

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

## **UUDEN PIENTALOALUEEN LÄMMITYSRATKAISUT**

### **Heating solutions of a new single-family house area**

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Mihail Vinokurov

Lappeenrannassa 3.6.2015

Juuli Jokinen

# SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	5
2 PIENTALOALUEEN ENERGIATEHOKKUUS JA LÄMMITTÄMINEN .....	6
2.1 Erilaiset rakennusten energiatehokkuusluokat .....	8
2.2 Talokohtainen lämmitys .....	9
2.2.1 Sähkölämmitys .....	10
2.2.2 Lämpöpumput .....	11
2.2.3 Polttokattilat .....	14
2.3 Alueellinen lämmitys .....	15
2.3.1 Vesikiertoinen lämpöverkko .....	15
2.3.2 Kaukolämpölaitos .....	16
2.3.3 Aluelämpölaitos .....	18
2.4 Lämmönjakotavat .....	19
3 KÄYTETTÄVÄT METODIT JA RAJAUKSET .....	20
3.1 Valitut lämmitysjärjestelmät .....	21
3.1.1 Suora sähkölämmitys .....	21
3.1.2 Maalämpöpumppu .....	22
3.1.3 Aluelämpölaitos .....	22
3.2 Alueen lämmitysenergian tarpeen laskeminen .....	23
3.3 Hiilijalanjäljen laskeminen .....	24
3.4 Kustannusten laskeminen .....	25
4 LÄMMITYSJÄRJESTELMIEN VERTAILU .....	27
4.1 Lämmitysenergian tarve .....	27
4.2 Hiilijalanjälki .....	30
4.3 Kustannukset .....	34
5 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35

6	YHTEENVETO.....	38
	LÄHDELUETTELO .....	40

## LIITTEET

- Liite 1. Lämmitystarpeen nettoenergian laskeminen.
- Liite 2. Laskennassa käytetyt lämpötilat.
- Liite 3. Rakennuksen lämmitystarpeen nettoenergian laskeminen.
- Liite 4. Hiilijalanjälkilaskenta.

## SYMBOLILUETTELO

$A_i$	rakennusosan pinta-ala [ $m^2$ ]
$C_{n,i}$	annuiteettitekijä
$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti 1000 [ $J/kgK$ ]
$CO_2\text{-ekv.}$	hiilidioksidiekvivalentti
$n_{50}$	rakennuksen ilmanvuotoluku [ $m^3/hm^2$ ]
$P$	lämpökuorma [ $W/m^2$ ]
$Q_i$	lämmitysenergia [ $kWh$ ]
$q_{50}$	rakennusvaipan ilmanvuotoluku [ $m^3/hm^2$ ]
$q_{v,tulo}$	tuloilmavirta [ $m^3/s$ ]
$q_{v,vuotoilma}$	vuotoilmavirta [ $m^3/h$ ]
$t_d$	ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaika-suhde [ $h/24h$ ]
$t_v$	ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhde [ $vrk/7vrk$ ]
$T_{lto}$	lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_s$	sisäilman lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{sp}$	sisäänpuhalluslämpötila
$T_u$	ulkoilman lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$U$	lämmönläpäisykerroin [ $W/(m^2K)$ ]
$V$	rakennuksen ilmatilavuus [ $m^3$ ]
$\Delta T_{puhallin}$	lämpötilan nousu puhaltimessa [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta t$	ajanjakson pituus [ $h$ ]

$\Phi_{lto}$	lämmöntalteenotolla talteen otettu kuukauden keskimääräinen teho [W]
$\Psi$	Lisäkonduktanssi [W/mK]
$\tau_d$	rakennuksen käyttötuntien lukumäärä vuorokaudessa [h]
$\tau_w$	rakennuksen käyttötuntien lukumäärä viikossa [d]
$\rho_i$	ilman tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

## 1 JOHDANTO

Suomessa suurin osa asumisen energiantarpeesta muodostuu lämmitysenergiasta. Esimerkiksi vuonna 2013 asuinrakennusten lämmitykseen käytettiin 55 140 GWh energiaa, josta 31 494 GWh käytettiin erillisten pientalojen lämmitykseen. Asumiseen kokonaisuudessaan kului 63 427 GWh energiaa. Pelkkien erillisten pientalojen lämmittämiseen kuluu siis noin 50 % asumisen koko energiankulutuksesta. (Tilastokeskus 2015.) Tämän takia lämmitysenergian kustannukset ovatkin käyttäjille suuri menoerä. Lämmöntuotannosta aiheutuu myös kasvihuonekaasuja, jotka vaikuttavat ilmaston lämpenemiseen. Pientalojen lämmittäminen aiheuttaa noin 10 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Motiva 2009, 3). EU:n tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä vähentää kasvihuonekaasuja 20 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Suomen oma tavoite samalla ajanjaksolla on vähentää kasvihuonekaasuja 16 prosentilla. (Euroopan komissio 2015.)

Ilmastotavoitteiden saavuttamiseen voidaan vaikuttaa lämmitysenergian päästöjä vähentämällä. Käyttämällä vähäpäästöisiä lämmitysenergian tuotantotapoja sekä vähentämällä asuntojen lämmitysenergian kulutusta kasvihuonekaasuja on mahdollista vähentää. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on vertailla erilaisia uuden pientaloalueen lämmitysratkaisuja syntyvien kasvihuonekaasujen sekä käyttäjille syntyvien kustannusten näkökulmasta. Tavoitteena on selvittää, ovatko vähäpäästöisimmät vaihtoehdot myös taloudellisesti kannattavia sekä sitä, miten talojen lämmitysenergian tarpeen muuttuminen vaikuttaa tuloksiin.

Tähän työhön on valittu lämmitysjärjestelmiksi suora sähkölämmitys, maalämpöpumppu sekä aluelämpölaitos. Kullekin lämmitysmuodolle on valittu myös erilaisia energiantuotantotapoja. Työssä käsitellään uutta pientaloaluetta, jota tarkastellaan keskimääräisen esimerkkitalon avulla. Esimerkkitalon energiatehokkuusratkaisuksi on valittu rakentamismääräyskokoelman vaatimukset täyttävä talo, matalaenergiatalo sekä passiivitalo.

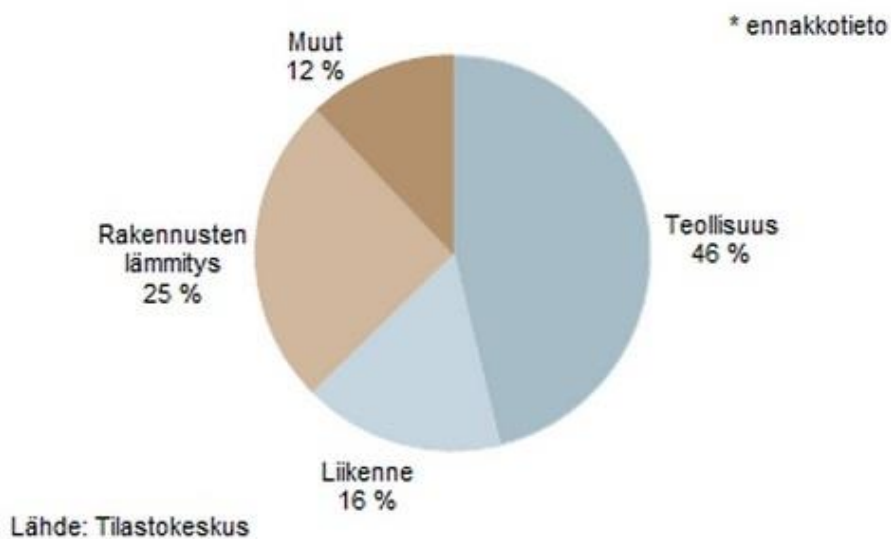
Aluksi työssä kerrotaan yleisesti lämmitysenergian tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä, mahdollisista lämmitysjärjestelmistä sekä energiatehokkuusratkaisuista. Tämän jälkeen esitellään valitut menetelmät ja miten niitä vertaillaan. Vertailu suoritetaan laskemalla kullekin lämmitysmuodolle sekä energiatehokkuusratkaisulle vuoden aikana tarvittavan lämmitysenergian tuotannosta aiheutuva hiilijalanjälki sekä lämmityksen kustannukset. Lopuksi tulokset kootaan yhteen ja niiden avulla tehdään johtopäätöksiä kussakin tilanteessa sopivimmista lämmitysjärjestelmästä.

Talojen lämmitysenergian tarve lasketaan Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden mukaan kunkin energiatehokkuusratkaisun mukaiselle uudelle talolle. Asuinalueen lämmitysenergian tarve lasketaan kertomalla yhden keskimääräisen talon lämmitysenergian tarve talojen lukumäärällä. Hiilijalanjälki lasketaan lämmitysenergian tuotannolle hiilidioksidiekvivalenteina käyttämällä kirjallisuudesta löytyviä arvoja. Kustannusten laskennassa huomioidaan järjestelmän investointi- ja huoltokustannukset ja lämmittämiseen kuluvan energian hinta vuoden ajalta

## **2 PIENTALOALUEEN ENERGIATEHOKKUUS JA LÄMMITTÄMINEN**

Asumisen energiankulutus on suurta, erityisesti asuntojen lämmitysenergian kulutus. Kuvassa 1 näkyy, että jopa neljäsosa Suomessa kulutetusta energiasta käytetään rakennusten lämmityksessä. Koska lämmitysenergian osuus on niin suuri, lämmitysenergian tuotannon päästöjä vähentämällä voidaan edistää pääsyä Suomen ilmastotavoitteisiin. Lämmitysenergian tuotannon päästöihin taas voidaan vaikuttaa useammalla eri tavalla.

### Energian loppukäytön jakaantuminen sektoreittain 2013\*



**Kuva 1.** Energian loppukäytön jakautuminen sektoreittain (Motiva Oy 2014b).

Energiatehokkaat rakennukset ovat hyvä keino vähentää lämpöenergian tuotannon päästöjä, sillä lämmitysenergian kulutus vähenee, jolloin sitä tarvitsee tuottaakin vähemmän. Lämmitysenergian kulutusta voidaan vähentää rakenneratkaisuilla, eli hyvällä lämpöeristyksellä, ovilla ja ikkunoilla sekä ilmatiiviillä rakenteilla. Myös lämmön talteenotto ilmanvaihdosta alentaa energian kulutusta. LTO:n vuosihyötysuhteen tulisi olla vähintään 65 %. (Nysted et al. 2012, 18.)

Toinen keino vähentää lämmitysenergian tuottamisesta syntyviä päästöjä on tuottaa energia vähäpäästöisillä menetelmillä. Fossiilisilla polttoaineilla tuotetulla energialla on suuret päästöt. Uusiutuvilla energiantuotantomenetelmillä, kuten biomassalla, tuulivoimalla, vesivoimalla, maalämmöllä, biokaasulla ja aurinkovoimalla, on pienet kasvihuonekaasupäästöt. Asumisen kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseksi näillä tuotantomenetelmillä on tärkeä rooli.

Asuinaluetta suunniteltaessa kannattaa tehdä energia-analyysi. Sen avulla voidaan selvittää alueelle sopivimmat energiaratkaisut. Energia-analyysissä tehdään alueen energiankulutuk-



sen arviointi, energiantuotantovaihtoehtojen kartoitus ja päästölaskenta. Analyysi auttaa suunnittelevaa tahoja päätöksenteossa, kun tarkoituksena on tehdä energiatehokas asuinalue. (Nysted et al. 2012, 35.) Alueen sähköenergiankulutukseen voi olla vaikea vaikuttaa aluesuunnittelulla, mutta sitä varten voidaan tehdä reaaliaikainen sähköenergiankulutuksen seuranta, jolloin tehopiikit pienenevät (Nysted et al. 2012, 36).

Alueen energiantuotantovaihtoehdot kartoitetaan sen perusteella, millainen ratkaisu alueelle sopii, sekä päästövaikutusten perusteella. Ekologisia vaihtoehtoja energiantuotannoksi ovat mm. kauko- tai aluelämpö, biopolttoaineet, maa-, vesi- ja kalliolämpö, kiinteistökohtainen pellettilämmitys, CHP ja biokaasu. Täydentävinä ratkaisuinä voidaan käyttää esim. aurinkolämpöä, ilmalämpöpumppuja ja puu- ja pellettitakkoja. Kuten edellä esitetyistä vaihtoehdoista huomataan, energiantuotanto voidaan toteuttaa talokohtaisesti, taloryhmäkohtaisesti tai alueellisesti. (Nysted et al. 2012, 24.)

Luvussa 2.1 esitellään mahdollisia pientalojen energiatehokkuusratkaisuja ja selvennetään, miten ne eroavat toisistaan. Luvuissa 2.2 ja 2.3 kerrotaan pientaloissa yleisesti käytettävistä lämmitysjärjestelmistä. Mukana on sekä talokohtaisia että alueellisia järjestelmiä. Luvussa 2.4 esitetään yleisimpien lämmönjakotapojen toimintaperiaatteet.

## **2.1 Erilaiset rakennusten energiatehokkuusluokat**

Vuonna 2010 voimaan tullessa Suomen rakentamismääräyskokoelman C3-osassa on annettu määräyksiä uusien rakennusten lämmöneristyksestä. Lämmönläpäisykertoimille on annettu enimmäisarvot, jotka eivät saa ylittyä. Myöskään rakennuksen vaipan läpi syntyvät johtumislämpöhäviöt eivät saa ylittää kyseisillä lämmönläpäisykertoimilla laskettua vaipan johtumislämpöhäviötä. Nykyään kaikkien uusien asuinrakennusten, jotka käyttävät lämmittämiseen energiaa, on noudatettava rakentamismääräyskokoelmassa annettuja arvoja (RakMK C3 2012, 4).

Matalaenergiatalon lämmitysenergian tarve tulisi olla noin 85 % vertailtavan rakentamismääräyskokoelman vaatimukset täyttävän rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta (Energiehokas koti 2013a). Matalaenergiatalon lämmitysjärjestelmän ominaiskulutus on noin 48–80 kWh/m<sup>2</sup>a (Suomen rakennusinsinööriliitto Oy 2009, 31). Lämmitysenergiantarvetta pienennetään eristeiden pienemmillä lämmönläpäisykertoimilla, parantamalla lämmöntalteenoton hyötysuhdetta ja pienentämällä vaipan ilmanvuotolukua (Suomen rakennusinsinööriliitto Oy 2009, 34).

