

gaia



*Innovative Solutions
for Sustainability*

Aurinkolämmön mahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmässä

Loppuraportti
8.11.2011

Markku Tahkokorpi, Markku Hagström, Juha Vanhanen
Gaia Consulting Oy



Sisällysluettelo

Executive summary	3
1 Johdanto	5
2 Aurinkolämmön keräintekniikat.....	6
2.1 Tasokeräimet.....	6
2.2 Tyhjöputkikeräimet	9
2.3 Keskittävät keräimet	11
2.4 Muita keräinratkaisuja	13
3 Aurinkolämmön varastointi.....	14
3.1 Tuntuvan lämmön varastot.....	14
3.2 Latenttilämpövarastot.....	15
3.3 Kaukolämpöjärjestelmien lämpövarastot.....	16
4 Aurinkolämmön kytkentävaihtoehtoja	18
4.1 Keskitettyjä kytkentöjä.....	19
4.2 Hajautettuja kytkentöjä	21
4.3 Muita ratkaisuja	23
5 Kustannuslaskelmia	23
5.1 Keskitetty aurinkolämpö suoraan kaukolämpöverkkoon	24
5.2 Keskitetty aurinkolämpö ja lämpöpumppuavusteinen kausivarastointi	27
5.3 Hajautettu aurinkolämpö kytkettynä kaukolämpöverkkoon.....	29
5.4 Hajautettu aurinkolämpö kaukolämpöverkon rinnalla.....	32
6 Yhteenveto ja johtopäätökset.....	33
Lähteet.....	34



Executive summary

Solar thermal energy utilization in district heating has been challenging in Finland for several reasons: low temperature levels of produced energy compared to typical district heating temperatures, energy production heavily concentrated to the summer time, large daily variation of summer time production and lack of standardized solutions for district heating coupling. However, modern vacuum tube collectors enable higher temperature levels than flat-plate collectors, and on the other hand, lower temperature district heating solutions are expected to spread.

The aim of this study was to assess technical feasibility of different solar thermal technologies (flat-plate collectors, vacuum tube collectors, concentrating collectors) in the Finnish district heating system, to define typical coupling alternatives of solar thermal to district heating system and to assess their strengths and weaknesses, to perform economical feasibility calculations in a few representative cases and to present conclusions and recommendations on how to best utilize solar thermal in district heating.

Main results of the study can be summarized as follows:

1. Energy efficiency and economics of centralized solar thermal installations are better than those of de-centralized installations. Costs per collector area and production cost of solar energy decrease when the system size increases. Similarly, thermal energy storage efficiency increases when the store size increases.
2. Solar thermal systems that are used to heat outgoing water of the district heating system are reaching competitiveness little by little; cost-effective and increasingly common vacuum tube collectors enable high enough temperatures.
3. Cost level of large solar thermal installations in the most advanced solar thermal countries has already reached competitiveness with traditional district heating in many cases. In Finland home market needs to grow, before collector prices and installation costs will reach the same level.

The following alternative solutions were selected to the feasibility calculations:

1. Centralized solar thermal:
 - a. preheating of district heating return water with flat-plate collectors
 - b. heating of district heating outgoing water with vacuum tube collectors
2. Centralized solar thermal with heat pump assisted seasonal storage of solar thermal in the bedrock
3. De-centralized solar thermal:
 - a. coupled to the district heating network
 - b. parallel to district heating network, detached from the network

Solar thermal energy production costs in the centralized return water preheating case (1 A) were rather sensitive to the return water temperature, due to the used flat-plate collectors: if the return water temperature increased from 30 °C to 60 °C, the production cost increased by about 55 – 60 %. In the centralized outgoing water heating case (1 B) the cost increase was only about 15 %, when outgoing water temperature was increased from 60 °C to 90 °C.



Heat pump assisted seasonal storage of solar thermal (case 2) appears an interesting future possibility to increase solar fraction significantly in a given district heating network. However, economical results were sensitive to several critical parameters and thus, further research and local pilot studies are still needed.

De-centralized solar thermal, coupled to district heating network (case 3 A) is mainly a question of business models and tariff structures which are challenging to solve for mutual benefit. In addition, these questions are very case specific. De-centralized solar thermal, parallel to district heating (case 3 B) cannot presently compete with district heating at sites with relatively small thermal energy consumption. In oil and electrically heated buildings the situation is different.

In all, solar thermal offers many alternative solutions in connection to district heating. The feasibility of different solutions in different district heating networks depends on the district heat production structure of each network. Therefore, a given solution may be economical in one district heating network and uneconomical in another. Thus, case specific assessment is necessary when considering solar thermal in a district heating network.



1 Johdanto

Aurinkolämpö on yksi merkittävimmistä uusiutuvan energian lähteistä. Sen markkinat kasvavat maailmalla nopeasti. Vuonna 2010 aurinkolämpötekniikalla tuotettiin maailmanlaajuisesti 162 TWh energiaa, kun esimerkiksi aurinkosähkön tuotanto oli 39,6 TWh. Euroopassa (EU27) asennetaan aurinkolämpökeräimiä vuosittain noin 4 000 000 m², mikä vastaa noin 3 000 MW huipputehoa. 1990-luvun puolivälin jälkeen Euroopassa on rakennettu yli sata kaukolämpöjärjestelmään liitettyä aurinkolämpökeräinjärjestelmää, joiden pinta-ala on vähintään 500 m². Euroopassa johtavia maita aurinkokaukolämmön alueella ovat Tanska, Ruotsi ja Itävalta. Myös Saksassa on tehty merkittäviä kokeiluja erityisesti lämmön kausivarastoinnin alueella.¹²

Suomessa aurinkolämmön hyödyntäminen on vielä vähäistä, vaikka omakotitalomittakaavassa järjestelmiä onkin asennettu jo varsin pitkään. Aurinkolämpöä on testattu osana kaukolämpöjärjestelmää vain muutamissa kohteissa. 1990-luvun alkupuolella TKK:n tekemässä tutkimuksessa aurinkokeräimiä käytettiin Oripohjan lämpökeskukselle palaavaan kaukolämpöveden esilämmitykseen³. 2000-luvun alussa aurinkolämmön mahdollisuuksia tutkittiin Eko-Viikissä, jossa aurinkolämmöllä tuotettiin lämpöä kahdeksaan kerrostaloon. Eko-Viikissä aurinkolämmön osuus oli noin 10 % lämmöntarpeesta ja noin 30 % lämpimän käyttöveden tarpeesta.⁴

Pitkän hiljaisen jakson jälkeen kiinnostus aurinkolämpöä kohtaan on kasvanut myös Suomessa. Syynä tähän on ollut hiilidioksidittoman energiantuotannon kysynnän kasvu sekä aurinkolämpötekniologian kustannusten lasku. Perinteisesti aurinkolämmön yhdistäminen kaukolämpöön on ollut ongelmallista lähinnä seuraavista syistä:

1. Aurinkolämmön tuotannon lämpötilataso on alhainen, joten sen yhdistäminen kaukolämpöön on ollut haasteellista. Osin tätä ongelmaa helpottavat uudet teknologiat, joilla aurinkolämmön lämpötilatasoa voidaan nostaa (mm. tyhjöputkikeräimet) sekä matalalämpötilaiset kaukolämpöratkaisut, joiden odotetaan yleistyvän.
2. Aurinkolämmön tuotannon painottuminen kesäaikaan sekä tuotannon suuret vaihtelut eri päivien välillä aiheuttavat vaikeuksia tuotannon mitoitukselle. Ongelma ilmenee erityisesti, kun aurinkolämmön osuus kasvaa merkittäväksi järjestelmän kokonaistuotannossa.
3. Vakioitujen ratkaisujen puuttuminen sekä puutteelliset tiedot teknologiasta, mikä on johtanut siihen, että ei ole muodostunut vielä tietoa siitä, millaiset kytkennät ja kokonaisratkaisut ovat Suomen oloissa toimivia ja kustannustehokkaita.

Tämän tutkimuksen tehtävänä on selvittää tarkemmin näitä ongelmakohtia. Ensimmäisenä tavoitteena on selvittää aurinkolämmön eri tuotantoteknologioiden soveltuvuus osaksi kaukolämpöjärjestelmää Suomen olosuhteissa. Toisena tavoitteena on määrittää tyypilliset

¹ ESTIF Solar Thermal Markets in Europe – Trends and Market Statistics 2010, June 2011

² Success Factors In Solar District Heating, CIT Energy Management AB (Deliverable D2.1 of Solar District Heating (SDH) Project)

³ NEMO-tiedote 2/96

⁴ Ekoviikin EU-aurinkolämpöjärjestelmien jatkoseurannan loppuraportti, Solpros 11/2004



aurinkolämmön kytkentävaihtoehdot osana kaukolämpöjärjestelmää sekä arvioida niiden vahvuudet ja heikkoudet. Kolmantena tavoitteena on arvioida aurinkolämmön kannattavuutta suorittamalla laskelmia muutamassa tyypillisessä aurinkolämpöä hyödyntävässä ratkaisuvaihtoehdossa. Tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa näkemys aurinkolämmön realistisista hyödyntämismahdollisuuksista kaukolämpöjärjestelmässä. Pitkällä tähtäimellä ratkaisut voivat parantaa kaukolämmön kilpailukykyä ja kiinnostavuutta asiakkaiden keskuudessa. Hankkeen tulokset ovat hyödynnettävissä useissa kohteissa, joihin jo nyt suunnitellaan aurinkolämmön hyödyntämistä.

Raportin luvussa 2 tarkastellaan aurinkolämmön keräintekniikoita ja arvioidaan niiden soveltuvuutta osaksi kaukolämmön tuotantoa Suomen olosuhteissa. Tarkasteltavia tekniikoita ovat tasokeräimet, tyhjöputkikeräimet sekä erilaiset keskittävät keräimet. Koska aurinkolämmön tuotanto vaihtelee voimakkaasti, tarkastellaan raportin luvussa 3 lyhyesti kaukolämpömittakaavaan soveltuvia lämmönvarastointiratkaisuja. Luvussa 4 tarkastellaan erilaisia aurinkolämmön kytkentätapoja sekä kuvataan erilaisia järjestelmäratkaisuja, joilla aurinkolämpö voidaan liittää kaukolämpöjärjestelmään. Luvussa 5 esitetään tyypillisten järjestelmäratkaisujen tapauslaskelmat, joiden tarkoituksena on kuvata tarkemmin erilaisten ratkaisujen kannattavuutta ja soveltuvuutta Suomessa. Yhteenvedo tuloksista sekä johtopäätökset esitetään luvussa 6.

2 Aurinkolämmön keräintekniikat

Aurinkolämpökeräimet voidaan jakaa keskittäviin ja ei-keskittäviin ratkaisuihin. Tyypillisimmät ei-keskittävät keräintyyppit ovat tasokeräimet ja tyhjöputkikeräimet. Erityisesti tasokeräimet ovat melko vakiintuneita, sillä niitä on käytetty jo pitkään mm. lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Viime vuosina kasvava kiinnostus uusiutuvaan energiaan on kuitenkin tuonut markkinoille uusia teknologioita. Lisääntynyt kiinnostus aurinkoenergiatekniikkaa kohtaan erityisesti Saksassa ja Skandinaviassa on saanut aikaan sen, että on alettu kehittämään keräintyyppejä, jotka soveltuvat hyvin myös pohjoisen kylmiin olosuhteisiin.

2.1 Tasokeräimet

Tasokeräimet ovat edullisimpia ei-keskittäviä keräimiä. Ne ovat olleet suosittuja erityisesti Euroopassa. Pääosa esimerkiksi Saksaan asennetuista aurinkokeräimistä on tasokeräimiä. Suurin eurooppalaisista keräinvalmistajista on itävaltalainen GREENoneTECH jonka keräinten tuotanto vuonna 2010 oli 800 000 m² ja kapasiteetti yli 1 500 000 m²/v.⁵ Toinen merkittävä aurinkokeräinten valmistaja on saksalainen Bosch Thermotechnik.

