al. 2014.)

Edelle mainittujen osien lisäksi soveltamisalan määrittelyyn kuuluu muun muassa allokontimenettelyiden, vaikutusluokkien ja vaikutusarvioinnin, käytettyjen tulkintatapojen, tiedoille asetettujen vaatimusten, olettamusten, rajoitusten, lähtötietojen laatuvaatimusten, mahdollisen kriittisen arvioinnin ja selvityksessä vaadittavan raportin tyyppin sekä muodon kuvaus. (ISO 14044 2006, 22–24.)

### **5.1.2 Inventaarioanalyysi**

Elinkaariarvioinnin inventaariovaiheessa kartoitetaan tarkastellun tuotejärjestelmän käyttämät energia-, materiaali- ja kemikaalipanokset sekä aiheutetut päästöt ja syntyvät jätteet. Nykyään pyritään yhä useammin arvioimaan myös maankäyttötietoja. (Antikainen et al. 2012, 16.) Tiedonkeruu voi vaatia paljon voimavaroja ja sen käytännön rajoitukset on hyvä ottaa huomioon soveltamisalassa ja dokumentoida selvityksen raportoinnissa (ISO 14040 2006, 34).

Tiedonkeruun jälkeen tiedot suhteutetaan tuotejärjestelmän yksikköprosesseihin ja toiminnallisen yksikön vertailuvirtaan. Näin muodostetaan määritellyn järjestelmän jokaisen yk-

sikköprosessin sekä mallinnettavan tuotejärjestelmän toiminnallisen yksikön inventaariotulokset. (ISO 14040 2006, 34.)

Harvat teollisuusprosessit tuottavat vain yhtä tuotosta tai perustuvat raaka-ainesyötteiden ja -tuotosten suoraviivaiseen kulkuun. Lisäksi eri tuotejärjestelmillä saattaa olla yhteisiä prosesseja. Saattaa myös käydä niin, että alkuperäisten rajausten perusteella tuotejärjestelmien väliset vertailut eivät olisi vertailukelpoisia. Tällaisten tilanteiden selvittämiseen on olemassa erilaisia toimintatapoja. Suositelluina olisi jakaa yksikköprosessit kahteen tai useampaan alaprosessiin tai laajentaa tuotejärjestelmä kattamaan rinnakkaistuotteisiin liittyvät lisätoiminnot. Jos kumpaakaan edellä mainituista menettelytavoista ei voida noudattaa, järjestelmän syötteet ja tuotokset täytyy allokoida sen tuotteille ja toiminnoille. Allokoinnissa syötteet ja tuotokset voidaan kohdentaa muun muassa fysikaalisten tai taloudellisten suhteiden perusteella. (ISO14044 2006, 38.) Allokointia ja sen välttämistä on käsitelty laajemmin kohdassa 5.2.

### 5.1.3 Vaikutusarviointi

Pelkkien inventaariotietojen pohjalta on vaikeaa tehdä johtopäätelmiä ketjun aiheuttamista vaikutuksista ympäristössä, minkä takia elinkaariarviointiin sisältyy vaikutusarviointiprosessi. Vaikutusarvioinnissa inventaarion tulokset ryhmitellään syy-seuraus-suhteiden perusteella vaikutusluokkiin ja inventaariotulokset muutetaan näiden mukaisiksi ympäristövaikutusluokkaindikaattorituloksiksi. (Antikainen et al. 2012, 16–17.)

Tällä hetkellä elinkaariarvioinnissa käytettävä vaikutusluokkajako voi olla joko keskipistetai loppupistemennetelmään perustuva. Keskipistemennelmä tarkoittaa vaikutusarviointimetodiikkaa, jossa arviointi pysäytetään johonkin tiettyyn ”keskivaiheeseen” syy-seurausketjussa. Esimerkiksi happamoitumisilmiötä kuvataan protonien potentiaalisella irtautumisella maaperässä. Tällöin vaikutusarviointia ei viedä happamoitumisessa joidenkin eliölajien häviämisen arviointiin asti. (Antikainen et al. 2012, 41.)

Yleisesti käytettyjä keskipistevaikutusluokkia ovat muun muassa (Antikainen et al. 2012, 16–17):

- ilmastonmuutos
- otsonikato
- happamoituminen
- rehevöityminen
- hengitysvaikutukset (pienhiukkaset)
- fotokemiallinen (alailmakehän) otsonin muodostuminen
- ekotoksisuus
- humaanitoksisuus
- luonnonvarojen ehtyminen

Loppupistemethodessa pyrkimyksenä on yhdistää keskipisteluokat esimerkiksi kolmeksi vaikutusluokaksi, kuten ihmisten terveys, luonnon ympäristö ja luonnonvarat. Tämän lähestymistavan ongelmana on kuitenkin se, että yhdistämisessä joudutaan tekemään paljon oletuksia syy-seuraus-ketjuista ja lopputulosta ei voida pitää kovin tieteellisenä. Tästä johtuen keskipistevaikutusarviointi on elinkaariyhteisön suosittama lähestymistapa. (Antikainen et al. 2012, 41.)

Elinkaariarvioinnin vaikutusarvioinnin perustana on karakterisointi. Karakterisoinnissa tarkasteltaville tuotevaihtoehdoille lasketaan eri vaikutusluokkaindikaattoritulokset. Esimerkiksi ilmaston muutosta aiheuttavat päästöt yhteismitallistetaan CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi. Erilaisten vaihtoehtojen ympäristösuorituskykyä vertailtaessa kaikki vaihtoehdot eivät välttämättä asetu samaan järjestykseen kaikkien indikaattoritulosten suhteen. Tällöin voi olla vaikeaa tehdä karakterisointitulosten perusteella päätös siitä, mikä vaihtoehto on paras ympäristövaikutusten osalta. Tällaisissa tilanteissa elinkaariarvioinnissa saatetaan käyttää normalisointia tai painotusta. (Antikainen et al. 2012, 17.) Normalisointi ja painotus ovat elinkaariarvioinnin vaikutusarviointivaiheen vapaaehtoisia osia (ISO 14040 2006, 36).

Normalisoinnissa karakterisointitulokset suhteutetaan niin, että eri vaikutusluokkien indikaattorituloksia voidaan verrata toisiinsa. Normalisointitekijänä voi olla esimerkiksi Eu-

roopan tai koko maailman päästöt. Jos vaikutusluokkaindikaattorien keskinäiseen tärkeyteen ei saada normalisoinnin kautta vieläkään selvyyttä, voidaan käyttää painotusta. Tällöin eri vaikutusluokat painotetaan toisiinsa nähden. Painotuksen tuloksena saadaan yhdet kokonaisvaikutusindikaattoritulokset kullekin vaihtoehdolle. Tuloksista on helppo löytää paras tai parhaat vaihtoehdot. Kokonaisvaikutusindikaattoritulokset ovat kuitenkin aina tavalla tai toisella subjektiivisia, koska painoarvojen määrittämisen taustalla on aina arvottaminen. Tämän takia suositellaan, että painotusta ei tulisi käyttää, jos elinkaariselvitystä on tarkoitus käyttää julkisesti esitettävissä vertailuväitteissä. (Antikainen et al. 2012, 17.)

#### **5.1.4 Tulosten tulkinta**

Tulosten tulkintavaiheessa elinkaariarvioinnin inventaarioanalyysin (LCI) ja vaikutusarviointivaiheiden (LCIA) tuloksia tarkastellaan yhdessä. Tulosten tulkinnassa keskitytään erityisesti elinkaariarvioinnin LCI- ja LCIA-vaiheiden tuloksiin perustuvien merkittävien asioiden tunnistamiseen, täydellisyyden, herkkyyden ja johdonmukaisuuden arviointiin. Tältä pohjalta muodostetaan johtopäätökset ja listataan rajoitukset ja suositukset. On toivottavaa, että saatujen tulosten pohjalta voidaan tuottaa tutkimuksen tavoitteet täyttävää tietoa. (ISO 14040 2006, 38).

Täydellisyyden, herkkyyden ja johdonmukaisuuden tarkistus on tärkeää selvitettävien tuotteiden monimutkaisuuden takia. Elinkaariarvioinnissa joudutaan usein tekemään erilaisia valintoja esimerkiksi systeemin rajauksessa ja aikajänteen valinnassa. Tästä syystä elinkaariarvioinnin tulokset eivät aina ole yksiselitteisiä. Luotettavan ja avoimen tulkinnan ja viestinnän perustana on tutkimuksen lähtöoletusten, aineiston ja rajausten vaikutusten analysointi tulosten tulkintaan, epävarmuuteen ja herkkyyteen. Analysoinnin tulokset tulee esittää avoimesti. (Antikainen et al. 2012, 7–13.)



## 5.2 Allokointimenettelyt

Allokointi on menettely, jossa monitoimisen prosessin ympäristökuormitukset jaetaan sen tuottamien tai sen vaatimien toimintojen ja tuotteiden kesken. Allokointia vaativia tilanteita on kolmenlaisia. (Antikainen et al. 2010, 35.):

- a) prosessi tuottaa useita tuotteita (multi-output)
- b) prosessi vastaanottaa useita jätetuotteita (multi-input)
- c) kierrätysjäte kierrätetään toiseksi tuotteeksi (open-loop recycling)

Allokointi on yksi elinkaariarvioinnin puhutuimmista metodologisista kysymyksistä. Allokointiongelmaan on esitetty ja sovellettu useita menettelyitä, mutta yksikään vaihtoehdoista ei tarjoa yleispätevää ratkaisua. ISO 14044 suosittaa seuraavaa kolmivaiheista menettelyä allokointiongelmaan (ISO14044 2006, 38):

- 1) Allokoinnin välttäminen
  - a. jakamalla allokoitava yksikköprosessi kahteen tai useampaan alaprosessiin ja keräämällä näihin alaprosesseihin liittyvät syöte- ja tuotostiedot
  - b. laajentamalla tuotejärjestelmä kattamaan rinnakkaistuotteisiin liittyvät lisätoiminnot
- 2) Jos allokointia ei voida välttää, järjestelmän syötteet ja tuotokset tulisi osoittaa sen eri tuotteiden ja toimintojen kesken tavalla, joka heijastaa niiden välisiä fysikaalisia suhteita
- 3) Jos allokoinnin perustaksi ei voida asettaa tai käyttää yksinomaan fysikaalisia suhteita, tulisi syötteet allokoida tuotteiden ja toimintojen kesken käyttäen niiden välisiä muita suhteita, kuten taloudellista arvoa.

ILCD-dokumentin mukaan monituotejärjestelmien käsittely riippuu ennen kaikkea tutkimuksen tavoitteista ja soveltamisalasta. Haitanjaolisesta lähestymistapaa käytettäessä tuotejärjestelmä jaetaan ensisijaisesti alasysteemeihin, ja mikäli tämä ei ole mahdollista, käytetään allokointia. Seurausvaikutuksellista lähestymistapaa käytettäessä suoritetaan tuotejärjestelmän laajennus. (Antikainen et al. 2010, 35–36.)

Esimerkiksi elinkaariarvioinnissa, jossa maissipohjaista etanolia verrattiin bensiiniin, suoritettiin tuotejärjestelmän laajennus, koska maissin viljelyprosessissa syntyi bioetanolin raaka-aineena käytettävien lehtien ja varsien lisäksi ihmisravintona ja rehuna hyödynnettäviä osia. Bensiinin tuotannon tuotejärjestelmää täydennettiin lisäämällä sinne maissintuotantoprosessi. Bensiinintuotannon tuotejärjestelmään lisätty maissintuotantomäärä perustui maissin ravintoarvoihin. (Luo et al. 2009, 533.)

### **5.3 Elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen kartoitus**

Nykyään tiedetään, että ihmistoiminnasta aiheutuvilla kasvihuonekaasuilla on merkittävä vaikutus ilmastomuutokseen. Tuotteen elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin on kehitetty kansainvälisiä laskentametoodeja. Tunnetuimpia olemassa olevia ohjeistuksia ovat PAS 2050 hiilijalanjälkistandardi ja WRI:n ja WBCSD:n yhteistyössä tuottama GHG Protocol -standardisarja. Sekä PAS 2050 että GHG Protocol -standardit pohjautuvat ISO 14040 -standardisarjan mukaiseen elinkaariarviointiin. (BSI 2011; GHG Protocol 2013.)

GHG Protocol -standardisarjaan kuuluvan Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard -ohjeistuksen mukaan kasvihuonekaasuinventaariorissa tulee huomioida ainakin hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>), metaanin (CH<sub>4</sub>), typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O), F-kaasujen (HFC- ja PCF yhdisteet) sekä rikkiheksafluoridin (SF<sub>6</sub>) mahdolliset päästöt ja poistumat ilmakehästä. Näiden lisäksi inventaariorissa voidaan huomioida myös muita kasvihuonekaasuja, jotka tulee mainita elinkaariarvioinnista laadittavassa raportissa. Kasvihuonekaasuja poistuu ilmakehästä esimerkiksi silloin, kun kasvit sitovat hiilidioksidia ilmakehästä ja muuttavat sen energiaksi fotosynteesin yhteydessä. (GHG Product Life Cycle Accounting Reporting Standard, 27–37.)

Inventariorivaiheessa kartoitettujen kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus ilmoitetaan yleensä laskemalla kasvihuonekaasujen ilmastomuutospotentiaali (Global Warming Potential, GWP) ilmoittamalla kasvihuonekaasukertymä CO<sub>2</sub>-ekvivalentteina. Kuten aiemmin vaikutusarviointi-osiossa, 5.1.3., kerrottiin, tämä tapahtuu kertomalla inventarioritiedot kaasukohtaisilla karakterisointikerroimilla. Käytettyjen karakterisointiker-

toimien lähde tulee raportoida. Kasvihuonekaasutarkasteluissa käytetään yleensä 100-vuoden GWP-karakterisointimallia. (GHG Product Life Cycle Accounting Reporting Standard, 85.)

Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard -ohjeistuksen mukaan tuotejärjestelmien, joiden prosesseihin käytetään eloperäisiä materiaaleja, kasvihuonekaasuinventaariorissa tulee huomioida mahdolliset maankäytön tai maankäytön muutosten vaikutukset kasvihuonekaasutaseeseen. Maankäytöstä voi aiheutua päästöjä tai päästövähennyksiä muun muassa erilaisissa maa- ja metsätalouden kasvu-, lannoitus-, viljely- sekä sadonkorjuu- tai metsänhakuu-prosesseissa. Esimerkiksi riisiä sisältävien tuotteiden elinkaariarvioinneissa riisin viljelystä aiheutuvat metaanipäästöt tulee sisällyttää kasvihuonekaasuinventaarioon raaka-aineiden hankinnasta aiheutuvana päästönä. (GHG Product Life Cycle Accounting Reporting Standard, 27–37.)

Maankäytön muutoksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset tarkoittavat:

- maaperän hiilivarastossa tapahtuvista muutoksista aiheutuvia bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä tai -vähenymiä maankäyttötavan säilyessä samana tai muuttuessa
- bioperäisiä tai ei-bioperäisiä hiilidioksidi-, typpioksiduuli- tai metaanipäästöjä, jotka aiheutuvat hyödynnettävälle maa-alueelle tehtävistä valmisteleuvista toimenpiteistä kuten kalkitsemisestä

## **6 ELINKAARIARVIOINTIMALLI**

Työn tavoitteena on tarkastella uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiantuotantomuotojen keskinäistä kilpailukykyä. Tarkasteluun on valittu aurinko- ja tuulivoiman tuotanto sekä CHP-tuotanto metsäbiomassoista. Tässä työssä vertaillaan energiantuotantomuotojen keskinäistä kilpailukykyä rakentamalla niihin perustuva energijärjestelmän malli, jolla voidaan täyttää yhdyskunnan vuotuinen energiantarve kahdella vaihtoehtoisella ratkaisulla. Energiantuotantomuotojen keskinäisen kilpailukyvyn arviointi toteutetaan laatimalla ISO 14040 ja ISO 14044 standardien mukainen elinkaariarviointi.

### **6.1 Tavoitteet ja soveltamisala**

Elinkaariarvioinnin tavoitteena on tarkastella uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiantuotantomuotojen keskinäistä ympäristöllistä kilpailukykyä. Kilpailukyvyn arviointi perustuu energiantuotantomuotojen elinkaarensa aikana aiheuttamien kasvihuonekaasujen arviointiin ja pääasiallisten energiantuotantomuotojen nettoenergiatarkasteluun. Tarkastelu toteutetaan huomioimalla energiantuotantomuotojen sekä tietyin rajauksien myös energian siirron elinkaaren merkittävimmät vaiheet tarkasteluun valittujen ympäristönäkökohtien kannalta. Kasvihuonekaasutarkastelussa karakterisointimallina käytetään CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years).

Tarkastelussa huomioidaan GHG Product Life Cycle Accounting Reporting Standard - ohjeistuksen mukaisesti mahdollisuuksien mukaan kaikki aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt, erityisesti CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC- ja PCF-yhdisteet sekä SF<sub>6</sub>. Metsäenergiantuotannon tiedetään aiheuttavan muutoksia maaperän hiilitaseessa, joten tutkimuksessa tarkastellaan myös maan käytön muutoksesta aiheutuvien bioperäisten hiilidioksidipäästöjen huomioon otamista metsäenergiantuotannon ympäristölliseen kilpailukykyyn.

#### **6.1.1 Toiminnallinen yksikkö**

Elinkaariarviointimalli rakennetaan niin, että sillä voidaan arvioida uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiantuotantomuotojen keskinäistä kilpailukykyä yhdyskunnan ener-

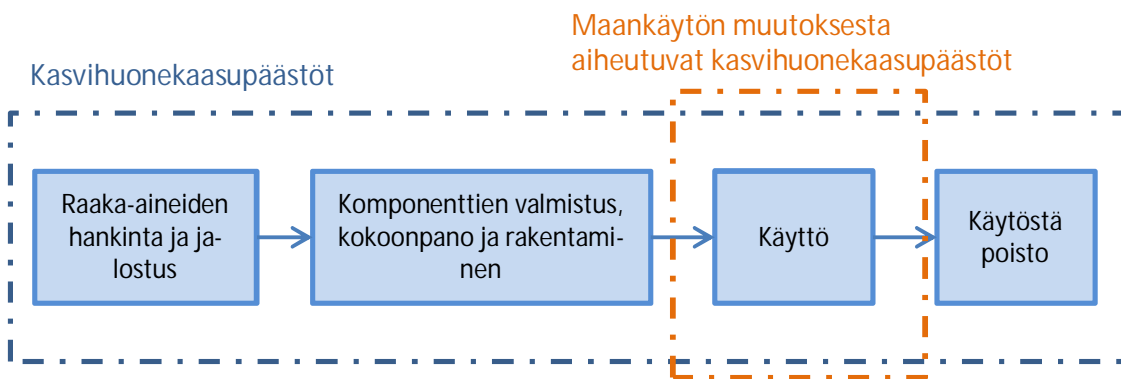
gialähteenä. Tarkasteluun on valittu aurinko- ja tuulisähkön tuotanto sekä CHP-tuotanto metsäbiomassoista. Tasapuolisen vertailun mahdollistamiseksi tuotantojärjestelmä laajennetaan sisältämään CHP-tuotannossa syntyvä lämpö.

Tuotejärjestelmän laajennus toteutetaan niin, että sen tulee samanaikaisesti täyttää yhdyskunnan sähkön- ja lämmöntarve. Tämä toteutetaan mallintamalla aurinko- ja tuulisähkön tuotannon rinnalle lämmöntuotantoa. Toiminnallinen yksikkö on yhdyskunnan vuotuinen sähkö- ja lämpöenergiatarve kuukausitasolla tarkasteltuna. Yhdyskunnan vuotuinen sähkö- ja lämmöntarve määritellään osiossa 6.2.3.

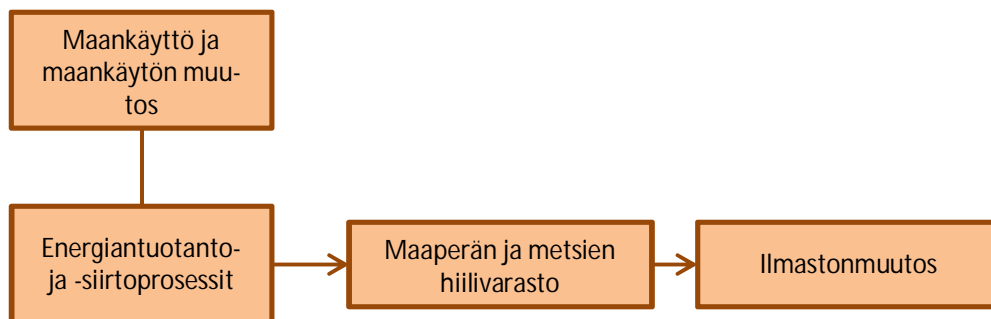
### **6.1.2 Tarkastelun rajaukset**

Kasvihuonekaasupäästöjen osalta tarkasteluun sisällytetään kaikki energiantuotantolaitosten elinkaaren vaiheet. Energiantuotantomuotojen energiaketjun energiasyötteet huomioidaan nettoenergiatarkastelussa niiltä osin, kun soveltuvia lähtötietoja löytyy. Lisäksi tarkastellaan lämmön- ja sähkönsiirtoverkon käytöstä ja lämmönsiirtoverkon rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Sähkönsiirtoverkon rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä ei tarkastella kuin tuulivoimantuotannon osalta, koska oletetaan, että keskenään verrattavissa energiantuotantoskenaarioissa vaadittavan sähkön siirto- ja jakeluverkoston määrä on sama. Tarkasteluajanjakso on yksi vuosi.

Maankäytön muutoksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt sisällytetään käyttövaiheen osalta, koska on arvioitu, että suurin osa metsäenergiantuotannon kasvihuonekaasuista syntyy metsähakkeen polton kasvihuonekaasupäästöjen ohella metsän hiilitaseen muutoksista. Tulokset esitetään sekä ilman maan käytön muutoksesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä että niiden kanssa. Kuvassa 10 on esitetty elinkaaritarkastelun rajaukset ja kuvassa 11 maankäytön ja maankäytön muutosten tarkastelutapa.



**Kuva 10.** Toteutettavan elinkaariarvioinnin tarkastelun rajaus.

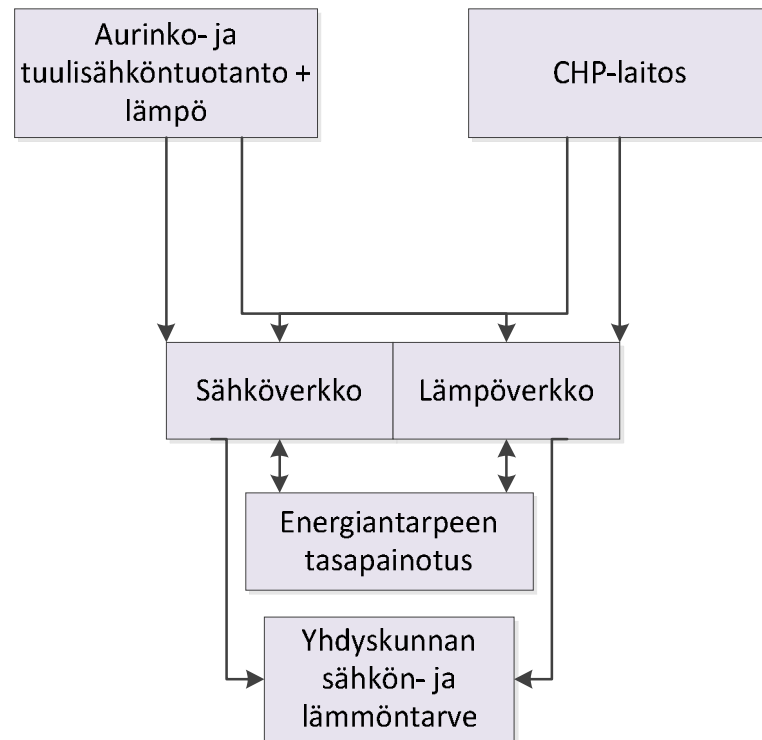


**Kuva 11.** Maankäytön ja maankäytön muutosten huomiointi toteutettavassa elinkaaritarkastelussa.

### 6.1.3 Tarkastelun toteuttaminen

Tarkastelu toteutetaan rakentamalla kuvan 12 mukainen elinkaariarviointimalli, jolla arvioidaan yhdiskunnan vuotuisen energiantarpeen täyttämistä eri tuotantomuotoihin perustuvilla ratkaisuilla. Malli sisältää aurinko- ja tuulisähköntuotannon, metsäbiomassaa polttoaineenaan käyttävän CHP-laitoksen ja tarvittavat energiansiirtoverkot. Malli toteutetaan niin, että sillä voidaan tarkastella ja vertailla seuraavanlaisia skenaarioita:

1. Aurinko- ja tuulisähköpainotteinen skenaario
2. CHP-painotteinen skenaario



**Kuva 12.** Toteutettavan mallin periaatekuva.

Aurinko- ja tuuliskenaarioissa yhdyskunnan energiajärjestelmä perustuu aurinko- ja tuulisähköntuotantoon, joiden rinnalle mallinnetaan lämmöntuotantoa. CHP-skenaariossa suurin osa asuinalueen sähkön- ja lämmöntarpeesta katetaan alueelle rakennetulla CHP-laitoksella. Kuukausina, jolloin energiajärjestelmä tuottaa sähköä yli tarpeen syötetään ylijäämäsähkö julkiseen sähköverkkoon, jossa sen oletetaan korvaavan Suomen keskimääräistä verkkosähköä. Lämpöenergiantuotanto mallinnetaan vastaamaan lämpöenergiatarvetta, joten ylijäämälämpöä ei synny. Kuukausina, joina aurinko-, tuuli- tai CHP-tuotannon potentiaali ei riitä, yhdyskunnan energiantarve tasataan yleisen sähköverkon avulla. Työssä ei tarkastella energiavarastoja.