Passiivitalon vanha määritelmä on, että se ei tarvitse lainkaan lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmää. Tällä hetkellä Suomen ilmasto-oloissa ei kuitenkaan ole nykytekniikalla taloudellisesti kannattavaa rakentaa taloa, joka ei tarvitsisi lainkaan lämmitysenergiaa. Suomessa passiivitalo onkin määritelty muutamalla lukuarvolla, joita ei saa ylittää. Huonetilojen lämmitysenergian tarve tulee olla Etelä-Suomessa pienempi kuin 20 kWh/m<sup>2</sup>a, Keski-Suomessa pienempi kuin 25 kWh/m<sup>2</sup>a ja Pohjois-Suomessa pienempi kuin 30 kWh/m<sup>2</sup>a. Rakennuksen kokonaisprimäärienergiantarpeen maksimiluvut ovat vastaavassa järjestyksessä 130, 135 ja 140 kWh/m<sup>2</sup>a. Lisäksi rakennuksen ilmanvuotoluvun tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 0,6 l/h. (Energiehokas koti 2013b.)

Nollaenergiatalo tuottaa vuodessa yhtä paljon energiaa kuin se käyttää lämmittämiseen ja sähkölaitteiden käyttöön. Plusenergiatalo taas tuottaa vuositasolla enemmän energiaa kuin se kuluttaa. Sähköntuotanto voidaan toteuttaa esimerkiksi aurinkopaneeleilla ja lämmöntuotanto puulla tai muulla biopolttoaineella. (Energiehokas koti 2015c.)

## 2.2 Talokohtainen lämmitys

Talokohtainen lämmitys tarkoittaa sitä, että jokaisella alueen rakennuksella on oma lämmitysjärjestelmänsä. Talokohtaisia lämmitysjärjestelmiä ovat esim. erilaiset kattilat, tulisijat, lämpöpumput, aurinkokeräimet ja sähkölämmitys. Seuraavissa alakappaleissa käsitellään erilaisia pientaloissa yleisesti käytettäviä talokohtaisia lämmitysmenetelmiä, niiden etuja ja ongelmia.

### 2.2.1 Sähkölämmitys

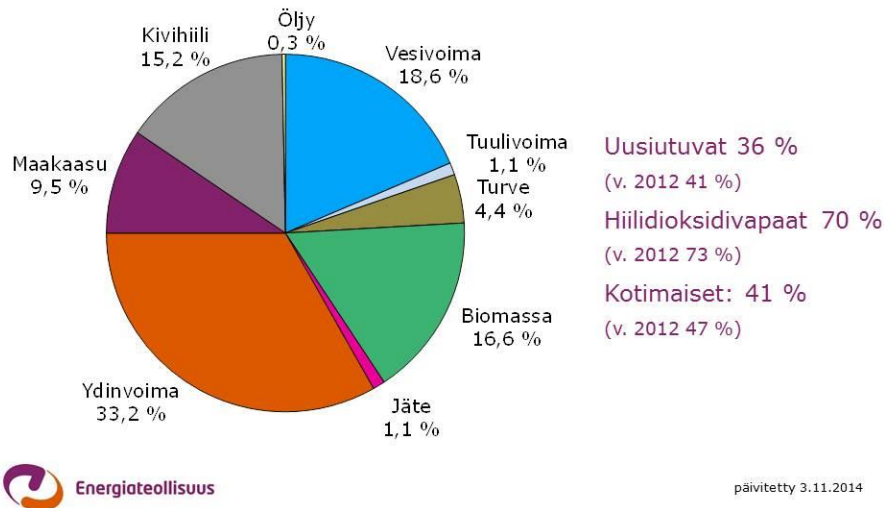
Sähkölämmitysratkaisuja on usean tyyppisiä. Päätyypit ovat suora sähkölämmitys, varaava sähkölämmitys, vesikiertoinen sähkölämmitys ja varaava vesikiertoinen sähkölämmitys. Järjestelmän valinnassa tulisi ottaa huomioon sähkölaitoksen kanta, viranomaisten ja rahoittajien ohjeet sähkölämmityksessä lainoitetuissa asuintaloissa sekä sähkön myynnissä käytettävät tariffit. (Seppänen 2001, 355.)

Sähköllä on erilaisia hintatariffeja eri tarkoituksiin. Yleistariffi on tarkoitettu tavallisten koti- ja maatalouskoneiden sekä valaistuksen käyttöön. Yleistariffilla sähkö laskutetaan käytön mukaan. Se on kannattavin vaihtoehto, jos vuotuinen sähkönkulutus on 7000–9000 kWh. (Seppänen 2001, 353.) Aikatariffi tarkoittaa sitä, että kello 22-7 sähkön hinta on noin puolet päiväsähkön hinnasta, koska päivisin sähkön kysyntä on suurempi kuin öisin. Aikatariffi laskutetaan kahdesta laskutuslaitteesta, joita ohjataan kytkinkellolla. Aikatariffia voidaan hyödyntää pientaloissa varaavalla lämmityksellä tai lämmittämällä lämmin käyttövesi lämminvesivaraajassa yön aikana. (Seppänen 2001, 354.) Vuodenaikatariffissa sähköllä on kaksi hintaa, joista korkeampaa käytetään talvipäivinä (marraskuun alusta maaliskuun loppuun) 15 tunnin ajan (esim. 7-22) ja matalampaa muina aikoina. Vuodenaikatariffin tarkoitus on mukailla sähköntuotannon ajallista vaihtelua. (Seppänen 2001, 354–355.) Dynaamisella tariffilla tarkoitetaan tariffia, jolla pyritään sähkön tuotantokustannusten ja kuluttajalaskutuksen vastaavuuteen. Suurimpina kulutushuippuina sähkön hinta on jopa 5-10 kertaa normaalia kalliimpi. Muulloin hinta on tavallista matalampi. (Seppänen 2001, 355.) Sähkön kokonaishinta muodostuu itse sähkön myyntihinnasta, sähkön siirtohinnasta ja veroista. Sähkön siirtohinta on sama riippumatta sähkön myyjästä, ja se kattaa mm. verkon huoltokustannuksia. (Energiateollisuus ry 2015d.)

Sähköä tuotetaan useilla eri tavoilla. Sitä voidaan tuottaa erilaisilla polttoaineilla käyvissä lauhdevoimalaitoksissa ja yhteistuotantolaitoksissa. Jälkimmäisessä tuotetaan sähkön lisäksi myös lämpöä. Polttoaineena voimalaitoksissa voidaan käyttää mm. kivihiihtä, maa-

kaasua, turvetta ja puupolttoaineita. Sähköä tuotetaan myös ydinvoimalaitoksissa, vesivoimaloissa, tuulivoimaloissa ja aurinkopaneeleilla. (Energiateollisuus ry 2014.) Kuvassa 2 näkyy vuonna 2013 Suomessa tuotetun sähkön energialähteet.

### Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013 (68,3 TWh)



**Kuva 2.** Sähkön tuotanto energialähteittäin vuonna 2013 (Energiateollisuus 2015a).

Käyttäjälle sähkölämmityksessä on useita etuja. Se on vaivaton ratkaisu ja sitä on helppo käyttää. Sähkölämmitys on mahdollinen melkein kaikkialla, koska sähköverkko on niin laaja jo valmiiksi. Koska suora sähkölämmitys reagoi nopeasti lämpötilanmuutoksiin, se ei kuluta ylimääräistä. Sähkölämmitykseen siirtyminen ei vaadi käyttäjältä suuria investointeja tai erityisiä toimenpiteitä. Lisäksi käyttäjän on helppo kontrolloida sähkön käyttöä erilaisilla kytkimillä ja asetuksilla. (Energiateollisuus 2015b.)

#### 2.2.2 Lämpöpumput

Lämpöpumput ovat myös sähkölämmityksen muoto, koska ne toimivat sähköllä. Lämpöpumppuja on erityyppisiä: poistoilmalämpöpumppu, maalämpöpumppu, vesiuilmalämpöpumppu ja ulkoilmalämpöpumppu. Nämä eroavat toisistaan siinä, mikä on käy-

tettävä lämmönlähde. Kaikki pumpputyypit hyödyntävät kylmäaineen kiertoprosessia, jossa kylmäaine vuorotellen höyrystyy sitoen lämpöä ja lauhtuu luovuttaen lämpöä. (Seppänen 2001, 377.)

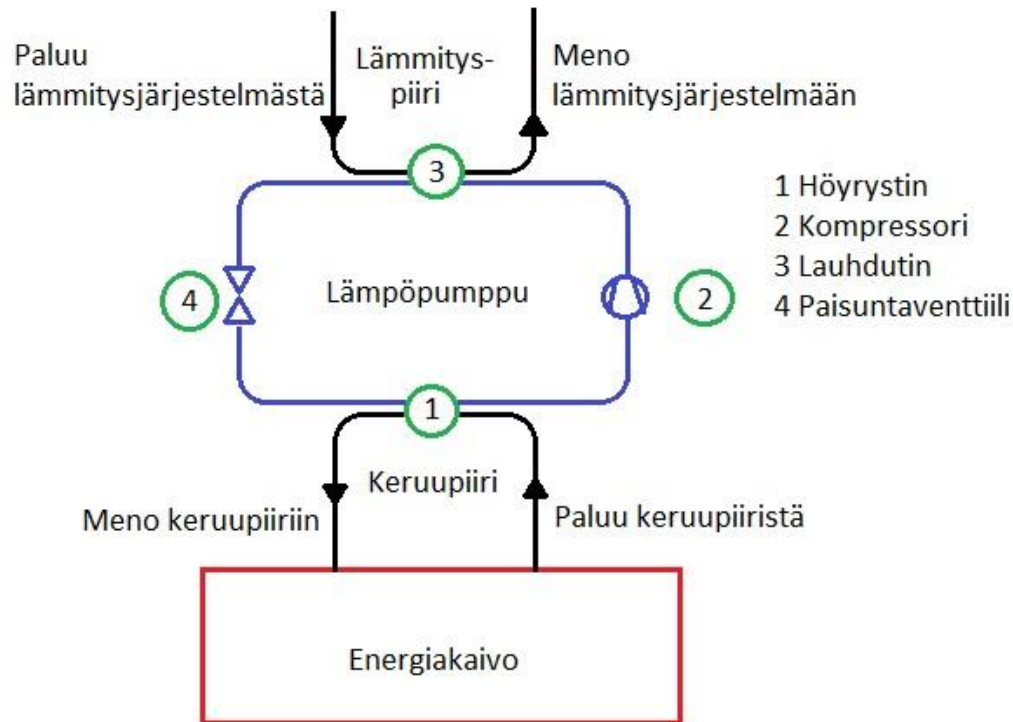
Ulkoilmalämpöpumppu ottaa lämmön ulkoilmasta ja luovuttaa sen huoneilmaan. Siinä on yleensä sisä- ja ulkoyksiköt. Ulkoyksikköön on sijoitettu höyrystin, kompressori ja automatiikan ohjauslaitteita. Sisäyksikössä puolestaan on puhallinpatteri, joka kierrättää ilmaa. Ulkoilmalämpöpumpun suorituskyky heikkenee ulkoilman kylmentyessä, jolloin on myös suurin lämmöntarve. Tämän vuoksi ulkoilmalämpöpumppu ei sovi ainoaksi lämmitysjärjestelmäksi, vaan se toimii lisälämmitysjärjestelmänä jonkin toisen rinnalla. (Motiva Oy 2008, 6.) Syksyllä ja keväällä ilmalämpöpumppua käyttämällä saa alennettua lämmityskustannuksia ja sitä voidaan käyttää jäähdytykseen kesäisin. (Motiva Oy 2008, 7.)

Ilma-vesilämpöpumppu ottaa myös lämmön ulkoilmasta, mutta siirtää sen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Myös käyttöveden lämmitys voidaan hoitaa sillä. Ilma-vesilämpöpumppu säästää 40–60 % lämmitysenergiakustannuksista verrattuna tilanteeseen, jossa käytettäisiin pelkkää suoraa sähkölämmitystä. Myöskään ilma-vesilämpöpumppua ei voida käyttää pääasiallisena lämmitysjärjestelmänä talven huonon suorituskyvyn vuoksi. (Motiva Oy 2008, 9.)

Poistoilmalämpöpumppu hyödyntää ilmanvaihdon poistoilman lämpöä. Höyrystin sijoitetaan poistoilmavirtaan ja lauhtutin lämmitysvesipiiriin. Jos rakennuksessa on poistoilmalämpöpumppu, siinä ei yleensä ole erillistä ilmanvaihto- ja lämmöntalteenottolaitteistoa. (Motiva Oy 2008, 10.)

Maalämpöpumpulla rakennuksen käyttämä lämmitysenergia otetaan maaperästä, kallioperästä tai vesistöistä. Maaperään porataan reikä, johon asetetaan keruuputkisto. Putkistossa kiertää jäätymätön neste, joka lämpenee maan sisällä kiertäessään. Keruupiiriä ja siihen kuuluvaa laitteistoa kutsutaan energiakaivoksi. Keruupiirin neste luovuttaa lämpönsä lämpöpumpun höyrystimessä, jolloin lämpöpumpussa kiertävä kylmäaine höyrystyy. Kylmä-

aineen painetta nostetaan kompressorilla ennen lauhdutinta, jossa kylmäaine lauhtuu takaisin nesteeksi ja luovuttaa lämpöä. Lauhduttimessa luovutettu lämpö siirtyy rakennuksen lämmitysjärjestelmässä kiertävään veteen. Lauhtunut kylmäaine paisuu paisuntaventtiilissä takaisin alkutilaan. (Suomen rakennusinsinööriliitto Oy 2014, 50–51.) Kuvassa 3 esitetään maalämpöpumpun toimintaperiaate.



**Kuva 3.** Maalämpöpumpun toimintaperiaate.

Lämpöpumpujen lämmönsiirtokykyä kuvaa lämpökerroin COP (Coefficient Of Performance). Se kertoo luovutetun lämmön ja käytetyn energian suhteen. Esimerkiksi maalämpöpumpuilla tyypillinen COP on 3, jolloin rakennuksen lämmittämiseen tarvitaan vain kolmasosa ostoenergiaa lämmitysenergian tarpeesta. (Motiva Oy 2009, 16.) Lämpöpumpujen suuri etu onkin suoraa sähkölämmitystä huomattavasti pienempi sähkönkulutus, mistä seuraa myös pienemmät päästöt energiantuotannossa. Toisaalta investointikustannus etenkin maalämpöpumpulla on suuri.