⁵ Solar industry – The first green shoots of recovery, Bank Sarasin & Cie AG 11/2009

Tasokeräimissä auringon valo absorboidaan keräinpintaan, jonka absorptio-ominaisuuksia on parannettu sopivalla pinnoitteella (ks. laatikko 2.1). Absorptiopinnasta lämpö johtuu lämmönsiirtoaineeseen, joka yleensä on neste (useimmiten vesi-glykoliseos jäätymisen estämiseksi) tai yksinkertaisemmissa sovelluksissa ilma. Absorptiopinta on suljettu lämpöeristettyyn laatikkoon, johon auringon säteily saapuu yhden lasilla peitetyn seinämän kautta (ks. kuva 2.1). Keräimen lämpötekniset ominaisuudet riippuvat pääasiassa lasin ja absorptiopinnan optisista ominaisuuksista sekä keräimen lämpöeristyksestä. Kokonaisjärjestelmän hyötysuhteeseen vaikuttaa myös merkittävästi lämmönsiirtoputkiston pituus ja sen lämpöeristyksen laatu.

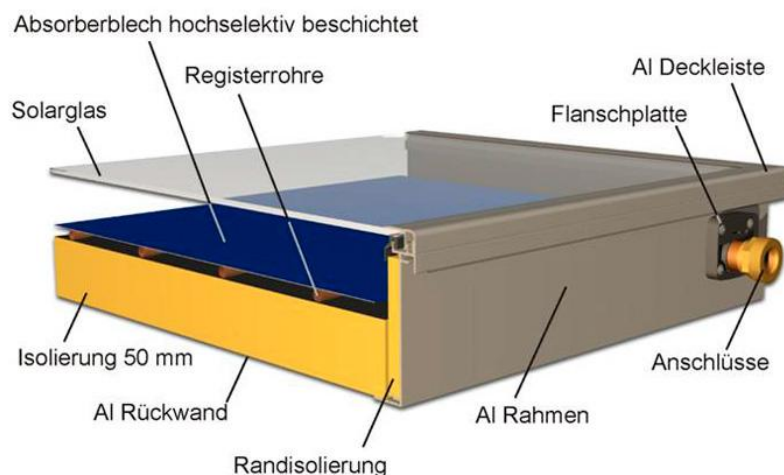
Laatikko 2.1: Savo-Solar Oy

Mikkelissä toimiva yritys Savo-Solar Oy on kehittänyt erityisesti absorptiopinnoitetta, jota he kutsuvat nimellä MEMO. Se koostuu kolmikerroksisesta tyhjötekniikoilla valmistetusta rakenteesta (pii, alumiini ja titaanioksidit), jolla saavutetaan yli 96 % absorptio auringon säteilylle ja pieni infrapuna-emissio. Pinnoite kestää usean sadan asteen lämpötilan. Yritys on patentoinut sekä pinnoitteen rakenteen että sen valmistusmenetelmän.

Tähän mennessä yritys on valmistanut tasokeräimiä, joissa lämmönsiirtokanavat on valmistettu suoraan metallikappaleeseen (kupari, alumiini tai ruostumaton teräs) ja optimoitu rakenteeltaan soveltaen luonnon rakenteita. Rakenne on palkittu mm. Intersolar-messuilla 2011.

Yrityksen tuotetiekartalla on myös pinnoitteen soveltaminen tyhjöputkikeräimiin sekä keskittäviin keräimiin.

<http://www.savo-solar.fi>



Kuva 2.1. Tasokeräimen rakenne (GREENoneTEC FK6000 series)



Tyypillisiä tasokeräimen teknisiä tietoja (Geo-Tec GSE2400/TINQ)

Mitat		Tekniset tiedot	
Pituus	0.986 m	Minimivirtaama	30 l/h
Leveys	2,412 m	Nimellisvirtaama	120 l/h
Kokonaispinta-ala	2,378 m ²	Maksimivirtaama	200 l/h
Apertuuriala	2,276 m ²	Nestetilavuus	2 l
Absorbaattorin pinta-ala	2,262 m ²	Maksimipaine	6 bar
Paino tyhjänä	42 kg	Stagnaatiolämpötila	199 °C
Maksimiteho W_{peak}		Hyötysuhde (koko pinta-alan suhteen)	
Maksimiteho	1812 W	η_0	0,762
Lämpökapasiteetti	6,2 kJ/K	a_1 [WK ⁻¹ m ⁻²)	3,68
		a_2 [WK ⁻² m ⁻²)	0,0080

Ruotsissa ja Tanskassa on rakennettu useita tasokeräimiin perustuvia aurinkolämpöä kaukolämpöverkkoon syöttäviä järjestelmiä. Pääosa niistä perustuu keskitettyyn aurinkolämmön tuotantoon maan pinnalle rakennetulla keräinkentällä. Suurin näistä on Marstalin 18 300 m²:n järjestelmä, jonka nimellisteho on 12,8 MW_{th} (ks. kuva 2.2).



Kuva 2.2. Marstalin aurinkokaukolämpöjärjestelmä ⁶

Ruotsissa on rakennettu myös useita aurinkolämmön hajautettuun tuotantoon perustuvia järjestelmiä. Niissä lämpökeräimet on asennettu (yleensä melko suuren) asiakkaan rakennuksen katolle ja kytketty kaukolämpöverkkoon. Tuotettuun lämpöön sovelletaan nettolaskutusperiaatetta. Esimerkkinä voidaan mainita Vislandassa sijaitseva *Allbohus Fastighets Ab*-vuokrataloyhtiöön vuonna 2009 rakennettu 350 m²:n kattoon integroitu tasokeräinkenttä, joka toteutettiin peruskorjauksen yhteydessä. Järjestelmän tuottama ylijäämälämpö syötetään paikalliseen *Alvesta Energi Ab*:n kaukolämpöverkkoon.

Tanskassa rakennetuissa tasokeräimiin perustuvissa järjestelmissä aurinkolämmön tuotantokustannustaso on ollut luokkaa 20–40 €/MWh. Kokonaisinvestointi esimerkiksi Bræderupin

⁶ Success Factors In Solar District Heating, CIT Energy Management AB (Deliverable D2.1 of Solar District Heating (SDH) Project)



vuonna 2007 valmistuneessa 8000 m²:n laitoksessa oli 205 €/keräineliö, sisältäen kaikki aurinkolämpöjärjestelmän kustannukset. Järjestelmään kuuluu myös 2000 m³ terästankkivarasto, jonka kapasiteetti on 110 MWh.

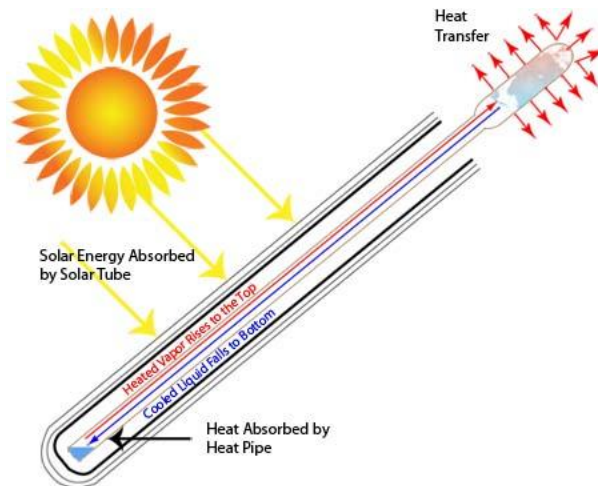
Periaatteessa Etelä-Suomeen voitaisiin rakentaa samanlaisia järjestelmiä lähes samoilla kustannuksilla, sillä säteilyolosuhteet eivät poikkea mainittavasti Ruotsin tai Tanskan vastaavista. Merkittävin ero on Suomen aurinkolämpömarkkinan kehittymättömyys, mistä syystä laitteistojen ja asennustyön hinnat ovat Suomessa tällä hetkellä korkeampia.

2.2 Tyhjöputkikeräimet

Tyhjöputkikeräimet ovat suosittuja erityisesti Kiinassa, missä niitä on asennettu noin 100 000 MW_{th}, kun tasokeräimiä on asennettu vain alle 10 000 MW_{th}. Vuonna 2009 Kiinan markkina oli 80,6 % koko maailman aurinkolämpökeräinmarkkinoista, kun seuraavana olevan Euroopan osuus oli 10,2 %. Näin ollen maailman uusasennuksista suurin osa tehdään tyhjöputkitekniikalla. Täten on myös ymmärrettävää, että tyhjöputkikeräinten tuotanto Kiinassa on varsin kustannustehokasta.⁷

Tyhjöputkikeräimessä absorboiva pinta on putken pinnalla. Putki on suljettu suurempaan lasiputkeen, josta ilma on poistettu, joten kuuma putki on hyvin lämpöeristetty ympäristöstään. Tämän vuoksi tyhjöputkikeräimillä päästään korkeampiin lämpötiloihin kuin tasokeräimillä.

Perinteisesti tyhjöputken sisällä on kiertänyt lämmönsiirtoneste u-putkessa, mutta modernimmassa ratkaisussa tyhjöputken sisällä on lämpöputki (engl. heat pipe), joka siirtää lämmön putken toiseen päähän, mistä lämpö siirretään lämmönsiirtonesteeseen lämmönvaihtimen välityksellä (ks. kuva 2.3). Tällainen ”kuivaliitos”-ratkaisu helpottaa huomattavasti huoltotyötä erityisesti siinä tapauksessa, että yksittäinen keräinputki rikkoontuu ja se joudutaan vaihtamaan.



Kuva 2.3. Lämpöputkella varustetun tyhjöputkikeräimen rakenne⁸

⁷ Solar Heat Worldwide, IEA 2011

⁸ <http://www.solarpanelsplus.com/thermal-how-it-works>



Kilpailu valmistajien välillä on kovaa, joten hinnat ovat laskeneet melko voimakkaasti. Toisaalta kova kilpailu on johtanut joillakin toimijoilla laatuongelmiin, minkä vuoksi oikean valmistajan valitseminen on erittäin tärkeää.

Kiinalaisten tyhjöputkikeräinvalmistajien tuotantomäärät ovat tyypillisesti varsin suuria. Esimerkiksi yksi suurimmista valmistajista, Shandong Linuo Solar Thermal Group Co., Ltd pystyy valmistamaan 45 miljoonaa tyhjöputkea vuodessa täysin integroidussa tehtaassaan. Niistä voidaan sitten koota erilaisia keräimiä tarpeen mukaan.⁹

Tyhjöputkikeräimistä on kehitetty myös erityisesti kylmiin olosuhteisiin (ks. kuva 2.4) soveltuva, heijastimella varustettu koteloitu versio, joka muistuttaa hieman tasokeräintä. Heijastin auttaa putkien ohi menevän säteilyn hyödyntämistä, joten niillä voidaan saavuttaa jonkin verran parempi kokonaishyötysuhde kuin avoimilla tyhjöputkikeräimillä. Lisäksi tässä ratkaisussa tyhjöputket on paremmin suojattu mekaaniselta rasitukselta, mikä parantaa niiden kestävyttä. Koteloitun tyhjöputkikeräimen ulkonäköäkin voi pitää parempana kuin koteloimattoman.