Elinkaarivointimallin laatiminen aloitetaan mitoittamalla tutkittavan energiajärjestelmän eri energiantuotantotavat. Tämän jälkeen rakennetaan mitoitetun kaltaisen energiajärjestelmän elinkaarimalli GaBi 5 elinkaarimallinnusohjelmistolla. Mallin rakennusvaiheessa arvioidaan eri prosessien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt. Nettoenergiatarkastelu toteutetaan viimeiseksi lähtötietojen sallimassa laajuudessa.

Elinkaariarviointimallin yksikköprosessin laaditaan pääasiassa kirjallisuudesta kerättyjen lähtötietojen perusteella. Työssä käytetään muutamia GaBi-ohjelmiston valmiita yksikköprosesseja. Jos yksikköprosesseissa on olemassa aluekohtaisia eroja, esimerkiksi energiantuotantoprofiileissa, pyritään valitsemaan mahdollisimman hyvin työn oletuksia tukeva yksikköprosessi. Inventaariovaiheen tiedonkeruu noudattaa energiantuotantomuotojen elinkaaren vaiheita. Elinkaariarvioinnin lähestymistapa on seurausvaikutuksellinen.

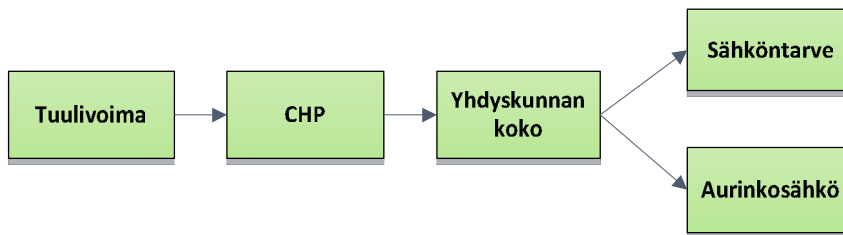
Aurinko- ja tuulisähköntuotannolle on ominaista suuri kausittainen vaihtelu. Myös rakennusten lämpöenergiatarve vaihtelee kuukausittain. Malli toteutetaan niin, että asuinalueen energiantarvetta tarkastellaan kuukausitasolla. Aurinkosähkön- ja tuulisähkön tuotanto ovat vahvasti riippuvaisia paikallisista säteily- ja tuuliolosuhteista. Myös metsätähteen riittävyys ja saatavuus polttoainekäyttöön riippuu alueesta. Tarkastelu on sijoitettu maantieteellisesti Lappeenrantaan.

Aurinko- ja tuulipainotteisessa energiajärjestelmässä verrataan keskenään kahta erilaista tapaa täyttää yhdyskunnan lämpöenergiatarve. Lisäksi tarkastellaan aurinkopaneelityypin valinnan vaikutusta vertailemalla kolmea erilaista aurinkopaneelityyppiä. Tutkitut paneelityypit ovat yksikiteisistä ja monikiteisistä piikidekennoista sekä kadmium-telluuri-kennoista valmistetut aurinkopaneelit.

## **6.2 Tuotejärjestelmän mitoittaminen**

Elinkaariarviointimallin prosessien mitoittaminen aloitetaan tuulivoimantuotannosta. Valittu tuulienergiantuotantokapasiteetin mukaan mitoitetaan sähköteholtaan vastaava CHP-laitos. Kuten aiemmin todettiin, lämmöntuotantoa ei kannata rakentaa ilman tuotantoa vastaavaa lämmöntarvetta, joka on kohtuullisen siirtoetäisyyden päässä. Oletetaan, että mitoitettu CHP-laitos on yhdyskunnan peruskuormalaitos. CHP-laitoksen ominaistehon ja vuotuisen energiantuotantopotentiaalın perusteella arvioidaan, minkä verran rakennuskantaa alueella voi olla. Rakennuskannan perusteella arvioidaan edelleen alueen vuotuinen sähköntarve. Rakennuskannan perusteella arvioidaan myös aurinkosähkön tuotantoon käytössä oleva kattopinta-ala ja määritetään asennettavan aurinkosähköjärjestelmän teho. Kuvas-  
sa 13 on esitetty mitoitusprosessin vaiheittainen eteneminen.





Kuva 13. Mallin mitoitusprosessin eteneminen.

### 6.2.1 Tuulivoimantuotanto

Aurinko- ja tuulienergiantuotantopotentiaalin arviointi on vahvasti paikkasidonnaista. Tuulivoimapotentiaalin arvioimisen kannalta on keskeistä tuuliolosuhteiden tarkka tuntemus. Kun tiedetään keskimääräiset tuuliolot, voidaan määrittää tuulipuiston vuosittainen energiantuotanto. Vuonna 2012 julkaistun tutkimuksen mukaan Etelä-Karjalasta, erityisesti Saimaan rannoilta, löytyy tuulivoimarakentamiselle tuuliolosuhteiden puolesta sopivia alueita. (Hynynen et al. 2012, 27.)

Aiemmin osiossa 3.2.2. todettiin, että tällä hetkellä Suomessa suosittu tuuliturbiinikokoluokka on noin 2-3 MW. Myös tuulivoimalle tehdyt EROI-tarkastelut tukevat vähintään 1 MW:n turbiinikoon valintaa. Suurten roottorihalkaisijoiden ansioista suuremmat voimalaitokset voivat hyödyntää myös alhaisia tuulennopeuksia. Lisäksi korkeutensa vuoksi suuret voimalaitokset ylettyvät hyödyntämään korkeammalla virtaavia nopeampia ilmavirtauksia.

Oletetaan, että alueelle rakennetaan 21 MW:n tuulipuisto, joka koostuu seitsemästä 3 MW tuulivoimalasta. Kokoluokan arvioidaan edustavan tyypillistä Suomessa sisämaahan toteutettua tai suunnitteilla olevaa tuulivoimahanketta (VTT 2012). Oletetaan lisäksi, että Etelä-Karjalan tuulivoimantuotantoon parhaiten soveltuvilla alueilla, noin 125 metrin korkeudella, tuulivoimalan huipunkäyttöaika on noin 2200 h/a (Hynynen et al. 2012, 32). Huipunkäyttöaika kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan. Tällöin nimellisteholtaan 21 MW:n tuulipuisto todellinen sähköntuotantoteho 2200 h/a huipunkäyttöajalla on keskimäärin 5 MW.

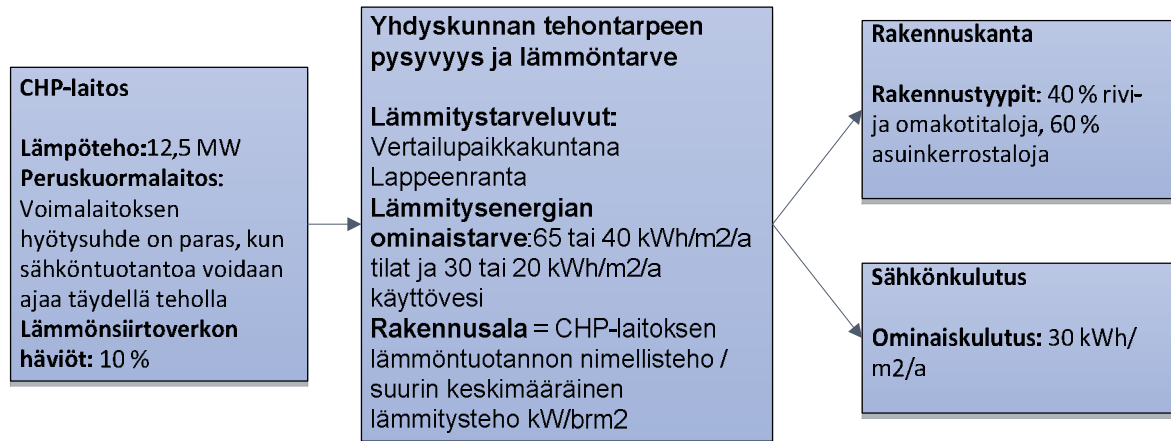
### 6.2.2 CHP-laitos

Keskitettyssä lämmitysjärjestelmässä on yleensä edullisinta jakaa hankinta eri tuotantomuotojen kesken, jolloin päästään taloudellisesti edullisimpaan lopputulokseen. Oletetaan, että mallinnettava CHP-laitos on yhdyskunnan peruskuormalaitos.

Aiemmin todettiin, että alueelle sijoitetun nimellisteholtaan 21 MW:n tuulipuiston keskimääräinen sähköntuotanto teho on 5 MW. Oletetaan, että myös CHP-laitoksen sähköteho on 5 MW. Kaukolämpövoimalaitoksen sähkötehon ja lämpötehon suhdetta kutsutaan rakennussuhteeksi. Oletetaan, että CHP-laitoksen rakennussuhde on 0,4, jolloin laitoksen lämpöteho on 12,5 MW. Oletetaan lisäksi, että CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on 90 %. CHP-laitoksen polttoaineteho on tällöin yhteensä 17,5 MW, josta sähköntuotannon osuus noin 30 % ja lämmöntuotannon noin 70 %.

### 6.2.3 Yhdyskunta

Määritellään seuraavaksi kuinka suuren yhdyskunnan peruslämpölaitokseksi aiemmin mitoitettu CHP-laitos soveltuu. Asuinrakennusten energiatehokkuusluokka vaikuttaa oleellisesti yhdyskunnan kokoon rakennusten kuluttaman lämpöenergian kautta. Valitun, kuvassa 13 esitetyn, mitoitusjärjestyksen vuoksi yhdyskunnan koko vaikuttaa edelleen sähköntarpeeseen ja aurinkosähkön tuotantoon käytettävissä olevan kattopinta-alan määrään. Arvioidaan yhdyskunnan koko rakennuskannalle, jonka energiatehokkuusluokka on rakennusmääräyskokoelman normitasoa sekä rakennuskannalle, joka on energiankulutukseltaan matalaenergiatasoa. Määrävänä tekijänä mitoituksessa on peruskuormalaitokseksi mitoitettun CHP-laitoksen ominaisteho ja lämmöntuotanto. Kuvassa 14 on esitetty yhdyskunnan mitoitusprosessin päävaiheet ja niihin liittyviä oletuksia.



**Kuva 14.** Yhdyskunnan ominaispiirteiden määrittämisen kulku ja eri vaiheissa käytetyt tärkeimmät oletukset.

Arvioidaan osiossa 3.2.3 esitettyjen voimalaitoksen mitoitusperiaatteiden mukaisesti, minikokoisen asuinalueen peruskuormalaitokseksi mitoitettu CHP-laitos soveltuu. Tärkeimpänä mitoitusperiaatteena pidetään voimalaitoksen hyötysuhteen optimointia määrittämällä yhdyskunnan koko niin, että voimalaitosta voidaan ajaa mahdollisimman paljon täydellä teholla. Peruskuormalaitosta ei siis mitoiteta tuottamaan verkon koko tehontarvetta, vaan noin 40–60 % lämpöverkon mitoitustehosta. Tuotettavan energian osuus kokonaisenergiasta tulee olemaan noin 80–90 %

Toinen tärkeä mitoittava tekijä on yhdyskunnan rakennusten lämpöenergiatarve. Rakennusmääräyskokoelman vähimmäisnormit täyttävän asuinrakennuksen lämmitysenergian ominaistarve on noin 65 kWh/m<sup>2</sup>/a ja käyttöveden lämmityksen ominaistarve 30 kWh/m<sup>2</sup>/a neliometriä kohden (RIL 2009, 31; Ympäristöministeriö 2011b, 1). Matalaenergiatason asuinrakennusten tilojen lämmitysenergian ominaistarve on noin 40 kWh/brm<sup>2</sup>/a ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergian ominaistarve noin 20 kWh/m<sup>2</sup>/a (RIL 2009, 31). Oletetaan lämmönsiirtoverkon häviöksi 10 % (Vehviläinen et al. 2010, 37).

Arvioidaan lämmitystarvelukujen avulla tilojen lämmityksen ominaisenergiatarve kuukausittain. Käytetään laskennassa lämmitystarvelukuja Lappeenrannalle vertailukaudella 1981–2010 (Ilmatieteen laitos 2013). Lämpimän käyttöveden osalta oletetaan, että energiatarve jakautuu tasaisesti koko vuoden kuukausien kesken. Näiden oletusten perusteella lasketaan keskimääräinen kuukausittainen lämmitysteho bruttoneliötä kohden. Rakennusneliöiden määrä arvioidaan jakamalla CHP-laitoksen ominaisteho helmikuun keskimääräi-

sellä bruttoneliökohtaisella lämmitysteholla. Menettelyn tarkoituksena on optimoida lämmitystehontarve niin, että CHP-laitosta voidaan ajaa suurimman osan ajasta mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. CHP-laitoksen ominaistehossa huomioidaan lämmönsiirron häviöt, eli lasketaan rakennuspinta-ala 11,25 MW ominaisteholle. Yhdyskunnan rakennuskannan energian- ja tehontarpeen laskenta normi- ja matalaenergiatasolle on esitetty liitteessä 1.

Ensimmäisen arviointikierroksen jälkeen käyttöveden tehontarpeen laskennassa huomioidaan tehon risteilyvyys Energiateollisuus ry:n käyttämän yhtälön avulla (Energiateollisuus 2006, 64):

$$P_{LKV} = 57 + 15,3[\ln(n^3 - n^2 + 1)]^{1,17} \quad (6)$$

$P_{LKV}$  = lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [kW]

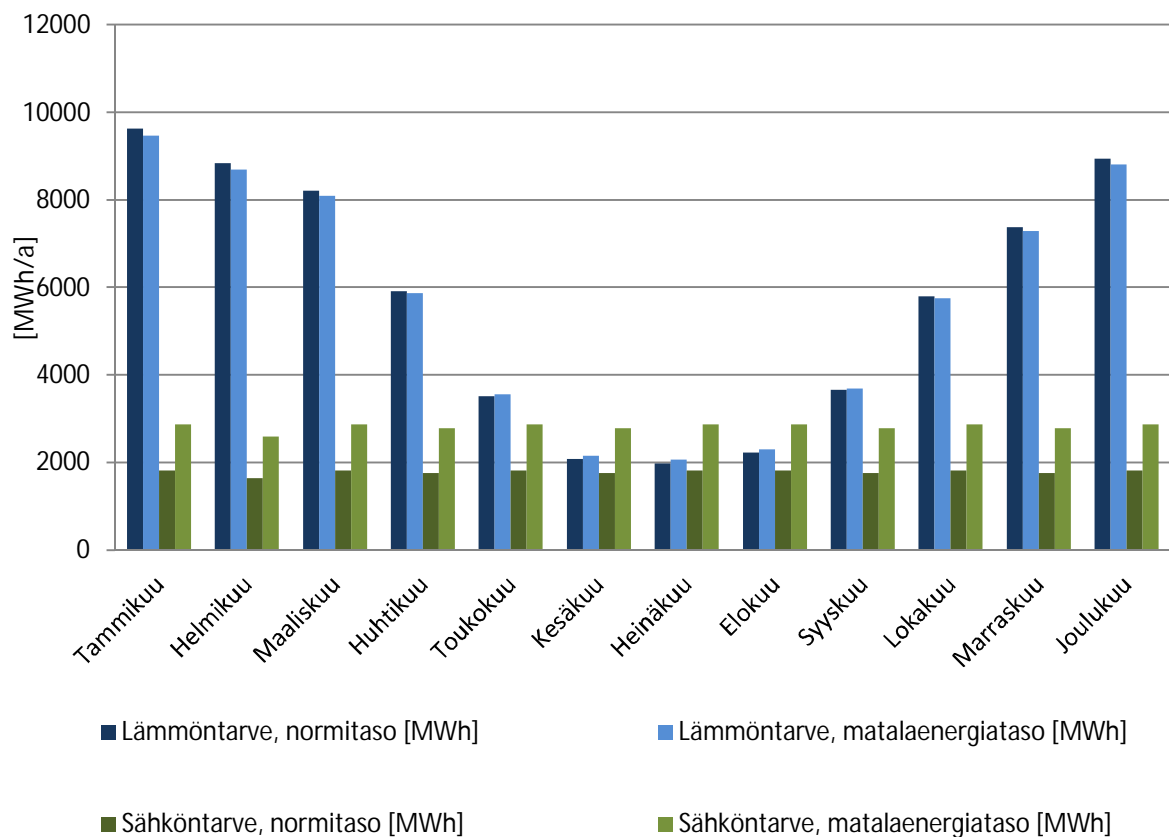
$n$  = asuinhuoneistojen määrä [kpl]

Oletetaan, että keskimääräisen asunnon koko on 90 m<sup>2</sup> (Tilastokeskus 2011). Tehon risteilyvyyden huomiointi pienentää käyttöveden lämmityksen vaativan tehon määrää. Tarkistetaan rakennuspinta-ala uusilla ominaistehontarpeen arvoilla. Lisäksi tarkistetaan vielä arvio käyttöveden lämmitysteholle uusilla pinta-alatiedoilla. Iteraation perusteella valitut arvot on esitetty kootusti taulukossa 2 ja laskenta liitteessä 1. Taulukossa on myös esitetty yhdyskunnan vuotuinen lämpö- ja sähköenergiantarve, jotka yhdessä muodostavat elinkaariarvioinnin toiminnallisen yksikön. Lämmöntarpeen laskenta perustuu aiemmin esitettyjen tilojen ja käyttöveden lämmityksen ominaisenergiatarpeisiin. Kiinteistö- ja kotitaloussähkön ominaiskulutus on energiatehokkuusluokaltaan sekä normi että matalaenergiarakennuksissa noin 30 kWh/m<sup>2</sup>/a (RIL 2009, 31).

**Taulukko 2.** Yhdyskunnalle määritettyjä tunnuslukuja: rakennusala sekä elinkaariarvioinnin toiminnallinen yksikkö vuotuinen lämpö- ja sähköenergiantarve.

Energiatehokkuusluokka	Normi	Matala
Rakennusala [brm <sup>2</sup> ]	718 000	1 130 000
Lämmitysenergiantarve [MWh/a]	<b>68 210</b>	<b>67 800</b>
Sähköenergiantarve [MWh/a]	<b>21 540</b>	<b>33 900</b>

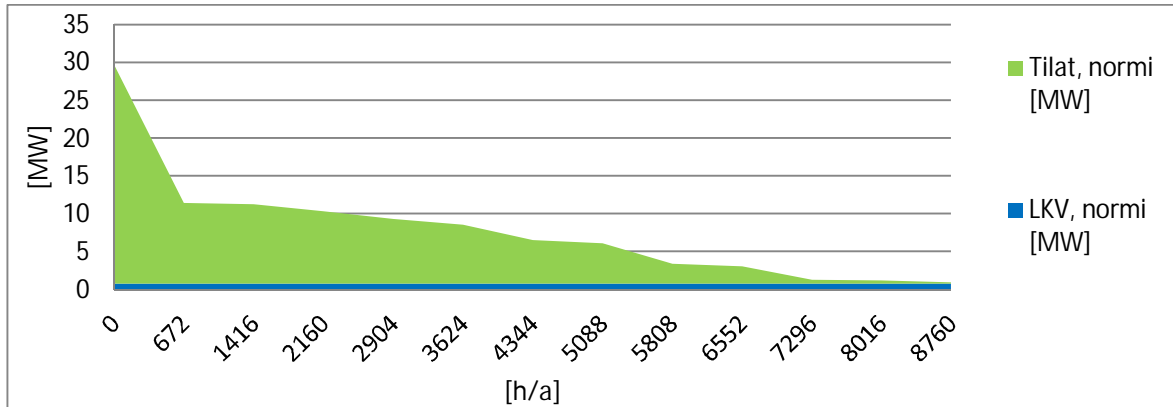
Lasketaan seuraavaksi yhdyskunnan lämpö- ja sähköenergian kuukausittainen jakautuminen ja määritetään lämpötehon pysyvyyskäyrä. Lämpöenergian tarpeen laskenta perustuu lämmitystarvelukujen hyödyntämiseen. Käytetään jälleen Lappeenrannan lukuja vertailukaudesta 1981–2010 ja oletetaan lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen ja aiemmin lasketun sähkötarpeen jakautuvan kuukausien tuntien suhteessa eri kuukausille. Yhdyskunnan sähkön- ja lämmöntarpeen kuukausittainen jakautuminen on esitetty kuvassa 15 ja laskenta tämän työn liitteessä 2.



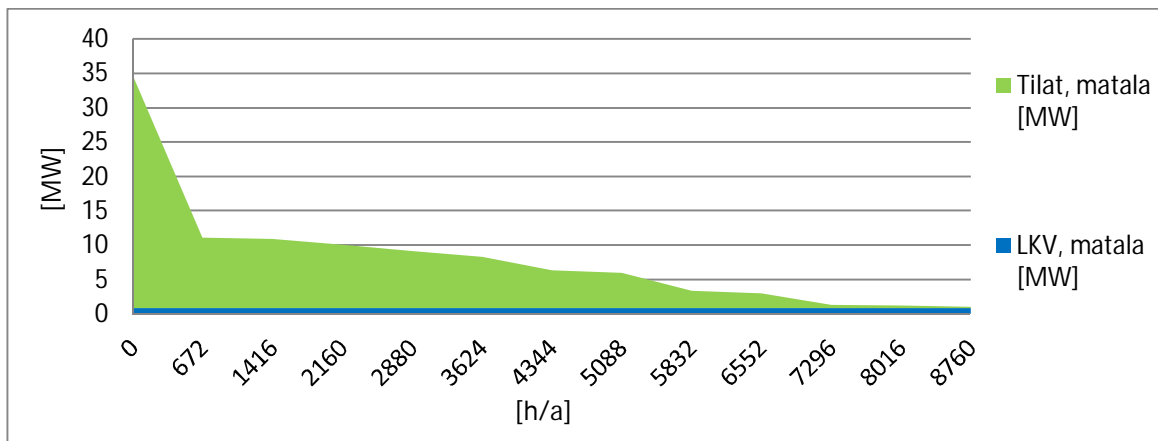
**Kuva 15.** Yhdyskunnan sähkön- ja lämmöntarpeen jakautuminen.

Lämpötehon pysyvyyskäyrän muotoa voidaan arvioida kuukausikohtaisten lämpöenergian kulutusarvioiden perusteella sekä ottamalla huomioon tilojen lämmityksen mitoitusteho pysyvyyskäyrän huipun arvioimiseksi. Käytetään tilojen lämmityksen mitoitustilanteen huipputeholle arvoa  $40 \text{ W/m}^2$  normitaloille ja  $30 \text{ W/m}^2$  matalaenergiataloille, jolloin tilojen lämmityksen mitoitustilanteen huipputeho on normitapauksessa 29 MW ja 34 MW matala-

energiatapauksessa (RIL 2009, 33). Lämpötehon pysyvyyskäyrä normirakennuksille on esitetty kuvassa 16 ja matalaenergiarakennuksille kuvassa 17.



**Kuva 16.** Rakennuskannan lämpötehon pysyvyyskäyrä, jos rakennukset ovat energiatehokkuusluokaltaan normitasoa.



**Kuva 17.** Rakennuskannan lämpötehon pysyvyyskäyrä, jos rakennukset ovat energiatehokkuusluokaltaan matalaenergiatasoa.

Määritetään vielä alueen asuntotyypit ja niiden alat. Tehdään oletus, että 60 % rakennus- alasta on rivi- ja omakotitaloja ja 40 % asuinkerrostaloja ja että rivi- ja omakotitaloissa ker- rosten lukumäärä on keskimäärin 1,2 ja asuinkerrostaloissa 4 (Pesola et al. 2012, 10). Pien- ja rivitalojen sekä asuinkerrostalojen osuus alueen rakennus- alasta, kerrosten keskimääräinen lukumäärä ja rakennusten pohjapinta-ala on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Eri rakennustyyppien osuus alueen rakennusalasta, kerrosten keskimääräinen lukumäärä ja rakennusten pohjapinta-ala.