### 2.2.3 Polttokattilat

Talokohtaisia polttokattiloita on erityyppisiä eri polttoaineille. Kattiloita käytetään sekä lämmitysveden että käyttöveden lämmittämiseen. Lämpö jaetaan asuntoon vesikiertoisella järjestelmällä. Polttoaineena voidaan käyttää esim. pellettiä, puuta, maakaasua ja öljyä. Öljy varastoidaan talon omaan polttoainevarastoon, josta polttoaine syötetään kattilaan. Maakaasu taas syötetään rakennukseen suoraan maakaasuverkosta, mikä rajoittaa maakaasukattilan käyttöä, sillä maakaasuverkko ei ole vielä kovin laaja Suomessa. Myös biokaasua voidaan polttaa kattilassa, ja esimerkiksi maatila voi tuottaa itse oman biokaasunsa biokaasureaktorissa. Maakaasu on polttoöljyä ympäristöystävällisempi polttoaine, sillä sen polttaminen ei tuota yhtä paljon hiilidioksidipäästöjä. Se ei aiheuta myöskään hiukkaspäästöjä. (Motiva 2009, 24–27.) Pellettijärjestelmään on mahdollista hankkia lämminvesivaraaja, kun taas esimerkiksi öljykattilassa sitä ei useimmiten tarvita. Pelletit varastoidaan erilliseen tilaan, kattilatalaan tai maanalaiseen säilytystilaan. Polttoaine syötetään automaation avulla varastosta kattilaan. (Motiva 2009, 14.) Puukattiloita on erityyppisiä sen mukaan, miten polttoainetta lisätään. Yläpalokattilassa polttoainetta lisätään pienempiä määriä ja useammin kuin alapalokattilassa. Käänteispalokattilassa taas puu kaasuuntuu ensin, ja myös kaasu palaa. Puu ja pelletti ovat uusiutuvia polttoaineita ja siten hiilidioksidipäästöttömiä polttoaineita. (Motiva 2009, 15.) Kuvassa 4 näkyy pellettikattilan rakenne.



**Kuva 4.** Pellettikattila (Nibe Energy Systems Oy 2015).

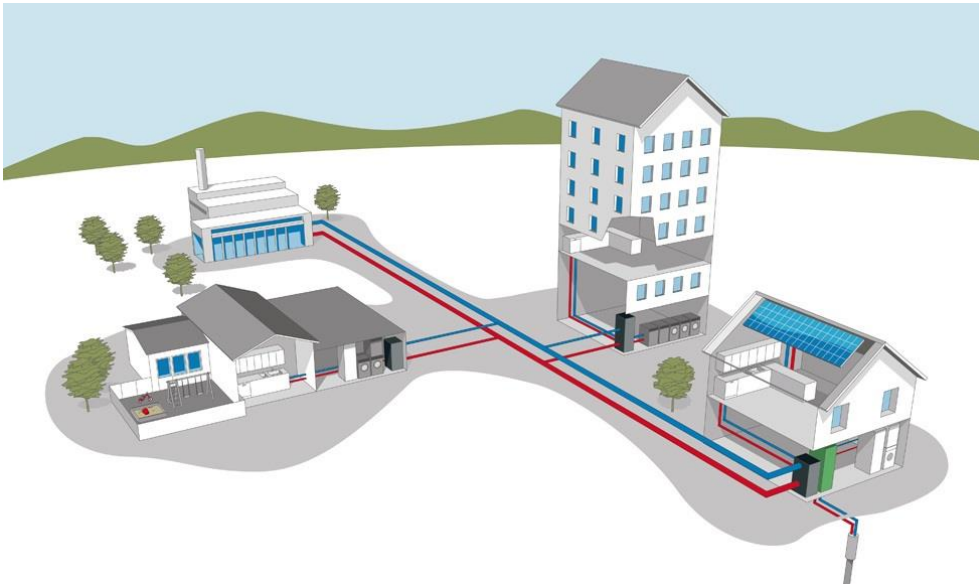
## **2.3 Alueellinen lämmitys**

Alueellisella lämmityksellä tarkoitetaan sitä, että alueen lämpö tuotetaan keskitetysti. Lämmöntuotanto voidaan toteuttaa esimerkiksi kaukolämpölaitoksessa tai alueellisessa lämpölaitoksessa, mistä lämpö jaetaan rakennuksiin vesikiertoisella lämpöverkolla. Myös maalämpöpumppua voidaan käyttää alueellisesti. Seuraavissa kappaleissa selvitetään vesikiertoisen lämpöverkon lämmönjaon toimintaperiaate sekä lämmöntuotantolaitosten toimintaperiaatteet, edut ja ongelmat.

### **2.3.1 Vesikiertoinen lämpöverkko**

Vesikiertoinen lämpöverkko tarkoittaa sitä, että lämmönjako taloihin suoritetaan veden avulla. Lämpölaitoksella lämmitetään vettä joko kierrättämällä sitä kattilassa, jossa polttoaine palaa, tai lämmönsiirtimen avulla. Lämmin vesi kiertää pumppujen avulla lämpöverkostossa lämmitettäviin rakennuksiin, joissa vesi luovuttaa lämpöenergiaa rakennusten lämmitysjärjestelmiin. Jäähdyntynyt lämpöverkon vesi palaa verkostoa pitkin takaisin lämpölaitokselle lämmitettäväksi. Verkostossa kiertää koko ajan sama vesi. Asiakkaiden lämmitysjärjestelmissä on erillinen kierto, eikä verkon vesi siis sekoitu asiakkaiden veteen. (Koskelainen et al. 2006, 43.) Kuvassa 5 on yksinkertainen esimerkki aluelämpöverkosta, jossa lämpö tuotetaan yhdessä paikassa, ja se kiertää alueen rakennuksissa.





**Kuva 5.** Vesikiertoinen aluelämpöverkko (Asko Appliances 2015).

Kaksiputkijärjestelmä on perinteinen kaukolämpöverkon järjestelmä. Siinä menoveden lämpötilaa säädetään tuotantopäässä lämpöhäviöiden pienentämiseksi niin, että vesi ei ole tarpeettoman lämmintä. Jakeluverkossa pidetään yllä niin korkeaa keskipainetta, ettei vesi pääse höyrystymään, ja lisäksi menojohdon painetta korotetaan niin, että sen paine riittää kattamaan verkostossa ja rakennuksissa tapahtuvat painehäviöt. Lämmitettävissä rakennuksissa lämpö siirtyy lämmönsiirrinten kautta, ja automatiikka säätelee sen läpi kulkevaa vesivirtaa kulloisenkin lämmitystehontarpeen mukaan. Tällöin laitteistoon ei kuulu lämmönvaraajaa, vaan kulutuksen vaihtelu näkyy suoraan kaukolämpöverkossa. (Koskelainen et al. 2006, 44.)

### 2.3.2 Kaukolämpölaitos

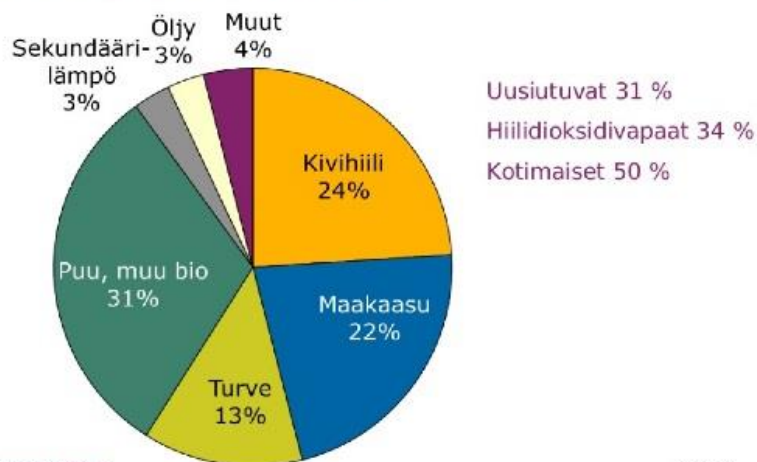
Kaukolämmöllä lämmitetään sekä rakennuksia että käyttövetä. Suomessa kaukolämmön osuus asuinrakennusten lämmityksestä vuonna 2013 oli 33 % (Tilastokeskus 2014, liitetaulukko 2). Se on yleisin asuinrakennusten lämmitystapa.

Kaukolämpöä voidaan tuottaa erillistuotantona tai yhteistuotannossa sähkön kanssa. Erillistuotannossa lämpöä tuotetaan lämpökeskuksissa. Lämpökeskuksissa polttoainetta poltetaan kattilassa, ja sen sisältämä lämpöenergia siirretään höyryyn tai veteen. Kattiloita on erityyppisiä. (Koskelainen 2006, 282.) Yhteistuotanto toteutetaan lämmitysvoimalaitoksissa, ja eri voimalaitostyyppejä ovat höyry-, kaasuturbiini-, kombi- ja moottorivoimalaitos. Höyryvoimalaitokset jaetaan lauhdutus- ja vastapainevoimalaitoksiin. (Koskelainen 2006, 297.)

Kaukolämpövoimalaitoksissa on mahdollista käyttää monia erilaisia polttoaineita. Polttoaineen käyttö riippuu myös voimalaitostyypistä. Kaasumaisia polttoaineita ovat nestekaasu ja maakaasu. Myös biokaasua on mahdollista käyttää. Nestemäisiä polttoaineita ovat jät-vesilietteet, teollisuuden jäteliemet ja öljy. Kiinteitä polttoaineita ovat hiili, turve, puu ja yhdyskuntajäte. (Koskelainen 2006, 260.) Kuvassa 6 esitetään kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon vuonna 2014 käytetyt polttoaineet.

### Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet 2014

- polttoaine-energia yhteensä 55,8 TWh



**Kuva 6.** Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet (Energiateollisuus ry 2015f).

Kaukolämmön kenties merkittävin etu on lämmön ja sähkön yhteistuotannolla saatava hyötysuhteen parannus. Tuotannon energiatehokkuus kasvaa noin 30 % verrattuna erillistuotantoon, koska samasta polttoainemäärästä saadaan sekä lämpöä että sähköä. Myös hiilidioksidipäästöt vähenevät huomattavasti verrattuna erillistuotantoon, noin 350 kg/MWh. Kaukolämmön yhteistuotanto onkin yksi merkittävimmistä yksittäisistä keinoista vähentää kasvihuonekaasujen syntymistä. (Koskelainen 2006, 27.) Vuonna 2014 kaukolämmöstä tuotettiin 74 % yhteistuotannolla (Energiateollisuus ry 2015f).

Kaukolämmön käyttöä rajoittaa asuinrakennusten etäisyys lämpövoimalasta. Kaukolämpöverkostossa kiertävä vesi on noin 65 – 115 °C. Lämpöhäviöihin kuluu keskimäärin 10 % veden verkoston siirtämästä lämpöenergiasta. Putkien vetäminen kauas voimalasta ei ole kannattavaa, koska lämpöhäviöt lisääntyvät. Lisäksi laajennettaessa lämpöverkkoa pientaloalueille ja kauempana toisistaan oleville alueille järjestelmän takaisinmaksuaika pitenee. (Koskelainen 2006, 26.)

### **2.3.3 Aluelämpölaitos**

Aluelämmitysjärjestelmissä lämmöntuotanto hoidetaan yleensä polttokattilalla, joka toimii kiinteällä polttoaineella (Koskelainen 2006, 384). Aluelämpölaitoksessa tuotetaan yleensä vain lämpöä, jolloin sen hyötysuhde on huonompi kuin yhteistuotantolaitoksen. Toimintaperiaate on kuitenkin muutoin sama kuin kaukolämpölaitoksellakin, vain pienemmässä koossa. Lämmönsiirto tapahtuu alueellisen lämpöverkon kautta.

Peruspolttoaineena aluelämpölaitoksessa voidaan käyttää hiilineutraaleja polttoaineita, kuten pellettiä tai haketta. Kuten kuvasta 6 nähdään, kaukolämpölaitoksissa käytetään edelleen paljon fossiilisia polttoaineita, joten aluelämpölaitoksen hiilidioksidipäästöt ovat uusiutuvia polttoaineita käyttämällä kaukolämpöä pienemmät. Usein kuitenkin pääkattilan rinnalla käytetään pienempää kattilaa tehohiippuja sekä lämpölaitoksen käynnistämistä varten, jolloin pientä kattilaa käytetään, että kaukolämpövesi saadaan lämmitettyä tarpeek-

si korkeaan lämpötilaan. Tämän kattilan polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi kevyttä polttoöljyä. (Flyktman et al. 2012, 39-40.)

Aluelämpölaitoksen tuottaman energian määrää voi säädellä esimerkiksi seuraavasti: kun asiakkaan lämpöenergian kulutus laskee, aluelämpölaitokselle palaavan veden lämpötila nousee ja myös laitokselta lähtevän veden lämpötila nousee. Laitoksen säätöjärjestelmä huomaa lämpötilan nousun ja polttoainetta syötetään vähemmän kattilaan. Savukaasuihin jää enemmän jäännöshappea, minkä sensorit huomaavat, ja palamisilmaa syötetään vähemmän. Tilanne tasapainottuu hiljalleen. (Härkönen 2012, 35.) Aluelämpölaitoksen etuna on helppo säädettävyys energian tarpeen mukaan, jolloin lämpöenergiaa ei mene hukkaan.

## 2.4 Lämmönjakotavat

Lämmönjako talon sisällä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Lämmönjakotapaan vaikuttaa myös lämmitysenergian lähde. Lämmönjakotapoja ovat: vesipatterijärjestelmä, lattialämmitys (vesikiertoinen tai sähkölämmitys), suora sähkölämmitys sähköpattereilla, sähkölämmitys vesipattereilla, ilmanvaihtolämmitys, sähkölämmitys kattosäteilylämmityksenä ja yhdistelmälämmitys. (Suomen rakennusinsinöörien liitto 2009, 117.)

Vesikiertoinen patterilämmitys toteutetaan kaksiputkikytkennällä ja lämpötilaa säädetään patteritermostaateilla. Se katkaisee kierron patterissa lämmitystarpeen ylityttyä, ja vesi jää kiertämään vain putkistoon. Jakotukkijärjestelmää käytetään pientaloissa jokaisessa kerroksessa vähentämään lämpöhäviötä putkissa. Jakotukkijärjestelmän avulla lämpimän veden kierto pysähtyy kokonaan piirissä, kun termostaatti sulkeutuu. Jakotukkijärjestelmää voidaan käyttää myös, jos halutaan yhdistelmälämmitys, eli sekä patteri- että lattialämmitys. (Suomen rakennusinsinöörien liitto ry 2009, 118.)

Lattialämmitystä käytetään usein märkätiloissa, ja se on yleistynyt pientaloissa. Lattialämmitysputkien asentamiselle on monta vaihtoehtoa; ne voidaan valaa betoniin, kiinnittää

lämmönluovutuslevyyn tai valaa kipsilevylattian tasoitelaastikaistoihin. Lattialämmitystä säädetään huonetermostaateilla. Lattialämmitys sopii käytettäväksi pienillä mitoituslämpötiloilla, joten se sopii hyvin esimerkiksi maalämpöpumpulle. (Suomen rakennusinsinöörien liitto ry 2009, 120.)

Ilmanvaihtolämmitys sopii passiivitaloille, joiden lämmitysenergian tarve on pieni. Ulkoilma lämpenee lämmöntalteenotossa ja huonekohtaisissa lämmittimissä tuloilman pääte-laitteissa. Lämmittimet ovat joko sähkövastuksilla tai vedellä toimivia. (Suomen rakennus-insinöörien liitto ry 2009, 122.)