Kuva 2.4. Tyhjöputkikeräimiä katolla Espoon Laajalahdessa¹⁰

Yksi tyhjöputkikeräinten heikkous verrattuna tasokeräimiin on ollut niiden mekaaninen kestävyys raesateessa. Perinteiset tyhjöputkikeräimet ovat vahingoittuneet testeissä, joissa on simuloitu 35 mm raesadetta. Saksassa on kuitenkin kehitetty tyhjöputkikeräimiä, joiden ulkoputki on normaalia paksumpaa lasia ja jotka kestävät jopa 40 mm raesateen.¹¹

Tyypillisiä tyhjöputkikeräimen teknisiä tietoja (Jianxing Jinyi Solar Energy Technology Co., Ltd JHC-5818-15)

Mitat		Tekniset tiedot	
Pituus	1.925 m	Minimivirtaama	120 l/h
Leveys	1,184 m	Nimellisvirtaama	160 l/h
Kokonaispinta-ala	2,279 m ²	Maksimivirtaama	500 l/h
Apertuuriala	1,408 m ²	Nestetilavuus	0,9 l
Absorbaattorin pinta-ala	1,208 m ²	Maksimipaine	12 bar
Paino tyhjänä	49 kg	Stagnaatiolämpötila	221 °C
Maksimiteho W_{peak}		Hyötysuhde (koko pinta-alan suhteen)	
Maksimiteho	899 W	η_0	0,394
Lämpökapasiteetti	16,8 kJ/K	a_1 [WK ⁻¹ m ⁻²)	1,11
		a_2 [WK ⁻² m ⁻²)	0,0065

⁹ Company website <http://www.Inxcl.com/en/about/>

¹⁰ Kuva: Markku Tahkokorpi

¹¹ News item at <http://www.solarthermalworld.org/node/2948>



2.3 Keskittävät keräimet

Keskittäviä lämpökeräimiä on käytetty erityisesti suurissa CSP¹²-voimalaitoksissa. Niissä tuotettavaa korkealämpötilaista lämpöä käytetään sähkön tuottamiseksi höyryturbiinitekniikoilla. Joissakin tapauksissa on hyödynnetty myös ORC¹³-tekniikkaa tai stirling-moottoreita.

Keskittämissä järjestelmissä käytetään yleensä yksi- tai kaksiakselista auringon seuranta (heliostaattia) hyötysuhteen pitämiseksi korkeana. Keskittävät järjestelmät jaetaan yleensä kahteen ryhmään: viivakeskittäviin ja pistekeskittäviin. Viivakeskittäville saadaan pienempi keskityssuhde, mutta niissä tarvitaan vain yhden akselin seuranta, joten ne ovat mekaanisesti yksinkertaisempia.

Suomen talvessa keskittävien keräinten mekaaniset, liikkuvat rakenteet ovat erittäin vaativia. Lisäksi auringon säteilyn painottuminen kesäkuukausille aiheuttaa sen, että seurantajärjestelmistä on hyötyä lähinnä vain kesäaikana. Lisäksi on huomattava, että Suomessa auringon suoran säteilyn osuus kokonaissäteilystä on huomattavasti pienempi kuin aurinkoisimmilla alueilla, joten keskittävien järjestelmien hyöty jää senkin vuoksi vähäisemmäksi. Sen sijaan Suomessa on saatavissa suhteellisen runsaasti epäsuoraa säteilyä, jota taso- ja tyhjöputkikeräimet pystyvät hyödyntämään varsin hyvin.

Käytännössä siis keskittäviä keräinratkaisuja ei kannata Suomessa hyödyntää ellei niiden ratkaisut tule erityisen edullisiksi ja kausivarastointi pystytään toteuttamaan kustannustehokkaasti.

Parabolinen kouru

Maailman toistaiseksi suurimmat käytössä olevat aurinkolämpövoimalat, ns. SEGS-yksiköt Mojaven autiomaassa Arizonassa, perustuvat viivakeskittäviin parabolisiin kouruihin (ks. kuva 2.5). Niissä lämmönsiirtoputken ulkopinnalle keskitetään auringon suoraa säteilyä parabolisella kourupeilillä. Tällä tekniikalla päästään noin 400 °C lämpötilaan käyttämällä öljyä lämmönsiirtoaineena. Yhteensä Arizonan viiden yksikön kokonaisteho on 353 MW. Voimalat on toimittanut israelilainen Lutz Industries. Yleisesti ottaen kaikki suurimmat käytössä olevat aurinkolämpövoimalat on toteutettu tällä tekniikalla. Suurin rakenteilla oleva aurinkolämpövoimalakompleksi on Blythe Solar Power project Riversiden maakunnassa Kaliforniassa. Sen suunniteltu teho on 968 MW.

¹² Concentrating Solar Power

¹³ Organic Rankine Cycle





Kuva 2.5. Keskittäviä aurinkolämpövoimaloita¹⁴

Parabolinen heijastin

Pistekeskittävät keräimet perustuvat usein paraboliseen peiliin jonka polttopisteessä on lämmön hyödyntämistä varten esimerkiksi kattila, valosähkömuunnin tai stirling-moottori. Koska tällaisella keskittäjällä voidaan saavuttaa jopa 1000-kertainen keskityssuhde, sillä on mahdollista toteuttaa monenlaisia prosesseja varsin hyvällä hyötysuhteella. Koska parabolinen peili vaatii kaksiakselisen auringon seurannan, tällaista rakennetta ei voi kasvattaa kovin suureksi ilman että mekaniikasta tulee äärimmäisen vaativaa ja se nousee päärooliin niin materiaaltarpeiltaan kuin investoinniltaan. Tyypilliset tähän tekniikkaan perustuvat laitteet ovat teholtaan muutamia kymmeniä kilowatteja. Kuvassa 2.5 oikealla alhaalla oleva Tessera Suncatcher tuottaa nelisyylinterisen Stirling-moottorin avulla 25 kW sähkötehoa ja sen keskityssuhde on 1100.

¹⁴ Brightsource, Lutz Industries, Tessera Solar



Power Tower

Suuri osa viime aikoina rakennetuista CSP-voimaloista perustuu ns. Power Tower arkkitehtuuriin. Siinä suurta parabolista peiliä approksimoidaan joukolla tasopeilejä, joita ohjataan siten, että ne heijastavat auringon suoran säteilyn tornin huipulla olevaan absorbaattoriin (ks. kuva 2.5, ylin kuva). Sieltä lämpö siirretään esimerkiksi sulan suolan avulla höyrygeneraattoriin tai uusimmissa ratkaisuissa välivarastona toimivaan lämpöakkuun. Lämpöakusta varastoitu lämpö voidaan siirtää höyrygeneraattorille siten, että tehoa voidaan tuottaa jopa 24 tuntia vuorokaudessa. Nämä voimalat toimivat tyypillisesti noin 550 °C lämpötilassa.

Fresnel-linssi

Fresnel-linssiä käytetään myös auringon suoran säteilyn fokusoimiseen erityisesti keskittävissä aurinkosähköjärjestelmissä. Tekniikka on vielä varsin uusi eikä sillä ole rakennettu ainakaan vielä kovin suuria järjestelmiä.

2.4 Muita keräinratkaisuja

Aurinkolämpöä voidaan kerätä myös esimerkiksi seinistä (ks. laatikko 2.2), teistä tai parkkipaikoista asentamalla pinnoitteen alle keräysputkisto, jonka avulla absorboitunut aurinkolämpö voidaan siirtää joko lämpövarastoon tai sitä voidaan käyttää esimerkiksi käyttöveden esilämmitykseen.

Laatikko 2.2: Porin uimahallin aurinkolämpöjärjestelmä

Porissa syyskuussa 2011 avatussa uudessa uimahallissa hyödynnetään aurinkolämpöä kahdella tavalla. Rakennuksen katolle on asennettu 200 m² (140 kW_{th}) aurinkolämpökeräimiä. Lisäksi osa (80 m²) rakennuksen eteläpuoleisen julkisivun kuparisista julkisivuelementeistä on Luvata Porin kehittämiä Nordic Solar -lämmönkeräysputkistolla varustettuja elementtejä (lämpöteho 56 kW_{th}). Kuparijulkisivu toimii siis tältä osin absorptiopintana. Lämpökeräimet eivät seinässä poikkea ulkonäöltään millään tavalla muusta kuparijulkisivusta. Näillä järjestelmillä aurinkolämmön osuus uimahallin kokonaislämmöntarpeesta on noin 5 %, muu lämpö tulee kaukolämpöverkosta.

Lähde: Petri Konttinen: Luvatan aurinkoenergia 28.4.2011



3 Aurinkolämmön varastointi

Aurinkolämmön tuotanto vaihtelee vuorokauden sisällä, päivästä toiseen ja vuodenaikasta toiseen. Tämän vuoksi aurinkolämmön tuotannon vaihtelua täytyy tasoittaa joko korvaavalla tuotannolla tai varastoimalla lämpöenergiaa lyhyemmäksi tai pidemmäksi ajaksi. Yleisesti ottaen lämpövarastojen taloudellisuus ja hyötysuhde on sitä parempi mitä suuremmasta varastosta on kyse. Niinpä kaukolämpöjärjestelmään liitetty suuri lämpövarasto voisi olla käyttökelpoinen ratkaisu aurinkolämmön ja muunkin ylijäämälämmön varastointiin huipputuotantoa vaativina hetkinä.

Lämpöenergian varastot voidaan jakaa tuntuvan lämmön varastoihin, latenttilämpövarastoihin ja termokemiallisiin varastoihin. Tuntuvan lämmön varastot perustuvat lämpötilaeron ja latenttilämpövarastot faasimuutoksen hyödyntämiseen. Termokemialliset varastot perustuvat sorptioprosessissa vapautuvaan tai sitoutuvaan reaktiolämpöön. Toistaiseksi termokemiallinen lämmönvarastointi ei ole saavuttanut suosiota laajassa mittakaavassa, siksi tässä raportissa keskitytään tuntuvan lämmön varastoihin ja latenttilämpövarastoihin.

Varastointimuodon valintaan vaikuttaa vaadittava varastointiaika ja lämpötila. Lämpövarastoja ladataan ja puretaan tyypillisesti energian tuotantokustannusten perustella. Lähtökohtana on varastoida lämpöä silloin, kun lämmön hinta on alhainen ja/tai lämpöä tuotetaan yli tarpeen. Varastoitua lämpöä hyödynnetään, kun lämmöntarve on suuri ja/tai lämmön hinta on korkea. Varastoitua lämpöä voidaan näin hyödyntää tasoittamaan kysynnän vaihtelua vuosi-, vuorokausi- tai tuntitasolla.

3.1 Tuntuvan lämmön varastot

Tuntuvan lämmön varastointi on eniten käytetty varastointitekniikka. Varastoinnin aikaskaala vaihtelee riippuen varastointimateriaalin lämpökapasiteetista, määrästä ja vaaditusta lämpötilatasosta. Varastoidun lämmön määrä voidaan laskea kaavalla

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1)$$

jossa

Q = varastoitu lämpömäärä

m = varastointimateriaalin massa

c_p = varastointimateriaalin ominaislämpökapasiteetti

ΔT = alku- ja loppulämpötilan erotus (tai maksimi- ja minimilämpötilan erotus)

Perinteisin tuntuvan lämmön varastointitekniikka on vesivaraaja. Veden suurimpina etuina ovat sen suuri ominaislämpökapasiteetti sekä halpa hinta. Taulukossa 3.1 on esitetty eräiden yleisesti käytettyjen materiaalien ominaislämpökapasiteetteja.