Rakennustyyppi	Energiatehokkuusluokka	Osuus rakennusalasta [%]	Osuus rakennusalasta [m <sup>2</sup> ]	Kerrosten lukumäärä keskimäärin [kpl]	Pohjapinta-ala [m <sup>2</sup> ]
Pien- ja rivitalot	Normitaso	60	430 800	1,2	359 000
Asuinkerrotalot	Normitaso	40	287 200	4	71 800
Pien- ja rivitalot	Matalaenergiataso	60	678 000	1,2	565 000
Asuinkerrotalot	Matalaenergiataso	40	452 000	4	113 000

Luvut vastaavat normitaloina noin 1197 rivi- ja omakotitaloa ja 205 asuinkerrostaloa ja matalaenergiataloina noin 1883 rivi- ja omakotitaloa ja 323 asuinkerrostaloa, olettaen, että rivi- ja omakotitalot ovat pohjapinta-alaltaan keskimäärin 300 brm<sup>2</sup> ja asuinkerrostalot 350 brm<sup>2</sup>.

#### 6.2.4 Aurinkosähköjärjestelmät

Aurinkosähköntuotanto oletetaan toteutettavaksi kiinteistökohtaisilla, kattoasenteisilla aurinkopaneeleilla, jotka kytketään talon sähköverkkoon. Arvioidaan, että rivi-, omakoti- ja asuinkerrostaloilla aurinkosähköntuotantoon soveltuvan kattopinta-alan osuus pohjapinta-alasta on 25 % (Pesola et al. 2012, 10), jolloin aurinkosähkön tuotantoon soveltuvaa kattopinta-alaa on käytettävissä taulukon 4 mukaisesti.

**Taulukko 4.** Aurinkosähköntuotantoon soveltuva kattopinta-ala.

Rakennustyyppi	Energiatehokkuusluokka	Pohjapinta-ala [m <sup>2</sup> ]	Käyttökelpoisen kattopinta-alan osuus pohjapinta-alasta [%]	Aurinkosähkön tuotantoon käytettävissä oleva kattopinta-ala [m <sup>2</sup> ]	Aurinkosähkön tuotantoon käytettävissä oleva kattopinta-ala yhteensä [m <sup>2</sup> ]
Pien- ja rivitalot	Normitaso	359 000	25	89 750	107 700
Asuinkerrotalot		71 800	25	17 950	
Pien- ja rivitalot	Matalaenergiataso	565 000	25	141 250	169 500
Asuinkerrotalot		113 000	25	28 250	

### 6.2.5 Aurinko- ja tuulivoimapainotteisen skenaarion lämmöntuotto

Mallinnetaan aurinko- ja tuulisähkötuotannon rinnalle lämmöntuotantoa. Toteutetaan lämmöntuotanto kahdella vaihtoehtoisella tavalla, jotka ovat maalämmöntuotanto kiinteistökohtaisella maalämpöjärjestelmällä tai alueellinen lämpölaitos. Maalämpöjärjestelmä oletetaan kytkettäväksi suoraan rakennusten lämmitysjärjestelmään. GaBi-mallissa maalämpöpumppujen tuottama lämpö ohjataan kuitenkin yhdyskunnalle lämpöverkon kautta mallin selkeyttämiseksi, mutta lämpöverkossa tapahtuvaa siirtohäviötä ei huomioida. Lämpölaitoksella tuotettu lämpöenergia siirretään rakennuksiin kaukolämpöverkossa.

Valitaan arvioitavaksi lämpöpumppuratkaisuksi porattuun lämpökaivoon perustuva maalämpöpumppuratkaisu, koska se soveltuu tarvittaessa myös pienille tonteille. Oletetaan lisäksi, että kaikkien rakennusten läheisyydestä löytyy tarpeeksi maalämmön hyödyntämiseen soveltuvaa maastoa. Mitoitetaan maalämpöjärjestelmän lämpöpumppu osateholle. Aiemmin osiossa 3.2.4. todettiin, että osateholla mitoitettu lämpöpumppu kattaa 60–80 % lämpötehon huipputarpeesta sekä 95–99 % vuotuisesta lämpöenergiatarpeesta. Oletetaan tässä yhteydessä, että lämpöpumput kattavat 60 % alueen lämpötehon huipputarpeesta ja 95 % vuotuisesta lämpöenergiatarpeesta. Yhdyskunnan lämpötehon huipputarve katetaan rakennusten lämmitysjärjestelmään kytketyillä sähkövastuksilla ja tarve jaetaan tasaisesti tammi- ja helmikuulle. Maalämpöjärjestelmällä tuotettu lämpöenergiaosuus normi- ja matalaenergiatehokkuusluokassa sekä sähkövastuksilla tuotettavan lämpöenergian määrä vuositasolla on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5.** Maalämpöjärjestelmän ja varavastusten lämmöntuotanto.

Energiatehokkuusluokka	Normi	Matala
Vuotuinen lämpöenergian tarve [MWh/a]	68 210	67 800
Maalämpöjärjestelmällä tuotetun energian osuus [%]	95	95
Sähkövastuksilla tuotetun energian osuus [%]	5	5
Maalämpöjärjestelmällä tuotetun energian osuus [MWh/a]	64 800	64 410
Sähkövastuksilla tuotetun energian osuus [MWh/a]	3 411	3 390

Mitoitetaan alueellinen lämpölaitos lämpöteholtaan aiemmin mitoitettun CHP-laitoksen kaltaiseksi peruskuormalaitokseksi, jolloin laitoksen ominaisteho on 12,5 MW. Oletetaan,



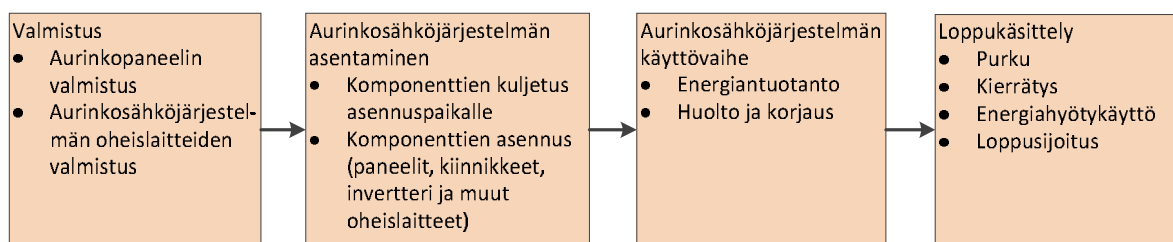
että lämpölaitoksen hyötysuhde on 85 % (Energiateollisuus 2006, 282). Oletetaan lisäksi, että lämpölaitos käyttää polttoaineena ominaisuuksiltaan vastaavaa metsähaketta, kun CHP-laitos.

### 6.3 Elinkaariarviointimallin rakentaminen

Rakennetaan tehdyn mitoituksen mukainen energiajärjestelmä GaBi 5 elinkaariarviointiohjelmistolla. Mallin mitoittaminen osiossa käsiteltyjen prosessien lisäksi tarvitaan myös muita prosesseja, jotka kuvataan tässä osiossa. Energiajärjestelmän prosessikaavio on esitetty liitteessä 3.

#### 6.3.1 Aurinkosähköntuotanto

Aurinkosähköjärjestelmän elinkaari mallinnetaan raaka-aineiden hankinnasta loppukäsittelyyn tai kierrätykseen. Kuvassa 18 on esitetty aurinkosähköjärjestelmien elinkaariarviointeihin yleisesti sisällytetyt elinkaaren vaiheet ja niihin kuuluvia toimintoja. Järjestelmän inventaariotiedot kohdennetaan aurinkosähköjärjestelmälle sen sähköverkkoon tuottamaa sähköenergiämäärää kohden. Tämä mahdollistaa paneelityyppien valinnan herkkyystarkastelun. (Fthenakis et al. 2011a, 6.)



**Kuva 18.** Aurinkosähköjärjestelmän elinkaari. (Fthenakis et al. 2011b, 3-4)

Valmistusvaihe sisältää tarvittavien raaka-aineiden louhimisen ja jatkokäsittelyn sekä aurinkopaneelien ja aurinkosähköjärjestelmän oheislaitteiden valmistuksen. Esimerkiksi piikidekennojen tapauksessa ensin louhitaan kvartsi, jonka jälkeen sitä jalostetaan ja puhdistetaan useissa prosesseissa aurinkosähkösovelluksiin soveltuvan piin aikaansaamiseksi.

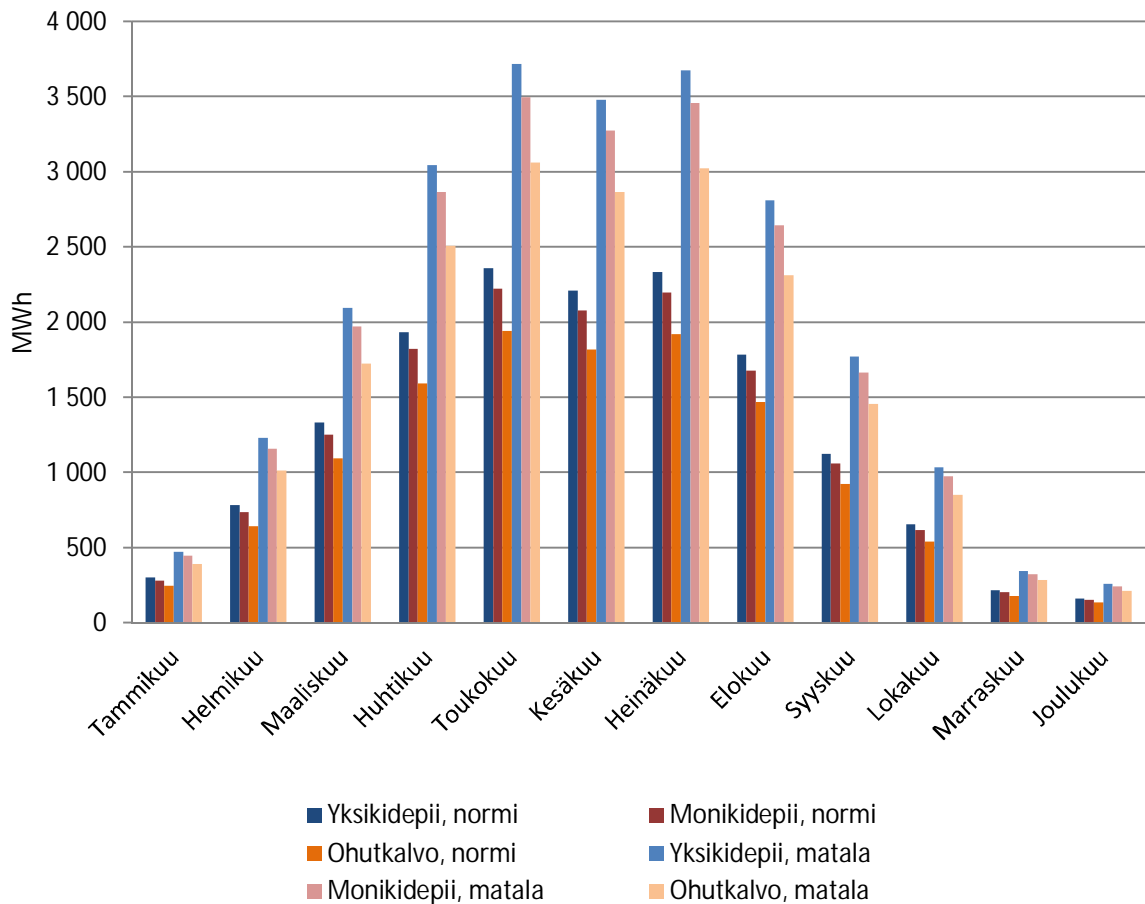
Ohutkalvokennojen pääraaka-aineet kadmium ja telluuri ovat yleensä sinkki- ja kuparisulattamoiden sivutuotteita, joita jalostetaan edelleen riittävän puhtauden saavuttamiseksi. (Fthenakis et al. 2011b, 3-4).

Asennusvaihe sisältää aurinkopaneelien ja oheislaitteiden sekä tukirakenteiden valmistuksen ja komponenttien kuljetukset asennuspaikalle, tukirakenteiden pystytyksen sekä laitteiston asennuksen (Fthenakis et al. 2011b, 3-4). Aurinkosähköjärjestelmien käytönaikainen säätö ja huoltotarve ovat hyvin vähäisiä. Aurinkosähköjärjestelmille tehdyissä elinkaariarvioineissa käyttövaiheen vaikutus syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin on usein arvioitu hyvin vähäiseksi tai jätetty kokonaan huomiotta (Hsu et al. 2012). Usein kuitenkin oletetaan, että oheislaitteisiin kuuluva invertteri uusitaan kerran aurinkosähköjärjestelmän elinajan aikana (Fthenakis et al. 2011a, 4). Elinkaarensa lopussa aurinkosähköjärjestelmä ja sen komponentit, jotka sisältävät arvokkaita osia ja komponentteja puretaan ja kierrätetään ja loput osat loppusijoitetaan (Fthenakis et al. 2011b, 3-4).

Käytetään kirjallisuusarvoja kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Skaalataan lähtötiedot tarvittaessa vastaamaan paremmin suomalaisia olosuhteita ja ajantasaista tekniikkaa. Muun muassa lähdekirjallisuudessa käytetyt paneelihyötysuhteet perustuvat vuonna 2010 tai myöhemmin tehtyihin markkinatutkimuksiin paneelien hyötysuhteista. Paneelihyötysuhteet on tarkistettu lähdekirjallisuuden viittaamien valmistajien nykyisistä paneelimalleista. Yksi- ja monikidepiipaneeleille käytetään hyötysuhteita 17 % ja 16 % ja ohutkalvopaneeleille hyötysuhdetta 14 % (Yingli Solar 2013 & First Solar 2013).

Elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetään arvoja 61,2 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh yksikidepiipaneeleille, 55,9 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh minikidepiipaneeleille ja 28,3 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh ohutkalvopaneeleille (Fthenakis et al. 2011, 10; Jungbluth et al. 2012, 218). Lähtötietojen tarkempi laskenta on esitetty tämän työn liitteessä 4.

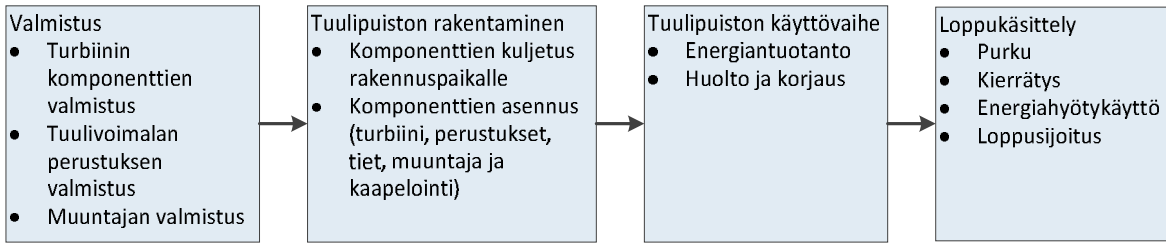
Aurinkosähköjärjestelmien käyttövaiheen tuotantopotentiaalia arvioidaan kaavalla 5. Käytetään mallin aurinkosähköjärjestelmän kapasiteettikertoimelle arvoa 0,75. Aurinkosähkön tuotantopotentiaali normi- ja matalaenergiatilanteessa on esitetty kuvassa 19 ja tarkat arvot taulukoituna liitteessä 4.



**Kuva 19.** Aurinkosähköjärjestelmän tuotantopotentiaali.

### 6.3.2 Tuulisähköntuotanto

Tuulivoimantuotannon elinkaareen kuuluvia vaiheita ovat tarvittavien raaka-aineiden hankinta ja jalostus, tuulipuiston komponenttien valmistus, komponenttien kuljetus rakennuspaikalle ja tuulivoimalan rakennus- ja asennustyöt, tuulipuiston käyttövaihe ja elinkaaren lopussa tuulipuiston käytöstä poisto. Kuvassa 20 on esitetty nämä tuulivoiman elinkaariarviointeihin yleisesti sisällytetyt elinkaaren vaiheet ja niihin kuuluvia toimintoja.



**Kuva 20.** Tuulivoimantuotannon elinkaaren vaiheet.

Valmistusvaihe sisältää tyypillisesti tuulipuiston raaka-aineiden tuotannon ja jalostuksen, komponenttien valmistuksen sekä kuljetukset raaka-aineiden jalostuksen ja komponenttien valmistuksen välillä. Tuulipuiston komponentteja ovat muun muassa perustukset, torni, kotelo, lavat ja muuntaja-asema. (Vestas 2012, 26.)

Tuulipuiston rakennusvaiheeseen sisältyy osien kuljetus rakennuspaikalle, tuulivoimalan pystytys- sekä asennustyöt. Pystytys- ja asennustyöt sisältävät usein myös uusien teiden ja muun tarpeellisen infrastruktuurin rakentamisen, perustusten valamisen, turbiinin noston, sisäiset kaapelointityöt sekä muuntaja-aseman pystytyksen ja puiston verkkoon kytkennän. (Vestas 2012, 26.)

Tuulipuiston käyttövaihe sisältää vähintään energiantuotannon, mutta yleensä myös tuulipuiston korjaus- ja huoltotyöt sekä tarvittavien varaosien valmistuksen. Elinkaaren lopussa tuulipuiston komponentit puretaan ja tuulipuistoon kuuluva maa-alue ennallistetaan tilaan, joka yleensä määritellään jo ennen tuulipuiston rakentamisen aloittamista. Puretut komponentit joko käytetään sellaisenaan uusiksi, kierrätetään soveltuvin osin, hyödynnetään energiantuotannossa tai loppusijoitetaan. (Vestas 2012, 26.)

Tuulivoimantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä arvioidaan tutkimuksen perusteella, jossa arvioitiin 44 julkaistua tuulivoiman LCA-tutkimusta. 34 työtä valittiin edelleen kvantitatiiviseen vertailuun. Nimellisteholtaan yli 100 kW tuuliturbiinien elinkaariarvioinneissa tuotejärjestelmä sisältää turbiinin lisäksi aina myös perustusten valmistuksen. Lisäksi suurin osa elinkaariarvioinneista sisältää myös sisäiset ja ulkoiset kaapeloinnit sekä muuntaja-asetat, jotka tarvitaan tuulipuiston kytkemiseksi yleiseen sähköverkkoon. Tuotejärjestelmä rajoittuu usein pisteeseen, jossa tuulipuistoa varten rakennettu sähköverkko yhdistyy jo

olemassa olevaan sähköverkkoon. Suurin osa tutkimuksista huomioi myös voimalan käytön ja huollon sekä niihin liittyvät erilaiset kuljetukset. Tutkimuksen mukaan mallinnuksessa käytettävien materiaalityyppien valinnalla on suuri merkitys. Esimerkiksi valitulla teräslaadulla ja edelleen teräksen jalostustekniikalla voi olla merkittävä vaikutus valmistusvaiheessa syntyviin päästöihin. Myös lapojen komposiittimateriaalien valinnalla arvellaan olevan suuri merkitys kokonaisuuden kannalta. Suurin osa tarkasteluun valituista artikkeleista on tehty Eurooppaan sijoittuvien tuulivoimaloiden tai -puistojen elinkaariarvioinneista. Käytetään tuulivoimantuotannolle päästöarvoa 12 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh. Arvo perustuu 13 yli 1 MW:n tuuliturbiineille laadittujen elinkaariarviointien keskiarvoon. Tutkimusten maksimi arvo oli noin 32 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh ja minimi noin 7 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh. (Arvesen & Hertwich. 2012.)

Arvioidaan tuulipuiston energiantuotantopotentiaali. Käytetään arvion perustana Suomen tuuliatlas-palvelun arviota tuulivoiman tuotantopotentiaalista 3 MW:n tuuliturbiinilla, joka on asetettu 125 m korkeudelle. Kerrotaan tämä arvio seitsemällä 21 MW tuulipuiston tuotantopotentiaalin arvioimiseksi. Tuotantoarvioissa huomioidaan tuulivoimalan käytettävyys, muuntajan ja siirtoverkon hyötysuhde, kylmät olosuhteet ja puiston vanahäviöt kokonaisyötysuhteella. Käytetään tuulipuiston tuotantoarvioissa kokonaisyötysuhteelle arvoa 0,903 (Hynynen et al. 2012, 29). Tuuliatlaksessa esimerkkivoimalana on käytetty WinWind WWD-3 tuulivoimalaa, jonka 3-lapaisen roottorin halkaisija on 90 m ja roottorin peittopinta-ala 7853 m<sup>2</sup> (Suomen tuuliatlas 2013). Tuulipuiston sähköntuotantopotentiaali tehdyillä oletuksilla on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** 21 MW tuulipuiston vuotuinen tuotantopotentiaali (Mukaillen: Suomen tuuliatlas 2013; Hynynen et al. 2012, 29).

<b>Kuukausi</b>	<b>Tuulipuiston tuotantopotentiaali [MWh]</b>
Tammikuu	6612
Helmikuu	5000
Maaliskuu	4014
Huhtikuu	3211
Toukokuu	3679
Kesäkuu	2743
Heinäkuu	2693
Elokuu	2762
Syyskuu	4052
<b>Lokakuu</b>	4715
<b>Marraskuu</b>	5082
<b>Joulukuu</b>	5126

### 6.3.3 CHP-laitos

Aiemmin oletettiin, että CHP-laitoksen sähköteho on 5 MW ja lämpöteho 12,5 MW, jolloin rakennussuhde on 0,4. Laitoksen kokonaishyötysuhteelle käytetään arvoa 90 %. Voimalaitosrakennuksen osalta elinkaariarvioinnissa huomioidaan voimalaitoksen raaka-aineiden tuotannon sekä rakentamisesta aiheutuvat päästöt sekä laitoksen käytöstä poistosta aiheutuvat päästöt. Voimalaitoksen käyttövaiheen osalta tarkasteluun sisällytetään polttoainehuolto, poltosta syntyvät päästöt sekä prosessissa syntyvät häviöt. CHP-laitoksen ja lämpölaitoksen polttoainehuolto mallinnetaan samalla tavalla. Polttoainehuolto- tuotejärjestelmän rakentaminen on kuvattu osiossa 6.3.4. Voimalaitoksen rakentamisesta ja purkamisesta aiheutuvia päästöjä arvioidaan kirjallisuuden perusteella taulukossa 7 esitettyjen arvojen keskiarvoon pohjautuen.

**Taulukko 7.** CHP-voimalaitoksen rakentamisesta ja purkamisesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen arviointi.

Päästöarvo [gCO <sub>2</sub> ekv/kWh]	Voimalaitos	Lähde
3,6	Hiilivoimalaitos	Hondo 2005
1,1	Hiilivoimalaitos	Odeh & Cockerill 2008
1,2	Hiilivoimalaitos	Pacca et al. 2002,
<b>Keskiarvo</b>		
<b>2,0</b>		

Metsätähteen energiahyötykäytön vaikutusta ilmakehän hiilitaseeseen arvioidaan metsätähteen energiahyötykäytön epäsuoria kasvihuonekaasupäästöjä käsittelevän artikkelin pohjalta. Tutkimusten tulokset on mallinnettu maaperän hiilimalli Yasso07:llä. Artikkelissa on arvioitu bioenergiantuotannon epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt energianhyötykäytön aloittamishetkellä ja edelleen seuraavalle 100 vuoden ajanjaksolle oletuksella, että metsätähtettä kerätään vuositasolla alueelta aina saman verran. (Repo et al. 2011.)

Arvioidaan tämän työn tarpeisiin keskimääräinen päästöarvo 100 vuoden tarkasteluajan jaksolta lähdeartikkelin kuvan 2 perusteella. Lähdeartikkelissa hiilidioksidipäästöt on laskettu metsähakkeelle kahdella eri rungon halkaisijalla. Käytetään työssä näiden keskiarvoa. Näillä oletuksilla metsätähteen energiahyötykäytöstä maaperän hiilitaseeseen muutoksen takia aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 181 kgCO<sub>2</sub>/MWh. Päästöt kohdennetaan tuotettua bioenergiayksikköä kohden.

Polton päästöjen arvioinnissa käytetään taulukossa 8 esitettyjä IPCC:n yleisiä päästökertoimia energiantuotannolle. Metsäbiomassasta varastoinnin aikana mahdollisesti vapautuvia kasvihuonekaasupäästöjä ei huomioida.