Sähkölämmitys voidaan toteuttaa pattereilla, lattialämmityksellä tai kattolämmityksellä. Patterin asennetaan yleensä ikkunoiden alle ja niissä on termostaatit, jotka huolehtivat huoneen oikeasta lämpötilasta. Lattialämmityksessä lämmityskaapelit asennetaan lattiaan ja ne toimivat joko jatkuvatoimisesti tai varaavina, jolloin lämpöä varataan lattiamateriaaliin. Reagointi lämpötilan muutokseen ei ole yhtä nopea kuin patterilämmityksessä. Kattolämmityksessä asennetaan lämmityskelmut sisäkattoon, ja sitä säädetään huonetermostaateilla. (Motiva Oy 2014c.)

### **3 KÄYTETTÄVÄT METODIT JA RAJAUKSET**

Tässä työssä on tehty laskennan suhteen jonkin verran oletuksia laskentaa helpottamaan sekä rajauksia mm. hiilidioksidipäästöjen sekä vuosikustannusten laskemisessa huomioon otettaviin asioihin. Seuraavissa alaluvuissa kuvataan lämmitysenergian tarpeen, hiilijalan-jäljen sekä lämmityksen kustannusten laskemisessa käytettävät menetelmät. Myös laskennassa tehdyt rajaukset ja oletukset esitellään. Lisäksi kuvataan valitut lämmitysjärjestelmät sekä niiden suhteen tehdyt rajaukset ja oletukset, ja niiden valitseminen tähän työhön perustellaan.

### 3.1 Valitut lämmitysjärjestelmät

Tähän työhön on valittu suora sähkölämmitys, maalämpöpumppu sekä aluelämpölaitos. Kaikille lämmitysjärjestelmille on valittu tuotantomenetelmiksi sekä pelkkiä uusiutuvia energialähteitä käyttäviä menetelmiä että myös fossiilisia energialähteitä käyttäviä menetelmiä. Valinnalla halutaan tarkastella hiilidioksidipäästöjen vähentymistä uusiutuvaa energiaa käytettäessä.

#### 3.1.1 Suora sähkölämmitys

Suora sähkölämmitys on edelleen yleinen lämmitysmuoto, koska sen investointikustannukset ovat matalat. Koska kaikkialle vedetään sähköverkko, siihen on myös helppo liittyä eikä se kaipaa huoltotoimenpiteitä. Fossiilisilla polttoaineilla tuotettuna sähköllä on suuret hiilidioksidipäästöt, mutta eri tuotantomenetelmillä päästöjä saadaan pienemmiksi. Tässä työssä on otettu vertailuun kolme sähkötuotantotapaa: vesivoima, tuulivoima sekä Suomen keskimääräinen sähköntuotanto. Suomen keskimääräisessä sähkötuotannossa on otettu huomioon kaikki Suomessa käytettävät sähköntuotantomenetelmät.

Keskimääräinen sähköntuotanto on otettu mukaan vertailuun, sillä käytännössä asiakas ei voi valita sähköntuotantotapaa, vaan sähkö tulee valtion verkosta, johon kaikki tuotettu sähkö ohjataan. Niinpä asiakkaan käyttämä sähkö on sekoitus näitä kaikkia. Tässä työssä kuitenkin verrataan myös uusiutuvia tuotantomenetelmiä keskimääräiseen, koska kun solmitaan esim. sähkösopimus vesivoimasta, verkkoon tuotetaan solmittujen sopimusten verran vesivoimaa. Tuulivoima on otettu mukaan vertailuun, koska hallituksen tavoitteen mukaan tuulivoimaa tulee lisätä Suomessa niin, että vuonna 2020 sitä tuotetaan 6 TWh ja vuonna 2025 9 TWh. Vuonna 2013 tuulivoimalla tuotettiin 777 GWh sähköä, joten tuulivoiman määrä tulee lisääntymään. (Energiateollisuus 2015c.) Vesivoiman määrä ei todennäköisesti tule enää juurikaan lisääntymään, mutta monet sähköyhtiöt tarjoavat sopimuksissa puhdasta vesisähköä, ja se on lähes päästötöntä, joten sitä on hyvä verrata keskimääräisen sähköntuotannon päästöihin. (Energiateollisuus ry 2015e.)

### 3.1.2 Maalämpöpumppu

Lämpöpumpuista maalämpöpumppu on valittu mukaan tähän työhön, koska sitä voidaan käyttää ilman lisälämmitysjärjestelmää, toisin kuin poistoilma-, ulkoilma- ja vesilämpöpumppuja. Työhön on valittu toinen sähkölämmityksen muoto, koska maalämpö kuluttaa sähköä vain noin kolmanneksen verrattuna suoraan sähkölämmitykseen. Lämmitysenergia tulee suoraan maasta, ja vain lämpöpumpun käyttämiseen kuluu sähköä. Sähkön hinnan vaihtelu vaikuttaa siis vain kolmasosaan lämmöntarpeesta. Myös käytön ympäristövaikutus pienenee suoraan sähkölämmitykseen verrattuna. (Suomen rakennusinsinööriliitto Oy 2014, 54–55.) Investointikustannukset ovat suuremmat kuin suoralla sähkölämmityksellä, joten tässä työssä tutkitaan, kompensoivatko maalämmön pienet käyttökustannukset vuositasolla investointikustannuksia. Sähkön tuotantotapoina käytetään samoja kuin suorassa sähkölämmityksessä.

### 3.1.3 Aluelämpölaitos

Aluelämpölaitos on valittu työhön alueellisena lämmitysratkaisuna. Jos alueella on kaukolämpö, rakennukset liitetään yleensä kaukolämpöverkkoon. Tässä työssä halutaan tutkia tapausta, jossa kaukolämpöverkkoon liittäminen ei ole mahdollista tai taloudellisesti kannattavaa. Aluelämpölaitoksessa käytetään polttoaineena puuhaketta. Polttoaineeksi on valittu puuhake, koska Suomen tavoite on nostaa vuoteen 2020 mennessä uusiutuvan energian osuus energian loppukäytöstä 38 prosenttiin, ja tätä tavoitetta edistää puuhakkeen käytön lisääminen (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015). Työssä tutkitaan myös tapausta, jossa laitoksessa käytetään 15 %:n lämmitystehontarpeen tuottamiseen öljykattilaa hakekattilan rinnalla, koska hakekattilan tuottama lämpöenergia ei välttämättä riitä vuoden ympäri.

### 3.2 Alueen lämmitysenergiantarpeen laskeminen

Esimerkkialueena tässä työssä käytetään kuvitteellista uutta pientaloaluetta. Kaikki alueen pientalot ovat erillisiä omakotitaloja. Alue sijaitsee Lappeenrannassa alueella, jonne kaukolämpöverkko ei yllä eikä sitä ole kannattavaa rakentaa. Alueella on 50 uutta taloa, joihin kaikkiin rakennetaan samanlainen lämmitysjärjestelmä ja jotka ovat kaikki samaa energiatehokkuusluokkaa.

Tässä työssä käsitellään rakennusmääräysten vaatimukset täyttävää taloa, matalaenergiataloa sekä passiivitaloa. Näissä talotyypeissä ero lämmitysenergiantarpeessa syntyy suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tehdyistä valinnoista, eikä erillistä energiantuotantojärjestelmää tarvita tuomaan sähkön kulutus ja tuotanto tasapainoon. Esimerkkitalona käytetään yksikerroksista pientaloa, jonka lämmitetty pinta-ala on 147 m<sup>2</sup> ja jonka alapohjan tyyppi on maanvarainen betonilattia. Laskuarvoina käytetään ympäristöministeriön käyttämän esimerkkitalon laskuarvoja pientalon energiatodistuksen laatimisesimerkistä vuodelta 2013. Talo lämmitetään vesikiertoisella lattialämmityksellä maalämmön sekä aluelämmön tapauksissa ja sähköpattereilla suoran sähkölämmityksen tapauksessa.

Rakennuksen lämmitysenergian nettotarve lasketaan Suomen rakentamismääräyskokoelman D5- ja D3-osien mukaisesti. Lämmitysenergian nettotarpeeseen kuuluu rakennuksen tilojen lämmitykseen tarvittavan lämmitysenergian nettotarve, lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve ja ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve. Talon lämpökuormat vähennetään lämmitysenergian nettotarpeesta. Esimerkkitalon oletetaan olevan asuinalueen keskimääräinen talo, ja sen lämmitysenergian tarve kerrotaan asuinalueen talojen lukumäärällä koko alueen lämmitysenergian nettotarpeen saamiseksi. Asuinalueen oletetaan olevan Lappeenrannassa, joten käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelman D3-osan liitteessä 2 esitettävän sääalueen II tietoja. Laskennassa käytettävät kaavat esitetään liitteessä 1.



### 3.3 Hiilijalanjäljen laskeminen

Hiilijalanjälki on tuotteen tai toiminnan elinkaaren aikana syntyneiden kasvihuonekaasupäästöjen, kuten hiilidioksidin, metaanin ja typen oksidien, määrä ilmaan. Sen avulla voidaan arvioida toiminnan vaikutusta ilmastoon. Hiilijalanjälki ilmaistään hiilidioksidiekvivalentteina. Tässä työssä hiilijalanjälki lasketaan viidenkymmenen talon uudispientaloalueen lämmitysenergian tuotannolle. Hiilijalanjälki lasketaan erikseen kullekin lämmitysjärjestelmälle ja tulokset ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina vuodessa. Hiilidioksidiekvivalentit lasketaan kertomalla kasvihuonekaasujen päästömäärät kilowattituntia kohden kyseisen päästön Global Warming Potential (GWP) -kertoimella.

Sähkötuotannossa verrataan vesivoiman, tuulivoiman ja Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimilla laskettuja hiilijalanjälkiä. Aluelämpölaitoksessa verrataan pelkällä hakekattilalla toimivaa laitosta sekä laitosta, jossa hakekattilan rinnalla toimii osan ajasta öljykattila. Öljykattilalla katetaan 15 % lämmitysenergian tuotannosta. Lämmitysenergian tarpeen tuottamiseen vaadittava primäärienergia lasketaan kahdella tavalla: ensin huomioimalla verkostojen ja kattiloiden hyötysuhteet ja sen jälkeen kirjallisuudesta löytyvillä primäärienergiakertoimilla. Primäärienergiakertoimilla kerrotaan ostoenergian tarve. Ne kuvaavat rakennuksen ostoenergian tuottamiseen tarvittavan primäärienergian määrää (Nysted et al. 2012, 29). Hiilijalanjälkilaskelmat esitetään kummallakin tavalla lasketulle energian tuotannolle.

Päästökertoimina käytetään kirjallisuudesta löytyviä arvoja. Laskennassa huomioidaan vain lämmitysenergian tuotannon aikaiset päästöt, joten polttoaineen hankkimisen tai valmistamisen päästöjä ei huomioida. Tuulivoimalle, vesivoimalle ja öljyn ja hakkeen poltolle löytyy suorat hiilidioksidiekvivalenttimäärät kilowattituntia kohti. Kertoimissa on huomioitu kaikki energian tuotannossa syntyvät kasvihuonekaasut. Näiden tuotantotapojen hiilijalanjälki lasketaan kertomalla hiilidioksidiekvivalentit sähköntuotannolla. Suomen keskimääräiselle sähköntuotannolle on hiilidioksidipäästöjen ominaiskerroin. Hiilidioksidin GWP-kerroin on 1, ja sähköntuotannon hiilijalanjälki saadaan kertomalla ominaispäästökerroin GWP-kertoimella ja saatu lukuarvo tuotetulla energialla. Muita kasvihuonekaasu-

päästöjä kuin hiilidioksidia ei ole huomioitu tässä kertoimessa. Niiden huomioiminen nostaisi päästöjä luultavasti noin parilla kymmenellä hiilidioksidiekvivalentilla.

### **3.4 Kustannusten laskeminen**

Lämmityksestä aiheutuvat kustannukset lasketaan yhtä taloa kohti, koska ne tulevat maksettavaksi talon asukkaille. Kustannuksiin lasketaan mukaan energian hinta sekä lämmitysjärjestelmän investointi- ja huoltokustannukset.

Sähkön hinta sähkö- ja maalämpöpumppulämmityksessä lasketaan keskimääräisen arvion mukaan. Sähkön hinta vaihtelee jatkuvasti, joten tarkkaa arviota on hankala tehdä. Hinta riippuu palveluntarjoajasta ja tariffista, jolla sähköä ostetaan. Sähkön hintatiedot otetaan tässä työssä Energiaviraston hintatilastosta, josta selviää sähkön energiahinta, siirtohintaa ja energiavero. Hintana käytetään 18 000 kWh vuodessa kuluttavan talon, jossa on huonekohmainen sähkölämmitys ja 3x25 A sulake, sähkön hintaa. Sähköveron arvona käytetään kotitalouksien sähköveroa. Kyseessä on koko maan painotettu keskiarvo, ja tilastosta käytetään tämän työn tekemisen aikaan viimeisimpiä arvoja eli 1.3.2015 tilastoituja hintoja. Liittymishintana sähköverkkoon käytetään Lappeenrannan energian hintoja. Liittymismaksutaulukossa 3x25 A on Lappeenrannassa pienin mahdollinen liittymä, joka rakennetaan joka tapauksessa sähkölaitteiden käyttöä varten. Siksi tässä työssä sähköliittymän investointikulua ei oteta huomioon. Myös huoltokustannukset oletetaan nollassi, sillä verkon huolto sisältyy siirtohintaan, ja muuten sähkölämmitysjärjestelmää ei juuri tarvitse huoltaa.

Maalämpöpumpun käyttämän energian hinta lasketaan käyttämällä sähkön hinnalle samaa arvoa kuin suorassa sähkölämmityksessä. Huoltokustannukset oletetaan nollassi, koska maalämpöpumput eivät juurikaan kaipaa huoltoa. Maalämpöpumpun investointikustannuksen vuotuiset kustannukset käyttäjälle lasketaan tasa-annuiteettimenetelmällä käyttämällä investoinnin pitoaikana 25 vuotta ja laskentakorkona 5 %:a. Vuotuiset kustannukset saadaan kertomalla annuiteettitekijä investoinnilla. Annuiteettitekijä lasketaan yhtälön 1 mukaisesti.

$$c_{n,i} = i * \frac{(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (1)$$

Missä

$c_{n,i}$  annuiteettitekijä

$i$  laskentakorko

$n$  pitoaika [a].