Taulukko 3.1. Eräiden materiaalien ominaislämpökapasiteetteja 25 °C:n lämpötilassa¹⁵

Materiaali	Ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]
Ilma	1003,5
Puu	1200–2300
Kipsi	1090
Asfaltti	920
Tiili	840
Graniitti	790
Teräsbetoni	880
Vesi	4 182

Tuntuvan lämmön varasto koostuu tavallisesti varastointimateriaalista, astiasta ja laitteistosta, jolla lämpöä syötetään varastoon ja puretaan siitä. Varastointiastian suunnittelussa tulee suosia materiaaleja, jotka minimoivat energiahäviöt varastoinnin aikana. Varastointiastian eristävyys tulee kiinnittää erityistä huomiota silloin, kun kyseessä on pienen kokoluokan varasto. Siirryttäessä suurempiin varastokokoihin, vähenee eristämisen tarve. Eristämättömällä, kooltaan 100 000-1 000 000 m³:n maanalaisella vesivarastolla voidaan saavuttaa 80 %:n hyötysuhde kuukausien tarkastelujaksolla (kesäkuukausista talvikuukausiin).

3.2 Latenttilämpövarastot

Latenttilämpöön perustuvat varastot hyödyntävät faasimuutosta vakiolämpötilassa. Aineen sulattaminen tai höyrystäminen vaatii energiaa. Kun neste puolestaan muuttuu kiinteäksi tai höyry nesteeksi, vapautuu lämpöä. Tyypillisiä faasimuutosaineita ovat esimerkiksi vesi/jää ja suolojen hydraatit. Taulukossa 3.2. on esitetty valikoitujen latenttilämpövarastomateriaalien termisiä ominaisuuksia.

¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity#Specific_heat_capacity



Taulukko 3.2. Eräiden latenttilämpövarastomateriaalien termisiä ominaisuuksia¹⁶

Materiaali	Toimintalämpötila [°C]	Lämpökapasiteetti [kWh/m ³]
Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O	24	70
CaCl ₂ · 6H ₂ O	30	47
Parafiini	20–60	56
Lauriinihappo	46	50
Steariinihappo	58	45
Pentaglyseriini	81	59
Butyylistearaatti	19	39
Propyylipalmiaatti	19	52
Na ₂ S + H ₂ O	50–100	500

Faasimuutosmateriaaleja käytetään lähinnä energian lyhytaikaiseen varastointiin kuten esimerkiksi osana talojen lämmitys- ja ilmastointijärjestelmiä, joissa nämä materiaalit voidaan integroida osaksi talon rakenteita¹⁷.

3.3 Kaukolämpöjärjestelmien lämpövarastot

3.3.1 Vesisäiliövarastot

Kaukolämpöjärjestelmissä on pääasiassa hyödynnetty suuria vesisäiliöitä joko maanpäällisinä rakenteina, jolloin ne voivat olla myös korkealämpötilaisia ja/tai korkeapaineisia tai erilaisia kallioluolavarastoina. Maanalaiset vesisäiliöt ovat suurempia, yleensä ilmanpaineisia ja suhteellisen matalalämpötilaisia.

Suomessakin on rakennettu useita lämpövarastoja kaukolämpöverkkoihin. Toistaiseksi kuitenkin mitään niistä ei ole kytketty aurinkolämpöjärjestelmiin, vaan niitä on käytetty lähinnä varalämmönlähteenä tai joissakin tapauksissa lämmön tuotannon optimointiin erityisesti CHP-laitosten yhteydessä. Taulukossa 3.3 on listattu suomalaisten kaukolämpöverkkojen lämpövarastoja ja niiden ominaisuuksia.

¹⁶ Energian varastoinnin nykytila. Alanen R., Koljonen T., Hukari S., Saari P. VTT Tiedotteita 2003

¹⁷ Energian varastointimuodot. Virtanen V. 2010



Taulukko 3.3. Suomessa kaukolämpöverkkoon rakennettuja lämpövarastoja¹⁸

Paikka	Tilavuus m ³	Kapasiteetti MWh	Maksimiteho MW	Pääpolttoaine	Käyttöön- ottovuosi
Otaniemi ¹	500	20	10	Kaasu	1974
Oulu	15 000	800	80	Turve	1985
Oulu (kallio)	190 000	10 000	80	Turve	1996
Lahti	10 000	450	40	Hiili	1985
Lahti	200	9	1	Kaasu	1989
Naantali	15 000	690	82	Hiili	1985
Helsinki Salmisaari ²	2*10 000	1 000	130	Hiili	1987
Helsinki Vuosaari	26 000	1 400	130	Kaasu	1997
Saarijärvi ¹	350	21	3	Turve	1988
Kouvola	10 000	420	72	Kaasu	1988
Hämeenlinna ²	10 000	320	50	Hiili	1988
Hyvinkää	10 000	350	50	Kaasu	1988
Vantaa ³	20 000	900	50	Hiili	1990
Rovaniemi	10 000	450	30	Turve	1998
Turku ⁴				Hiili, biomassa	2002

¹ paineistettu, ² kytkentä lämmönsiirtimellä, ³ muutettu vanhasta öljysäiliöstä, ⁴ muutettu vanhasta kaasukellosta

3.3.2 Maa- ja kalliovarastot

Keski-Euroopassa on rakennettu erilaisia maavarastoja kaukolämpöverkkojen yhteyteen. Yksinkertaisimmillaan maahan kaivetaan kaivanto joka tiivistetään, täytetään hiekalla ja vedellä sekä lämpöeristetään päältä. Lämpö syötetään varastoon ja puretaan sieltä syöttöputkiston avulla. Tämä on suhteellisen edullinen lämpövarasto, mutta sen kapasiteetti ei luonnollisesti vastaa samankokoisen vesivaraston kapasiteettia.

Maalämpö ja siihen liittyvä lämpöpumpputekniikka ovat viime vuosina kehittyneet erityisesti Ruotsissa, missä maalämpöjärjestelmiä on asennettu satoja tuhansia. Siellä on myös sovellettu maalämpötekniikkaa lämmön kausivarastointiin. Lämpökaivotekniikalla voidaan rakentaa suuria lämpövarastoja suhteellisen edullisesti poraamalla useita kymmeniä lämpökaivoja suhteellisen lähelle toisiaan. Näitä voidaan hyödyntää myös kausivarastoina. Syvällä kalliooperässä lämpö pysyy melko hyvin tallessa, ellei kalliooperässä ole varastoja jäähdyttäviä pohjavesivirtauksia. Normaalisissa maalämpöjärjestelmissä vesivirtaukset eivät haittaa, päinvastoin ne tuovat lämpöä lämpöpumpun jäähdyttämälle alueelle. Mutta käytettäessä kalliooperää lämpövarastona pohjavesivirtaukset voivat olla ongelma.

Aurinkolämpösovelluksissa kalliooperävarastot ovat otollisia, sillä niitä voidaan käyttää hyvin alhaisissakin lämpötiloissa (noin 10 °C) ja ne mahdollistavat erittäin tehokkaan aurinkolämmön

¹⁸ Energian varastoinnin nykytila. Alanen R., Koljonen T., Hukari S., Saari P. VTT Tiedotteita 2003

keräilyn. Tällaiset matalan lämpötilan kalliovarastot vaativat kuitenkin aina lämpöpumpun varaston purkamiseksi. Korkean lämpötilan kalliovarastot, jotka eivät vaadi lämpöpumpua, ovat myös mahdollisia, mutta ne vaativat suurehkon alkuinvestoinnin varastointialueen kalliooperän lämpötilan kohottamiseksi toimintalämpötilaan (esim. 40–80 °C). Toinen tapa hyödyntää lämpökaivoja on kaukolämpöverkoissa, joissa tarjotaan kaukokylmää. Kalliooperävarastosta voidaan yleensä syöttää viilennystä suoraan kaukokylmäverkkoon.

4 Aurinkolämmön kytkentävaihtoehtoja

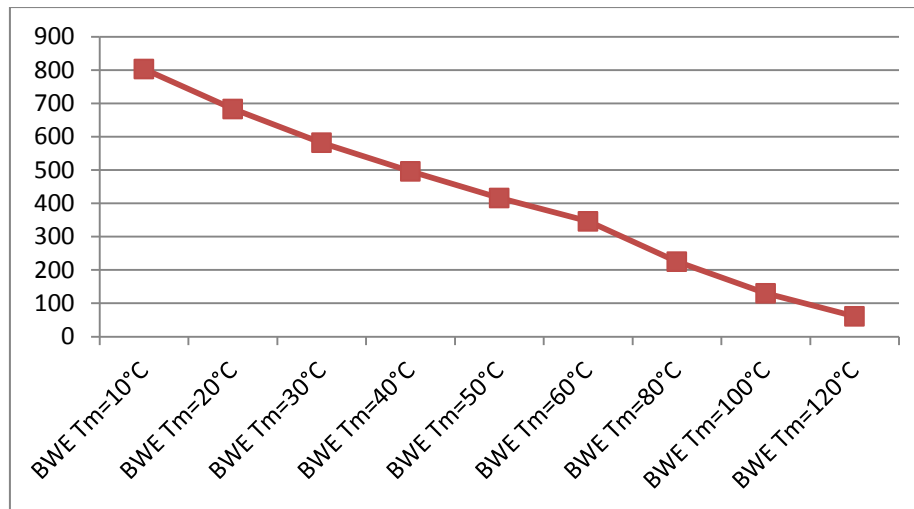
Aurinkolämmön kytkentävaihtoehdot kaukolämpöjärjestelmässä voidaan jakaa keskitettyihin ja hajautettuihin ratkaisuihin. Keskitetyissä ratkaisuissa aurinkolämpökeräimet on keskitetty yhteen paikkaan, yleensä päälämpövoimalan läheisyyteen, josta lämpö kytketään kaukolämpöverkkoon joko suoraan tai lämpövaraston kautta. Hajautetuissa ratkaisuissa keräimet on asennettu yleensä kaukolämmön tilaajien omistamien rakennusten katoille. Näissä tapauksissa kytkentävaihtoehtoja ja liiketoimintamalleja on useita. Kytkentöjen osalta hajautetuissa ratkaisuissa tuotanto voidaan hyödyntää joko ainoastaan käyttökohteessa tai vaihtoehtoisesti sitä voidaan syöttää välillä myös kaukolämpöverkkoon (meno- tai paluupuolelle). Liiketoimintamallin kannalta oleellinen kysymys on keräinten omistus; omistajana voi olla joko asiakas, kaukolämpöyhtiö tai erillinen lämpöyrittäjä.

Riippumatta siitä onko kyseessä keskitetty vai hajautettu järjestelmä, kytkentälämpötilalla on suuri merkitys järjestelmän toiminnan ja hyötysuhteen kannalta. Aurinkolämpökeräinten, erityisesti tasokeräinten, hyötysuhde riippuu varsin voimakkaasti siitä, kuinka paljon keräimen keskimääräinen lämpötila poikkeaa ympäristön lämpötilasta. Kuvassa 4.1 on esitetty erään modernin tasokeräimen teoreettinen vuotuinen tuotto (kWh/m²) lämpötilaeron funktiona Helsingissä etelään suunnattuna ja 45 asteen kulmaan kallistettuna. Arvot on laskettu SPF¹⁹ karkeatuottolaskurilla kyseisen keräimen mittaustulosten pohjalta. Laskelma antaa teoreettisen maksimituoton kyseisestä keräimestä valittujen sijaintipaikkojen säteilyolosuhteissa huomioimatta mitään muita järjestelmän häviöitä.

Kuvasta 4.1 voidaan todeta, että nostettaessa keräimen keskilämpötilan ja ulkoilman lämpötilan eroa esimerkiksi +10 °C:sta +20 °C:een putoaa vuotuinen tuotto noin 15 %. Huomattavaa on että korkeammilla lämpötilaeroilla suhteellinen pudotus on vieläkin suurempi. Tämän vuoksi aurinkolämmön tuotannon kannalta on sitä edullisempää, mitä alhaisemmassa lämpötilassa lämpöä voidaan tuottaa.