**Taulukko 8.** Metsähakkeen polton päästökertoimet. (IPCC 2006, 2.17,25.) Alkuperäiset arvot muunnettu kertoimella 0,0036 yksiköstä kg/TJ -> kg/MWh

Kasvihuonekaasu	Päästöarvo [kg/MWh]
CH <sub>4</sub>	0,0396
N <sub>2</sub> O	0,0252

Käyttövaiheen energiantuotanto mallinnetaan niin, että CHP-laitos tuottaa, milloin kapasiteetti riittää, kaiken yhdiskunnan tarvitseman lämpöenergian. Tuotettu kokonaisenergia

määräytyy siis lämmöntarpeen mukaan. 40 % tuotetusta kokonaisenergiasta on aina sähköenergiaa. Kuukausina, jolloin CHP-laitoksen tuotanto ei täytä sähkö- tai lämpöenergian tarvetta, energiantarve täytetään varavoimaksi mallinnetun julkisen sähköverkon kautta. Lisäksi oletetaan, että CHP-laitos ei ole käytössä kesä-elokuussa alhaisen lämmöntarpeen ja huollon takia. Näillä oletuksilla CHP-laitoksen tuotannon osuus yhdyskunnan lämpöenergiankulutuksesta on sekä normienergiatehokkuusluokan että matalaenergiatehokkuusluokan tarkastelussa 86 %.

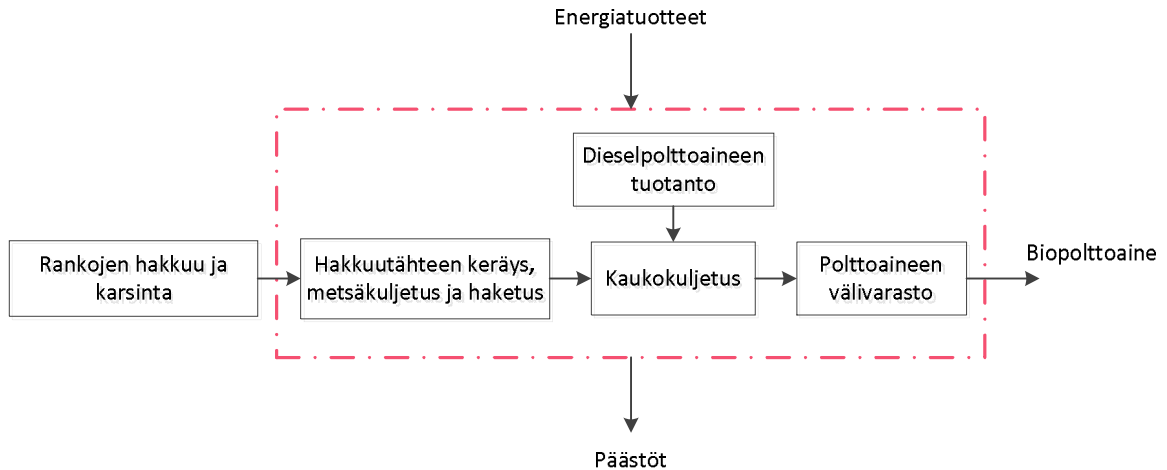
#### **6.3.4 Polttoainehuolto**

Arvioidaan polttoainehuoltoketjun kasvihuonekaasupäästöjä polttoaineen tuotantoon liittyvien koneiden ja laitteiden energiankulutuksen kautta. Koneiden ja laitteiden valmistukseen tai niiden käytöstä poistoon liittyviä ympäristövaikutuksia ei huomioida. Polttoaineen poltosta aiheutuvat päästöt huomioidaan voimalaitoskohtaisesti omissa yksikköprosesseissaan.

Suomessa energiantuotantoon käytettävän metsähakkeen raaka-aineena käytetään pääasiassa metsäteollisuuden ainespuuksi kelpaamatonta puubiomassaa. Tällöin on tapana kohdistaa hakkuun päästöt täysmääräisesti ainespuulle. Biopolttoaineen tuotantoketjussa erilaisten työkoneiden päästöjä arvioidaan tuntituottavuuden ja energiankulutuksen perusteella. Tuntituottavuus tarkoittaa tarkasteltavan työkoneen tuottavuutta tunnin ajanjaksolla. Työkoneiden energian kulutus ilmoitetaan tuntikohtaisena kulutuksena, jolloin kasvihuonekaasupäästöt saadaan selvitettyä käytetyn energialähteen ja työkoneen ominaisuuksien perusteella. Yleensä työkoneiden polttoaineena käytetään dieselpolttoainetta. (Laihanen & Tarjanen 2001, 40.)

Metsähakkeen tuotannon osalta huomioidaan energiapuun kuljetusten ja haketuksen energiankulutuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Polttoainehuolto-tuotejärjestelmän rajat ja yksikköprosessit on esitetty kuvassa 21. Polttoaineen välivarastoyksikköprosessista ei aiheudu mitään päästöjä. Yksikköprosessi on tehty mallinnusteknisistä syistä. Prosessissa valmis biopolttoaine ohjataan joko CHP- tai lämpölaitokselle.





**Kuva 21.** Polttoainehuolto -tuotejärjestelmän rajat ja yksikköprosessit.

Tuotantoketjut mallinnetaan olemassa olevien tutkimusten tulosten pohjalta. Tässä työssä metsähakkeen lämpöarvona käytetään  $0,8 \text{ MWh/i-m}^3$ , joka edustaa keskimääräistä lämpöarvoa laatuluokan II hakkeelle, jonka kosteuspitoisuus on enintään 50 prosenttia. Hakkeen irtotiheydelle saapumistilassa käytetään arvoa  $300 \text{ kg/i-m}^3$ . (Finbio 2013.) Tällöin energiasisältö hakekiloa kohden on  $9,6 \text{ MJ}$  ja tilavuus  $0,003 \text{ m}^3$ , kun käytetään kerrointa  $0,000278$  muunnettaessa megawattitunnit megajouleiksi.

Metsähake oletetaan haketettavan keskitetysti niin kutsutulla terminaalihaketuksella. Terminaalihaketuksen osuuden arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa (Motiva 2013). Terminaalihaketusta kutsutaan myös välivarastohaketukseksi. Palstalla kasoissa oleva puuaines kerätään ja kuljetetaan palstalta välivarastolle. Välivarastolla puuaines kasataan suurempaan välivarastokasaan, josta se on myöhemmin helppo hakettaa. Hakettaessa hakkuri puhalttaa metsähakkeen suoraan kuoma-auton lavalle, jossa se kuljetetaan käyttöpaikalle. Tässä tarkastelussa metsäkuljetuksen kuljetusmatkana käytetään  $250 \text{ m}$  ja metsätyökoneiden polttoaineena dieselpolttoainetta (Laihanen & Tarjanne 2001, 10–48.)

Oheisessa taulukossa 9 on esitetty välivarastohaketusmenetelmän metsässä tapahtuvien työvaiheiden työteho, polttoaineenkulutus ja aiheutuvat päästöt energiasisältöä kohden. Hakkeen energiasisällöksi oletettiin aiemmin  $0,8 \text{ MWh/i-m}^3$ . Hakuukoneille, metsätraktoreille sekä haketuslaitteille käytetään vuoden 2011 laitekannan mukaista päästökerrointa  $2632 \text{ gCO}_2\text{ekv/l}$  (VTT Lipasto 2013).

**Taulukko 9.** Välivarastohaketusmenetelmän metsässä tapahtuvien työvaiheiden työteho, polttoaineenkulutus ja aiheutuvat päästöt. (Mukaiillen Kupari 2005, 60; Laihanen & Tarjanne 2001, 48.)

Työvaihe	Työteho [i-m <sup>3</sup> /h]	Kulutus [l/h]	Kasvihuonekaasupäästö [kgCO <sub>2</sub> ekv/h]	Ominaispäästö [kgCO <sub>2</sub> ekv/MWh]
Metsäkuljetus	33	9	23,69	0,90
Haketus	46	46	121,07	3,29
<b>Yhteensä</b>			144,76	4,19

Metsähakkeen kaukokuljetus oletetaan tehtävän täysperävaunukuorma-autolla, joka käyttää polttoaineenaan dieselöljyä. Kuljetusten mallinnus toteutetaan GaBi 5:n valmiilla yksikköprosessilla. Suomessa käytetyn keskimääräisen täysperävaunukuorma-auton kokonaismassa on 60 tonnia ja kuormakapasiteetti 40 tonnia (VTT Lipasto 2013). GaBi 5:n yksikköprosessi GLO: Truck-trailer PE, jonka päästöluokka on Euro 5, kokonaismassa 34–40 tonnia ja kuormakapasiteetti 27 tonnia vastaa parhaiten suomalaista kuljetuskalustoa. Kaukokuljetukseen käytettävän rekan polttoainehuolto mallinnetaan GaBi 5:n yksikköprosessilla EU-27: Diesel mix at refinery PE.

Metsähakkeen keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa vuonna 2011 oli 96 km (Tilastokeskus 2012b). Oletetaan metsähakkeen kaukokuljetusmatkaksi 100 km. Lisäksi oletetaan, että täysperäkuorma-auto kuljettaa täyden lastin metsähaketta polttolaitokselle ja ajaa takaisin tyhjänä. Tämän kuvaamiseksi kuorman täyttöasteeksi GaBi:ssa on muutettu 50 prosenttia ja kuljetusmatkaksi 200 kilometriä.

### 6.3.5 Maalämpöjärjestelmä

Maalämpöjärjestelmän elinkaareen kuuluu järjestelmän komponenttien raaka-aineiden hankinta ja jalostus, komponenttien valmistus, maalämpöjärjestelmän asentaminen sekä maalämpöjärjestelmän käyttö ja käytöstä poisto. Käyttövaiheeseen sisältyy maalämpöpumpun tarvitseman sähköenergian tuottaminen. Maalämpöjärjestelmän huoltotarve on yleensä pieni. Tyypillinen huoltotoimenpide on kylmäaineen lisääminen järjestelmään. (Greening & Azapagic 2012.)

Suurin osa maalämpöjärjestelmän elinkaarenaikaisista kasvihuonekaasupäästöistä syntyy käyttövaiheessa. Käyttövaiheessa aiheutuvat kasvihuonekaasut ovat pääasiassa järjestelmän kuluttaman sähköntuotannosta aiheutuneita päästöjä. Lisäksi maalämpöjärjestelmien kylmäaineina käytetään usein fluorihilivety-yhdisteitä, jotka ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Lämpöpumpuille tehdyissä elinkaariarvioinneissa oletetaan usein, että kylmäainetta vapautuu ilmakehään jonkin verran jo valmistusvaiheessa ja edelleen vuosittain lämpöpumpputjärjestelmän käyttövaiheessa. (Greening & Azapagic 2012; Johnson 2011.)

Arvioidaan kiinteistökohtaisten maalämpöjärjestelmien valmistamisesta, asennuksesta, käytöstä poistosta ja tarvittavista kuljetuksista aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä tutkimuksen pohjalta, jossa vertailtiin erilaisten lämpöpumpusovellusten ympäristövaikutuksia Iso-Britanniassa. Tutkimuksessa on tarkasteltu muun muassa asuinrakennuksen yhteyteen asennettavaa maalämpöjärjestelmää, jonka lämmönkeruuputkisto on asennettu 150 metriä syvään lämpökuiluun. Maalämpöjärjestelmän lämpökertoimeksi on oletettu 3,9 ja aiheutuvat ympäristövaikutukset on kohdennettu maalämpöjärjestelmälle sen tuottamaa lämpöenergiayksikköä kohden. (Greening & Azapagic 2012.)

Tutkimuksessa on huomioitu valmistus ja asennusvaiheen osalta raaka-aineiden hankinta ja jalostus, maalämpöjärjestelmän komponenttien valmistus, asuinrakennuksen lattian alle asennettavan lämmönjakojärjestelmän valmistus, kylmäaineen valmistus sekä lämpökaivojen poraus ja koko järjestelmän asennus. Maalämpöjärjestelmä oletettiin valmistettavan Euroopassa ja sen eliniäksi arvioitiin 20 vuotta. Käyttövaiheen osilta tarkastelussa huomiointiin järjestelmän käyttämän sähkön tuotanto, 6 % vuotuinen häviö kylmäaineelle ja korvaavan kylmäaineen valmistus. Elinkaaren lopussa metalliosat oletettiin kierrätettäviksi Iso-Britannian kierrätysasteen mukaisesti ja muut järjestelmän osat loppusijoitettiin kaatopaikalle. Järjestelmän komponenteille oletettiin 700 km kuljetusmatka valmistajalta asennuspaikalle. Näillä oletuksilla tutkimuksen mukaan maalämpöjärjestelmän kasvihuonekaasupäästöt ovat 0,189 kgCO<sub>2</sub>ekv/kWh, josta yli 95 % aiheutuu käyttövaiheessa kulutetun sähkön tuotannosta. (Greening & Azapagic 2012). Muusta kuin sähköntuotannosta aiheutuvat elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat tällöin noin 0,00945 kgCO<sub>2</sub>ekv/kWh.

Arvo 0,00945 kgCO<sub>2</sub>ekv/kWh on laskettu maalämpöjärjestelmälle, jonka lämpökerroin on 3,9. Oletetaan, että tämän työn maalämpöjärjestelmän lämpökerroin on 3. Lämpökerroin kertoo kuinka paljon lämpöä maalämpöjärjestelmä pystyy tuottamaan kuluttamaansa sähköenergiayksikköä kohden. Tällöin maalämpöjärjestelmälle, jonka lämpökerroin on 3, muusta kuin sähköntuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt vastaavilla oletuksilla ovat noin 0,0123 kgCO<sub>2</sub>ekv/kWh. Käytetään tätä arvoa maalämpöjärjestelmän kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa.

### **6.3.6 Lämpölaitos**

Käyttövaiheen energiantuotanto mallinnetaan niin, että lämpölaitos tuottaa, milloin kapasiteetti riittää, kaiken yhdyskunnan tarvitseman lämpöenergian. Tuotettu kokonaisenergia määräytyy siis lämmöntarpeen mukaan. Kuukausina, jolloin lämpölaitoksen tuotanto ei täytä lämmöntarvetta, energiantarve täytetään rakennusten lämmitysjärjestelmiin kytkettyjen sähkövastusten avulla. Jos aurinko- ja tuulisähköä tuotetaan yli yhdyskunnan tarpeen, sähkövastusten energiantarve katetaan uusiutuvalla energialla ja muussa tapauksessa huippu- ja varavoimaksi mallinnetulla keskimääräisellä suomalaisella verkkosähköllä. Lisäksi oletetaan, että lämpölaitos ei ole käytössä kesä-elokuussa alhaisen lämmöntarpeen ja huoltoseisokin takia. Lämpölaitoksen hyötysuhteeksi oletettiin aiemmin 85 %.

Lämpölaitoksen rakentamisesta, energiantuotannosta, polttoainehuollosta sekä käytöstä poistosta aiheutuvien päästöjen arvioinnissa käytetään samoja päästöarvoja kun CHP-laitoksen päästöjen arvioinnissa.

### **6.3.7 Sähkön- ja lämmöntarve**

Elinkaariarvioinnin toiminnallinen yksikkö on osiossa 6.2.3 määritetty yhdyskunnan vuosittainen sähkö- ja lämpöenergiatarve kuukausitasolla ja kahdessa eri rakentamisen energiatehokkuusluokassa tarkasteltuna. Sähkö- ja lämmöntarveyksikköprosesseissa on syöteenä yhdyskunnan tarvitsema sähkö- ja lämpöenergiamäärä kuukausikohtaisina virtoina.

### 6.3.8 Sähköverkko

Mallin kaikissa eri tuotantolaitoksissa tuotettu sähköenergia tuodaan sähköverkkoon mallinnuksen selkeyttämiseksi. Sähköverkosta lähtee yhdyskuntaan sen kuukausitasolla tarvitsema sähköenergiamäärä. Lisäksi, jos yhdyskunnan lämmöntarve täytetään maalämmöllä, sähköverkosta otetaan maalämpöjärjestelmän tarvitsema sähkömäärä. Jos sähköenergiaa tuotetaan enemmän kuin sitä tarvitaan, ylijäämä sähköä mallinnetaan syötettävän yhdyskunnan ulkopuoliseen sähköverkkoon, jossa se korvaa keskimääräistä suomalaista verkkosähköä. Hetkinä, jolloin sähköntuotanto ei riitä kattamaan kulutusta sähköä otetaan yhdyskunnan sähköverkon ulkopuolelta.

Oletetaan, että sähkönsiirrosta aiheutuu, aurinkosähköä lukuun ottamatta, 4 % siirtohäviöt. Sähkönsiirtohäviöt mallinnetaan hukkalämpönä ilmaan. Sähkönsiirron häviöistä aiheutuvan lisäenergiantuotannon päästöjä ei huomioida tässä yksikköprosessissa. Siirtohäviöistä aiheutuva lisäenergiantuotannon tarve ja edelleen lisäenergiantuotannosta aiheutuvat päästöt kohdennetaan yksikköprosessille, joka energian tuottaa.

### 6.3.9 Lämpöverkko

CHP- ja lämpölaitoksen tuottama lämpö siirretään asuinrakennuksille kaukolämpöverkossa. Kaukolämpöverkon infrastruktuurin materiaalien valmistuksen ja rakennuksen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä arvioidaan tutkimuksen perusteella, jossa on tutkittu ympäristövaikutuksia kaukolämpöjärjestelmälle, joka täyttää 240 asuinrakennuksen lämpöenergiantarpeen. (Oliver-Sóla et al. 2009). Alkuperäisen tutkimuksen tuotejärjestelmä sisältää voimalaitoksen, kaukolämpöverkon ja sen pääkomponentit, rakennuskohtaiset liittymisjohdot, rakennuskohtaiset lämmönjakokeskukset sekä lämmönjakojärjestelmän ja tarvittavat kaivu- ja asennustyöt. Tuotejärjestelmä ei sisällä kaukolämpöjärjestelmän energian kulutusta eikä järjestelmässä tapahtuvia lämpöhäviöitä.

Suomessa kaukolämpöenergia siirretään yleensä kaksiputkijärjestelmällä, jossa on kiertoineena vesi. Kaukolämpöputki on terästä ja ympäröivä eristekerros polyuretaaninvaahtoa,

jonka ympärillä on vielä kova polyeteenistä valmistettu suojakerros. (Energiateollisuus 2006, 137.) Lähdetutkimuksen kaukolämpöputkien rakenne on vastaavanlainen.

Lähdetutkimuksen toiminnallinen yksikkö on kaukolämpöjärjestelmä, joka kattaa 240 kotitalouden tilojen ja käyttöveden lämmityksen 50 vuoden ajan. Rajataan lähdetutkimuksen tuloksista pois voimalaitoksen sekä rakennuskohtaisen lämmönjakojärjestelmän aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt, koska mallista löytyy jo lämpöä tuottava voimalaitos ja rakennuskohtaiset lämmönjakojärjestelmät on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi skaalataan tulokset vastaamaan energiatehokkuudeltaan normi- ja matalaenergiarakennusten määriä, jotka arvioitiin osiossa 6.2.3. Energiatehokkuusluokaltaan normitason yhdyskunnassa on noin 1400 rakennusta ja matalaenergiatason yhdyskunnassa noin 2200 rakennusta. Liitteessä 5 on esitetty tarkemmin tarkasteluun sisällytetyt kaukolämpöjärjestelmän osat, arviointiin sisällytetyt toiminnot ja järjestelmän osien rakentamisesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Yhteenveto tuloksista on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Kaukolämpöverkon rakentamisesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt.

	Energiatehokkuusluokka: normi [kgCO <sub>2</sub> ekv / rakennuskanta]	Energiatehokkuusluokka: matala [kgCO <sub>2</sub> ekv / rakennuskanta]
Kasvihuonekaasupäästöt toimintavuotta kohden	40 250	63 250

Kaukolämpöverkon käyttövaiheen osalta huomioidaan kaukolämpöverkossa tapahtuvat lämmönsiirtohäviöt ja kaukolämpöverkon pumppausenergian kulutus. CHP- ja lämpölaitoksessa tuotetulle lämmölle oletetaan 10 % siirtohäviö lämpöverkossa (Vehviläinen et al. 2010, 37). Lämmönsiirtohäviöt mallinnetaan hukkalämpönä ilmaan. Kaukolämpöverkon pumppausenergian kulutuksen oletetaan olevan 0,5 % kaukolämmön hankinnasta (Pöyry Energy 2009, 2).

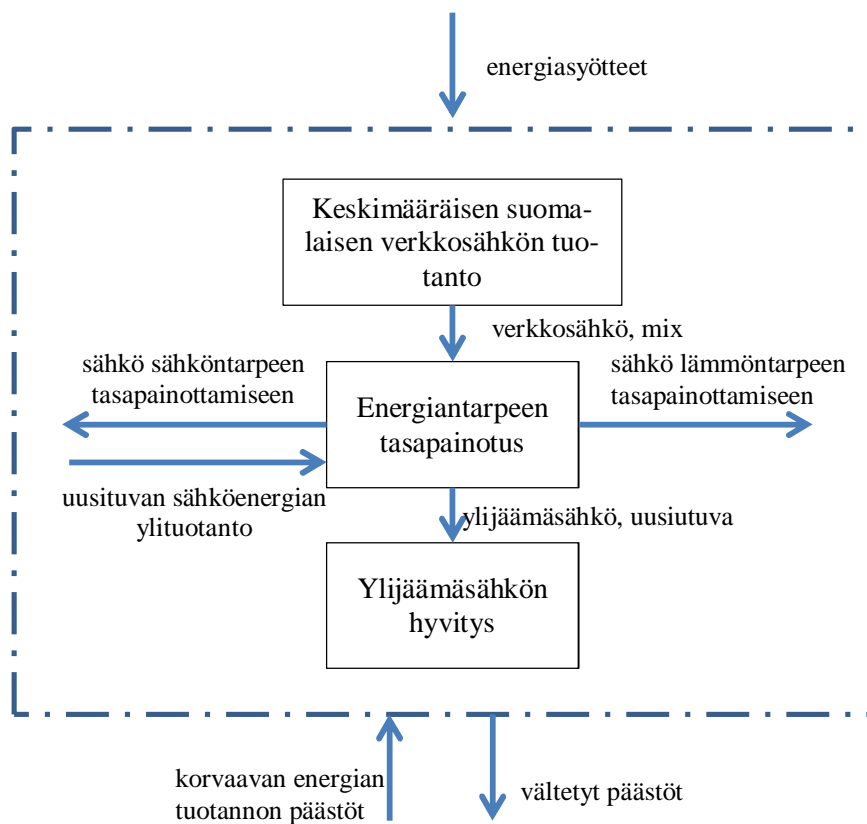
Kaikki mallin lämpövirrat kulkevat GaBi 5:n lohkokaaviossa lämpöverkko-yksikköprosessin kautta mallinnuksen selkeyttämiseksi. Lämpöverkko on rakennettu niin, että sieltä lähtee tuotteena aina yhdyskunnan tarvitsema vuotuinen lämpömäärä kuukausitasolla. Jos tarkasteltavan skenaarion pääasiallinen lämmöntuotantotapa ei riitä täyttämään

alueen lämmöntarvetta, vaje täytetään asuinrakennusten lämmönjakojärjestelmään kytke-  
tyillä sähkövastuksilla, joihin sähkö otetaan sähköverkosta.

Maalämpöpumpuilla tuotetulle lämmölle ei kuitenkaan oleteta mitään lämpöhäviöitä läm-  
pöverkossa, kaukolämmön pumppausenergiankulutusta eikä maalämpöskenaariolle kohdis-  
teta lämpöverkon rakentamisesta aiheutuvia päästöjä, koska maalämpöjärjestelmän olete-  
taan olevan kytketty suoraan asuinrakennusten lämmönjakojärjestelmään.

### 6.3.10 Energiantarpeen tasapainotus ja ylijäämäsähkön hyvittäminen

Mallissa varaudutaan uusiutuvan energian ajoittaiseen yli- tai alituotantoon kolmen yksik-  
köprosessin avulla. Yksikköprosesseilla varaudutaan tilanteeseen, jolloin uusiutuvan ener-  
gian tuotanto ylittää tai alittaa yhdyskunnan sähkön- tai lämmöntarpeen. Yksikköprosessit  
on esitetty kuvassa 22.



**Kuva 22.** Uusiutuvan energian tuotantokuorman vaihteluihin varautuminen GaBi-mallissa.

Energiantarpeen tasapainotus -yksikköprosessi on laadittu mallinnusteknisistä syistä. Yksikköprosessin avulla voidaan tasapainottaa kuukausitasolla sähkön- tai lämmöntuotannon vajeita. Jos yhdyskunnan energiantarvetta ei voida täyttää mallinnetulla uusiutuvan energian tuotannolla, tasapainotetaan vaje keskimääräisellä suomalaisella verkkosähköllä. Malli osaa myös korvata lämpövajeen tuotejärjestelmässä tuotetulla uusiutuvalla sähköenergialla, mikäli sähköenergian ylituotanto esiintyy samanaikaisesti lämpövajeen kanssa. Suomalaisen verkkosähkön tuotanto mallinnetaan GaBi 5:n yksikköprosessilla FI: Electricity grid mix PE.