Aluelämpölaitoksen rakentamisesta aiheutuvat kustannukset lasketaan Benet Oy:n tutkimuksen esimerkin mukaan. Siinä on laskettu kustannukset 300 kW:n aluelämpölaitokselle, joka toimii puuhakkeella. Benet Oy:n esimerkissä olevat investointikustannukset muutetaan ominaisinvestoinniksi jakamalla kustannukset laitoksen teholla, ja tässä työssä käsiteltyjen aluelämpölaitosten investoinnit saadaan kertomalla ominaisinvestointi aluelämpölaitoksen teholla.

Aluelämpölaitoksena käytetään lämpökontissa olevaa hakelämpölaitosta, joka sisältää öljykattilan varatehoksi, hakevaraston ja muut tarvittavat laitteet. Investointikustannuksiin lasketaan lämpökonttilaitoksen hankintakustannus, kiertovesipumppu ja paineenpitojärjestelmä, laitoksen perustuksen työt, kuljetus sekä asennus. Myös aluelämpöverkon rakentamisen kustannukset huomioidaan. Putkiston hinnassa käytetään suoraan samaa arvoa kuin esimerkkilaskennassa, jossa putkistoa on 1110 metriä, koska tämän työn asuinalueen kokoa ei ole määritetty. Investointikustannuksessa huomioidaan myös 20 %:n investointituki, joka myönnetään uusiutuville energiamuodoille. (Ojaniemi & Penttinen 2009, 5-6.) Investointikustannukset jaetaan 50 talon kesken ja vuotuisen kustannukset lasketaan tasaannuiteettimenetelmällä samalla laskentakorolla ja pitoajalla kuin maalämpöpumpulle. Lisäksi kustannuksissa huomioidaan vuosittaiset huoltokustannukset ja puuhakkeen ja öljyn hinta.

Tässä työssä käsitellään kahta eri lämmönjakomenetelmää: suoraa sähkölämmitystä ja vesikiertoista lattialämmitystä. Tässä työssä niiden investointikustannuksia ei huomioida,

vaan niiden oletetaan olevan osa talojen rakennuskustannuksia. Yleensä vesikiertoisen lattialämmityksen investointikustannukset ovat hieman suuremmat kuin suoran sähkölämmityksen. Johtopäätökset-osiossa pohditaan myös, millainen vaikutus lämmönjakojärjestelmän investoinneilla olisi ollut lopputulokseen.

## 4 LÄMMITYSJÄRJESTELMIEN VERTAILU

Tässä luvussa lasketaan ensin uuden asuinalueen lämmitysenergian tarve kohdassa 4.1 esitettävillä arvoilla. Tämän jälkeen lasketaan koko asuinalueen lämmitysenergian tuotannon hiilijalanjälki tavoilla, jotka aiemmin esitettiin. Lopuksi lasketaan yhdelle talolle lämmittämisestä aiheutuvat vuosikustannukset. Kunkin osa-alueen tuloksia avataan hieman niiden esittämisen jälkeen.

### 4.1 Lämmitysenergian tarve

Yksittäisen talon lämmitysenergian tarve lasketaan käyttämällä liitteen 1 yhtälöitä sekä taulukoiden 1, 2, 3 ja 4 arvoja. Taulukossa 1 esitetään esimerkkitalon pinta-ala, sisälämpötilat ja alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero, jota käytetään lattian läpi kulkevan lämpövirran laskemisessa.

**Taulukko 1.** Esimerkkitalon yleiset laskuarvot (Ympäristöministeriö 2013, 8).

Lämmitetty nettoala	147,0 m <sup>2</sup>
Sisälämpötila	21,0 °C
Puolilämpimän tilan lämpötila	17 °C
Alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero	5 °C

Taulukossa 2 esitetään talon eri rakenteiden pinta-alat. Puolilämpimällä tilalla tarkoitetaan tässä tapauksessa autotallia, jonka kanssa talolla on yksi yhteinen seinä. Kyseisen seinän läpi ei kulje yhtä suuri lämpövirta kuin ulkoilmaan johtavien seinien läpi.

**Taulukko 2.** Esimerkkitalon vaipan pinta-alat (Ympäristöministeriö 2013, 8).

Rakenteiden pinta-alat	m <sup>2</sup>
Ulkoseinä ulkoilmaan	107,25
Ulkoseinä puolilämpimään tilaan	5,75
Yläpohja	147
Alapohja	147
Ikkunat	24,4
Ovet	8,2
Yhteensä	439,6

Taulukossa 3 esitetään esimerkkitalon kylmäsiltojen pituudet ja lisäkonduktanssit. Näiden arvojen oletetaan pysyvän samoina energiatehokkuusluokasta huolimatta, vaikka todellisuudessa esimerkiksi lisäkonduktanssien arvot saattavat muuttua normaalista talosta passiivitaloon siirryttäessä.

**Taulukko 3.** Esimerkkitalon kylmäsiltojen laskuarvot (Ympäristöministeriö 2013, 8).

Kylmäsiilat	A [m]	Ψ [W/m°C]
Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	56,6	0,05
Ulkoseinän ja alapohjan välinen liitos	56,5	0,17
Ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	17,5	0,04
Ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	7,5	-0,04
Ikkunaliitos	63,4	0,04
Oviliitos	24	0,04

Taulukossa 4 esitetään arvot, jotka muuttuvat talotyypistä riippuen ja näin ollen vaikuttavat talon lämpöenergian tarpeeseen.

**Taulukko 4.** Käsiteltävien talotyyppien tekniset tekijät (Suomen rakennusinsinööriliitto Oy 2009, 34).

Tekninen tekijä	Normaali talo	Matalaenergiatalo	Passiivitalo
U-arvot			
alapohja, maanvastainen	0,16	0,12	0,1
alapohja ryömintätilaan	0,17	0,1	0,08
alapohja ulkoilmaan	0,09	0,08	0,08
ulkoseinä	0,17	0,12	0,08-0,10
yläpohja	0,09	0,08	0,07
ikkunat	1	0,8	0,7/0,8
ovet	1	0,6	0,5
Vaipan ilmanvuotoluku n50, 1/h	< 2,0	< 0,8	< 0,6
Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde, %	> 45	> 70	> 80
Ilmanvaihdon ominais- sähköteho, kWh/m <sup>3</sup> /s	< 2,5	< 2,0	< 1,5

Lämmitysenergian tarpeen laskennassa käytetyt ulkoilman lämpötilan ja alapohjan puolisen maan ja ulkoilman kuukausittaiset lämpötilaerot esitetään liitteessä II. Lämpöenergian tarpeen laskenta esitetään tarkemmin liitteen III taulukoissa. Taulukkoon 5 on koottu laskennan osa-alueiden tulokset ja lopulliset asuinalueiden lämmitysenergian nettotarpeet. Lämpökuormat vähentävät lämmitysenergian tarvetta.

**Taulukko 5.** Lämmitysenergian nettotarpeet.

	Rakentamismääräys- kokoelman vaati- mukset täyttävä talo [kWh]	Matalaenergiatalo [kWh]	Passiivitalo [kWh]
Johtumislämpöhäviöt	13 987	11 171	9 885
Vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve	1 131	452	339
Ilmanvaihdon lämmitysenergi- an nettotarve	2 705	677	73
Tulo- ja korvausilman lämpe- nemisen lämpöenergian tarve	2 472	2 472	2 472
Lämpimän käyttöveden lämmi- tysenergian nettotarve	5 145	5 145	5 145
Lämpökuormat	-4 893	-4 893	-4 893
Rakennuksen lämmitysenergi- an nettotarve	20 548	15 024	13 022
<b>Asuinalueen lämmitysenergi- an nettotarve</b>	<b>1 027 400</b>	<b>751 250</b>	<b>651 100</b>

Taulukosta huomataan, että matalaenergiataloissa ja passiivitaloissa johtumislämpöhäviöt, vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve ja ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve ovat huomattavasti pienemmät kuin normaalissa talossa. Erityisesti ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve pienenee suhteessa paljon. Matalaenergiarakennuksia suunniteltaessa ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla on siis suuri merkitys, ja siihen kannattaakin panostaa.

## 4.2 Hiilijalanjälki

Kun sähkö tuotetaan tuulivoimalla, kasvihuonekaasupäästöjä syntyy eniten voimalan rakentamisesta ja osien valmistamisesta. Näistä syntyy 98 % tuulivoimalan elinkaaren hiilidioksidipäästöistä, jotka ovat yhteensä onshore-voimalassa noin 4,64 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh ja offshore-voimalassa noin 5,25 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Käyttövaiheessa syntyvät päästöt ovat peräisin huoltotoimenpiteistä. (Parliamentary Office of Science and Technology 2006, 3.) Tässä työssä oletetaan käytössä olevan onshore-voimala, ja päästöinä käytetään huoltotoi-

menpiteiden päästöjä eli 0,09 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Päästökerroin on tarkka verrattuna muihin käytettyihin kertoimiin, ja sillä saatavat arvot ovatkin lähinnä vertailun vuoksi.

Jos vesivoimaa tuotetaan patoaltailla, patoaltaiden rakentamisesta syntyy suurimmat kasvihuonekaasupäästöt. Koska niitä ei oteta huomioon tässä työssä, vesivoiman tuotanto on lähes päästötöntä, ja päästöt ovatkin pienemmät kuin 5 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Metaanipäästöjä syntyy, kun patoaltaissa oleva kasvillisuus hajoaa. Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, ja sen vuoksi tässä työssä käytetään vesivoiman päästönä edellä mainittua enimmäisarvoa 5 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. (Parliamentary Office of Science and Technology 2006, 3.)

Suomen keskimääräinen sähkönhankinnan CO<sub>2</sub>-päästökerroin lasketaan viiden vuoden liukuvana keskiarvona. Tällä hetkellä se on 223 g CO<sub>2</sub>/kWh. (Motiva Oy 2014a.) Luvussa on huomioitu kaikki Suomessa käytettävät sähköntuotantomuodot.

Puuhakkeen palamisen ominaispäästökerroin on 0 g CO<sub>2</sub>/kWh, koska puu on kasvaessaan sitonut itseensä saman määrän hiilidioksidia kuin sitä poltettaessa vapautuu. Muita päästöjä syntyy 18 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh rakennuksen saamaa energiaa kohti. Kun otetaan huomioon polton hyötysuhde 0,85, päästöt ovat 22 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Kevyen polttoöljyn polttamisessa syntyvät päästöt ovat 267 g CO<sub>2</sub>-ekv./kWh ja hyötysuhde huomioon ottaen 314 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. (Heljo & Laine 2005, 54.)

Aluelämpöverkon häviöiden arvona on käytetty kaukolämpöverkon häviöitä, koska lämmönjakotapa on sama. Sähköverkon ja kaukolämpöverkon häviöinä on käytetty Vantaan energian antamia keskiarvoja. Niiden perusteella sähköverkon hyötysuhteeksi tulee 96,6 % ja kaukolämpöverkon 90,6 % (Vantaan energia 2015). Maalämpöpumpun COP-kertoimena käytetään arvoa 3. Taulukossa 6 esitetään todellinen tuotettu energia, kun häviöt on otettu huomioon.



**Taulukko 6.** Asuinalueen lämmitysenergian kattamiseen tuotettu energia.

Lämmitystapa	Talotyyppi	Tuotettu energia [kWh]
Suora sähkö	Normaali talo	1 063 561
	Matalaenergiatalo	777 692
	Passiivitalo	674 016
Maalämpöpumppu	Normaali talo	354 520
	Matalaenergiatalo	259 231
	Passiivitalo	224 672
Aluelämpölaitos	Normaali talo	1 334 112
	Matalaenergiatalo	975 523
	Passiivitalo	845 475

Taulukossa 7 esitetään hiilijalanjäljet kullekin valitulle lämmitysmuodolle ja lämmitysenergian tuotantotavalle sekä eri talotyypeistä muodostuville asuinalueille. Sähköverkolla tarkoitetaan tulevissa taulukoissa Suomen keskimääräistä sähköntuotantoa, josta syntyvä sekoitus ostetaan sähköverkosta.

**Taulukko 7.** Eri lämmitysmenetelmistä syntyvät asuinalueen hiilidioksidipäästöt hyötysuhteet huomioimalla.

Lämmitysjärjestelmä	Tuotantotapa	Hiilijalanjälki, normaali talo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]	Hiilijalanjälki, matalaenergiatalo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]	Hiilijalanjälki, passiivitalo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]
Suora sähkölämmitys	Tuulivoima	96	70	61
	Vesivoima	5318	3888	3370
	Sähköverkko	237174	173425	150306
Maalämpöpumppu	Tuulivoima	32	23	20
	Vesivoima	1773	1296	1123
	Sähköverkko	79058	57808	50102
Aluelämpölaitos	Hakekattila	24014	17559	15219
	Hake + öljy	73843	53995	46797

Taulukosta huomataan, että tuulivoiman lisäksi vesivoiman päästöt ovat pienimmät. Sen sijaan Suomen keskimääräisellä sähköntuotannolla lasketut päästöt ovat suoran sähkölämmityksen tapauksessa huomattavasti suuremmat kuin muilla lämmitystavoilla. Kun sähkönkulutus putoaa kolmasosaan maalämpöpumppua käyttäessä, myös hiilijalanjälki tippuu

ja on samoissa lukemissa kuin hake- ja öljykattilalaitoksen hiilijalanjälki. Kun aluelämpölaitoksessa käytetään hakkeen lisäksi öljyä, päästöt nousevat huomattavasti, vaikka öljyllä katetaan vain 15 % lämmitysenergian tarpeesta.

Lasketaan seuraavaksi hiilidioksidipäästöt primäärienergiakertoimilla. Primäärienergiakerroin uusiutuvalla ostoenergialle on 0,5, sähkölle 1,7, kaukolämmölle 0,7 ja fossiilisille polttoaineille 1 (RakMK D3 2012, 8). Uusiutuvien sähköntuotantomenetelmien kertoimena käytetään 0,5. Samaa kerrointa käytetään myös aluelämpölaitoksessa hakkeella tuotetulle lämmölle. Taulukossa 8 esitetään tällä tavalla lasketut hiilijalanjäljet vuodessa.

**Taulukko 8.** Eri lämmitysmenetelmistä syntyvät asuinalueen hiilidioksidipäästöt primäärienergiakertoimet huomioimalla.

Lämmitysjärjestelmä	Tuotantotapa	Hiilijalanjälki, normaali talo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]	Hiilijalanjälki, matalaenergiatalo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]	Hiilijalanjälki, passiivitalo [kg CO <sub>2</sub> -ekv/a]
Suora sähkölämmitys	Tuulivoima	46	34	29
	Vesivoima	2569	1878	1628
	Sähköverkko	389487	284799	246832
Maalämpöpumppu	Tuulivoima	15	11	10
	Vesivoima	856	626	543
	Sähköverkko	129829	94933	82277
Aluelämpölaitos	Hakekattila	9247	6761	5860
	Hake + öljy	49007	35835	31057

Tällä tavalla laskettuna tuotantomenetelmien hiilijalanjälkien suuruusjärjestys on sama, mutta keskimääräisen sähkön tuotannon hiilijalanjälki on huomattavasti suurempi kuin muiden tuotantomenetelmien hiilijalanjäljet. Aluelämpölaitoksen hiilijalanjälki pienenee sekä pelkkää haketta että haketta ja öljyä käytettäessä, koska hakkeelle käytetään uusiutuvan energian kerrointa.