¹⁹ Solartechnik Prüfung Forschung





Kuva 4.1. Erään tasokeräimen tuotto [kWh/m²/vuosi] Helsingissä lämpötilaeron funktiona

Tyhjöpötkikeräimillä tuoton pudotus lämpötilaeron kasvaessa ei ole yhtä suurta kuin tasokeräimillä. Jos aurinkolämpö halutaan syöttää järjestelmään suhteellisen korkeassa lämpötilassa (> 50 °C), on yleensä syytä harkita tyhjöpötkikeräinten käyttöä.

4.1 Keskitettyjä kytkentöjä

Keskitetyt aurinkokeräimet voidaan kytkeä kaukolämpöjärjestelmään joko suoraan tai lämpövaraston kautta. Aurinkolämmön yhteydessä käytetään useimmiten lämpövaraajaa, jonka kapasiteetti riittää vähintään tasaamaan vuorokauden sisäisen ja usein myös muutaman päivän tuotantomäärän vaihtelun. Ideaalinen automaatiojärjestelmä pyrkii ohjaamaan tuotetun lämmön kytkentää tilanteen mukaan siten, että tuotanto syötetään kulloinkin vastaanottopisteeseen, jonka lämpötila on mahdollisimman lähellä keräinten ulostulolämpötilaa. Jos käytettävissä on hyvin kerrostunut lämpövarasto, helpottaa tämä järjestelmän optimaalista käyttöä.

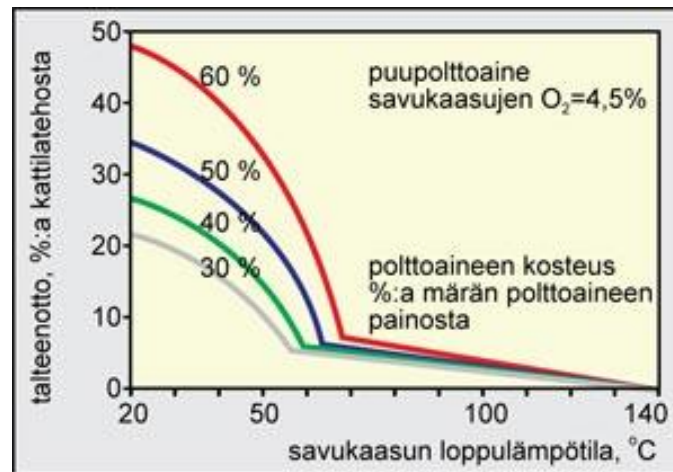
Tanskassa rakennetut suuret aurinkolämpöjärjestelmät ovat pääosin keskitetysti kytkettyjä. Niissä lämpövoimaloiden yhteyteen, maan pinnalle rakennetut keräinkentät on kytketty keskitetysti kaukolämpöverkkoon, yleensä paluuveden esilämmitykseen. Näissä järjestelmissä on käytetty järjestelmän kokoon nähden suhteellisen pieniä lämpövarastoja.

Yksinkertaisimmassa kytkentäratkaisussa aurinkolämpö kytketään suoraan esilämmittämään kaukolämpöverkon paluuvettä ennen sen syöttämistä lämpölaitokseen. Tämä ratkaisu soveltuu erityisesti järjestelmiin, joissa aurinkolämmön tuotto on vähäistä verrattuna kokonaistuotantoon. Jos aurinkolämpöä halutaan tuottaa merkittävämpiä määriä, järjestelmään on syytä lisätä riittävän suuri lämpövarasto aurinkolämmön parhaan tuottokauden energian hyödyntämiseksi.

Tanskassa rakennetuissa keskitetyissä aurinkolämpöjärjestelmissä on päästy kustannustasoon 20–40 €/MWh sellaisissa järjestelmissä, joissa keräinkenttien koot ovat useita tuhansia neliömetrejä. Kustannuksissa on mukana myös merkittävän kokoiset lämpövarastot. Tyypillisesti tällaisten suurtenkin keräinkenttien aurinkoenergian tuotto muodostaa kuitenkin vain noin 20 % koko järjestelmän vuotuisesta lämmön tarpeesta.



Käytettäessä aurinkolämpöä kaukolämpöjärjestelmän paluuveden esilämmitykseen täytyy ottaa huomioon mahdollinen käytössä oleva savukaasupesuri. Käytettäessä kosteaa polttoainetta (yleensä jotakin biomassaa) voidaan savukaasupesuria käyttämällä saada prosessista enemmän energiaa irti. Koska pesurin teho paranee käytettävän veden lämpötilan laskiessa (ks. kuva 4.2) samoin kuin aurinkokeräimenkin, ei näiden yhteiskäyttöä voi yleensä suositella, mikäli savukaasupesurilla on tarkoitus ottaa energiaa talteen hyödyntäen paluuvettä pesurissa.



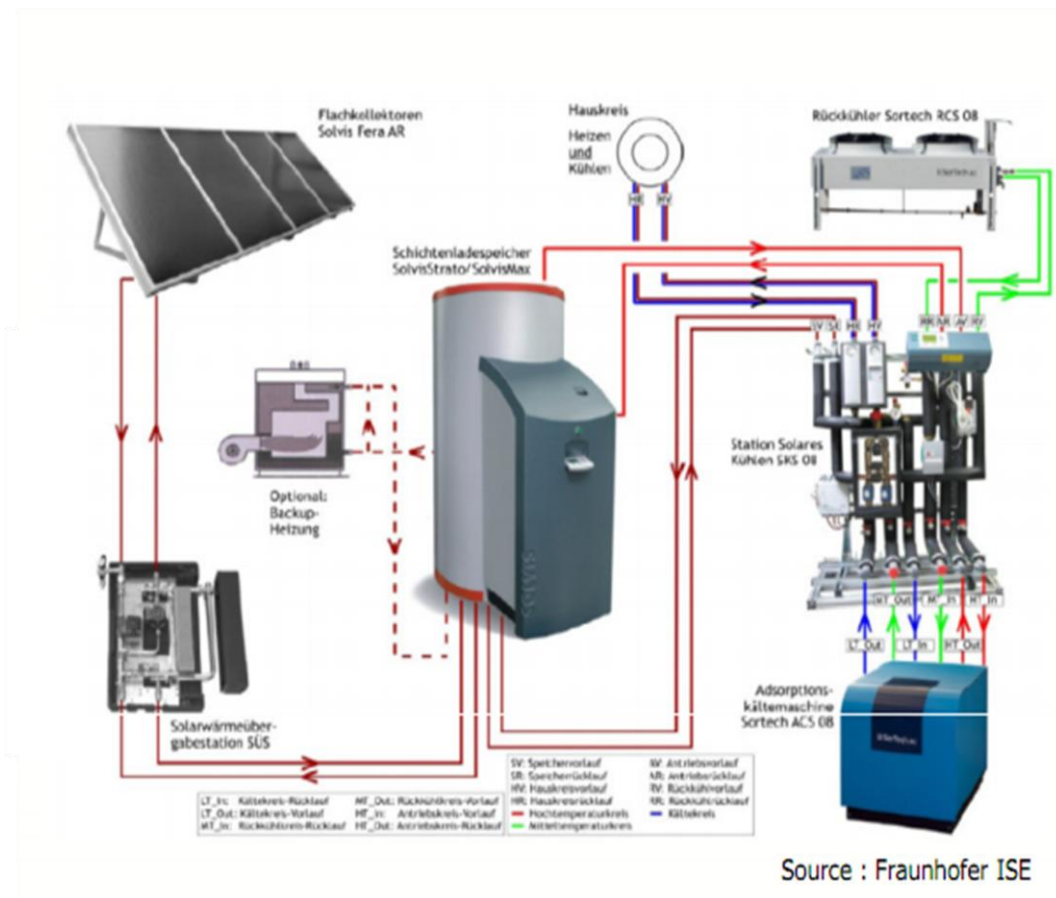
Kuva 4.2. Savukaasupesurin energian talteenotto polttoaineen eri kosteusprosentteilla ja savukaasun loppulämpötiloilla²⁰

Saksassa keskitettyihin järjestelmiin on liitetty myös kausivarastoja, jolloin kesäkuukausina tuotettu ylimääräinen lämpö varastoidaan käytettäväksi lämmityskauden aikana. Saksalaiskoekieluissa on pyritty saavuttamaan noin 50 % aurinkolämmön osuus tuotetusta lämpöenergiasta. Esimerkiksi Neckarsulm-Amorbachin aurinkokaukolämpöjärjestelmässä 5670 m²:n (3,97 MW_{th}) aurinkokeräimillä tuotetaan 46 % verkossa tarvittavasta lämmöstä hyödyntäen 63 000 m³:n porakaivolämpövarastoa kausivarastointiin.

Keskitetyissä järjestelmissä voidaan aurinkolämpöä käyttää myös keskitetyn kaukokylmän tuotannon energialähteenä. Aurinkolämmöllä tuotetaan viilennystä useimmiten absorptiolämpöpumppuja hyödyntämällä. Tekniikkaa ei vielä voida pitää kaupallisesti kypsänä, sillä sitä on ryhdytty kehittämään aktiivisemmin vasta viime vuosina. Sovellusta pidetään kuitenkin erityisen potentiaalisena varsinkin Keski- ja Etelä-Euroopassa, sillä jäähdytyksen tarve on suurimmillaan silloin kun auringon säteily on voimakkaimmillaan.

Kuvassa 4.3 on esitetty aurinkolämpöjärjestelmä, jota voidaan hyödyntää jäähdytykseen. Järjestelmässä tuotetaan lämpöä aurinkokeräinjärjestelmällä puskurilämpövarastoon. Varastoon voidaan tuoda myös lisälämpöä, jos aurinkolämpöä ei ole riittävästi. Puskurivarastossa olevalla lämmöllä tuotetaan viilennystä absorptiolämpöpumpun avulla. Sen toiminnan edellytyksenä on lauhdutin, jonka lämpötila on puskurivaraston ja jäähdytettävän tilan lämpötilan välissä.

²⁰ Condens Oy:n verkkosivu <http://www.condens.fi>



Kuva 4.3. Järjestelmä viilennyksen tuottamiseksi aurinkolämmöllä

4.2 Hajautettuja kytkentöjä

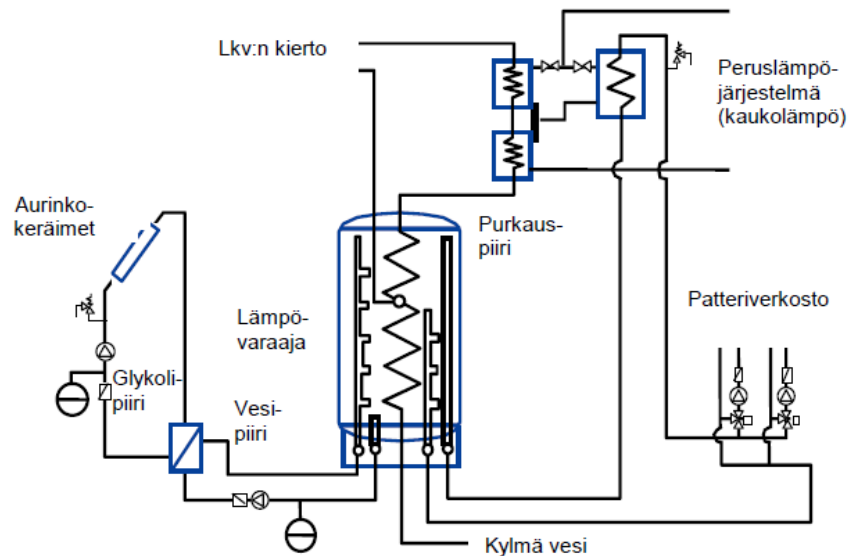
Suomessa rakennetussa Eko-Viikin kaukolämpöön kytketyissä aurinkolämpötaloissa keräimiä ei ole lainkaan kytketty kaukolämpöverkkoon, vaan aurinkolämpö syötetään paikalliseen varaajaan, josta se syötetään lämpimään käyttöveeteen. Tämä ei ole useinkaan optimaalisin ratkaisu, varsinkin jos keräinpinta-alaa on enemmän kuin noin 2 m²/huoneisto, sillä kesällä kaikkea tuotettua lämpöä ei pystytä hyödyntämään käyttöveden suhteellisen vähäisen kulutuksen takia.²¹

Yleensä kaukolämmitysjärjestelmän kylmin piste sijaitsee tilaajalaitteissa siellä, missä kylmästä vedestä tuotetaan lämmintä käyttövettä. Esimerkiksi edellä mainituissa Eko-Viikin aurinkolämpötaloissa auringolla tuotettu lämpö on kytketty juuri tähän pisteeseen, eli paikalliseen lämpövaraajaan (ks. kuva 4.4). Tällaisella kytkennällä voidaan oikein mitoitetuna tuottaa merkittävä osa talojen lämpimästä käyttövedestä. Monimutkaistamalla kytkentää hiukan, voidaan varaajasta ottaa myös lämpöä kosteiden tilojen kesäaikaiseen lämmitykseen. Yleisesti ottaen kuitenkin tällaiset hajautettuihin varaajiin perustuvat järjestelmät tulevat selvästi kalliimmiksi kuin keskitetyt

²¹ Ekoviikin EU-aurinkolämpöjärjestelmien jatkoseurannan loppuraportti, Solpros 11/2004



järjestelmät, sillä pienet varaajat ovat suhteessa kalliimpia kuin suuremmat lämpövarastot. Samoin asennuskustannukset suhteessa tuotettuun energiamäärään ovat pienemmissä järjestelmissä suurempia kuin suurilla keräinkentillä.