Uusiutuva energia, joka ylittää yhdyskunnan energiantarpeen syötetään tuotejärjestelmän ulkopuolelle, jossa sen oletetaan korvaavan keskimääräistä suomalaista verkkosähköä. Verkkosähkön tuotannon päästöt hyvitetään vältettyinä päästöinä tuotejärjestelmälle. Käytetään verkkosähkölle energiavajeen korvaavan yksikköprosessin FI: Electricity grid mix PE päästöarvoa. Päästöarvo on CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) metodologian mukaisesti 312 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh.

## 6.4 Nettoenergiatarkastelu

Yksityiskohtaisten lähtötietojen löytäminen voimalaitosten raaka-aineiden hankinnasta ja jalostuksesta, komponenttien valmistuksesta, voimalaitosten rakentamisesta tai asentamisesta, käytönaikaisten toimintojen ja käytöstä poiston sekä erilaisten kuljetusten kuluttaman energian arvioimiseksi osoittautui erittäin haasteelliseksi. Toteutetaan nettoenergiatarkastelu hyvin yleisellä tasolla kirjallisuusarvojen ja elinkaariarviointimallissa käytettyjen energiantuotantopotentiaalien avulla.

Arvioidaan kirjallisuuden perusteella aurinko- ja tuulisähkön energiantakaisinmaksuajat elinkaariarviointimallin oletuksilla sekä muodostetaan arvio metsäenergiantuotannon polttoaineketjun energiankulutuksesta suhteessa tuotettuun energiaan. Käytetään aurinko- ja tuulisähköntuotannolle kaavan 4 ja CHP-tuotannolle kaavan 2 logiikkaa.



### 6.4.1 Aurinkosähkön EROI-arvo

Käytetään aurinkosähköjärjestelmän energiantakaisinmaksuajan arvioinnissa samoja lähteitä, joiden perusteella arvioitiin aiemmin elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Aurinkosähköjärjestelmän eliniäksi oletettiin molemmissa lähteissä 30 vuotta. Energiantakaisinmaksuajan laskennan rajaukset ja tehdyt skaalaukset on esitetty liitteessä 4. Aurinkosähköjärjestelmän EROI-arvo kaavan 4 ensimmäisen muodon mukaisesti laskettuna eli aurinkosähköjärjestelmän arvioitu elinikä jaettuna sen energian takaisinmaksuajalla on esitetty taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Aurinkosähköjärjestelmän energian takaisinmaksuajan ja EROI-arvon laskenta.

Paneelityyppi	Yksikidepii	Monikidepii	Ohutkalvo (CdTe)	Lähde
Aurinkosähköjärjestelmän energian takaisinmaksu-aika [a], keskiarvo	2,6	2,5	1,2	Fthenakis et al. 2011, 10; Jungbluth et al. 2012, 218.
Aurinkosähköjärjestelmän elinikä [a]	30	30	30	Fthenakis et al. 2011, 10; Jungbluth et al. 2012, 218.
EROI-arvo	11	12	25	

### 6.4.2 Tuulisähkön EROI-arvo

Myös tuulisähkön nettoenergiatarkastelussa käytetään samaa lähdettä kuin elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Tutkimuksessa on raportoitu 11 tuulipuiston, joiden tuulivoimaloiden turbiinien ominaisteho on suurempi kuin 1MW, energiantensiteetti. Energiaintensiteetillä tarkoitetaan tutkimuksessa tuulivoimalan elinkaarenaikaisen kokonaisenergiatarpeen suhdetta sen elinkaaren aikana tuottamaan energiamäärään. (Arvesen & Hertwich 2012.) Artikkelin lisämateriaalissa on raportoitu artikkeleita yksityiskohteisemmin tarkasteltujen tutkimusten lähtöoletukset. Lisämateriaalin mukaan mukana on kolme 3 MW tuuliturbiineille tehtyä elinkaariarviointia.

Lasketaan raportoitujen tuuliturbiinien ominaistehojen, kapasiteettikertoimien ja energiaintensiteetin avulla näiden kolmen lähdetutkimuksen elinkaarenaikainen kokonaisenergiakulutus. Tässä työssä mallinnetun tuulipuiston energian takaisinmaksuajalle muodostetaan kolme arviota lähdetutkimuksen tuulivoimaloiden kokonaisenergiakulutuksen kautta. EROI-arvo lasketaan kaavan 4 mukaisesti tuulipuiston eliniän ja energian takaisinmaksuajan suhteena. Taulukossa 12 on esitetty laskennan kulku ja elinkaariarviointimallin tuulipuiston EROI-arvo kolmeen eri lähteeseen pohjautuen.

**Taulukko 12.** Tuulisähkön EROI-arvon laskenta.

Arvio numero	1	2	3	Lähde
Ominaisteho [MW]	3	3	3	Arvesen & Hertwich 2012
Kapasiteettikerroin [%]	33,3	30	54,2	Arvesen & Hertwich 2012
Vuodessa tuotettu sähköenergia [MWh]	8 751	7 884	14 244	Arvesen & Hertwich 2012
Energiaintensiteetti [kWh/kWh]	0,043	0,027	0,028	Arvesen & Hertwich 2012
Tuulivoimalan elinkaarenaikainen energian-kulutus [MWh]	7 526	4 257	7 977	Arvesen & Hertwich 2012
Tuulivoiman tuotanto mallin 7:lle tuulivoimalalle [MWh]	50 000	50 000	50 000	Elinkaariarviointimalli 6.3.2
EBPT [a]	1,05	0,60	1,12	
EROI-arvo	19	34	18	

Arvioitu EROI-arvo on pienimmillään 18 ja suurimmillaan 34. Arvioiden keskiarvo on noin 23.

### 6.4.3 CHP-tuotannon EROI-arvo

Arvioidaan CHP-tuotannon EROI-arvo kaavan 2 mukaisesti, mutta lasketaan EROI-arvo pelkän sähkön sijaan sähkölle ja lämmölle. Lasketaan EROI-arvo käyttövaiheen polttoaineen tuotannon energiankulutuksen ja tuotettua energiamäärää vastaavan voimalaitoksen rakentamiseen kuluneen energiasyötteen ja tuotetun energian suhteena.

Polttoainehuoltoketjun energiankulutus koostuu laaditussa elinkaariarviointimallissa ainoastaan työkonien polttoainekulutuksesta. Tarkasteluun on sisällytetty polttoaineen metsäkuljetus, haketus ja kaukokuljetus. Polttoainehuollon kasvihuonekaasupäästöjen las-

kennassa käytettiin osiossa 6.3.4 apuna arvioita metsäkuljetus- ja haketus-työvaiheiden työteholle ja työkoneiden polttoaineen kulutukselle. Taulukossa 13 on arvioitu näiden samojen arvojen pohjalta, kuinka paljon dieselpolttoainetta kuluu tuotetun metsätähdehакkeen energiasisältöä kohden. Tiedot kaukokuljetuksen polttoaineenkulutuksesta haetaan GaBi 5:sta. Metsähакkeen lämpöarvona käytetään edelleen 0,8 MWh/i-m<sup>3</sup> ja irtotiheydelle saapumistilassa arvoa 300 kg/i-m<sup>3</sup>.

**Taulukko 13.** Polttoainehuoltoketjun dieselpolttoaineen ominaiskulutus.

Työvaihe	Työteho [i-m <sup>3</sup> /h]	Työteho [MWh/h]	Diesel-polttoaineen kulutus [l/h]	Diesel-polttoaineen ominaiskulutus [l/MWh]
<b>Metsäkuljetus</b>	33	26,4	9	0,34
<b>Haketus</b>	46	36,8	46	1,25
<b>Kaukokuljetus</b>				1,69
<b>Yhteensä</b>				3,28

Arvioidaan myös biovoimalaitoksen rakentamiseen kuuluva energia kirjallisuuden perusteella. Erään tutkimuksen perusteella CHP-laitoksen rakentamiseen kuluu energiaa noin 525 MWh megawattia polttoainetehoa kohden (Zuwala 2012). Tällöin mallin CHP-laitoksen rakentamiseen voidaan arvioida kuluneen noin 9 200 MWh energiaa, jos kokonaisteho on 17,5. Lasketaan voimalaitoksen rakentamisen energiankulutus sen käyttövaiheessa tuottamaa energiaa kohden. Käytetään voimalaitoksen käyttöiälle arvioita 30 vuotta ja huipunkäyttöajalle samaa arvioita kuin aiemmin osiossa 6.2.3 eli noin 6 000 h/a. Tällöin voimalaitos voisi tuottaa käyttöikänsä aikana noin 3150 GWh energiaa eli rakentamisvaiheessa kulutettu energia on noin 0,003 MWh/MWh.

Lasketaan biovoimalaitoksen energiantuotannon EROI-arvo, kun tuotetaan 10 MWh energiaa ja voimalaitoksen polttoainehyötysuhde on 0,9. Käytetään dieselin lämpöarvolle arvoa 10,05 kWh/l (Motiva 2010a). Laskenta on esitetty taulukossa 14.

**Taulukko 14.** CHP-laitoksen EROI-arvon laskenta.

Tuotettu energia [MWh]	10
Biopolttoaineen kulutus [MWh]	11,1
Polttoaineketjun diesel-polttoaineen kulutus vastaavalla hakemäärällä [l]	36,5
Kulutetun dieselin energiasisältö [MWh]	0,37
Voimalaitoksen rakentamisen energiankulutus [MWh]	0,03
EROI-arvo (tuotettu energia / polttoaineketjun ja voimalaitoksen rakentamisen energiankulutus)	25

## 6.5 Herkkyystarkastelu

### 6.5.1 Lämmöntuotantotavan vaikutus syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin aurinko- ja tuulipainotteisessa skenaariossa

Vertaillaan keskenään kahta vaihtoehtoista tapaa täyttää yhdyskunnan lämpöenergian tarve, kun pääasiallinen sähköntuotantotapa on aurinko- ja tuulisähköntuotanto. Verrataan lämmöntuotantoa maalämpöpumpuilla tilanteeseen, jossa lämpö tuotettaisiin lämpölaitoksella. Oletetaan, että aurinkosähköjärjestelmän paneelit on valmistettu monikiteisestä piistä. Tarkastellaan lisäksi bioperäisten hiilidioksidipäästöjen huomioon vaikutusta lämpölaitosvaihtoehdon kilpailukykyyn. Toteutetaan tarkastelu molemmilla toiminnallisilla yksiköillä, koska niiden sähkön ja lämmöntarpeen suhde on erilainen. Herkkyystarkastelun tulokset on esitetty taulukoissa 15 ja 16.

Taulukko 15. Lämmöntuotantomuodon valinnan herkkyytarkastelu. Energiatehokkuus: normitaso.

Energiatehokkuusluokka	NORMI		
	Maalämpöjärjestelmä	Lämpölaitos	Lämpölaitos, bioperäinen CO <sub>2</sub> ei huomioitu
<b>Lämmöntuotantotapa</b>			
<b>Kasvihuonekaasupäästöt</b>	tCO <sub>2</sub> ekv/a		
<b>Polttoainehuolto</b>	0	695	695
<b>Sähköntuotanto uusiutuvista</b>	1 566	1 566	1 566
<b>Lämmöntuotanto uusiutuvista</b>	839	12 478	653
<b>Lämpöverkko</b>	0	40	40
<b>Korvaavan energian tuotanto</b>	62	0	0
<b>Yhdyskunnan sähkötarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 891	-9 594	-9 594
<b>Yhteensä</b>	-2 424	5 185	-6 640

Taulukko 16. Lämmöntuotantomuodon valinnan herkkyytarkastelu. Energiatehokkuus: matalaenergiataso.

Energiatehokkuusluokka	MATALA		
	Maalämpöjärjestelmä	Lämpölaitos	Lämpölaitos, bioperäinen CO <sub>2</sub> ei huomioitu
<b>Lämmöntuotantotapa</b>			
<b>Kasvihuonekaasupäästöt</b>	tCO <sub>2</sub> ekv/a		
<b>Polttoainehuolto</b>	0	692	692
<b>Sähköntuotanto uusiutuvista</b>	2 122	2 122	2 122
<b>Lämmöntuotanto uusiutuvista</b>	834	12 432	650
<b>Lämpöverkko</b>	0	63	63
<b>Korvaavan energian tuotanto</b>	532	0	0
<b>Yhdyskunnan sähkötarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 114	-8 362	-8 362
<b>Yhteensä</b>	-626	6 948	-4 834

Maalämpöjärjestelmä yhdyskunnan pääasiallisena lämmöntuotantomuotona aiheuttaa vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä sekä normi- että matalaenergiatehokkuustasolla. Yhdyskunnan energiajärjestelmän kokonaiskasvihuonekaasupäästöt ovat normienergiatehokkuustasolla noin -2420 tCO<sub>2</sub>ekv/a maalämpöjärjestelmän ollessa yhdyskunnan pääasiallinen lämmitysmuoto ja lämpölaitoksen ollessa yhdyskunnan pääasiallinen lämmitysmuoto 5185 tCO<sub>2</sub>ekv/a ja -6640 tCO<sub>2</sub>ekv/a, kun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida. Matalaenergiatehokkuustasolla vastaavat luvut ovat maalämpöjärjestelmälle -626 tCO<sub>2</sub>ekv/a ja 6948 tCO<sub>2</sub>ekv/a tai -4834 tCO<sub>2</sub>ekv/a lämpölaitokselle.

Taulukoista nähdään, että sekä lämmöntuotantotavan valinnalla, että bioperäisten hiilidioksidipäästöjen huomioinnilla on merkitystä kokonaisuuden kannalta. Jos bioperäiset hiilidioksidipäästöt sisällytetään tarkasteluun, maalämpöjärjestelmä on aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta parempi vaihtoehto molemmissa energiatehokkuusluokissa, kuin lämpölaitos. Lämpölaitosvaihtoehdon selvästi suuremmat päästöt aiheutuvat pääasiassa lämpölaitoksen elinkaarenaikaisista kasvihuonekaasupäästöistä. Lämmöntuotannossa suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu metsätähteestä polttoprosessissa vapautuvasta hiilestä. Mikäli bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei sisällytetä tarkasteluun, lämpölaitos on maalämpöjärjestelmää parempi vaihtoehto. Lisäksi molemmista taulukoista nähdään, että lämpölaitoksen toimiessa yhdyskunnan pääasiallisena lämmöntuotantomuotona yhdyskunta ei tarvitse korvaavaa energiantuotantoa ja lisäksi aurinko- ja tuulisähköä jää vuositasolla maalämpöjärjestelmä vaihtoehtoa enemmän syötettäväksi yhdyskunnan ulkopuolelle.

### **6.5.2 Aurinkopaneelitekniikan valinnan vaikutus syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin**

Työssä aurinkosähköntuotantoon käytettävissä oleva ala säilyy vakiona. Tarkastellaan, miten käytetyn paneelintyyppin valinta vaikuttaa energiajärjestelmän tuottamiin kasvihuonekaasupäästöihin. Tarkastellaan aurinkopaneelitekniikan vaihtamista monikiteisestä piistä yksikiteiseen piihin tai kadmium-telluuri-ohutkalvokennoihin.

Piikidepaneelien sähköntuotannon hyötysuhde on parempi kuin ohutkalvotekniikkaa edustavan kadmium-tellurii-paneelien. Ohutkalvoteknologiaan perustuvien aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ovat kuitenkin pienempiä kuin piikideteknologiaan perustuvien aurinkosähköjärjestelmien kasvihuonekaasupäästöt, kun päästöt suhteutetaan paneelien elinkaarensa aikana tuottamaan sähköenergiaan.

Toteutetaan herkkyystarkastelu koko mallin tasolla, jotta nähdään kompensoiko piikidekennojen parempi aurinkosähköntuotantopotentiali valmistuksesta aiheutuvia suurempia kasvihuonekaasupäästöjä. Toteutetaan tarkastelu molemmilla toiminnallisilla yksiköillä, koska niiden sähkön ja lämmöntarpeen suhde on erilainen ja käytetään yhdyskunnan läm-

möntarpeen kattamiseen maalämpöä. Herkkyystarkastelun tulokset on esitetty taulukoissa 17 ja 18.

**Taulukko 17.** Aurinkopaneelin valinnan herkkyystarkastelu. Energiatohokkuus: normitaso.

<b>NORMI</b>			
	Monikiteinen pii	Yksikiteinen pii	Ohutkalvo
	tCO <sub>2</sub> ekv/a		
<b>Aurinkosähköntuotanto</b>	969	1 130	456
<b>Maalämmön tuotanto</b>	839	839	839
<b>Korvaavan energian tuotanto</b>	62	48	91
<b>Yhdyskunnan sähköntarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 891	-5 155	-4 361
<b>Yhteensä</b>	-3 020	-3 138	-2 975
<b>Muutos [tCO<sub>2</sub>ekv/a]</b>	0	-118	45
<b>Muutos [%]</b>	0 %	4 %	-1 %

**Taulukko 18.** Aurinkopaneelin valinnan herkkyystarkastelu. Energiatohokkuus: matalaenergiataso.

<b>MATALA</b>			
	Monikiteinen pii	Yksikiteinen pii	Ohutkalvo
	tCO <sub>2</sub> ekv/a		
<b>Aurinkosähköntuotanto</b>	1 526	1 779	718
<b>Maalämmön tuotanto</b>	834	834	834
<b>Korvaavan energian tuotanto</b>	532	492	617
<b>Yhdyskunnan sähköntarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 114	-4 514	-3 320
<b>Yhteensä</b>	-1 223	-1 409	-1 152
<b>Muutos [tCO<sub>2</sub>ekv/a]</b>	0	-186	71
<b>Muutos [%]</b>	0 %	15 %	-6 %

Taulukoista nähdään, että normienergiatohokkuustasolla kaikkien kolmen vaihtoehdon kokonaiskasviuonekaasupäästöt jäävät molemmilla toiminnallisilla yksiköillä negatiivisiksi. Tämä johtuu siitä, että kuukausina, jolloin yhdyskunnan uusiutuvan sähkön tuotanto ylittää yhdyskunnan kokonaisenergiantarpeen, ylijäämä sähkö syötetään yhdyskunnan ulkopuolelle, jossa sen oletetaan korvaavan päästöiltä keskimääräistä suomalaista verkkosähköä.

Kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta arvioituna yksikiteisestä piistä valmistetut paneelit ovat paras vaihtoehto, jonka jälkeen monikiteisestä piistä valmistetut ja viimeisenä ohutkalvotekniikka hyödyntävät paneelit. Käytetään kuitenkin energiatuotantomuotojen keskinäisen kilpailukyvyn arvioinnissa monikiteisestä piistä valmistettuihin aurinkosähköjärjestelmiin perustuvia arvioita, koska ne edustavat keskimääräistä tapausta sekä hyötysuhteen että päästökertoimen näkökulmasta. Elinkaarimallissa oletetut aurinkopaneelialat ovat todella suuria. Todellisuudessa eri kiinteistöihin rakennetut aurinkosähköjärjestelmät olisivat suorituskyvyltään ja komponenttivallinnoiltaan luultavasti hieman erilaisia, joten keskiarvoisen paneelilaadun valinta on perusteltua.



## 7 TULOKSET

Elinkaariarvioinnin tulokset kasvihuonekaasupäästöjen osalta esitetään kahdessa osassa:

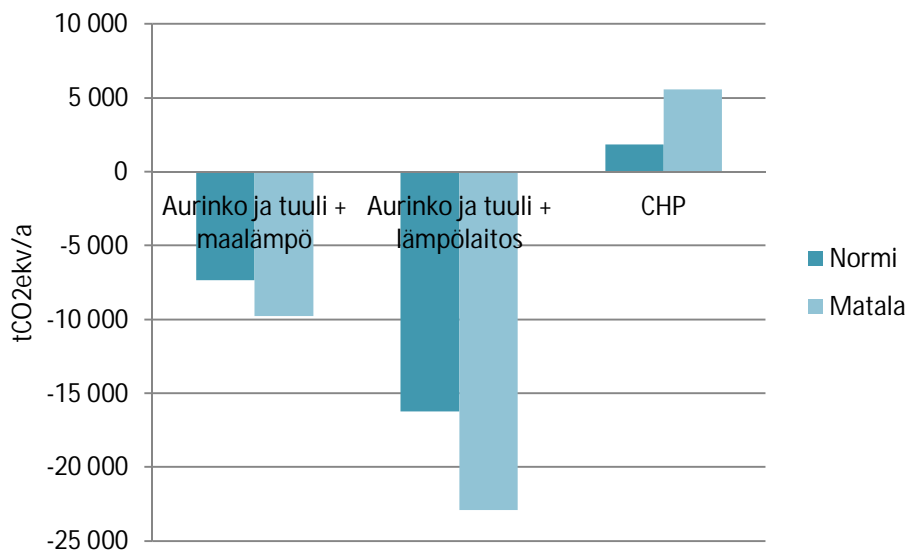
1. Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ilman maaperän hiilitaseen muutoksen huomiointia
2. Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt, kun muutokset maaperän hiilitaseessa huomioidaan.

Tämän jälkeen tarkastellaan yhteenvetoa energiatuotantomuotojen EROI-arvoista ja verrataan niitä aiempien tutkimusten tuloksiin. Lopuksi käsitellään tulosten tulkinnan rajoituksia.

### 7.1 Energiajärjestelmien keskinäinen kilpailukyky yhdiskunnan energialähteenä kasvihuonekaasujen näkökulmasta

#### 7.1.1 Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ilman maaperän hiilitaseen muutoksen huomiointia

Yhdiskunnan kolmen vaihtoehdoisen energiajärjestelmän vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt molemmilla toiminnallisillayksiköillä on esitetty kuvassa 23. Kuvasta nähdään, että kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta aurinko- ja tuulipainotteinen skenaario, jossa pääasiallinen lämmöntuotantomuoto on lämpölaite, on molemmilla toiminnallisilla yksiköillä paras vaihtoehto. Toiseksi paras vaihtoehto on aurinko- ja tuulipainotteinen skenaario, jonka pääasiallinen lämmöntuotanto tapahtuu maalämpöpumpuilla. CHP-painotteisissa skenaarioissa kasvihuonekaasupäästöt ovat molempia aurinko- ja tuulipainotteista skenaariota suuremmat molemmilla toiminnallisilla yksiköillä. Kuvasta nähdään, että eri vaihtoehtojen erot ovat selkeästi isommat matalaenergiatarkastelussa kuin normienergiatarkastelussa.

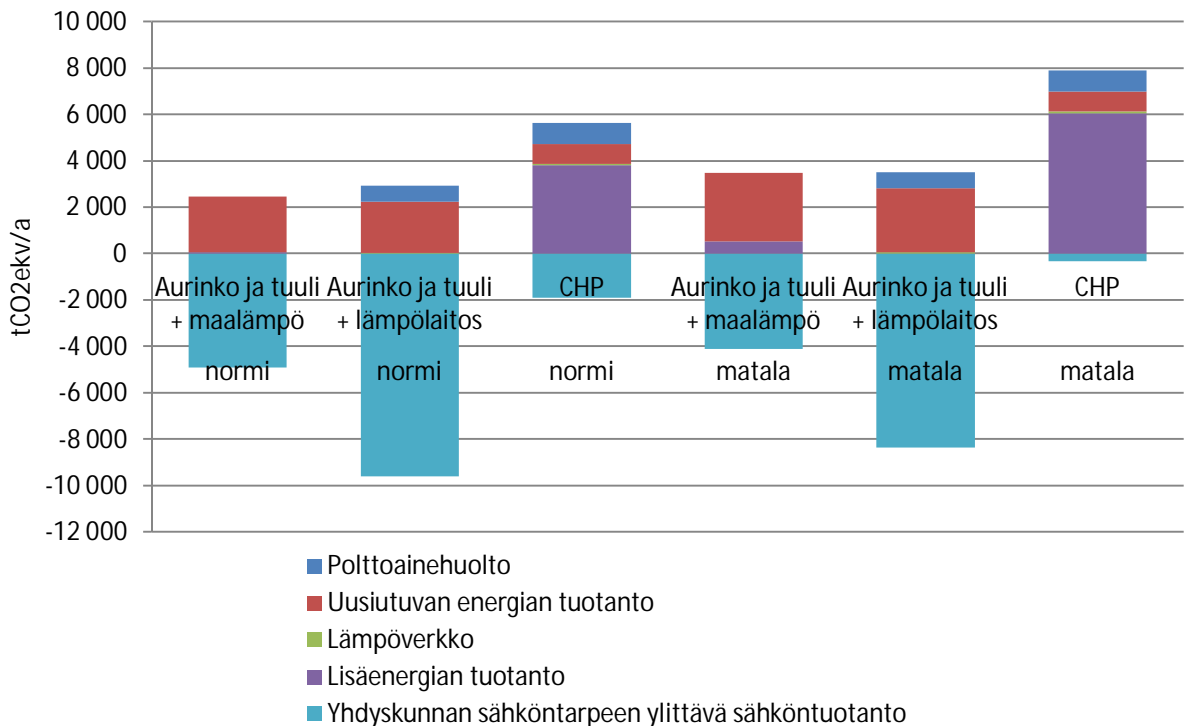


**Kuva 23.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kokonaiskasviuonekaasupäästöt molemmilla toiminnallisilla yksiköillä.