### 4.3 Kustannukset

1.3.2015 sähkön energiahinnan keskiarvo oli 6,54 snt/kWh. Siirtohintana oli 3,64 snt/kWh ja sähkövero 2,79 snt/kWh. Hinnoissa on huomioitu 24 % arvonlisävero. (Energiavirasto 2015.) Sähkön kokonaishinta oli siis 13,83 snt/kWh. Maalämpöpumpun annuiteettitekijäksi tulee yhtälöllä 1 laskettuna 0,07095, ja vuotuisesti annuiteetiksi tulee tällöin 993 €/vuosi, kun investointikustannus on 14 000 €.

Benet Oy:n esimerkissä aluelämpölaitoksen teho on 300 kW ja investointi 111 200 €. Ominaisinvestointi on siis 370,67 €/kW. Putkiston rakentamisen kustannukset ovat 102 600 €. Huoltokustannukset ovat yhteensä 11 000 €/vuosi, eli 220 €/vuosi yhdelle taloudelle. Puuhakkeen hinta on 0,022 €/kWh. (Ojaniemi & Penttinen 2009, 5-6.) Kevyen polttoöljyn hinta oli 15.3.2015 päivitetyn tiedon mukaan 0,921 €/l (Öljy- ja Biopolttoaineala ry 2015). Kevyen polttoöljyn lämpöarvon ollessa 10,02 kWh/l (Motiva 2010, 2) öljyn hinnaksi tulee 0,091 €/kWh.

Aluelämpölaitosten kokoina on käytetty 410 kW, 320 kW ja 270 kW ja investointien suuruudet on laskettu näiden tehojen mukaan ominaisinvestoinnin avulla. Laitosten koot on laskettu alueen energiatarpeen mukaan käyttämällä aluelämpölaitoksen huipunkäyttöaikana 2500 h/a, joka on normaali huipunkäyttöaika pienille aluelämpölaitoksille (Ympäristöministeriö 2012, 39). Taulukossa 9 esitetään kaikkien lämmitysjärjestelmien kustannukset vuodessa.

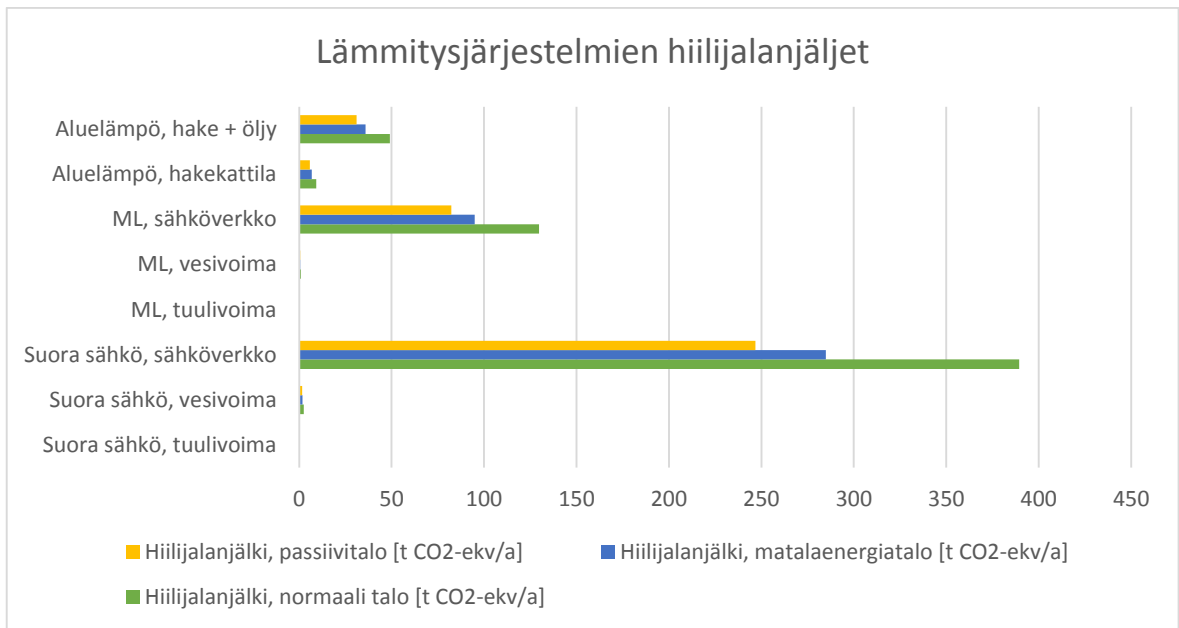
**Taulukko 9.** Lämmitysjärjestelmien kustannukset käyttäjälle vuodessa.

	Energian hinta [€/a]	Huoltokustannukset [€/a]	Investointikustannukset [€/a]	Yhteensä [€/a]
<b>Suora sähkölämmitys</b>				
Normaalitalo	2842	0	0	2842
Matalaenergiatalo	2078	0	0	2078
Passiivitalo	1801	0	0	1801
<b>Maalämpöpumppu</b>				
Normaalitalo	947	0	993	1941
Matalaenergiatalo	693	0	993	1686
Passiivitalo	600	0	993	1594
<b>Aluelämpö, hake</b>				
Normaalitalo	587	220	376	1147
Matalaenergiatalo	429	220	309	958
Passiivitalo	327	220	288	880
<b>Aluelämpö, hake+öljy</b>				
Normaalitalo	866	220	376	1453
Matalaenergiatalo	634	220	309	1163
Passiivitalo	549	220	288	1057

Tulosten mukaan pelkällä aluelämmöllä toimiva laitos olisi edullisin lämmitysratkaisu kaikilla talotyypeillä. Myös osittain öljyä käyttävän laitoksen kustannukset jäävät kaikissa talotyypeissä maalämpöä ja suoraa sähkö pienemmiksi. Sähkölämmitystyypeistä maalämpö voittaa suoran sähkön.

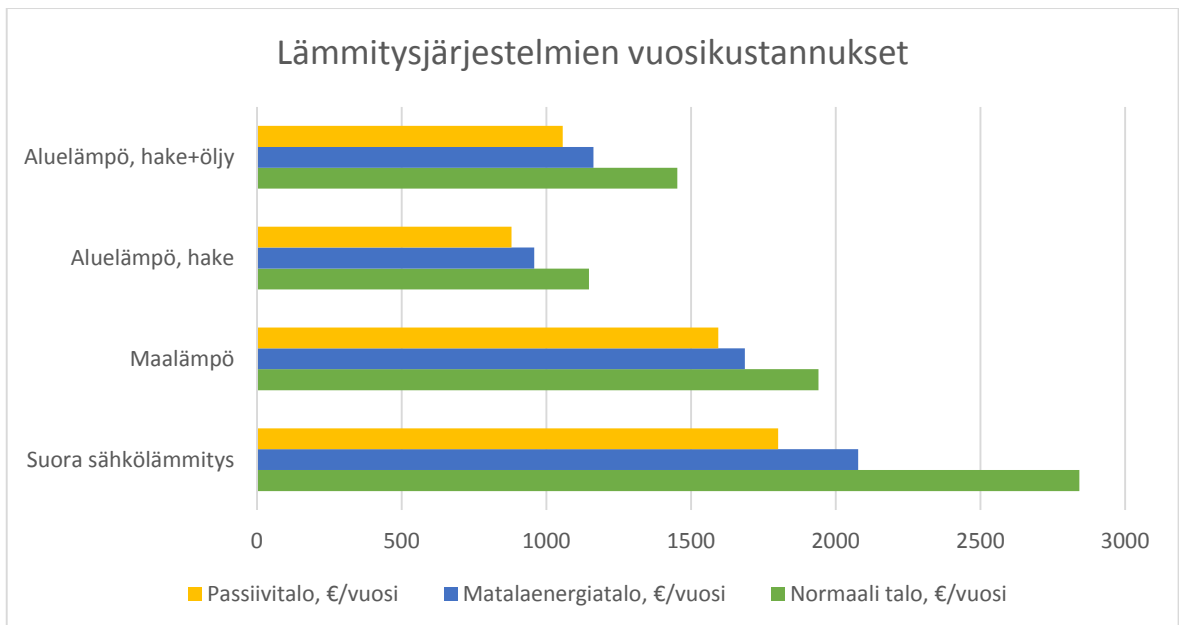
## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämmitysjärjestelmän kustannukset ja hiilijalanjälki riippuvat lämmitysenergian tarpeesta eli tässä tapauksessa talon energiatehokkuudesta. Hiilijalanjäljet seuraavassa tulosten tarkastelussa ovat primäärienergiakertoimilla laskettuja. Kuvassa 7 esitetään normaaleista taloista, matalaenergiataloista ja passiivitaloista koostuvien asuinalueiden hiilijalanjäljet kaikilla tarkastelluilla lämmitysmenetelmillä.



**Kuva 7.** Lämmitysjärjestelmien hiilijalanjäljet.

Kuvassa 8 puolestaan esitetään normaalin talon, matalaenergiatalon sekä passiivitalon vuotuiset lämmityskustannukset kullakin lämmitysmenetelmällä.



**Kuva 8.** Lämmitysjärjestelmien vuosikustannukset.

Suoran sähkölämmityksen toteuttaminen Suomen keskimääräisellä sähköntuotannolla aiheuttaa selkeästi eniten kasvihuonekaasupäästöjä kaikilla talotyypeillä. Se on myös lämmitysjärjestelmistä selvästi kallein. Investointikustannuksia järjestelmällä ei ollut, mutta jos sen haluaa myöhemmin vaihtaa vesikiertoiseen, vaihtaminen on kallista. Sähkölämmitys näyttäisi kaikilla taloalueilla olevan sekä ympäristön että kustannusten kannalta huonoin vaihtoehto. Toisaalta jos alueelle esimerkiksi rakennettaisiin tuulivoimaa tai vesivoimaa sen takia, että sinne rakennetaan uusia asuntoja, päästöt putoisivat melko lähelle nolaa. Tällöin korkeat kustannukset voitaisiin hyväksyä ympäristöystävällisyyden puolesta.

Maalämpöpumpun päästöt ovat kolmasosa suoran sähkölämmityksen päästöistä kaikilla energiatehokkuusratkaisuilla. Sen vuosittaiset kustannukset ovat hieman pienemmät kuin suoran sähkön. Normaalisessa talossa säästöä tulee noin 900 euroa vuodessa, matalaenergiatalossa noin 400 euroa ja passiivitalossa enää noin 200 euroa. Maalämpö olisi kuitenkin kaikilla sähköntuotantomenetelmillä ja energiatehokkuusratkaisuilla sekä hiilijalanjäljeltään että kustannusten kannalta suoraa sähkölämmitystä parempi vaihtoehto.

Aluelämpölaitoksen päästöt ovat sekä pelkällä hakkeella että hakkeella ja öljyllä tuotettuna suuremmat kuin sähkön ja maalämpöpumpun päästöt, kun sähkö tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla, mutta huomattavasti pienemmät silloin, kun sähkö tuotetaan keskimääräisellä sähköntuotannolla. Myös vuosikustannukset ovat menetelmistä pienimmät. Öljyn käyttö kasvattaa hiilijalanjälkeä energiatehokkuudesta riippuen noin 25 000–40 000 CO<sub>2</sub>-ekvivalentilla vuodessa, mutta kustannukset nousevat normaalilla talolla vain noin 300 eurolla vuodessa, matalaenergiatalolla noin 200 eurolla vuodessa ja passiivitalolla alle 200 eurolla vuodessa.

Kaikilla energiatehokkuusratkaisuilla eri lämmitysjärjestelmien hiilijalanjälkien ja kustannusten suuruudet ovat samassa järjestyksessä. Kokonaiskuvassa pienin hiilijalanjälki ja pienimmät kustannukset kaikilla lämmitysmenetelmillä on passiivitaloalueella. Tulosten perusteella kaikilla asuinalueilla paras yhdistelmä ympäristön ja kustannusten kannalta olisi hakelämpölaitos. Myös kevyen polttoöljyn käyttö huippulämmön tuottamiseksi on

hyvä ratkaisu. Kaikista pienimmät päästöt saataisiin tuulivoimalla tuotetulla sähköllä maalämpöpumpua käyttäen. Tuulivoimalla ei kuitenkaan käytännössä voida tuottaa perussähköä, koska tuotanto riippuu sääolosuhteista. Lisäksi kun käytössä on kansallinen verkko, johon kaikki sähkö syötetään, ei voida taata uusiutuvan sähkön käyttöä.

Aluelämpölaitoksen kustannuksiin vaikuttavat investointikustannukset. Kustannukset eivät todellisuudessa välttämättä muutu tasaisesti suhteessa laitoksen kokoon, jolloin etenkin passiivitaloalueella aluelämpölaitoksen vuotuiset kustannukset saattaisivat olla suuremmat kuin tässä työssä on esitetty. Kustannukset lienevät kuitenkin varsin kilpailukykyiset maalämpöön ja sähköön verrattuna. Jos sähkön investointikustannukset olisi otettu huomioon ja jaettu muiden investointien tapaan 25 vuodelle, vuosikustannukset olisivat kasvaneet noin sadalla eurolla vuodessa. Se olisi pitänyt sähkön ja maalämmön hintaeron samana, mutta suurentanut eroa niiden ja aluelämmön välillä.

Jos lämmönjakojärjestelmän kustannukset olisi otettu huomioon, maalämmön ja aluelämmön vuosikustannukset olisivat nousseet hieman enemmän kuin suoran sähkölämmityksen. Se olisi voinut vaikuttaa etenkin passiivitalon tapauksessa siten, että maalämmön kustannukset olisivat nousseet suoran sähkölämmityksen yläpuolelle. Muissa tapauksissa erot olisivat todennäköisesti olleet edelleen selkeät ja samanlaiset kuin nyt. Voidaan siis olettaa, että rajaus ei vaikuttanut merkittävästi tuloksiin.

## **6 YHTEENVETO**

Suomessa asumisen energiankulutuksesta suurin osa kuluu rakennusten lämmitykseen. Tässä työssä käsiteltiin uuden pientaloalueen lämmitysratkaisuja lämmitysenergian tuotannossa syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen sekä lämmityksen vuosikustannusten näkökulmasta. Uutta pientaloaluetta käsiteltiin keskimääräisten esimerkkitalojen kautta. Talotyyppeinä käytettiin rakentamismääräyskokoelman vaatimukset täyttävää taloa, matalaenergiataloa sekä passiivitaloa. Esimerkkitaloista koostuville uusille asuinalueille laskettiin vuotuinen lämmitysenergian tarve.