Kuva 4.4. Aurinkolämmön kytkentä Eko-Viikissä (Lähde: Solpros)

Ruotsissa on rakennettu hajautetusti kaukolämpöverkkoon kytkettyjä aurinkokeräimiä pääasiassa vuokrataloyhtiöiden katoille. Keräimet ovat kiinteistöyhtiön omistuksessa. Niissä aurinkolämpö on kytketty myös suoraan kaukolämpöverkkoon siten, että kiinteistössä tuotettu ylijäämälämpö syötetään kaukolämpöverkkoon. Useimmissa tapauksissa lämpöenergia laskutetaan nettoperiaatteella eli kaukolämpöverkkoon syötetyn lämpöenergian määrä vähennetään sieltä otetusta energiasta ja asiakas maksaa vain erotuksesta. Tällaisessa ratkaisussa kaukolämpöverkkoa käytetään tavallaan tuotetun aurinkolämmön varaajana sekä lisälämmön tuottajana. Näissä tapauksissa keräinala määräytyy lähinnä sopivasti käytettävissä olevan kattopinta-alan mukaan.

Ruotsissa rakennetuissa hajautetuissa järjestelmissä kytkentä kaukolämpöverkkoon perustuu useimmiten valmiiseen tehdasvalmisteiseen kytkentäyksikköön, joka mahdollistaa nettolaskutuksen. Aurinkolämpö käytetään ensisijaisesti paikallisesti lämpimän käyttöveden tuottamiseen, ja vain ”ylimääräinen” lämpö syötetään kaukolämpöverkkoon. Esimerkiksi Vislandassa 345 m² aurinkokeräimillä tuotetaan vuositasolla noin 140 MWh lämpöenergiaa, kun kyseisen vuokrataloyhtiön lämmön kulutus on noin 150 MWh/a. Koska yhtiöllä on kaukolämpötoimittajan kanssa nettolaskutus sopimus, ei laskutettavaa energiaa tyypillisenä vuonna jää paljoakaan. Järjestelmästä tehdyn kustannuslaskelman mukaan järjestelmän tuottaman lämmön hinta on 83 €/MWh ilman tukea ja 63 €/MWh tuet huomioituna.²²

²² Success Factors In Solar District Heating, CIT Energy Management AB (Deliverable D2.1 of Solar District Heating (SDH) Project)



Itävallassa, erityisesti Grazissa rakennetut järjestelmät ovat teknisesti samantapaisia kuin Ruotsissakin, mutta siellä liiketoimintamalli on useimmissa tapauksissa ollut erilainen. Siellä paikallinen lämpövoimayrittäjä rakentaa ja operoi aurinkolämpöjärjestelmiä sekä myy tuottamansa lämmön joko kiinteistölle, jonka katolla keräimet ovat ja/tai kaukolämpöyhtiölle.

Itävallassa esimerkiksi *Wasserwerk Andritz*in toimitilojen yhteydessä on *solar.nachwärme Energiecontracting GmbH*:n omistama ja operoima 3855 m²:n keräinkenttä ja 60 m³:n puskurilämpövarasto. Tämän tuotantolaitteiston kokonaisinvestointi oli noin 1,5 M€, josta katettiin 30 % avustuksella. Keräinkentän mitoitettu vuosituotto on 1,62 GWh ja kohteen kulutusarvio 800 MWh. Näistä luvuista laskettuna tuotantokustannus on noin 75 €/MWh ilman tukea ja noin 52 €/MWh tuki huomioiden. *Solar.nachwärme* myy vesiyhtiölle sen kiinteistössään tarvitseman lämmön ja ylimenevän tuotannon paikalliselle kaukolämpöyhtiölle (*Energie Graz GmbH*). Energia myydään kummallekin markkinahintaan. Markkinahinta sisältää 5 €/MWh fossiilipolttoaineveroa, jota tässä tapauksessa ei tarvitse tilittää valtiolle, koska fossiilipolttoaineita ei käytetä.

4.3 Muita ratkaisuja

Viime aikoina Suomessakin, erityisesti S-ryhmän toimesta, on rakennettu ruotsalaisten esikuvien mukaisia järjestelmiä, joissa ylijäämälämpöä esimerkiksi kylmäkalusteista tai vastaavista syötetään ensisijaisesti lämmityskäyttöön ja mikäli sille ei ole tarvetta, lämpö syötetään porakaivovarastoon. Sieltä se palautetaan lämpöpumpun avulla takaisin lämmitykseen, kun lämmityksen tarve ylittää hukkalämmön määrän. Toteuttajana näissä hankkeissa on useimmiten ollut Fortum Power and Heat Oy.

Tällaiseen järjestelmään voidaan erityisen tehokkaasti tuoda lisälämpöä aurinkokeräinten avulla. Tämä johtuu siitä, että kallioperävarastot ovat yleensä varsin suuria, ja ne toimivat yleensä alhaisemmissa lämpötiloissa kuin vesivarastot, joten niiden lämpötila ei nouse merkittävästi, vaikka niihin pumpataan huomattavia määriä lämpöenergiaa.

5 Kustannuslaskelmia

Tässä luvussa on esitetty valikoitujen aurinkolämpöratkaisujen kustannuslaskelmia. Laskelmiin on valittu seuraavat ratkaisut:

1. Keskitetty aurinkolämpöratkaisu:
 - A. kaukolämmön paluueden esilämmitys tasokeräimillä
 - B. kaukolämmön menoveden lämmitys tyhjöpumppukeräimillä
2. Keskitetty aurinkolämpöratkaisu, jossa on lämpöpumppuavusteinen aurinkolämmön kausivarastointi kallioperään
3. Hajautettu aurinkolämpö
 - A. kaukolämpöverkkoon kytkettynä
 - B. kaukolämmön rinnalla, kaukolämpöverkosta erillään

Kustannuslaskelmissa on tarkasteltu lämmöntuotannon kokonaiskustannuksia huomioiden sekä pääoma- että käyttökustannukset. Laitteistojen pääomakustannusten perusteena olevat investoinnit



on muutettu vuosikustannuksiksi annuiteettimenetelmällä. Laskentakorkona on käytetty 5 %. Laitteistojen eliniät on arvioitu erikseen kunkin ratkaisun yhteydessä.

Konkreettisia, kohdekohtaisia laskelmia tehtäessä on tärkeää ottaa huomioon tilakustannukset (esim. tontti tai kattopinta-ala), jotka ovat erittäin tapauskohtaisia. Tiheään asutuilla alueilla suuret tilakustannukset voivat tehdä aurinkolämmöstä kannattamatonta, vaikka se muuten olisi kannattavaa. Haja-asutusalueilla tilakustannuksilla ei yleensä ole merkitystä. Näissä laskelmissa oletettiin, että tonttimaata tai kattopinta-alaa on vapaasti käytettävissä.

5.1 Keskitetty aurinkolämpö suoraan kaukolämpöverkkoon

Suoraan kaukolämpöverkkoon liitetyn keskitetyn aurinkolämmön tapauksessa laskettiin kaksi erilaista vaihtoehtoa. A-tapauksessa tasokeräimillä tuotettu aurinkolämpö syötetään perinteisen kaukolämpöverkon paluupuolelle esilämmittämään kiertovettä ennen sen syöttämistä pääasialliseen lämmöntuottojärjestelmään. B-tapauksessa tyhjöputkikeräimillä tuotettu lämpö syötetään matalalämpötilaisen kaukolämpöjärjestelmän menoveteen kierrättäen kaukolämmön paluuvettä keräimien kautta.

A: Kytkeä paluuveteen ja tuotto tasokeräimillä

Tämän järjestelmäratkaisun etuna on se, että se on teknisesti yksinkertainen. Ratkaisu tarjoaa mahdollisuuden syöttää aurinkolämpö hyvällä hyötysuhteella verkkoon, koska paluuveden lämpötila on suhteellisen alhainen. Lasketuissa tapauksissa käytettiin paluuveden lämpötilana 30, 40, 50 ja 60 °C. Tämän ratkaisun haittapuolia ovat mm. se, että CHP-laitosten sekä kosteaa biomassaa polttavien lämpölaitosten hyötysuhde voi alentua paluuveden lämpötilan noustessa. Tällä ratkaisulla ei myöskään voida tuottaa kovin suurta suhteellista osuutta kaukolämmön kokonaistuotannosta.