Taulukosta 19 ja kuvasta 24 nähdään eri skenaarioiden osalta polttoainehuollosta, uusiutuvan energiantuotannosta, lämpöverkosta ja lisäenergian tuotannosta aiheutuvat päästöt sekä yhdyskunnan energiantarpeen ylittävän, yhdyskunnan ulkopuolelle ohjatusta sähköenergiasta saatu päästövähennys. Huomataan, että aurinko- ja tuulipainotteisissa skenaarioissa suurin osa kasviuonekaasupäästöistä aiheutuu uusiutuvan energian tuotannosta, joka sisältää aurinko- ja tuulisähkötuotannon elinkaarenaikaiset kasviuonekaasupäästöt. CHP-skenaarioissa suurin osa kasviuonekaasupäästöistä aiheutuu lisäenergian tuotannosta. Lämpöverkkojen rakentamisesta sekä lämmönsiirron energiankulutuksen aiheuttamien kokonaispäästöjen osuus kokonaispäästöistä on vähäinen kaikissa skenaarioissa, joihin se sisältyy.

**Taulukko 19.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt päästölähteittäin molemmilla toiminnallisilla yksiköillä.

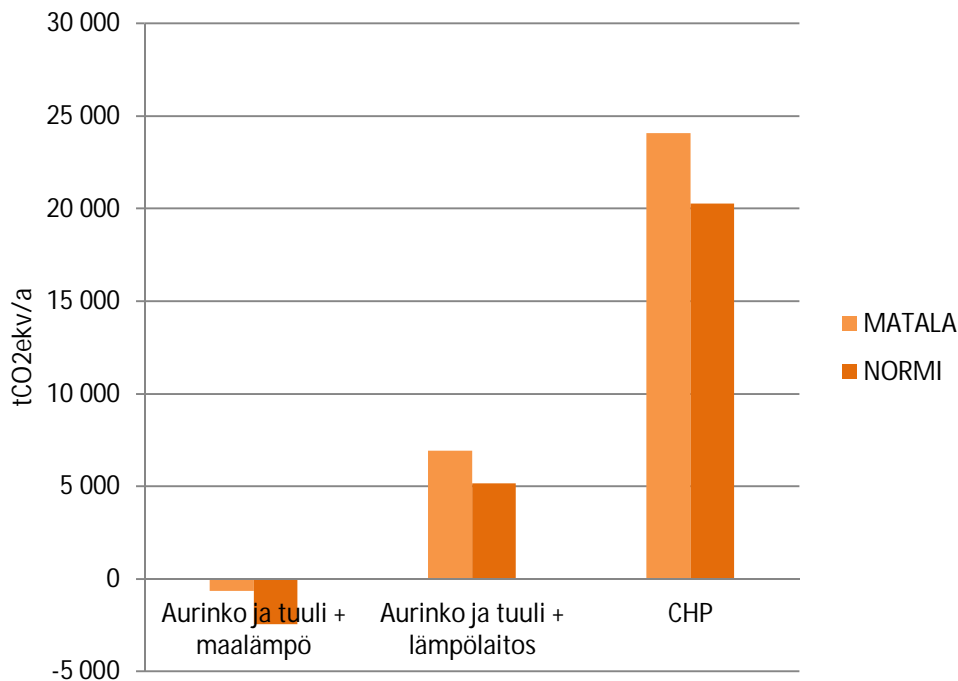
Toiminnallinen yksikkö	NORMI			MATALA		
	Aurinko ja tuuli + maalämpö	Aurinko ja tuuli + lämpölaitos	CHP	Aurinko ja tuuli + maalämpö	Aurinko ja tuuli + lämpölaitos	CHP
<b>Kasvihuonekaasupäästöt</b>	tCO <sub>2</sub> ekv/a					
<b>Polttoainehuolto</b>	0	695	919	0	692	915
<b>Uusiutuvan energian tuotanto</b>	2 405	2 218	864	2 956	2 772	861
<b>Lämpöverkko</b>	0	40	40	0	63	63
<b>Lisäenergian tuotanto</b>	62	0	3 832	532	0	6 068
<b>Yhdyskunnan sähkötarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 891	-9 594	-1 906	-4 114	-8 362	-320
<b>Yhteensä</b>	-2 424	-6 640	3 749	-626	-4 834	7 588



**Kuva 24.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt päästölähteittäin molemmilla toiminnallisilla yksiköillä laskettuna.

### 7.1.2 Energiajärjestelmien elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt, kun muutokset maaperän hiilitaseessa huomioidaan

Yhdyskunnan energiajärjestelmän vuosittaiset kokonaiskasvihuonekaasupäästöt molemmilla toiminnallisilla yksiköillä on esitetty kuvassa 25. Kuvasta nähdään, että aurinko- ja tuulisähkö -skenaarion energiajärjestelmän kokonaispäästöt ovat alhaisemmat kuin CHP-skenaarion kokonaispäästöt. Lämpölaite- ja maalämpö-ratkaisuun nähden, mutta vaihtoehto on silti merkittävästi parempi molemmilla toiminnallisilla yksiköillä, kuin CHP-skenaario.



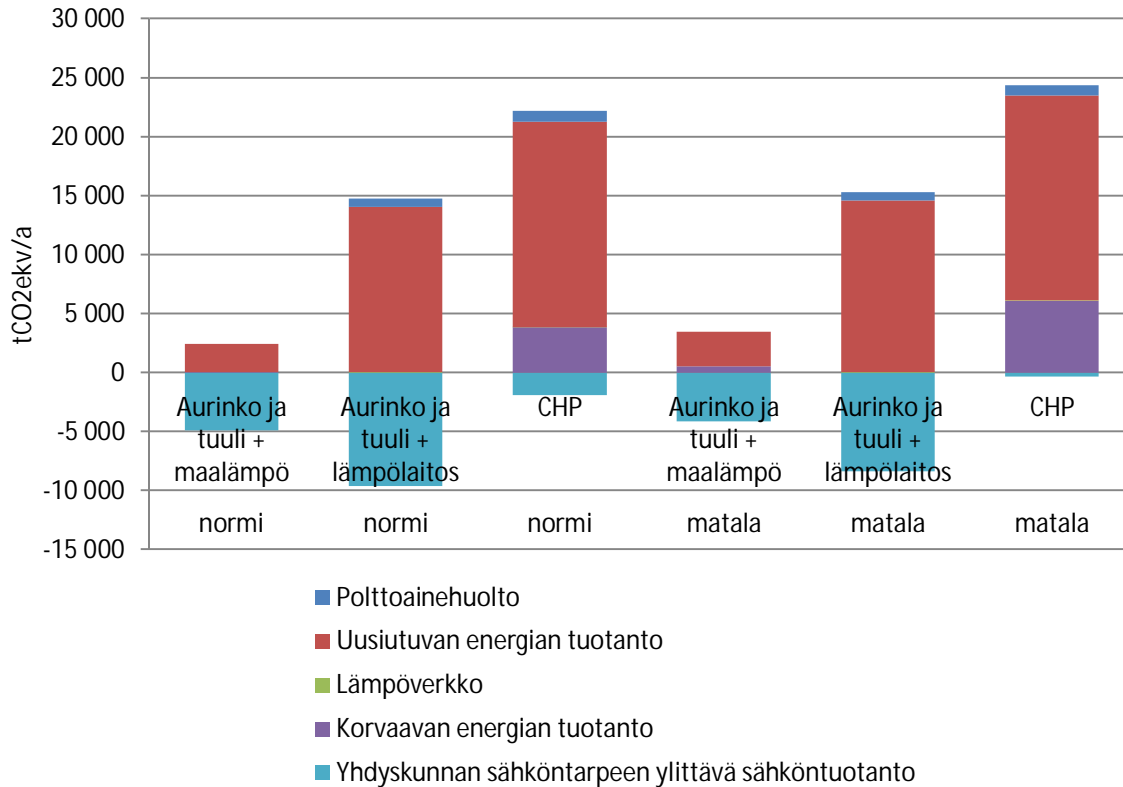
**Kuva 25.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kokonaiskasvihuonekaasupäästöt molemmilla toiminnallisilla yksiköillä.

Taulukosta 20 ja kuvasta 26 nähdään eri skenaarioiden tapauksessa polttoainehuollosta, uusiutuvan energiantuotannosta, lämpöverkosta ja lisäenergian tuotannosta aiheutuvat päästöt sekä yhdyskunnan energiantarpeen ylittävän, yhdyskunnan ulkopuolelle ohjatusta sähköenergiasta saatu päästövähennys.

**Taulukko 20.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt päästölähteittäin molemmilla toiminnallisilla yksiköillä laskettuna.

Skenaario	NORMI			MATALA		
	Aurinko ja tuuli + maalämpö	Aurinko ja tuuli + lämpölaite	CHP	Aurinko ja tuuli + maalämpö	Aurinko ja tuuli + lämpölaite	CHP
<b>Kasvihuonekaasupäästöt</b>	tCO <sub>2</sub> ekv/a					
<b>Polttoainehuolto</b>	0	695	919	0	692	915
<b>Uusiutuvan energian tuotanto</b>	2 405	14 044	17 419	2 956	14 554	17 356
<b>Lämpöverkko</b>	0	40	40	0	63	63
<b>Korvaavan energian tuotanto</b>	62	0	3 832	532	0	6 068
<b>Yhdyskunnan sähköntarpeen ylittävä sähköntuotanto</b>	-4 891	-9 594	-1 906	-4 114	-8 362	-320
<b>Yhteensä</b>	-2 424	5 185	20 304	-626	6 948	24 083

Suurin osa CHP-skenaarion elinkaarenaikaisista kasvihuonekaasupäästöistä, 86 %, aiheutuu uusiutuvan energiantuotannosta biovoimalaitoksessa. Biovoimalaitoksen päästöistä 95 % aiheutuu energiahyötykäytön aiheuttamasta muutoksesta metsän hiilitaloudessa. Jos huomioidaan myös polttoainehuollon päästöt, hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöjen osuus kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä on 90 % koko energiaketjun päästöistä.



**Kuva 26.** Vaihtoehtoisten skenaarioiden vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt päästölähteittäin molemmilla toiminnallisilla yksiköillä laskettuna.

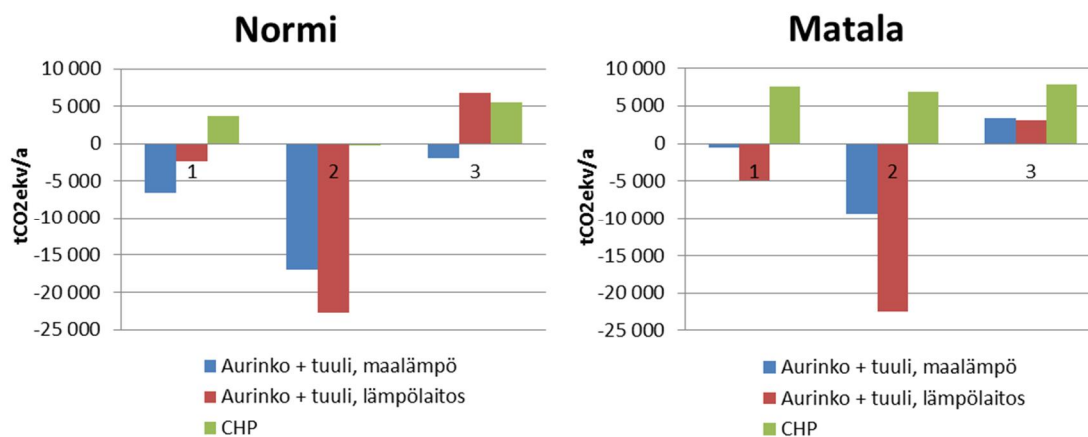
### 7.1.3 Ylijäämäsihkin hyvityskertoimen vaikutus energiajärjestelmien keskinäiseen kilpailukykyyn

Osioissa 7.1.1 ja 7.1.2 esitettyjen tulosten perusteella nähdään, että tuotantojärjestelmän ulkopuolelle syötetyn ylijäämäsihkin hyvittämisen seurauksena syntyvät kasvihuonekaasupäästövähennykset ovat erittäin merkittäviä kokonaistulosten kannalta. Toteutetaan herkkyytstarkastelu tuotantojärjestelmän ulkopuolelle syötetyn sihkin hyvityskertoimen valinnan vaikutuksesta energiajärjestelmien keskinäiseen kilpailukykyyn.

Elinkaariarviointimallissa alueen tarpeen ylittävä sähköntuotanto hyvitetiin Suomen keskimääräisellä sähköntuotannon päästökertoimella 312 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh. Toteutetussa elinkaarimallissa on huomioitu ylijäämäsihkin tuotanto kuukausitasolla eli malli ei erittele tarkemmin minkälaista tuotantokapasiteettia valtakunnan verkossa vähennetään tehotasapainon säilyttämiseksi. Toteutetaan herkkyytstarkastelu vertaamalla keskiarvopäästökertoimella saatua tulosta kahteen päästökertoimen kannalta äärimmäiseen tilanteeseen, ve-

sisähkön- ja kivihiilisähkön tuotantoon. Kivihiilisähköntuotannolle käytetään päästökeroainta 820 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh

Käytetään kivihiilisähköntuotannon päästökertoimelle GaBi 5:n yksikköprosessin FI: Electricity from hard coal PE päästöarvoa. Päästöarvo on CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) metodologian mukaisesti 971 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh. Vesisähkön tuotannolle käytetään GaBi 5:n yksikköprosessin FI: Electricity from hydro power PE päästöarvoa. Päästöarvo on CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) metodologian mukaisesti 14,3 gCO<sub>2</sub>ekv/kWh. Herkkyystarkasteluun liittyvä laskenta on esitetty liitteessä 5 ja tulokset havainnollistettu kuvassa 27 ilman metsäpolttoaineen polttoaineketjun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ja kuvassa 28 niin, että bioperäiset päästöt on huomioitu. Käydään herkkyystarkastelun tulokset läpi erikseen molemmille toiminnallisille yksiköille ja ensin tilanteessa, jossa bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida.

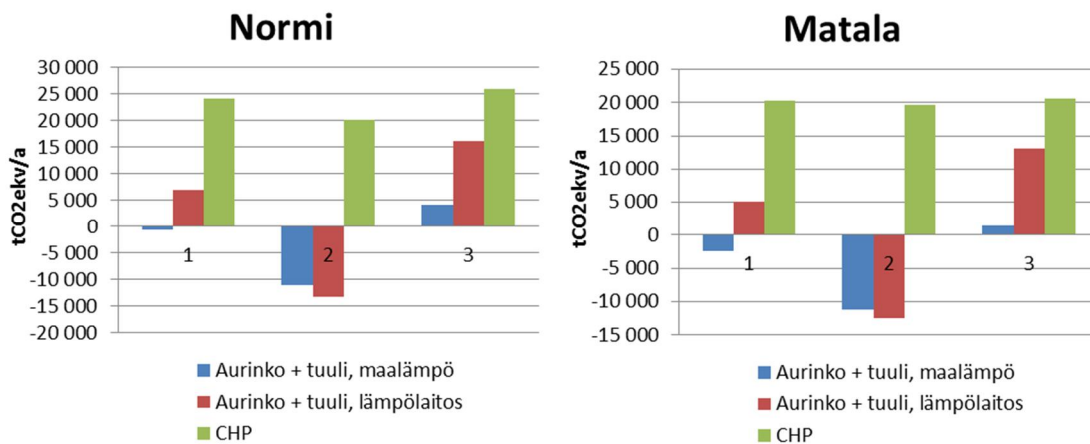


**Kuva 27.** Normi- ja matalaenergiavaihtoehtojen vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt, kun ylijäämä sähkö hyvitetään 1. keskimääräisellä sähkön päästökertoimella 2. kivihiilisähkön päästökertoimella 3. vesisähkön päästökertoimella. Metsäpolttoaineen tuotannon bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei ole huomioitu. Yksikkö tCO<sub>2</sub>ekv/a.

Kuvissa ylimmäisenä on esitetty perustilanne, kun hyvitys toteutetaan keskimääräisellä sähköntuotannon päästökertoimella. Kuvista nähdään, että päästökertoimen valinnalla on erittäin merkittävä vaikutus kokonaistuloksiin. Merkitys korostuu niissä skenaarioissa, joissa ylijäämä sähköä tuotetaan paljon. Aiemmin osiossa 7.1.1 ja 7.1.2 nähtiin, että erityisesti aurinko- ja tuulisähkötavoitteisissa skenaarioissa, kun lämmöntuotanto toteutetaan

lämpölaitoksella, vuosittainen yhdyskunnan energiantarpeen ylittävä sähköntuotannon määrä on suuri.

Kun toiminnallinen yksikkö on määritelty energiategokkuudeltaan normitason yhdyskunnalle ja ylijäämäsiähkön hyvitys toteutetaan keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimen sijaan kivihiilisähkön päästökertoimella, on lämpölaitos maalämpöä parempi lämmitysvaihtoehto kokonaiskasviuonekaasupäästöjä ajatellen. Vesisähkön päästökertoimella käytettäessä maalämpö on lämpölaitosta parempi valinta. Lisäksi vesisähkön päästökertoimella käytettäessä on CHP-skenaario toiseksi paras vaihtoehto. Tilanteessa, jossa toiminnallinen yksikkö on määritelty matalaenergiatason yhdyskunnalle, CHP-skenaario säilyy molemmissa tarkasteluissa eniten kasviuonekaasupäästöjä aiheuttavana vaihtoehtona.



**Kuva 28.** Normi- ja matalaenergiavaihtoehtojen vuotuiset kasviuonekaasupäästöt, kun ylijäämäsiähkö hyvitetään 1. keskimääräisellä sähkön päästökertoimella 2. kivihiilisähkön päästökertoimella 3. vesisähkön päästökertoimella. Metsäpoltoaineen tuotannon bioperäiset hiilidioksidipäästöt on huomioitu. Yksikkö tCO<sub>2</sub>ekv/a.

Kuvan 28 mukaisesti normienergiatasolla vaihtoehtojen keskinäinen paremmuusjärjestys on sama molemmissa tutkituissa vaihtoehtotilanteissa. Aurinko- ja tuulisähkötalotteinen skenaario, jossa lämpö tuotetaan pääasiallisesti lämpölaitoksella, aiheuttaa pienimmät kasviuonekaasupäästöt ja maalämpö pääasiallisena lämmitysmuotona toiseksi pienimmät kasviuonekaasupäästöt. Päästökertoimen valinta vaikuttaa kuitenkin lämmitysmuotojen paremmuusjärjestykseen perustilanteeseen nähden. Matalaenergiatasolla perustilanteessa ja vesisähkötalottehdossa energiajärjestelmien keskinäinen paremmuusjärjestys säilyy sa-



mana. Kivihiilen päästökerrointa käytettäessä lämpölaitos osoittautuu paremmaksi vaihtoehdoksi maalämpöön verrattuna, toisin kuin perustilanteessa.

Herkkyystarkastelun pohjalta voidaan todeta, että tuotejärjestelmän ulkopuolelle syötettävän sähkön hyvitystä laskettaessa päästökertoimen valinnalla on merkittävä vaikutus tuloksiin. Kuitenkin kahdeksassa tapauksessa seitsemästä, CHP-laitokseen perustuvan energijärjestelmän vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt säilyivät merkittävimpinä.

## 7.2 Energiantuotantomuotojen nettoenergiat

Taulukossa 21 on esitetty yhteenveto aiemmin osiossa 6.4 määritellyistä EROI-arvoista. Verrataan saatuja arvoja työn alussa osiossa 2.2 tarkasteltuihin uusiutuvan energian EROI-arvioihin. Aiempien tutkimusten arviot aurinkosähkön EROI-arvoille ovat luokkaa 3–10 ja tuulisähkölle luokkaa 18–24. Tätä työtä varten tehdyn tiedonkeruun puitteissa ei löytynyt yhtäkään arvioita CHP-tuotannon EROI-arvoista.

**Taulukko 21.** Yhteenveto energiantuotantomuotojen EROI-arvoista.

	Yksikidepii	Monikidepii	Ohutkalvo
<b>Aurinkosähkön tuotannon EROI</b>	11	12	25
<b>Keskiarvo</b>	16		
	Arvio 1	Arvio 2	Arvio 3
<b>Tuulisähköntuotannon EROI</b>	19	34	18
<b>Keskiarvo</b>	23		
<b>CHP-tuotannon EROI</b>	25		

Tämän työn arviot aurinkosähkön EROI-arvolle ovat selvästi suuremmat kuin aikaisempien tutkimusten. Osaltaan eroa selittävät luultavasti erilaiset aurinkosähköntuotantopotentiaalit. Osiossa 6.3.1 todettiin, että useissa aurinkosähkölaitteille tehdyissä elinkaariarvioinneissa käytettiin aurinkopaneelien hyötysuhteille paikoittain hyvinkin maltillisia lukuja. EROI-arvojen laskennassa lähtötietona toimiva aurinkosähkölaitteiden energian takaisinmaksuaika lasketaan elinkaariarvioinnin pohjalta, joten tämän työn selkeästi suu-

remmat EROI-arvot voivat olla seurausta muun muassa eroista energiantuotantopotentiaalin arvioinnissa.

Tuulisähköntuotannolle tehdyistä EROI-arvioista arviot 1 ja 3 ovat samaa luokkaa aikaisempien tutkimusten kanssa. Suoritetun arvioinnin perusteella kaikki mallinnetut energiantuotantomuodot ovat nettoenergianäkökulmasta kannattavia, koska energiaa jää jalostuksen energiantarpeeseen nähden käytettäväksi moninkertainen määrä.

### **7.3 Tulosten tulkinnan rajoitukset**

Tämä tarkastelu on rajattu kattamaan energiajärjestelmän elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ja mallin energiantuotantomuodoille on tehty nettoenergiatarkastelu. Näiden tulosten pohjalta ei voida ottaa kantaa energiantuotantomuotojen kokonaisvaltaiseen ympäristösuorituskykyyn.

Mallin tarkoituksena oli arvioida uusiutuviin energialähteisiin perustuvan energiantuotannon kilpailukykyä yhdiskunnan energiantuotantolähteenä. Työssä on pääasiallisesti käytetty lähtöarvoina tietoja, jotka ovat mahdollisimman keskimääräisiä ja edustavia. Tulokset eivät tällöin perustu mihinkään olemassa olevaan järjestelmään, eikä niitä voi suoraan käyttää minkään tietyn energiajärjestelmän tai sen osan arviointiin. Mallia voidaan kuitenkin päivittää vastaamaan paremmin jotain todellista energiajärjestelmää tai sen osaa.

Työssä energiajärjestelmien tarkastelu on toteutettu yksittäisten tekniikoiden tasolla ja skenaariot laadittu täyttämään energiantarve kuukausitasolla. Jotta voitaisiin ottaa vielä perustellummin kantaa energiajärjestelmien laadintaan liittyvään päätöksentekoon, tulisi tarkastelu viedä systeemitasolle ja tarkastella myös tehotasapainoa ja tehotasapainon säilyttämisen vaikutusta ympäristövaikutuksiin.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Työn tavoitteisiin kuului sähkö- ja lämpöenergian tuotantomenetelmien ympäristöllisen kilpailukyvyn määrittäminen alueellista energiajärjestelmää suunniteltaessa. Tarkastelu toteutettiin laatimalla elinkaariarviointimalli kuvitteellisen yhdyskunnan energiajärjestelmälle sen elinkaaren aikaisten kasvihuonekaasupäästöjen selvittämiseksi. Tämän lisäksi laadittiin arvio energiantuotantomuotojen EROI-arvoista, joita tarkastellaan yhdessä elinkaariarvioinnin tulosten kanssa.

Mallinnettavan sähkö- ja lämpöenergian tuotantomenetelmien mitoitus aloitettiin alueelle rakennettavissa olevasta tuulivoimakapasiteetista. Tämän jälkeen tuulivoimapuiston perusteella mitoitettiin peruskuormalaitokseksi soveltuva CHP-laitos, jonka sähköntuotantoteho vastaa tuulivoimapuiston keskitehoa. CHP-laitoksen mitoittamisen jälkeen arvioitiin yhdyskunnan koko laitoksen tuottamaan lämpöenergiaan pohjautuen. Arvioitiin kuinka monen pien-, rivi- tai kerrostalon lämpöenergiatarpeen kattavana perusvoimalaitoksena CHP-laitos voisi toimia. Rakennuskannan koon arvioinnin jälkeen tehtiin arvio näiden sähkönkulutuksesta.