Tässä tutkimuksessa esitettiin pientalojen tyypillisiä lämmitysratkaisuja sekä valittiin niistä kolme tarkempaan tutkimukseen. Lämmitysjärjestelmiksi valittiin suora sähkölämmitys, maalämpöpumppu ja aluelämpölaitos. Sähkön tuotantomenetelmiksi valittiin Suomen keskimääräinen sähköntuotanto, tuulivoima ja vesivoima. Aluelämmön tuotantomenetelmiksi valittiin puuhake sekä puuhake ja öljy. Eri lämmitysmenetelmiä vertailtiin laskemalla niille hiilijalanjälki vuoden ajalta sekä käyttäjälle aiheutuvat vuosikustannukset.

Tulosten perusteella kaikilla esimerkkiasuinalueilla pienin hiilijalanjälki oli tuulivoimalla toimivalla maalämpöpumpulla, ja suurin hiilijalanjälki oli Suomen keskimääräisellä sähköntuotannolla toimivalla suoralla sähkölämmityksellä. Pienimmät kustannukset olivat jokaisessa tapauksessa hakkeella toimivalla aluelämpölaitoksella, ja suurimmat joko suoralla sähkölämmityksellä tai maalämpöpumpulla. Tarkastellessa sekä hiilijalanjälkeä että kustannuksia hakelämpölaitos oli jokaisella asuinalueella paras vaihtoehto. Myös polttoöljyn käyttö lisätehon tuottamisessa on halvempaa kuin maalämpö ja suora sähkö, ja hiilidioksidipäästöt jäävät alhaisemmiksi.



## LÄHDELUETTELO

Asko Appliances. 2015. HWC. [Yrityksen nettisivu]. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: <http://www.asko-professional.com/hwc/hwc-interactive-guide/>

Energiatehokas koti. 2013a Matalaenergiatalo. [Nettisivujen osa]. Motivan ylläpitämä sivusto. Päivitetty 25.4.2013. [Viitattu 26.2.2015]. Saatavissa: [http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva\\_tietaa/matalaenergiatalo](http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva_tietaa/matalaenergiatalo)

Energiatehokas koti. 2013b Passiivitalo. [Nettisivujen osa] Motivan ylläpitämä sivusto. Päivitetty 25.4.2013. [Viitattu: 26.2.2015]. Saatavissa: [http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva\\_tietaa/passiivitalo](http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva_tietaa/passiivitalo)

Energiateollisuus ry. 2015a. Sähköntuotanto. [Energiateollisuus ry:n nettisivuilla] [Viitattu 17.3.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

Energiateollisuus ry. 2015b. Sähkölämmitys. [Energiateollisuus ry:n nettisivuilla] [Viitattu 17.3.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/sahkolammitys>

Energiateollisuus ry. 2015c. Tuulivoima. [Nettisivujen osa]. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/tuulivoima>

Energiateollisuus ry. 2015d. Miten sähkön hinta muodostuu? [Verkkosivu] [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkon-hinta-ja-sopimukset/mista-sahkon-hinta-muodostuu>

Energiateollisuus ry. 2015e. Vesivoima. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima>

Energiateollisuus ry. 2015f. Tilastot ja julkaisut. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.4.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut>

Energiateollisuus ry. 2014. Voimalaitostyyppit. [Energiateollisuus ry:n nettisivuilla]. Päivitetty 7.3.2014. [Viitattu 10.2.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/s-hk-ntuotanto/voimalaitostyyppit>

Energiavirasto. 2015. Sähköenergian ja siirron hinnan kehitys. [Excel-tilauskoko] Päivitetty 1.3.2015. [Viitattu 31.3.2015]. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkonhintatilastot>

Euroopan komissio. 2015. Overview of Europa 2020 Targets. [PDF-dokumentti] Euroopan komission nettisivuilla. Päivitetty 10.2.2015. [Viitattu 3.4.2015]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_fi.htm)

Flytktman, Martti. Impola, Risto. Linna, Veli. 2012. Kotimaisista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. [PDF-dokumentti]. VTT:n Ympäristöministeriölle ja Energiateollisuus ry:lle tekemä raportti. [Viitattu 27.3.2015.]

Heljo, Juhani. Laine, Hannele. 2005. Sähkölämmitys ja lämpöpumput sähkökäyttäjinä ja päästöjen aiheuttajina Suomessa. [PDF-dokumentti]. Julkaisija: Tampereen teknillinen yliopisto. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: [http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Ekorem/EKOREM\\_LP\\_ja\\_sahko\\_raportti\\_051128.pdf](http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Ekorem/EKOREM_LP_ja_sahko_raportti_051128.pdf)

Härkönen, Martti. 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. [PDF-dokumentti]. KPAMKin ja CENTRIAn tutkimus. [Viitattu 26.3.2015]. Saatavissa: <http://www.forestpower.net/data/liitteet/103854=hakelamporaportti.pdf>

Koskelainen Lasse, Saarela Rauli, Sipilä Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

Motiva Oy. 2008. Lämpöä ilmassa. [PDF-dokumentti]. Motivan julkaisu lämpöpumpuista. [Viitattu 5.4.2015]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/files/175/Ilmalampopumput.pdf>

Motiva Oy. 2009. Pientalojen lämmitysjärjestelmät. [verkkojulkaisu] Julkaisija: Motiva Oy. [Viitattu 21.3.2015]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/2701/Pientalon\\_lammitysjarjestelmat.pdf](http://www.motiva.fi/files/2701/Pientalon_lammitysjarjestelmat.pdf)

Motiva Oy. 2010. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökertoimet sekä energian hinnat. [PDF-dokumentti]. [Viitattu 1.4.2015]. 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. 2014a. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. [Verkkosivu] Motivan nettisivujen osa. Päivitetty 24.4.2014. [Viitattu 24.3.2015] Saatavissa: [http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto\\_suomessa/co2-laskentaohje\\_energiankulutuksen\\_hiilidioksidipaastojen\\_laskentaan/co2-paastokertoimet](http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet)
- Motiva Oy. 2014b. Energian loppukäyttö. [Verkkosivu]. Päivitetty 2.12.2014. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto\\_suomessa/energian\\_loppukaytto](http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto_suomessa/energian_loppukaytto)
- Motiva Oy. 2014c. Huonekohtainen sähkölämmitys. [Verkkosivu] Päivitetty 21.10.2014. [Viitattu 5.4.2015]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammonjaon\\_vaihtoehdot/huonekohtainen\\_sahkolammitus](http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammonjaon_vaihtoehdot/huonekohtainen_sahkolammitus)
- Nibe Energy Systems Oy. 2015. Pellettikattilan ja –polttimet, toiminta. [Yrityksen verkkosivu]. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: <http://www.nibe.fi/Tuotteet/Pellettikattilat/Funktion/>
- Nysted, Åsa. Sepponen, Mari. Virtanen, Mikko. 2012. Ekotaajaman suunnitteluperiaatteet. [PDF-dokumentti]. VTT:n teettämä tutkimus. ISBN 978-951-38-38-7838-2 [Viitattu 30.3.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>
- Ojaniemi, Asko. Penttinen, Lauri. 2009. Pudasjärven matalaenergiarakentamisen hirsikorttelialua – Selvitys lämmön tuotannosta uusiutuvalla energialla. [PDF-dokumentti] Benet Oy:n toteuttama tutkimus. [Viitattu 1.4.2015].
- Parliamentary Office of Science and Technology. 2006. Carbon Footprint of Electricity Generation. [Verkkajulkaisu] October 2006, number 268. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://www.parliament.uk/documents/post/postpn268.pdf>
- Suomen Rakennusinsinöörien liitto. 2014. Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. RIL 265-2014. Kustantaja: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL Oy. 189 s. ISBN 978-951-758-584-2.
- Suomen Rakennusinsinööriliitto. 2009. Matalaenergiarakentaminen – asuinrakennukset. RIL 249-2009. Kustantaja: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL Oy. 291 s. ISBN 978-951-758-517-0.

Tilastokeskus. 2014. Asumisen energiankulutus 2014. [Verkojulkaisu] ISSN=2323-3273. 2013. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 3.2.2015]. Saatavilla: [http://www.stat.fi/til/asen/2013/asen\\_2013\\_2014-11-14\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/asen/2013/asen_2013_2014-11-14_tie_001_fi.html)

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2015. Energia. [Verkkosivu] Päivitetty 29.1.2015. [Viitattu 26.3.2015]. Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=2070>

Vantaan Energia. Häviöt sähkön ja lämmön siirrossa. [Yrityksen nettisivut] Vantaan energian nettisivut. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://yhteiskuntavastuu2013.vantaanenergia.fi/ilmastonmuutoksenhillinta/Sivut/haviot.aspx>

Ympäristöministeriö. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. [PDF-dokumentti] Ympäristöministeriön ja Energiateollisuus ry:n julkaisu. [Viitattu 6.4.2015].

Ympäristöministeriö. 2013. Energiatodistuksen laadintaesimerkki, uudispientalo. [Verkojulkaisu]. Ympäristöministeriön energiatodistusten laadintaesimerkki. [Viitattu 5.3.2015]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen\\_energia\\_ja\\_ekotehokkuus/Rakennuksen\\_energiatodistus/Energiatodistuslomakkeet](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus/Rakennuksen_energiatodistus/Energiatodistuslomakkeet)

Öljy- ja Biopolttoaineala ry. 2015. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. [Verkkosivu]. Päivitetty 15.3.2015. [Viitattu 1.4.2015]. Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta>

## LIITTEET

### LIITE I. Lämmitysenergian nettotarpeen laskeminen.

Rakennuksen lämmitysenergian nettotarve koostuu tilojen lämmitysenergian nettotarpeesta  $Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}}$ , lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarpeesta  $Q_{\text{lkv,netto}}$  ja ilmanvaihdosta talteen otetusta energiasta  $Q_{\text{to}}$ . Tilojen lämmitysenergian nettotarpeeseen kuuluu tilojen lämmitysenergian tarve  $Q_{\text{tila}}$  ja lämmityksessä hyödynnettävät lämpökuormat  $Q_{\text{sis.lämpö}}$ . Lämmitysenergian nettotarve lasketaan yhtälöllä 2.

$$Q_{\text{lämmitys,tilat,netto}} = Q_{\text{tila}} - Q_{\text{sis.lämpö}} \quad (2)$$

Tilojen lämmitysenergian tarve lasketaan yhtälöllä 3.

$$Q_{\text{tila}} = Q_{\text{joht}} + Q_{\text{vuotoilma}} + Q_{\text{iv,tuloilma}} + Q_{\text{iv,korvausilma}} \quad (3)$$

Missä

$Q_{\text{joht}}$  johtumislämpöhäviöt vaipan läpi [kWh]

$Q_{\text{vuotoilma}}$  vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh]

$Q_{\text{iv,tuloilma}}$  tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh]

$Q_{\text{iv,korvausilma}}$  korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve [kWh] (RakMK D5 2012, 15).

Lasketaan ensin rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt. Koko vaipan johtumislämpöhäviöt saadaan laskemalla eri rakennusosien häviöt yhteen. Rakennusosan lämpöhäviöt lasketaan yhtälöllä 4.

$$Q_{\text{rak.osa}} = U * A * (T_s - T_u) * \Delta t / 1000 \quad (4)$$

Missä

$U$  lämmönläpäisykerroin [ $W/(m^2K)$ ]

$A$  rakennusosan pinta-ala [ $m^2$ ]

$T_s$  sisäilman lämpötila [ $^{\circ}C$ ]

$T_u$  ulkoilman lämpötila [ $^{\circ}C$ ]

$\Delta t$  ajanjakson pituus [h]

1000 kerroin, jolla muutetaan yksikkö kilowattitunneiksi (RakMK D5 2012, 16).

Johtumislämpöhäviöt lasketaan kullekin kuukaudelle erikseen käyttäen rakentamismääräyskokoelman D3-osassa annettuja ulkolämpötilan keskiarvoja II-vyöhykkeelle. Ajanjaksona käytetään kunkin kuukauden tuntimäärää. Kuukausittaisen lämpöhäviöt lasketaan yhteen.

Vuotoilma tarkoittaa rakenteiden epätiiviyksien kautta tulevaa ilmaa. Sen lämmittämisen lämpöenergian tarve lasketaan yhtälöllä 5.

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i * c_{pi} * q_{v,vuotoilma} * (T_s - T_u) * \frac{\Delta t}{1000} \quad (5)$$

missä

$\rho_i$  ilman tiheys,  $1,2 \text{ kg/m}^3$

$c_{pi}$  ilman ominaislämpökapasiteetti,  $1000 \text{ J/kgK}$

$q_{v,vuotoilma}$  vuotoilmavirta [ $m^3/h$ ]. (RakMK D5 2012, 19.)

Vuotoilmavirta lasketaan yhtälön 6 mukaisesti:

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 * x} * A_{vaippa} \quad (6)$$

missä

$q_{50}$  rakennusvaipan ilmanvuotoluku [ $m^3/hm^2$ ]

$A_{vaippa}$  rakennusvaipan pinta-ala [ $m^2$ ]

$x$  kerroin; 35 yksikerroksiselle talolle

3600 kerroin. (RakMK D5 2012, 19.)

Rakennusvaipan ilmanvuotoluku voidaan laskea tunnetun rakennuksen ilmanvuotoluvun avulla yhtälöllä 7.

$$q_{50} = \frac{n_{50}}{A_{vaippa}} * V \quad (7)$$

Missä

$n_{50}$  rakennuksen ilmanvuotoluku [ $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ]

$V$  rakennuksen tilavuus [ $\text{m}^3$ ].

Ilmanvaihdon lämpöenergian tarve lasketaan yhtälöllä 8.

$$Q_{iv} = t_d * t_v * \rho_i * c_{pi} * q_{v,tulo} * \left( (T_{sp} - \Delta T_{puhallin}) - T_{lto} \right) * \frac{\Delta t}{1000} \quad (8)$$

Missä

$t_d$  ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde [h/24]

$t_v$  ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhde [vrk/7vrk]

$\rho_i$  ilman tiheys, 1,2  $\text{kg}/\text{m}^3$

$c_{pi}$  ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/kgK

$q_{v,tulo}$  tuloilmavirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$T_{sp}$  sisäänpuhalluslämpötila

$\Delta T_{puhallin}$  lämpötilan nousu puhaltimessa [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{lto}$  lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta t$  ajanjakson pituus [h]

1000 kerroin. (RakMK D5 2012, 21.)

Sisäänpuhalluslämpötila sekä lämmön nousu puhaltimessa ovat tiedossa. LTO:n jälkeinen lämpötila täytyy laskea erikseen. Se tehdään yhtälöllä 9 kullekin kuukaudelle erikseen.

$$T_{lto} = T_u + \frac{\phi}{t_d * t_v * \rho_i * c_{pi} * q_{v,tulo}} \quad (9)$$

Missä

$\Phi_{lto}$  lämmöntalteenotolla talteen otettu kuukauden keskimääräinen teho [W]

$T_u$  ulkoilman lämpötila [°C] (RakMK D5 2012, 21).