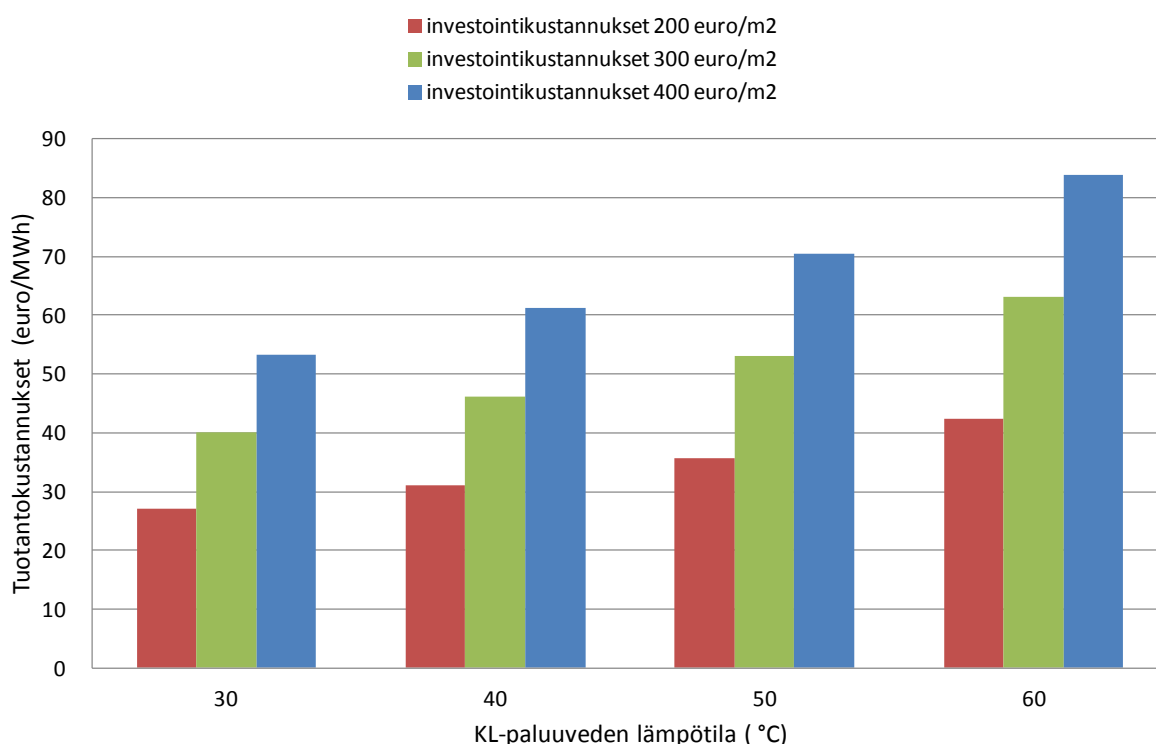
Laskennassa käytettiin aiemmin kuvatun tasokeräimen (Geo-Tec GSE2400/TINQ) teknisiä tietoja. Sen listahinta Saksassa ja Itävallassa on 720 €/keräin, josta neliö hinnaksi tulee noin 300 €/m². Perustapauksessa oletettiin kuitenkin, että rakennettaessa vähintään 1000 m²:n keräinkenttä pystytään keräin-, rakentamis- ja putkistokulut kattamaan kokonaishintaan 200 €/m², joka vastaa Tanskassa rakennettujen vastaavien järjestelmien kustannuksia. Herkkyytarkasteluna laskettiin aurinkolämmön tuotantokustannukset myös investointikustannuksilla 300 ja 400 €/m². Aurinkokeräinten eliniäksi oletettiin 20 vuotta, käyttö- ja kunnossapitokustannuksiksi 1 €/MWh ja keräinjärjestelmän putkistohäviöiksi 10 %. Auringon säteilyn osalta käytettiin Helsingin säteilymääriä.

Yhteenveto tuloksista on esitetty taulukossa 5.1 ja kuvassa 5.1. Keräintuotto ja sen myötä tuotantokustannukset ovat varsin herkkiä kaukolämmön paluuveden lämpötilan suhteen, mikä oli odotettavissakin tasokeräimiä käytettäessä: kaukolämmön paluuveden lämpötilan vaihdellessa välillä 30 - 60 °C, laskennallinen keräintuotto vaihteli vastaavasti välillä 615 - 388 MWh/v ja aurinkolämmön tuotantokustannukset välillä 27 - 42 €/MWh (investointikustannuksella 200 €/m²). Investointikustannusten kaksinkertaistuesssa tuotantokustannukset lähes kaksinkertaistuvat myös, koska aurinkolämmön kustannusrakenne on erittäin pääomavaltainen.



Taulukko 5.1. Keskitetyn aurinkolämmön tuotantokustannukset; kaukolämmön paluuveden esilämmitys tasokeräimillä, investointikustannukset 200 €/m²

Talous:	KL-paluuveden lämpötila (°C)			
	30	40	50	60
Keräintuotto [MWh/v]	615	533	463	388
Pääomakustannus [€/v]	16049	16049	16049	16049
Käyttö- ja kunnossapito [€/v]	615	533	463	388
Kiinteät + muuttuvat kust. [€/v]	16663	16581	16511	16436
Tuotantokustannukset [€/MWh]	27	31	36	42



Kuva 5.1. Keskitetyn aurinkolämmön tuotantokustannukset, kun aurinkolämpöä käytetään kaukolämmön paluuveden esilämmitykseen

B: Kytettä menoveteen ja tuotto tyhjöpötkikeräimillä

Tapauksessa B laskettiin aurinkolämmön tuotto ja tuotantokustannukset, kun 1000 m² keräinkentällä tuotettu aurinkolämpö syötetään kaukolämpöjärjestelmän menoveteen. Sen lämpötilana käytettiin laskelmissa 60, 75 ja 90 °C. Tarkastellussa ratkaisussa ajatuksena on kierrättää kaukolämpöjärjestelmän vesi paluupuolelta keräinten kautta menopuolelle (lämmönvaihtimen kautta), jolloin kyseessä on itse asiassa aurinkolämmöllä toimiva kaukolämpölaitos. Kaukolämmön paluuveden lämpötilaksi oletettiin 40 °C, minkä ansiosta keräinten keskilämpötila pysyy kohtuullisen alhaisena.

Lämpö oletettiin tässä tapauksessa tuotettavan aiemmin mainitulla kiinalaisvalmisteisella tyhjöpötkikeräimellä (Jianxing Jinyi Solar Energy Technology Co., Ltd JHC-5818-15), jonka listahinta

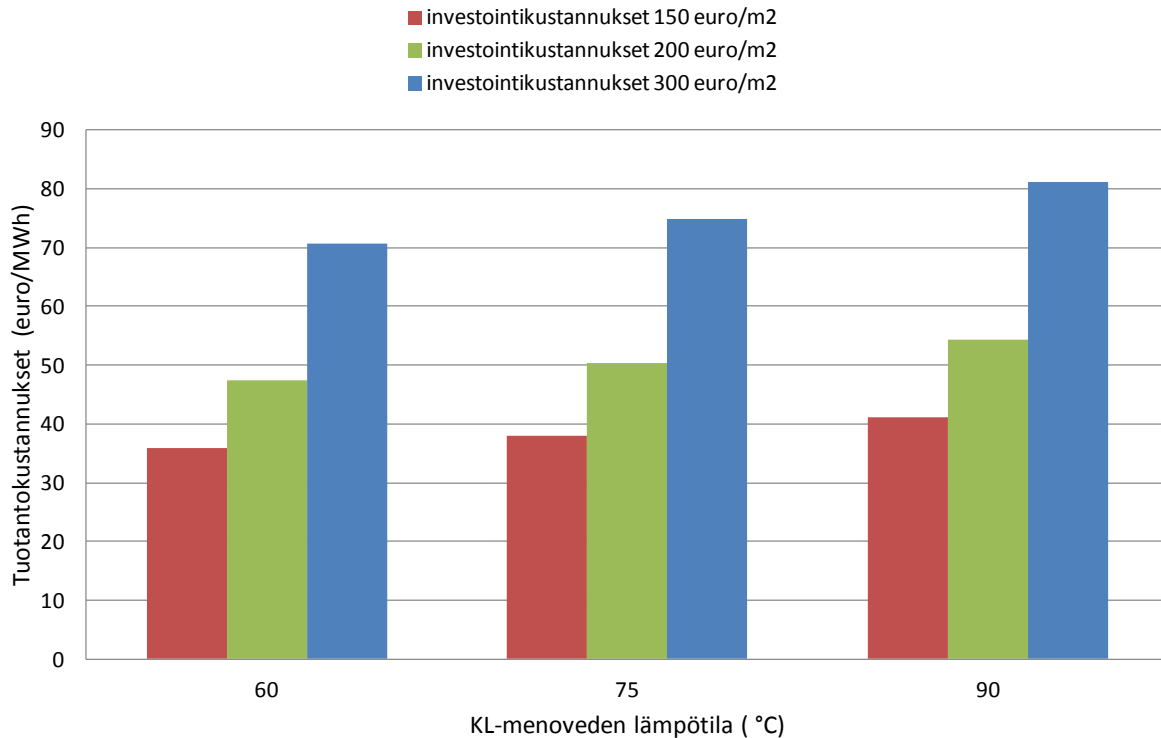
on 155 €/m². Perustapauksessa käytettiin kokonaisinvestointina 150 €/m²; herkkyystarkasteluissa lisäksi 200 ja 300 €/m². Muut oletukset olivat samat kuin A-tapauksessa.

Laskennan tulokset on koottu taulukoon 5.2 ja kuvaan 5.2. Tyhjöputkikeräimiä käytettäessä keräintuotto ja siten tuotantokustannuksetkaan eivät ole erityisen herkkiä menoveden lämpötilan suhteen: menoveden lämpötilan vaihdellessa välillä 60 – 90 °C, laskennallinen keräintuotto vaihteli välillä 346 – 301 MWh/v ja tuotantokustannukset välillä 36 – 41 €/MWh (investointikustannuksella 150 €/m²). Tässäkin tapauksessa tuotantokustannukset ovat vahvasti sidoksissa investointikustannuksiin, kuten kuvasta 5.2 käy ilmi.

Taulukko 5.2. Keskitetyn aurinkolämmön tuotantokustannukset; kaukolämmön menoveden lämmitys tyhjöputkikeräimillä, investointikustannukset 150 €/m²

Talous:	KL-menoveden lämpötila (°C)		
	60	75	90
Keräintuotto [MWh/v]	346	326	301
Pääomakustannus [€/v]	12036	12036	12036
Käyttö- ja kunnossapito [€/v]	346	326	301
Kiinteät + muuttuvat kust. [€/v]	12382	12362	12337
Tuotantokustannukset [€/MWh]	36	38	41





Kuva 5.2. Keskitetyn aurinkolämmön tuotantokustannukset, kun kaukolämmön menoveden lämmitys tehdään tyhjöputkikeräimillä

5.2 Keskitetty aurinkolämpö ja lämpöpumppuavusteinen kausivarastointi

Tässä tapauksessa laskettiin, kuinka aurinkolämmön kausivarastoinnin avulla voitaisiin tehostaa maalämpöjärjestelmään perustuvan kaukolämpölaitoksen toimintaa vuoden ympäri. Teknisesti järjestelmän ajateltiin toimivan siten, että kaukolämpöä tehdään suurella maalämpöjärjestelmällä, johon kuuluu yhtenäinen lämpökaivokenttä (porareikäkenttä). Aurinkolämmöllä ladataan lämpökaivoja kesällä matalassa lämpötilassa, ja syksyllä ja talvella lämpöpumput saavat maasta lämpöä korkeammassa lämpötilassa kuin ilman aurinkolämpöä. Kesäkaudella lisäksi osa aurinkolämpöjärjestelmän tuotosta käytetään suoraan kulutukseen, mikä vähentää lämpöpumppujen käytön tarvetta kesällä ja siten myös sähkön kulutusta vuositasolla. Tarkastelussa oletettiin lisäksi, että maaperän lisäksi järjestelmässä on puskurivaraajat, joiden kautta lämpöä voidaan syöttää tasaisesti kulutukseen ja kausivarastoon. Tässä tapauksessa ei siis enää ole kyse pelkästä maalämpöjärjestelmästä, vaan pikemminkin aurinkolämmön kausivarastointijärjestelmästä, jota lämpöpumppu avustaa. Taulukkoon 5.3 on koottu laskentaan liittyviä oletuksia ja lähtöarvoja.