Lopuksi arvioitiin millainen määrä aurinkosähköä talojen katoille asennettavilla aurinkosähköpaneeleilla voitaisiin tuottaa. Elinkaariarvioinnin toiminnallinen yksikkö oli yhdyskunnan vuotuinen sähkö- ja lämpöenergiatarve kuukausitasolla tarkasteltuna. Toiminnallista yksikköä valittaessa työssä päädyttiin valitsemaan kaksi toiminnallista yksikköä, koska haluttiin selvittää, onko sähkön- ja lämmöntarpeen määrän keskinäisellä suhteella merkitystä kilpailukykyisimmän energiajärjestelmän valinnassa. Tämän lisäksi työssä huomioitiin myös metsäenergiaketjun aiheuttamat muutokset metsän hiilivarastoille maan käytön muutosten kautta, mutta tulokset esitettiin myös ilman näitä bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä.

Merkittävimpiä energiantuotantoskenaarioiden keskinäiseen paremmuusjärjestykseen kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta vaikuttavia tekijöitä ovat yhdyskunnan energiantarpeen ylittävästä sähköstä saadut päästövähennykset sekä suurimpina päästöjen aiheuttajina CHP-skenaarioissa korvaavan energian tuotanto ja jos bioperäiset hiilidioksidipäästöt

huomioidaan, uusiutuvan energian tuotanto. Lämpöverkon rakentamisesta ja purkamisesta aiheutuu suurimmillaankin vain 2 % elinkaarenaikaisista kasvihuonekaasupäästöistä.

Ylijäämäsihtien päästövähennykset ovat normienergiatasolla 34–325 % ja matalaenergiatasolla 4–237 % aiheutuvista päästöistä, kun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida. Kun bioperäiset hiilidioksidipäästöt huomioidaan, päästövähennykset ovat normienergiatasolla 9–198 % ja matalaenergiatasolla 1–118 % aiheutuvista päästöistä. Suurimmat päästövähennykset syntyvät aurinko- ja tuuli-skenaarioissa, joissa sähköntuotanto ylittää ajoittain mallinnetun yhdyskunnan kokonaisenergiatarpeen merkittävästi. Nähdään, että tarkasteltavan mallin energiantuotantokapasiteetin mitoituksella ja toisaalta energian tarpeen määrittämisellä on suuri vaikutus lopputulokseen. CHP-skenaarioissa suurin osa päästöistä, 68 % normienergiatehokkuus- ja 77 % matalaenergiatehokkuustasolla, aiheutuu lisäenergian tuotannosta, kun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida. Kun bioperäiset hiilidioksidipäästöt huomioidaan, lisäenergian tuotannon osuus on 17 % normienergiatehokkuustasolla ja 25 % matalaenergiatehokkuustasolla, jolloin suurin osa päästöistä aiheutuu uusiutuvan energian tuotannosta.

Elinkaariarvioinnin perusteella kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta suurin osa yhdyskunnan energiantuotannosta kannattaa toteuttaa aurinko- ja tuulivoimalla, kun verrataan tuloksia CHP-painotteiseen energiantuotantomalliin. Toisaalta aurinko- ja tuulisähkön tuotannon ennustettavuus ja erityisesti säädeltävyys on hyvin rajallista. Todellisuudessa energiajärjestelmää ei voida rakentaa pelkästään tuuli- ja aurinkoenergiantuotannon varaan ilman mittavaa energiavarastokapasiteettia. Yhteenveto skenaarioiden paremmuusjärjestyksestä kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta on esitetty taulukoissa 22 ja 23. Kun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida, neljässä skenaariossa kuudesta kokonaiskasvihuonekaasupäästöt ovat negatiivisia. Huomioitaessa bioperäiset hiilidioksidipäästöt kahdessa skenaarioissa kuudesta kokonaispäästöt ovat negatiiviset. Kun tarkastellaan skenaarioiden keskinäistä järjestystä molemmilla eri toiminnallisilla yksiköillä nähdään, että sähkön- ja lämmöntarpeen keskinäisellä suhteella ei ole merkitystä kilpailukykyisimmän energiajärjestelmän valinnassa.

**Taulukko 22.** Skenaarioiden keskinäinen kilpailukyky. Bioperäiset CO<sub>2</sub>-päästöt ei huomioitu.

Sija	Skenaario	Kokonaispäästöt [tCO <sub>2</sub> ekv/a]
	<b>NORMI</b>	
1.	Aurinko + tuuli, lämpölaite	-6 640
2.	Aurinko + tuuli, maalämpö	-2 424
3.	CHP	3 749
	<b>MATALA</b>	
1.	Aurinko + tuuli, lämpölaite	-4 834
2.	Aurinko + tuuli, maalämpö	-626
3.	CHP	7 588

**Taulukko 23.** Skenaarioiden keskinäinen kilpailukyky. Bioperäiset CO<sub>2</sub>-päästöt huomioitu.

Sija	Skenaario	Kokonaispäästöt [tCO <sub>2</sub> ekv/a]
	<b>NORMI</b>	
1.	Aurinko + tuuli, maalämpö	-626
2.	Aurinko + tuuli, lämpölaite	6 948
3.	CHP	24 083
	<b>MATALA</b>	
1.	Aurinko + tuuli, maalämpö	-2 424
2.	Aurinko + tuuli, lämpölaite	5 185
3.	CHP	20 304

Saatujen tulosten merkittävyyden arvioimiseksi laaditulla elinkaariarvointimallilla toteutettiin tarkastelu, jossa CHP-laitoksen polttoaineena käytettiin metsähakkeen sijaan kivihiiltä. Kivihiilen tuotantovaiheen päästöjä arvioitiin GaBi:n yksikköprosessilla FI: Hard coal mix PE ja polton päästöt samasta lähteestä metsähakkeen polton päästöjen kanssa (IPCC 2006, 2.16). Tuotettu sähkö- ja lämpöenergiämäärä ja voimalaitoksen hyötysuhde oletettiin vastaavaksi kuin metsähaketta käytettäessä. CHP-laitoksen polttoaineen ollessa kivihiili vuotuiset kasviuonekaasupäästöt olivat normitason yhdyskunnalle noin 41 400 tCO<sub>2</sub>ekv vuodessa ja matalaenergiatason yhdyskunnalle 45 100 tCO<sub>2</sub>ekv vuodessa. Metsäbiomassojen energiahyötykäytöstä aiheutuu tällöin normienergiatasolla 96 % pienemmät kasviuonekaasupäästöt, kun bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida ja 46 % pienemmät kasviuonekaasupäästöt, kun bioperäiset hiilidioksidipäästöt huomioidaan kuin käytettäessä kivihiiltä CHP-laitoksen polttoaineena. Tarkastelu osoittaa, että vaikka metsä-

biomassoja hyödyntävistä CHP-painotteisista skenaarioista aiheutuu aurinko- ja tuulisähköpainotteisiin skenaarioihin verrattuna enemmän kasvihuonekaasupäästöjä, ovat sen vuotuisen energiantuotannon kokonaiskasvihuonekaasupäästöt silti merkittävästi pienemmät kuin käytettäessä kivihiiltä sähkö- ja lämmöntuotannossa.

Pääosin uusiutuviin energialähteisiin perustuvien energiajärjestelmien vertailussa aurinko- ja tuulipainotteinen skenaario, jossa lämmöntarve täytettiin lämpölaitoksella, osoittautui mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi, vaikka sen kokonaispäästöt olivat selvästi maalämpöjärjestelmällä lämmitettyä skenaarioita suuremmat. Kun alueen yhdyskunnan pääasiallinen lämmöntuotantomuoto oli lämpölaitos, yhdyskunnan kokonaisenergiantarve pystyttiin täyttämään täysin mallinnetun energiajärjestelmän tuottamalla uusiutuvalla energialla. Tältä pohjalta voidaankin olettaa, että kokonaisvaltaisesti paras energianhankintavaihtoehto on monen eri energiantuotantomuodon yhdistelmä. Alhainen päästötaso tietyssä kategoriassa on yhdentekevää, jos energiaa ei ole saatavissa silloin, kun sitä tarvitaan.

Bioperäisten hiilidioksidipäästöjen huomiointi vaikuttaa aurinko- ja tuulisähköpainotteisten skenaarioiden keskinäiseen paremmuusjärjestykseen lämmitysmuodon valinnan kautta. Skenaario, jossa lämpöenergia tuotetaan lämpölaitoksella, on paras vaihtoehto, jos bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida, sekä normi- että matalaenergiatasolla. Kun bioperäiset hiilidioksidipäästöt huomioidaan, aurinko- ja tuulisähköpainotteinen skenaario maalämpölämmityksellä on paras vaihtoehto.

Työn tavoitteena oli myös selvittää millainen suhde energiantuotantomuotojen nettoenergian määrällä on syntyviin ympäristövaikutuksiin. Toteutetun EROI-arvojen laskennan pohjalta on vaikea tehdä kovin vahvoja johtopäätöksiä, koska laskennan lähtötietojen kerääminen osoittautui hyvin haasteelliseksi ja eri energiantuotantomuodoille laskettujen EROI-arvojen rajauksien yhteneväisyydestä ei ole tarkkaa tietoa. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että sekä tuuli- ja aurinkosähköntuotannon että metsäbiomassan käyttö polttoaineena CHP-tuotannossa on nettoenergiameiessä kannattavaa työssä mallinnetulla alueella EROI-arvon ollessa noin 16 aurinkosähkölle, 23 tuulisähkölle ja 25 CHP-tuotannolle.

Selkeimmin tuloksista nähtävä johtopäätös on, että ympäristön kannalta parhaan energiantuotantojärjestelmän valitseminen ei ole yksinkertainen tehtävä. Valinta pohjautuu aina tiettyihin kriteereihin ja tämän työn tapauksessa tärkeimpänä kriteerinä pidettiin elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä eikä esimerkiksi energiahuollon varmuutta. Aiemmin todettiin, että vaihtoehtojen keskinäinen kilpailukyky on suuresti riippuvainen energiantuotantolaitosten mitoituksesta ja toisaalta alueen energiantarpeesta. Mikäli alueen lämmön- tarve olisi merkittävästi suurempi suhteessa sähköntarpeeseen, voisi tutkittujen vaihtoehtojen paremmuusjärjestys olla erilainen. Lisäksi aiemmin työn teoriaosassa nostettiin esille, että uusiutuvien energialähteiden hyödynnettävyys riippuu vahvasti alueellisista erityispiirteistä, kuten aurinko- ja tuuliolosuhteista. Voidaankin todeta, että kestävän energiajärjestelmän suunnittelussa alueellisten ominaisuuksien huomiointi on erittäin tärkeää, ja mikä tietyllä alueella osoittautuu parhaimmaksi ratkaisuksi, ei välttämättä ole sitä toisenlaisessa ympäristössä.

Työssä hyödynnettyä ajattelumallia, jossa energiajärjestelmien kilpailukykyä arvioidaan sekä lämmön että sähkön tarpeen täyttämisen näkökulmasta, voitaisiin jatkossa hyödyntää laajemmin. Työssä energiajärjestelmien tarkastelu on toteutettu yksittäisten tekniikoiden tasolla ja skenaariot laadittu täyttämään lämpö- ja sähköenergian tarve kuukausitasolla. Seuraava vaihe voisi olla muokata ja laajentaa mallia niin, että myös tehontarve on huomioitu ja tarkastella tehotasapainon takaamisen vaikutusta ympäristövaikutuksiin. Nykyisellään mallissa lähes kaikissa skenaarioissa on ylituotantoa kaikkina kuukausina. Sen sijaan, että ylituotanto syötetään julkiseen verkkoon, voisi ylijäämäenergian tuotannolle mallintaa energiavaraston.

Käytännön päätöksenteon tueksi nyt analysoitujen ympäristönäkökohtien lisäksi myös vaihtoehtojen taloudelliset näkökohdat tulisi selvittää. Työssä ei ole tarkastelu tilannetta, jossa alueella olisi ennestään käytettävissä olevaa fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa tuotantoa. Myös tämän siirtymävaiheen sisällyttäminen tarkasteluun voisi tuoda mielenkiintoisen lisänäkökulman aiheeseen.

## LÄHTEET

Ali-Löytty, M. Heikkilä, J. Härmälä, W. Kaikko, J. Kokkonen, K. Kuisma, T. Kässä, T. Lehtovaara, M. Rousku, P. Vasama, J. Viitikko, O. 2011. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto biopolttoaineilla, alueellinen selvitys: tutkimusraportti. 133 s. ISBN 978-952-265-083-2.

Alsema, E.A. de Wild-Scholten, M.J. 2005. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. Esitetty Materials Research Society:n syyskokouksessa Bostonissa marraskuussa 2005. 10 s.

Antikainen, R. Seppälä, J. Grönroos, J. Korhonen, M. Koskela, S. Manninen, K. Mattila, T. Schultz, E. Tuominen, M. Gustafsson, M. Baumgartner, R. Korhonen, J. Tsvetkova, A. Heilin, T. Häkkinen, T. Ovaskainen, M. Pingoud, K. Soimakallio, S. Sokka, L. Tonteri, H. Vares, S. Wessman, H. Angerman, M. Heino, J. Suopajarvi, H. Dahl, O. Husgafvel, R. 2012. Elinkaarimenetelmät yrityksen päätöksenteon tukena. FINLCA-hankkeen loppuraportti. 90 s. Suomen ympäristö 10/2012. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135094&lan=fi>

Antikainen, R. 2010. Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. [Suomen ympäristöministeriön www-sivuilla.]. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. Saatavissa: [www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

Antikainen, R. Tenhunen, J. Ilomäki, M. Mickwitz, Per. Punttila, P. Puustinen, M. Seppälä, J. Kauppi, L. 2007. Bionergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat: Nykytilakatsaus. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 98 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007. ISBN 978-952-11-2666-6.

Arvesen, A. Hertwich, E.G. 2012. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16. 5994-6006. ISSN 1364-0321.



Bhatia, P. Cummis, C. Brown, A. Draucker, L. Rich, D. Lahd, H. 2011. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. USA: World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. 144 s. ISBN 978-1-56973-773-6

Breyer, C. 2013. Market Potential of Solar Photovoltaics. LUT Summer School 2013: BL10A8100 Solar Economy. Course material.

BSI. 2011. PAS 2050: 2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Publicly available specification. Saatavissa: <http://shop.bsigroup.com/en/forms/PASs/PAS-2050/>

Coley, D. 2008. Energy and Climate Change. Creating a Sustainable Future. West Sussex, John Wiley & Sons. 656 s. ISBN 978-0-470-85313-9

Di Napoli, C. 2007. Tuulivoimaloiden melon syntytavat ja leviäminen. Suomen ympäristö 4/2007. Helsinki: Ympäristöministeriö. 31 s. Julkaisu on saatavana vain internetistä. ISBN 978-952-11-2585-0 (PDF).

Energiatehokas koti. 2013. [Motiva Oy:n organisoiman energiatehokas koti – viestintäkampanjan www-sivuilla]. [Päivitetty 25.4.2013]. [viitattu 28.5.2013]. Saatavissa: <http://www.energiatehokaskoti.fi/>

Energiateollisuus ry. 2014. Sähkömarkkinat. [Energiateollisuus ry:n www-sivuilla]. Päivitetty 16.1.2014. [viitattu 16.1.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/>

Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

European Commission. 2010. International Reference Life Cycle Data System. General guide for Life Cycle Assessment. Detailed guidance. Luxemburg: Publications Office of the European Union. 394 s. ISBN 978-92-79-19092-6.

Fthenakis, V. Kim, H. C. 2009. Land use and electricity generation: A life cycle analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009:13. 1465–1474. ISSN 1364-0321.

Fthenakis, V. Kim, H. C. Frischknecht, R. Raugei, Kim, H. C. Alsema, E. Held, M. de Wild-Scholten, M. 2011a. Methodology Guidelines on Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12. Report T12-03:2011. 20 s.

Fthenakis, V. Kim, H. C. Frischknecht, R. Raugei, M. Sinha, P. Stucki, M. 2011b. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12. Report T12-02:2011. 63 s.

Fthenakis, V. M. Kim, H.C. Alsema, E. 2008. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science & Technology*, 2008:42. 2168–2174. ISSN 0013-936X.

Finbio ry. 2013. Bioenergiatietoa. [Finbio ry:n www-sivuilla]. Päivitetty 22.4.2010. [viitattu 11.1.2013]. Saatavissa: <http://www.finbioenergy.fi/default.asp?sivuID=9164>

First Solar. Thin Film Modules. 2013. [First Solar www-sivuilla]. [viitattu 3.7.2013] Saatavissa: <http://www.firstsolar.com/Innovation/Advanced-Thin-Film-Modules>

Goto, K. Yogo, K. Higashii, T. 2013. A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Applied Energy*, 2013:111. 710–720. ISSN 0306-2619.

Greenhouse gas (GHG) Protocol. 2013. [GHG Protocol-laskentatyökalun www-sivuilla]. [viitattu 28.02.2013]. Saatavissa: <http://www.ghgprotocol.org/>

Greening, B. Azapagic, A. 2012. Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 2012 39:1. 205-217. ISSN 0360-5442.

Guest, G. Bright, R.M., Cherubini, F. Michelsen, O. Strømman, A. 2011. Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. Centralized Versus Decentralized Deployment Strategies. *Journal of Industrial Ecology*, 2011:6. ISSN 1530-9290.

Gupta, A. Hall, C.A.S. 2011. A Review of the Past and Current State of EROI Data. *Sustainability*, 2011:10. 1796-1809. ISSN 2071-1050.

Hall, C.A.S. Balogh, S. Murphy, D.J.R. 2009. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies* 2009:2. 25–47. ISSN 1996-1073

Hildén, M. Hallanaro, E. Karjalainen, L. Järvelä, M. 2013. Uusi luonnonvaratalous: Onko biomassa avain kestäväan kasvuun? 1. painos. Helsinki: Gaudeamus. 302 s. ISBN 978-952-495-285-9.

Heinberg, R. 2009. Searching for a Miracle. "Net Energy" Limits & The fate of Industrial Society. International Forum on Globalization. The Post Carbon Institute. False Solution Series #4. 76 s.

Huhtinen, M. Korhonen, R. Pimiä, T. Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu. Otavan Kirjapaino. Opetushallitus. 342 s. ISBN 978-952-13-3476-4.

Hynynen, K. Koivuniemi, A. Baygildina, E. Laaksonen, P. Pyrhönen, O. 2012. Tuulivoiman mahdollisuudet Etelä-Karjalassa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 22. 40 s. ISBN 978-952-265-281-2

Hsu, D. D. O'Donoghue, P. Fthenakis, V. Heat, G. A. Kim, H. C. Sawyer, P. Choi, J. Turney, D.E. 2012. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 2012 16: S1. 122–135. ISSN 1530-9290.

Ilmatieteen laitos. 2013. Lämmitystarveluvut. [Ilmatieteen laitoksen www-sivuilla]. Päivitetty 4.1.2013. [viitattu 4.12.2013] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Ilmatieteen laitos. 2012. Aurinko. [Ilmatieteen laitoksen www-sivuilla]. Päivitetty 20.9.2012. [viitattu 20.9.2012]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/aurinko>

IPCC. 2012. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. New York: Cambridge University Press. 1088 s. ISBN 978-1-107-02340-6.

IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 Energy. Japan: IGES. ISBN 4-88788-032-4.

ISO 14044. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suunta-  
viivoja. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 96 s.

Johnson, E.P. 2011. Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources. Energy Policy. 2011 39:3. 1369-1381. ISSN 0301-4215.

Jorge, R.S. Hertwich, E.G. 2013. Environmental evaluation of power transmission in Norway. Applied Energy. 2013:101. 513-520. ISSN 0306-2619.

Jungbluth, N. Stucki, M. Flury, K. Frischknecht, R. Büsler, S. 2012. Life Cycle Inventories of Photovoltaics. Version: 2012. Uster: ESU-services Ltd. Sveitsin energiaministeriön (Swiss Federal Office of Energy SFOE) tilaama raportti. Hankittu [www.LC-Inventories.ch](http://www.LC-Inventories.ch) LCI-portaalin kautta. 238 s.

Kaipia, T. 2013. Energy Efficiency of Electric Power Distribution. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Kurssin BL40A2300 Energiatohokkuus luentomateriaali. 30 s.

Kara, M. Helynen, S. Mattila, L. Viinikainen, S. Ohlström, M. Lahnalampi, M. 2004. Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 396 s. ISBN 951-37-4256-3.

Karjalainen, T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus –  
laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulun yliopiston raportti. 23 s. Saatavissa:  
[http://www.motiva.fi/files/6677/Pien\\_CHP\\_raportti\\_final.pdf](http://www.motiva.fi/files/6677/Pien_CHP_raportti_final.pdf)

Keronen, J. 2013. Energy business transformation towards solar economy. 5.8.2013. LUT Summer School: Solar Economy. 71 s. Osa kurssin luentomateriaalia.

Kirkinen, J. Soimakallio, S. Mäkinen, T. McKeough, P. Savolainen, I. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset. Helsinki: Edita Prima Oy. 45 s. VTT tiedotteita 2418. ISBN 978-951-38-6976-2

Kleijn, R. van der Voet, E. Kramer, G.J. van Oers, L. van der Giesen, C. 2011. Metal requirements of low-carbon power generation. Energy 36. 5640–5648. ISSN 0360-5442.

Koistinen, J. Tuulivoimaloiden linnustovaikutukset. Suomen ympäristö 721. Helsinki: Ympäristöministeriö. 42 s. Saatavissa:  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=24366&lan=fi>

Kupari, J. 2005 Kestävän kehityksen näkökulmien huomioiminen kunnan energiaratkaisussa. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Laihanen, M. Tarjanne, R. 2001. Hakkuutähteistä tuotetun puupolttoaineen tuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 76 s. Tutkimusraportti EN B-147. ISBN 951-764-559-7.

Lavelle, M. Grose T.K. 2013. Water Demand for Energy to Double by 2035. [National geographic-lehden www-sivuilla]. Päivitetty 30.1.2013. [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa:  
<http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2013/01/130130-water-demand-for-energy-to-double-by-2035/>

Luo, L. Van der Voet, E. Huppes, G. Helias, A. de Haes, U. 2009. Allocation issuen in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009:14. 529–539. ISSN 1617-7502.

Maalampo.fi. 2013. Tietoa energiantehokkaasta asumisesta. [Vaillant-maalämpöpumpun ja TS-Tekniikka Oy:n ylläpitämällä www-sivulla]. [viitattu 13.6.2013]. Saatavissa:

<http://www.maalampo.fi/>

Mattila, T. Helin, T. Antikainen, R. Soimakallio, S. Pingoud, K. Wessman, H. 2011. Land use in life cycle assessment. Helsinki:Finnish Environment Insitute. 86 s. The Finnish Environment 24/2011. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=130275&lan=en>

Motiva Oy. 2013. Uusiutuva energia. [Motiva Oy:n www-sivuilla]. Päivitetty 30.04.2013. [viitattu 9.5.2013]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia)

Motiva Oy. 2012. Lämpöä omasta maasta-opas. 16 s. Saatavissa:

[http://www.motiva.fi/julkaisut/rakentaminen/lampoa\\_omasta\\_maasta\\_opas\\_maalammosta.1072.shtml](http://www.motiva.fi/julkaisut/rakentaminen/lampoa_omasta_maasta_opas_maalammosta.1072.shtml)

Motiva Oy. 2011a. Hanki hallitusti maalämpöjärjestelmä. 6 s. [Motiva Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 13.6.2013]. Saatavissa:

[http://www.motiva.fi/julkaisut/koti\\_ja\\_asuminen/hanki\\_hallitusti\\_maalampojarjestelma.1046.shtml](http://www.motiva.fi/julkaisut/koti_ja_asuminen/hanki_hallitusti_maalampojarjestelma.1046.shtml)

Motiva Oy. 2010a. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökerroimet sekä energian hinnat. Energiatehokkuus-sopimukset. [Motiva Oy:n www-sivuilla]. Päivitetty 19.4.2010. [viitattu 17.10.2013]. Saatavissa:

[http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden\\_lampoarvot\\_hyotysuhteet\\_ja\\_hiilidioksidin\\_ominaispaastokertoimet\\_seka\\_energianhinnat\\_19042010.pdf](http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf)

Motiva Oy. 2010b. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. Loppuraportti 12/2010. Helsinki: Motiva Oy. 59 s. Saatavissa ainoastaan sähköisessä muodossa.

Murphy, D. J. Hall, C.A.S. Michael, D. Cleveland, C. 2011. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels. *Sustainability* 2011, 3. 1888–1907. ISSN 2071–1050.

Murphy, D.J. Hall, C.A.S. 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1185 (2010). 102–118. ISSN 0077-8923.