Lämmöntalteenotolla talteen otettu teho taas lasketaan yhtälöllä 10.

$$\phi_{lto} = \eta_{a,ivkone} * t_d * t_v * \rho_i * c_{pi} * q_{v,tulo} * (T_s - T_u) \quad (10)$$

Missä

$\eta_{a,ivkone}$  ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde (RakMK D5 2012, 21).

Lämmöntalteenoton hyötysuhteena käytetään kullekin talotyypille ominaista arvoa.

Seuraavaksi lasketaan tuloilman lämmitystarve. Koska esimerkkitalossa tulo- ja poistoilmavirrät ovat tasapainossa, ei taloon tule lainkaan korvausilmaa. Tuloilman lämmitystarve lasketaan kaavalla 11.

$$Q_{iv,tuloilma} = t_d * t_v * \rho_i * c_{pi} * q_{v,tulo} * (T_s - T_{sp}) * \Delta t / 1000 \quad (11)$$

Ilmanvaihdosta talteen otettu energia vähennetään lämmitysenergiantarpeesta. Se saadaan laskettua yhtälöllä 12.

$$Q_{lto} = \Sigma t_d * t_v * \rho_i * c_{pi} * q_{v,tulo} * (T_{lto} - T_u) * \Delta t / 1000 \quad (12)$$

Lopuksi lasketaan lämpimän käyttöveden lämmitysenergian tarve rakentamismääräyskoelman D3-osan mukaisesti. Siellä annetaan eri talotyypeille lämpimän käyttöveden ominaiskulutuksen arvot sekä tarvittavan lämmitysenergian arvot. Kylmän veden lämpötilana käytetään 5 °C ja lämpimän veden lämpötilana 55 °C. (RakMK D3 2012, 21.) Pientalolle lämmitysenergian tarve lasketaan seuraavasti:

$$Q_{lkv} = 35 \frac{kWh}{m^2 a} * 147 m^2 = 5145 \frac{kWh}{a}$$



Rakennuksen lämpökuormat on laskettu RakMK D3:n kappaleen 3.3 mukaisesti. Kokoelman taulukossa 3 esitetään laskennassa tarvittavat arvot. Valaistuksen, kuluttajalaitteiden ja ihmisten lämpökuorma lasketaan yhtälöllä 13.

$$Q = k * P * \frac{\tau_d}{24} * \frac{\tau_w}{7} * \frac{8760}{1000} \quad (13)$$

Missä

k käyttöaste

P lämpökuorma [W/m<sup>2</sup>]

$\tau_d$  rakennuksen käyttötuntien lukumäärä vuorokaudessa [h]

$\tau_w$  rakennuksen käyttötuntien lukumäärä viikossa [d]. (RakMK D3 2012, 19.)

## LIITE II. Laskennassa käytetyt lämpötilat

**Taulukko 10.** Laskennassa käytettyjä lämpötiloja (RakMK D3 2012, 30; RakMK D5 2012, 18).

Kuukausi	Ulkoilman keskilämpötila [C]	Alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen keksilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero
Tammikuu	-3,97	0
Helmikuu	-4,5	-1
Maaliskuu	-2,58	-2
Huhtikuu	4,5	-3
Toukokuu	10,76	-3
Kesäkuu	14,23	-2
Heinäkuu	17,3	0
Elokuu	16,05	1
Syyskuu	10,53	2
Lokakuu	6,2	3
Marraskuu	0,5	3
Joulukuu	-2,19	2

## LIITE III. Rakennuksen lämmitysenergian nettotarpeen laskeminen.

**Taulukko 11.** Rakentamismääräyskokoelman vaatimukset täyttävän talon lämmitysenergian nettotarve.

Rakennuksen tilojen lämmitysenergia [kWh]	Johtumislämpöhäviöt	A [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>joht</sub> [kWh]
	Alapohja	147	0,16	3168,2
	Yläpohja	147	0,09	1744,6
	Ulkoseinä ulkolämp.	107,25	0,17	2454,6
	Ulkoseinä puolilämp.	5,57	0,17	33,2
	Ikkunat	24,4	1	3284,9
	Ovet	8,2	1	1104,0
	Kylmäsiilat	L [m]	Ψ [W/mC]	Q <sub>kylmäsiila</sub> [kWh]
	Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	56,5	0,05	380,3
	Ulkoseinän j alapohjan liitos	56,5	0,17	1293,1
	Ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	17,5	0,04	94,2
	Ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	7,5	-0,04	-40,4
	Ikkunaliitos	63,4	0,04	341,4
	Oviliitos	24	0,04	129,2
Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve, kuukausittain				
	LTO:lla talteenotettu teho	LTO:n jälkeiset lämpötilat	Ajanjakson pituus	Q <sub>v</sub> [kWh]
	792,84744	7,2665	744	485
	809,676	6,975	672	452
	748,71216	8,031	744	445
	523,908	11,925	720	232
	325,14048	15,368	744	59
	214,96104	17,2765	720	0
	117,4824	18,965	744	0
	157,1724	18,2775	744	0
	332,44344	15,2415	720	64
	469,9296	12,86	744	191
	650,916	9,725	720	344
	736,32888	8,2455	744	433
YHTEENSÄ	Vuotoilman lämmittämiseen tarvittava nettoenergia			
20296,09186	1130,9			
Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve [kWh]				
5145				

Lämpökuormat	Käyttöaste	Lämpökuorma [W/m <sup>2</sup> ]	Käyttötunnit/Käyttöpäivät	Q <sub>sis.lämpö</sub>
Valaistus	0,1	8	7/24	1030,176
Kuluttajalaitteet	0,6	3	7/24	2317,896
Ihmiset	0,6	2	7/24	1545,264
YHTEENSÄ				
4893,336				
Rakennuksen lämmitysenergian nettotarve [kWh]				
20548				

Taulukko 12. Matalaenergiatalon lämmitysenergian nettotarve.

Rakennuksen tilojen lämmitysenergia [kWh]	Johtumislämpöhäviöt	A [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>joht</sub> [kWh]
	Alapohja	147	0,12	2376,1
	Yläpohja	147	0,08	1550,8
	Ulkoseinä ulkolämp.	107,25	0,12	1732,7
	Ulkoseinä puolilämp.	5,57	0,12	23,4
	Ikkunat	24,4	0,8	2628,0
	Ovet	8,2	0,6	662,4
	Kylmäsiilat	L [m]	[W/mC]	Q <sub>kylmäsiila</sub> [kWh]
	Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	56,5	0,05	380,3
	Ulkoseinän j alapohjan liitos	56,5	0,17	1293,1
	Ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	17,5	0,04	94,2
	Ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	7,5	-0,04	-40,4
	Ikkunaliitos	63,4	0,04	341,4
	Oviliitos	24	0,04	129,2
	Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve, kuukausittain			
	LTO:lla talteenotettu teho	LTO:n jälkeiset lämpötilat	Ajanjakson pituus	Q <sub>iv</sub> [kWh]
	1233,3	13,509	744	157
	1259,5	13,35	672	149
	1164,7	13,926	744	135
	815,0	16,05	720	23
	505,8	17,928	744	0
	334,4	18,969	720	0
	182,8	19,89	744	0
	244,5	19,515	744	0

	517,1	17,859	720	0
	731,0	16,56	744	0
	1012,5	14,85	720	84
	1145,4	14,043	744	129
YHTEENSÄ	Vuotoilman lämmittämi- seen tarvittava net- toenergia			
14773,21468	452,4			
Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve [kWh]				
5145				
Lämpökuormat	Käyttöaste	Lämpökuorma [W/m <sup>2</sup> ]	Käyttötunnit/Käyttöpäivät	Q <sub>sis.lämpö</sub>
Valaistus	0,1	8	7/24	1030,176
Kuluttajalaitteet	0,6	3	7/24	2317,896
Ihmiset	0,6	2	7/24	1545,264
YHTEENSÄ				
4893,336				
Rakennuksen lämmit- tysenergian nettotarve [kWh]				
15025				

Taulukko 13. Passiivitalon lämmitysenergian nettotarve.

Rakennuksen tilojen lämmitysenergia [kWh]	Johtumislämpöhäviöt	A [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>joht</sub> [kWh]
	Alapohja	147	0,1	1980,1
	Yläpohja	147	0,07	1356,9
	Ulkoseinä ulkolämp.	107,25	0,08	1155,1
	Ulkoseinä puolilämp.	5,57	0,08	15,6
	Ikkunat	24,4	0,8	2628,0
	Ovet	8,2	0,5	552,0
	Kylmäsilat	L [m]	[W/mC]	Q <sub>kylmäsilta</sub> [kWh]
	Ulkoseinän ja yläpoh- jan liitos	56,5	0,05	380,3
	Ulkoseinän j alapohjan liitos	56,5	0,17	1293,1
	Ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	17,5	0,04	94,2
	Ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	7,5	-0,04	-40,4
	Ikkunaliitos	63,4	0,04	341,4
	Oviliitos	24	0,04	129,2
	Ilmanvaihdon lämmit- tysenergian nettotar- ve, kuukausittain			

	LTO:lla talteenotettu teho	LTO:n jälkeiset lämpötilat	Ajanjakson pituus	Q <sub>iv</sub> [kWh]
	1409,5	16,006	744	26
	1439,4	15,9	672	28
	1331,0	16,284	744	11
	931,4	17,7	720	0
	578,0	18,952	744	0
	382,2	19,646	720	0
	208,9	20,26	744	0
	279,4	20,01	744	0
	591,0	18,906	720	0
	835,4	18,04	744	0
	1157,2	16,9	720	0
	1309,0	16,362	744	7
YHTEENSÄ	Vuotoilman lämmittämiseen tarvittava nettoenergia			
12770,29052	339,3			
Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve [kWh]				
5145				
Lämpökuormat	Käyttöaste	Lämpökuorma [W/m <sup>2</sup> ]	Käyttötunnit/Käyttöpäivät	Q <sub>sis.lämpö</sub>
Valaistus	0,1	8	7/24	1030,176
Kuluttajalaitteet	0,6	3	7/24	2317,896
Ihmiset	0,6	2	7/24	1545,264
YHTEENSÄ	4893,336			
Rakennuksen lämmitysenergian nettotarve [kWh]				
13022				

## LIITE IV. Hiilijalanjälkilaskenta.

**Taulukko 14.** Aluelämmön hiilijalanjäljen laskenta.

Hyötysuhteet		
Aluelämpölaitos, hake		
Kattilan hyötysuhde	Verkoston hyötysuhde	Hiilidioksidipäästöt [g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh]
0,85	0,0906	18
Hake	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	1334112	24014
Matalaenergiatalo	975523	17559
Passiivitalo	845475	15219
Aluelämpölaitos, hake+öljy		
Öljykattilan hyötysuhde	Verkoston hyötysuhde	Hiilidioksidipäästöt [g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh]
0,85	0,0906	267
Öljy 15 %	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	200117	53431
Matalaenergiatalo	146328	39070
Passiivitalo	126821	33861
Hake 85 %	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	1133996	20412
Matalaenergiatalo	829194	14925
Passiivitalo	718653	12936
Primäärienergiakertoimet		
Aluelämpölaitos, hake		
Primäärienergiakerroin, hake	Primäärienergiakerroin, öljy	Hiilidioksidipäästöt, hake: 18
0,5	1	Hiilidioksidipäästöt, öljy: 267
	Primäärienergian tarve [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	513700	9246,6
Matalaenergiatalo	375625	6761,25
Passiivitalo	325550	5859,9
Aluelämpölaitos, hake+öljy		
Öljy 15 %	Primäärienergian tarve [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	154110	41147,37
Matalaenergiatalo	112687,5	30087,5625
Passiivitalo	97665	26076,555
Hake 85 %	Primäärienergian tarve [kWh]	Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	436645	7859,61
Matalaenergiatalo	319281,25	5747,0625
Passiivitalo	276717,5	4980,915

**Taulukko 15.** Suoran sähköntuotannon hiilijalanjälki hyötysuhteilla.

Tuulivoima	Verkon hyötysuhde	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	0,966	0,09
	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	1063561	96
Matalaenergiatalo	777692	70
Passiivitalo	674017	61
Vesivoima	Verkon hyötysuhde	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	0,966	5
	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	1063561	5318
Matalaenergiatalo	777692	3888
Passiivitalo	674017	3370
Keskimääräinen	Verkon hyötysuhde	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	0,966	223
	Lämmitysenergian tuotanto [kWh]	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	1063561	237174
Matalaenergiatalo	777692	173425
Passiivitalo	674017	150306

**Taulukko 16.** Suoran sähkölämmityksen hiilijalanjälki laskettuna primäärienergiakertoimilla.

Tuulivoima	Primäärienergiakerroin	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	0,5	0,09
	Primäärienergian tarve	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	513700	46,233
Matalaenergiatalo	375625	33,80625
Passiivitalo	325550	29,2995
Vesivoima	Primäärienergiakerroin	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	0,5	5
	Primäärienergian tarve	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]
Normaali talo	513700	2568,5
Matalaenergiatalo	375625	1878,125
Passiivitalo	325550	1627,75
Keskimääräinen	Primäärienergiakerroin	Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> - ekv/kWh]
	1,7	223
	Primäärienergian tarve	Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]



Normaali talo	1746580	389487,34
Matalaenergiatalo	1277125	284798,875
Passiivitalo	1106870	246832,01

**Taulukko 17.** Maalämpöpumpun hiilijalanjälkilaskenta.

## Hyötysuhteilla

Verkon hyötysuhde	0,966		
COP	3		
	Sähköenergian tarve [kWh]		
Normaali talo	342467		
Matalaenergiatalo	250417		
Passiivitalo	217033		
	Tuulivoima	Vesivoima	Keskimääräinen
Ominaispäästöt [g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh]	0,09	5	223
Hiilidioksidipäästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]			
Normaali talo	32	1773	79058
Matalaenergiatalo	23	1296	57808
Passiivitalo	20	1123	50102

## Primäärienergiakertoimilla

	Tuulivoima	Vesivoima	Keskimääräinen
Primäärienergiakerroin	0,5	0,5	1,7
Primäärienergian tarve			
Normaalitalo	171233,3333	171233,3333	582193,3333
Matalaenergiatalo	125208,3333	125208,3333	425708,3333
Passiivitalo	108516,6667	108516,6667	368956,6667
Päästöt [kg CO <sub>2</sub> -ekv]			
Normaalitalo	15,411	856,1666667	129829,1133
Matalaenergiatalo	11,26875	626,0416667	94932,95833
Passiivitalo	9,7665	542,5833333	82277,33667