Mälkki, H. Hongisto, M. Turkulainen, T. Kuisma, J. Loikkanen, T. Vihreän energian kriteerit ja elinkaariarviointi energiatuotteiden ympäristökilpailukyvyyn arvioinnissa. 1999. VTT Kemiantekniikka: Espoo. VTT tiedotteita 1974. 117 s. ISBN 951-38-5466-3

Oliver-Sola, J. Gabarrell, X. Rieradevall, J. 2009. Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. *Energy Policy*, 2009: 37. 4711-4719. ISSN 0301-4215.

Persson, C. Fröling, M. Svanström, M. 2006. Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System. Part 3: Use Phase and Overall Discussion. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006:6. 437–446. ISSN 1617-7502.

Pesola, A. Hagström, M. Vanhanen, J. 2012. Aurinkoenergian tuotanto- ja käyttömahdollisuudet Pohjois-Karjalassa. CO2FREE-hankkeen loppuraportti. 30 s.

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). 2013. Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. [Euroopan komission Join Research Centren www-sivuilla]. [viitattu 2.9.2013]. Osa SOLAREC- hanketta. Saatavissa: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>

Plevin, R.J. Delucchi, M.A. Creutzig, F. 2014. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. *Journal of Industrial Ecology*, 18. 73–83. ISSN 1530-9290.

Pöyry Energy Oy. 2009. Energiateollisuus ry. Energiatehokkuusselvitys kaukolämmityksen pumppausjärjestelyistä. Raportti 60N50061.02. 28 s. PDF. Saatavissa:

[http://energia.fi/sites/default/files/pumppauksen\\_energiatehokkuus\\_loppuraportti\\_2009.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/pumppauksen_energiatehokkuus_loppuraportti_2009.pdf)

Raugei, M. Fullana-i-Palmer, P. Fthenakis, V. 2012. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles. *Energy Policy*, 45. 576–582. ISSN 0301-4215.

Repo, A. Tuomi, M. Liski, J. 2011. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy*. 2011:3. 107–115. ISSN 1757-1707.

RIL. 2009. RIL 249–2009. Matalaenergiarakentaminen: asuinrakennukset. 2. painos. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Saarijärven Offset. 291 s. ISBN 978-951-758-517-0.

Saidur, R. Rahim, N.A. Islam, M.R. Solangi. K.H. 2011. Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011:15. 2423–2430. ISSN 1364-0321.

Schelter, E. 2012. Sustainability, renewable energy and rare earth elements. Yleisöluento 26.10.2012. Pennsylvanian yliopisto. Saatavissa:

<https://www.sas.upenn.edu/slice/sustainability-renewable-energy-and-rare-earth-elements>

Sharp Electronics Europe. 2012. [Sharp Electronics Europe www-sivuilla]. [viitattu 4.12.2012]. Saatavissa: <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/technikprinzip.htm>

Sims, R. P. Mercado, W. Krewitt, G. Bhuyan, D. Flynn, H. Holttinen, G. Jannuzzi, S. Khennas, Y. Liu, M. O'Malley, L. J. Nilsson, J. Ogden, K. Ogimoto, H. Outhred, Ø. Ulleberg, F. van Hulle. 2011. Integration of Renewable Energy into Present and Future Energy Systems. Osa IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S.



Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (toim.)- julkaisua. Cambridge University Press: Cambridge, Iso-Britannia ja New York, Yhdysvallat.

Soukka, R. 2013. Havainnekuva nykyisten yhdyskuntien energiantuotannon ja tavoitetilana pidettävän kestäväen energiantuotantoon liittyvistä keskeisistä muutostarpeista, haasteista ja markkinainstrumenteista.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry (STY). 2013. [Suomen Tuulivoimayhdistyksen www-sivuilla]. [viitattu 4.10.2013]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/>

Suomen tuuliatlas. 2013. Työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2008 tilaama selvitys Suomen tuulioloista. [Suomen tuuliatlaksen www-sivuilla]. [viitattu 11.02.2013]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2013. [Suomen tuulivoimayhdistyksen www-sivuilla]. [viitattu 11.02.2013]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/>

Suomi, U. Hietaniemi, J. Hellgren, M. 2004. Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Motiva. Laskentaohjeistus (pdf). Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje\\_CO2\\_kohde\\_040622.pdf](http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf)

Tilastokeskus. 2012a. Energiatilasto: Vuosikirja 2011. Suomen virallinen tilasto. 151 s. ISSN 1796-0479

Tilastokeskus. 2012b. Tieliikenteen tavarankuljetukset 2011. Suomen virallinen tilasto. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. Päivitetty 6.6.2012. [viitattu 23.1.2013]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/kttav/2011/kttav\\_2011\\_2012-06-06\\_tau\\_010\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kttav/2011/kttav_2011_2012-06-06_tau_010_fi.html)

Tilastokeskus. 2011. Asumisväljyys lisääntyy hitaasti. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. Päivitetty 18.10.2011. [viitattu 14.6.2013]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/tup/vl2010/art\\_2011-10-18\\_001.html](http://www.stat.fi/tup/vl2010/art_2011-10-18_001.html)

Thorpe, D. 2011. Solar technology. The earthscan expert guide to using solar energy for heating, cooling and electricity. New York, Earthscan. 238 s. ISBN 978-1-84971-109-8

Union of Concerned Scientists. 2013. How it Works: Water for Coal. [Union of Concerned Scientists [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 15.7.2013. [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/water-energy-electricity-coal.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/water-energy-electricity-coal.html)

U.S. Department of Energy. 2012. Photovoltaics. [Yhdysvaltain energiaministeriön [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 31.10.2012. [viitattu 7.8.2013]. Saatavissa: <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pv.html>

Yingli Solar. Products. 2013. [Yingli Solar [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [viitattu 3.7.2013]. Saatavissa: <http://www.yinglisolar.com/en/products/>

Ympäristöministeriö. 2012. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 35 s.

Ympäristöministeriö. 2011a. Ekosysteemipalvelut. [Suomen ympäristöministeriön [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 15.6.2011. [viitattu 15.1.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=301105>

Ympäristöministeriö. 2011b. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Muistio 28.3.2011. 9 s. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=126233&lan=fi>

Ympäristöministeriö. 2007. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 72 s.

Vehviläinen, I. Pesola, A. Heljo, J. Vihola, J. Jääskeläinen, S. Kalenoja, H. Lahti, P. Mäkelä, K. Ristinmäki, M. 2010. Rakennetun ympäristön energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt. Sitran selvityksiä 39. Helsinki, Sitra. 125 s. Julkaisu on osa toimintaohjelmaa ERA17 – Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017. ISBN 978-951-563-738-3.

Vestas. 2012. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V90-3.0 MW Wind Plant. Version 1.0. Denmark: Vestas Wind Systems A/S. 105 s.

Volter Oy. 2013. [Volter Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 25.1.2013]. Saatavissa: <http://www.volter.fi/etusivu>

VTT Lipasto. 2012. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankukutuksen laskentajärjestelmä. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/index.htm>.

VTT. 2012. Suomen tuulivoimatilastot. [VTT:n www-sivuilla]. Päivitetty 11.10.2012. [viitattu 4.10.2013]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/index.jsp>

Väisänen, S. Soukka, R. 2009. Turpeen ja turvepohjaisen dieselin kasvihuonekaasupäästöt elinkaaren aikana. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 59 s. Tutkimusraportti

Weidema, B. 2003. Market information in life cycle assessment. Danish Environmental Protection Agency. Danish Ministry of the Environment. Environmental Project No. 863. 147 s.

Wind Power Monthly. 2014. The 10 Biggest Turbines in the World. [Wind Power Monthly:n www-sivulla]. [viitattu 16.2.2014]. Saatavissa: <http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>

WWF. 2011. Ilmastolaskuri. Laskentaperusteet. [WWF:n Ilmastolaskuri www-sivulla]. [viitattu 16.6.2013] Saatavissa: [http://ilmastolaskuri.fi/web/storage/files/21112011\\_oletuskertoimet\\_ja\\_arvot.pdf](http://ilmastolaskuri.fi/web/storage/files/21112011_oletuskertoimet_ja_arvot.pdf)

Zuwala, J. 2012. Life cycle approach for energy and environmental analysis of biomass and coal co-firing in CHP plant with backpressure turbine. *Journal of Cleaner Production*, 2012:35. 164–175. ISSN 0959-6526.



## LIITE I: Yhdyskunnan rakennuskannan tehontarpeen ja pinta-alan määrittäminen

### Energiatohokkuusluokka: normitaso

Kuukausi	Normi, suhteellinen jakauma	Lämmitysenergian ominais-tarve [kWh/brm2]	LKV läm-mityksen ominais-tarve [kWh/brm2]	Lämmitys-energian ominais-tarve yhteensä [kWh/brm2]	Kuukauden tunnit [h]	Keski-määräinen lämmitys-teho [kW/brm2]
Tammikuu	0,167	10,9	2,5	13,4	744	0,0180
Helmikuu	0,154	10,0	2,5	12,5	672	0,0186
Maaliskuu	0,137	8,9	2,5	11,4	744	0,0153
Huhtikuu	0,089	5,8	2,5	8,3	720	0,0115
Toukokuu	0,036	2,4	2,5	4,9	744	0,0065
Kesäkuu	0,007	0,4	2,5	2,9	720	0,0041
Heinäkuu	0,003	0,2	2,5	2,7	744	0,0036
Elokuu	0,009	0,6	2,5	3,1	744	0,0041
Syyskuu	0,041	2,6	2,5	5,1	720	0,0071
Lokakuu	0,085	5,5	2,5	8,0	744	0,0108
Marraskuu	0,120	7,8	2,5	10,3	720	0,0143
Joulukuu	0,152	9,9	2,5	12,4	744	0,0167
Yhteensä	1	65	30	95		

CHP-laitoksen lämmöntuotannon ominaisteho[MW]	Rakennusneliöt[brm2]	Lämmitysenergiantarve [MWh]	Asunnot [kpl]	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], kierros 1
11,25	604 321	57 410	6 715	0,76

2. kierros		
Kuukausi	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], 1. kierroksen arvo, risteily huomioituna	Keskimääräinen lämmitystehontarve tilat + LKV, risteily huomioitu [kW/brm2]
Tammikuu	0,76	0,015
Helmikuu	0,76	0,016

Maaliskuu	0,76	0,013
Huhtikuu	0,76	0,009
Toukokuu	0,76	0,004
Kesäkuu	0,76	0,001
Heinäkuu	0,76	0,001
Elokuu	0,76	0,002
Syyskuu	0,76	0,004
Lokakuu	0,76	0,008
Marraskuu	0,76	0,012
Joulukuu	0,76	0,014

Rakennusneliöt noin [brm2]	Asunnot [kpl]	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], kierros 2	Energiantarve [MWh]
718 000	7 978	0,78	68 210

### Energiatohokkuusluokka: matalaenergiataso

1. kierros						
Kuukausi	Normi, suhteellinen jakauma	Lämmitysenergian ominais-tarve [kWh/brm2]	LKV läm-mitys-energian ominais-tarve [kWh/brm2]	Lämmitys-energian ominais-tarve yhteensä [kWh/brm2]	Kuukauden tunnit [h]	Keski-määräinen lämmitys-teho [kW/brm2]
Tammikuu	0,167	6,7	1,7	8,355	744	0,0112
Helmikuu	0,154	6,2	1,7	7,827	672	0,0116
Maaliskuu	0,137	5,5	1,7	7,139	744	0,0096
Huhtikuu	0,089	3,6	1,7	5,218	720	0,0072
Toukokuu	0,036	1,5	1,7	3,121	744	0,0042
Kesäkuu	0,007	0,3	1,7	1,931	720	0,0027
Heinäkuu	0,003	0,1	1,7	1,799	744	0,0024
Elokuu	0,009	0,3	1,7	2,010	744	0,0027
Syyskuu	0,041	1,6	1,7	3,288	720	0,0046
Lokakuu	0,085	3,4	1,7	5,068	744	0,0068
Marraskuu	0,120	4,8	1,7	6,478	720	0,0090
Joulukuu	0,152	6,1	1,7	7,765	744	0,0104
Yhteensä	1	40	20	60		

CHP-laitoksen lämmöntuotannon ominaisteho[MW]	Rakennusneliöt[brm2]	Lämmitysenergiantarve [MWh]	Asunnot [kpl]	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], kierros 1
11,25	965 935	57 956 099	10 733	0,81

2. kierros		
Kuukausi	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], 1. kierroksen arvo, risteily huomioituna	Keskimääräinen lämmitystehontarve tilat + LKV, risteily huomioitu [kW/brm2]
Tammikuu	0,81	0,010
Helmikuu	0,81	0,010
Maaliskuu	0,81	0,008
Huhtikuu	0,81	0,006
Toukokuu	0,81	0,003
Kesäkuu	0,81	0,001
Heinäkuu	0,81	0,001
Elokuu	0,81	0,001
Syyskuu	0,81	0,003
Lokakuu	0,81	0,005
Marraskuu	0,81	0,007
Joulukuu	0,81	0,009

Rakennusneliöt noin [brm2]	Asunnot [kpl]	Lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve [MW], kierros 2	Energiantarve [MWh]
1 130 000	12 556	0,82	67 800



## LIITE 2

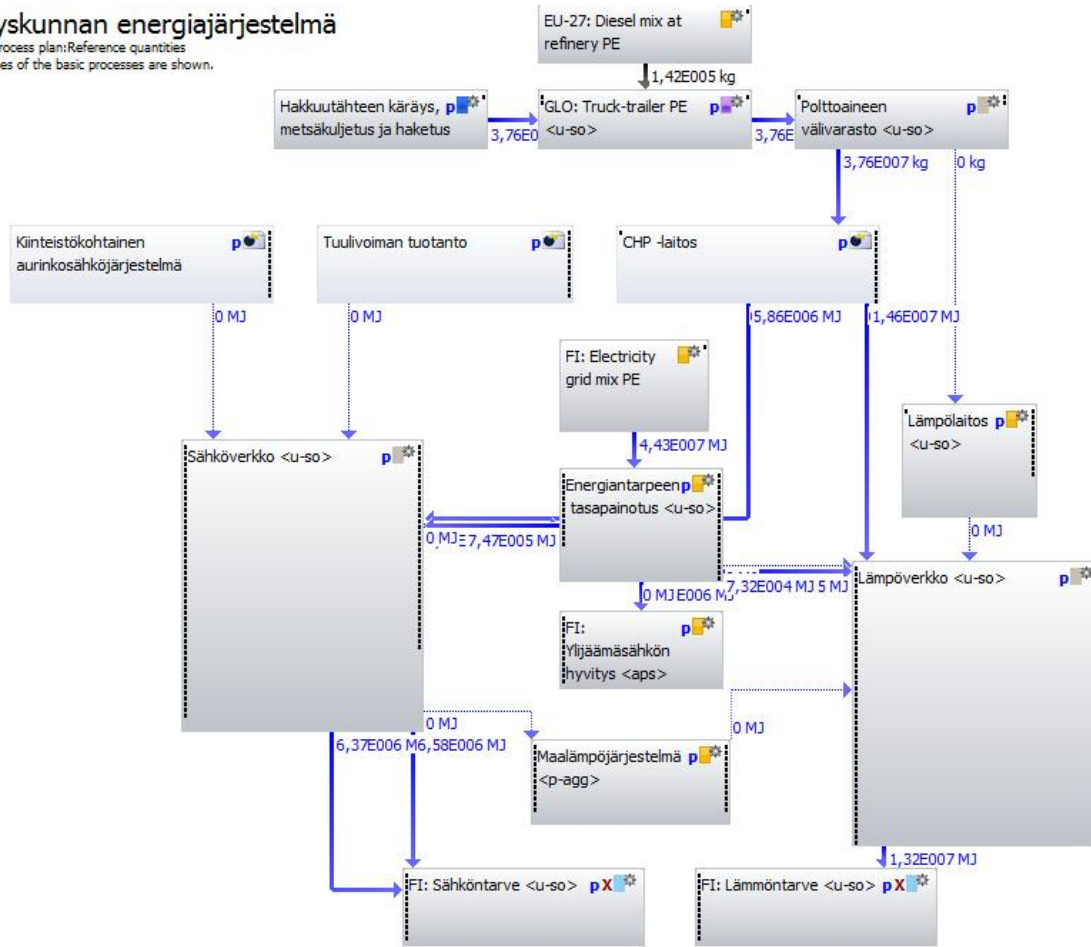
### Lämpö- ja sähköenergian tarpeen kuukausittainen jakautuminen

Kuukausi	Normi	Suhteellinen jakauma, läm- pö	Suhteellinen jakauma, sähkö ja LKV	Q <sub>th,tilat</sub> , normi [MWh]	Q <sub>th,tilat</sub> , matala [MWh]	Q <sub>th,ikv</sub> , normi [MWh]	Q <sub>th,ikv</sub> , matala [MWh]	Q <sub>th,tot</sub> , normi [MWh]	Q <sub>th,tot</sub> , matala [MWh]	Q <sub>e,tot</sub> , normi [MWh]	Q <sub>e,tot</sub> , matala [MWh]
Tammikuu	759	0,167	0,085	7 804	7 558	1 829	1 919	9 633	9 478	1 829	2 879
Helmi	699	0,154	0,077	7 187	6 961	1 652	1 734	8 840	8 694	1 652	2 601
Maalis	621	0,137	0,085	6 385	6 184	1 829	1 919	8 215	8 103	1 829	2 879
Huhtik	403	0,089	0,082	4 144	4 013	1 770	1 858	5 914	5 871	1 770	2 786
Toukoku	165	0,036	0,085	1 697	1 643	1 829	1 919	3 526	3 563	1 829	2 879
Kesäku	30	0,007	0,082	308	299	1 770	1 858	2 079	2 156	1 770	2 786
Heinäku	15	0,003	0,085	154	149	1 829	1 919	1 984	2 069	1 829	2 879
Eloku	39	0,009	0,085	401	388	1 829	1 919	2 230	2 308	1 829	2 879
Syysku	184	0,041	0,082	1 892	1 832	1 770	1 858	3 662	3 690	1 770	2 786
Lokaku	386	0,085	0,085	3 969	3 844	1 829	1 919	5 798	5 763	1 829	2 879
Marrasku	546	0,120	0,082	5 614	5 437	1 770	1 858	7 384	7 295	1 770	2 786
Jouluku	692	0,152	0,085	7 115	6 891	1 829	1 919	8 945	8 810	1 829	2 879
Yhteensä	4539	1	1	46 670	45 200	21 540	22 600	68 210	67 800	21 540	33 900

### LIITE 3: Energiajärjestelmän prosessikaavio

#### Yhdyskunnan energiajärjestelmä

GaBi 5 process plan: Reference quantities  
The names of the basic processes are shown.



## LIITE 4: Aurinkosähköjärjestelmä

### Aurinkosähköjärjestelmän lähtötiedot

Lähde	Fthenakis et al. 2011			Jungbluth et al. 2012		
Tuotejärjestelmän rajat	Paneelin, tukirakenteiden, kaapelointien sekä taajuusmuuttajan ja muiden aurinkosähkön tuottamisen ja verkkoon kytkemisen kannalta välttämättömien komponenttien valmistus; Tarkastelussa on huomioitu tuotantoprosesseista, tuotantotilojen ilmastoinnista ja valaistuksesta sekä päästöjen hallinnasta aiheutuvat materiaali- ja energiasyötteen sekä tuotokset			Paneelin, tukirakenteiden, kaapelointien sekä taajuusmuuttajan ja muiden aurinkosähkön tuottamisen ja verkkoon kytkemisen kannalta välttämättömien komponenttien valmistus, aurinkosähköjärjestelmän asennus, huolto ja käytöstä poisto		
Lähteen oletukset	säteily 1700 kWh/m <sup>2</sup> /a; PR 0,75; elinikä 30 a; invertterin elinikä 15 a; paneelien hyötysuhteet 14,0% 13,2% 10,9%			3 kW <sub>p</sub> asennus; elinikä 30 a; vuotuinen saanti 922 kWh/kW <sub>p</sub> ; paneelien hyötysuhteet 14,0% 13,6% 11,7%		
Mallia varten tehty skaalaus	säteily 1700 kWh/m <sup>2</sup> /a -> 1100 kWh/m <sup>2</sup> /a (kääntäen verrannollinen); hyötysuhteet 14,0% 13,2% 10,9% -> 17% 16% 14% (kääntäen verrannollinen)			vuotuinen saanti 922 kWh/kW <sub>p</sub> -> 800 kWh/kW <sub>p</sub> (Jungbluth et al. 2012, 147)		
Paneelityyppi	Yksikidepii	Monikidepii	Ohutkalvo	Yksikidepii	Monikidepii	Ohutkalvo
Elinkaaren aikaiset KHK -päästöt [gCO <sub>2</sub> -ekv/kWh]	36,9	35,7	21,7	85,4	76,1	35,0
Aurinkosähköjärjestelmän energian takaisinmaksuaika [a]	2,2	2,2	1,0	3,1	2,8	1,4
Elinkaaren aikaiset KHK -päästöt [gCO <sub>2</sub> -ekv/kWh], keskiarvo	61,2	55,9	28,3			
Aurinkosähköjärjestelmän energian takaisin-	2,6	2,5	1,2			

maksuaika [a], kes- kiarvo			
----------------------------------	--	--	--

### Aurinkosähkön tuotantopotentiaali kuukausittain:

Aurinkosähkijärjestelmän paneelityyppi	Yksikidepii		Monikidepii		Ohutkalvo	
	normi	matala	normi	matala	normi	matala
Energiatehokkuusluokka						
Tammikuu [MWh]	302	475	284	447	249	392
Helmikuu [MWh]	783	1 232	737	1 159	645	1 014
Maaliskuu [MWh]	1 332	2 096	1 254	1 973	1 097	1 726
Huhtikuu [MWh]	1 936	3 047	1 822	2 868	1 594	2 509
Toukokuu [MWh]	2 362	3 717	2 223	3 498	1 945	3 061
Kesäkuu [MWh]	2 211	3 479	2 081	3 275	1 821	2 865
Heinäkuu [MWh]	2 334	3 674	2 197	3 458	1 922	3 026
Elokuu [MWh]	1 785	2 809	1 680	2 644	1 470	2 314
Syyskuu [MWh]	1 126	1 772	1 060	1 668	927	1 459
Lokakuu [MWh]	659	1 037	620	976	543	854
Marraskuu [MWh]	220	346	207	325	181	285
Joulukuu [MWh]	165	259	155	244	136	214

**LIITE 5: Kaukolämpöverkon rakennusvaiheen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta.**

Vaihe	Sisältää	KHK-päästöt rakennusta kohden [kgCO <sub>2</sub> ekv /rakennus]	KHK-päästöt, energia- tehokkuusluokka: normi [kgCO <sub>2</sub> ekv / rakennuskanta]	KHK-päästöt, energia- tehokkuus- luokka: matala [kgCO <sub>2</sub> ekv / rakennuskanta]
Kaivuutyöt	Katukivetyksmateriaalin, betonin ja sementin tuotanto, työko- neiden polttoaineen- kulutus	500	700 000	1 100 000
Kauko- lämpö- verkon put- ket	Putkien valmistus: Teräksen valmistus, polyuretaanin valmis- tus, polyetaanin val- mistus	125	175 000	275 000
Kauko- lämpö- verkon muut komponentit	Tarkastuslaatikko, laskuhana, kierto- vesipumppu	250	350 000	550 000
Liitymis- johdot	Putkien valmistus: Teräksen valmistus, polyuretaanin valmis- tus, polyetaanin val- mistus	458	641 667	1 008 333
Rakennus- kohtaiset komponentit	Sulkuventtiili, läm- pömittari	104	145 833	229 167
	Yhteensä	1 438	2 012 500	3 162 500
	Päästöt/toimintavuosi	29	40 250	63 250

**LIITE 6:**

	Bioperäiset ei huomioitu		Bioperäiset huomioitu	
	Kivihiilisähkön päästökerroin	Vesisähkön päästökertoimella	Kivihiilisähkön päästökerroin	Vesisähkön päästökertoimella
<b>Skenaario</b>	<b>NORMI</b>			
Aurinko + tuuli, maalämpö [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	-16 970	-1 974	-10 956	4 040
Aurinko + tuuli, lämpölaitos [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	-22 687	6 730	-13 315	16 102
CHP [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	-276	5 567	20 058	25 901
Aurinko + tuuli, maalämpö [%]	-156	70	-1 650	745
Aurinko + tuuli, lämpölaitos [%]	-836	378	-292	132
CHP [%]	-107	49	-17	8
<b>Skenaario</b>	<b>MATALA</b>			
Aurinko + tuuli, maalämpö [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	-9 316	3 300	-11 114	1 502
Aurinko + tuuli, lämpölaitos [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	-22 495	3 144	-12 476	13 163
CHP [tCO <sub>2</sub> ekv/a]	6 913	7 893	19 629	20 609
Aurinko + tuuli, maalämpö [%]	-1 388	627	-359	162
Aurinko + tuuli, lämpölaitos [%]	-365	165	-341	154
CHP [%]	-9	4	-3	2