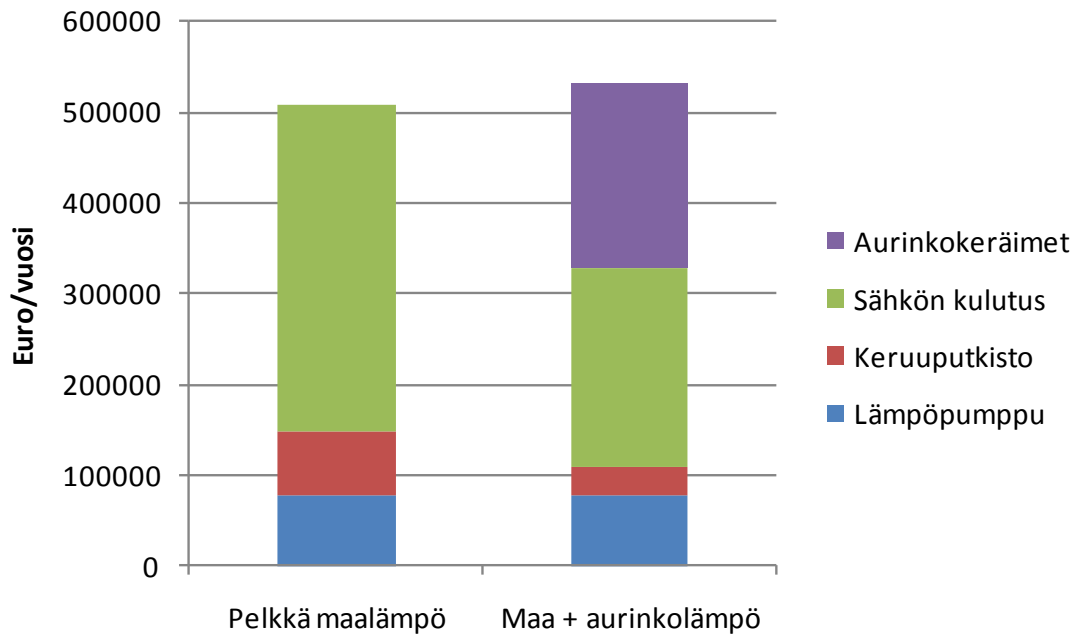
Taulukko 5.3. Laskentaoletuksia ja lähtöarvoja tapauksessa, jossa aurinkolämmön kausivarastointi yhdistetään lämpöpumppujärjestelmään

Parametri	Arvo
Maalämpöjärjestelmän vuosituotto ilman aurinkolämpöä	10 GWh
Maalämpöjärjestelmän vuosituotto aurinkolämmön yhteydessä	7 GWh
Veden lämpötila varaajassa	+50 °C
Aurinkokeräinten keskilämpötila kausivarastoon syötettäessä	< 20 °C
Maalämpöporakaivojen mitoitusarvo	100 kWh/m
Lämpövarastoporakaivojen mitoitusarvo	100 W/m
Lämpöpumpun nimellisteho	2 MW
Aurinkokeräimen tuotto kausivarastoon tuotettaessa	750 kWh/v
Aurinkokeräimen tuotto kulutukseen tuotettaessa	550 kWh/v
Lämpöpumpun hinta (sisältää puskurivaraajan)	400 €/kW
Sähkön hinta	100 €/MWh
Porakaivometrin hinta putkineen	20 €/m
Aurinkokeräimen hinta	200 €/m ²

Aurinkolämpöä varastoitaessa oletettiin, että kallioperän lämpötila on keskimäärin 10 °C korkeampi kuin pelkässä maalämpötapauksessa, mikä parantaa lämpöpumpun lämpökerrointa noin 20 %. Lämpöpumppujen eliniäksi oletettiin 15 vuotta, aurinkokeräinten 20 vuotta ja porakaivojärjestelmien 50 vuotta. Lämpövaraston hyötysuhteen oletettiin olevan 90 %.

Näillä oletusarvoilla saatiin pelkän maalämpöjärjestelmän tuottaman lämmön hinnaksi 51 €/MWh ja lämpöpumppuavusteisen aurinkolämmön kausivarastojärjestelmän tuottaman energian hinnaksi 53 €/MWh. Kuvassa 5.3 on esitetty edellä mainittujen järjestelmien vuosikustannusten vertailu. Keskeiset kustannuserot syntyvät sähkön kulutuksesta, aurinkokeräininvestoinnista ja tarvittavasta porakaivometrien määrästä. Aurinkokeräimet nostavat investointikustannuksia, mutta pienentävät sähkön kulutusta ja porakaivoinvestointia. Porakaivometrejä tarvitaan vähemmän, koska lämmön siirto kallioperässä ja porarei'issä tehostuu lämpötilaerojen kasvaessa. Sähkön kulutus puolestaan vähenee, koska lämpöpumppujen vuosittaiset käyttötunnit ovat pienemmät ja käytönaikainen hyötysuhde on parempi.





Kuva 5.3. Pelkän maalämmön ja kausivarastoon perustuvan maalämpö-aurinkolämpöyhdistelmän vuosikustannusten vertailu

Kuvan 5.3 perusteella voidaan todeta, että tehdyin oletuksien lämpöpumppuavusteisella aurinkolämmön kausivarastoinnilla voidaan tuottaa likimain samanhintaista lämpöä kuin pelkällä maalämpöjärjestelmällä. Aurinkolämpötapauksessa sähkön kulutus on noin 40 % pienempi kuin pelkässä maalämpötapauksessa. Tästä seuraa että sähkön hinnan noustessa aurinkolämmön kausivarastointi tulee suhteessa edullisemmaksi. Muiden oletusten säilyessä ennallaan sähkön hinnan noustessa arvosta 100 €/MWh arvoon 118 €/MWh molempien järjestelmien tuottama lämpöenergia on samanhintaista (58 €/MWh).

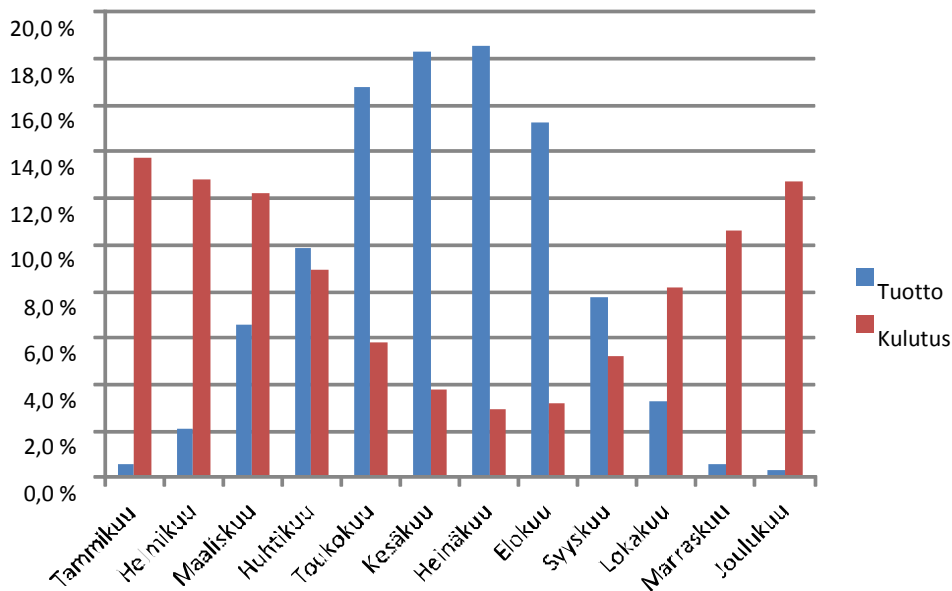
On huomattava, että edellä esitetty laskelma on varsin herkkä oletusarvoille. Esimerkiksi lämpövarastokaivosta saatava maksimiteho on kriittinen parametri järjestelmien välisen hintasuhteen kannalta. Myös aurinkolämmön tuottoparametrit ovat varsin kriittiset, sillä muutokset niissä kertaantuvat osittain lämmön varastoinnin takia. Muun muassa näistä syistä johtuen tämän vaihtoehdon kannattavuuden arviointi edellyttää vielä tarkempia tutkimuksia. Tässä laskelmassa ei huomioitu sitä, että porareikävarastoa voidaan mahdollisesti käyttää myös viilennystarkoitukseen kesän aikana, jolloin saadaan ”ilmaista” energiaa.

Aurinkolämmön kannattavuus kaukolämmön tuotannossa riippuu luonnollisesti kaukolämmön tuotantorakenteesta kyseisessä kaukolämpöverkossa. Mitä kalliimpaa tuotantoa aurinkolämmöllä korvataan, sitä kannattavampaa se on. Potentiaalisimpia kohteita ovat ne, joissa kesällä tuotetaan tarvittava lämpö esim. öljyllä tai maakaasulla. Vastaavasti esim. hake-CHP:n korvaaminen aurinkolämmöllä ei välttämättä ole kustannustehokasta eikä järkevää.

5.3 Hajautettu aurinkolämpö kytkettynä kaukolämpöverkkoon

Tässä tapauksessa tarkasteltiin erityisesti, minkälaisilla ehdoilla ja hinnoilla kaukolämpöyhtiön kannattaisi käydä lämpökauppaa asiakkaan kanssa, joka tuottaa itse aurinkolämpöä vuotuisen

tarpeensa määrän, mutta joka ”varastoi” lämmön kaukolämpöverkkoon. Laskelmassa oletettiin, että energian tuotto ja kulutus summataan nettosummaksi kuukausitasolla, koska tämä on yleinen kaukolämmön mittaus- ja laskutusjakso. Tarkastelua varten vuosituotanto ja -kulutus jaettiin tyypillisen aurinkolämmön tuotantojakautuman sekä asuintaloyhtiön kulutusjakauman mukaisesti kuukausitasolla (ks. kuva 5.4).



Kuva 5.4. Vuotuinen aurinkolämmön tuotanto- ja lämmön kulutusjakautuma kuukausitasolla

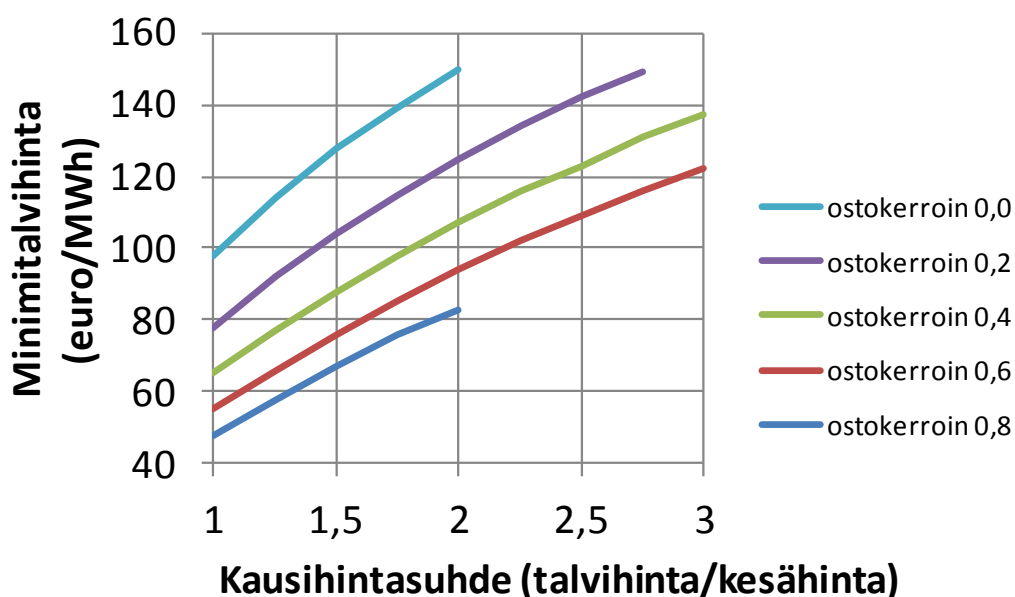
Tapauksen laskennassa käytettiin esimerkkinä kaukolämpöasiakasta, jonka kulutus on 200 MWh/v. Aurinkoenergian tuotantokustannuksena käytettiin tyhjöputkikeräimillä (155 €/m²) 90 asteisena kaukolämpöverkkoon syötetyn energian hintaa eli 42 €/MWh (vrt. taulukko 5.2). Käyttämällä kuvan 5.4 tuotanto- ja kulutusjakautumaa saadaan verkkoon kesäkaudella syötettävän ja sieltä talvella takaisin ostettavan lämmön määräksi 113 MWh/v. Voidaan olettaa, että ainakin toistaiseksi aurinkolämpöjärjestelmien kesällä kaukolämpöverkkoon syöttämä lämpö voidaan pääosin siirtää suoraan kulutukseen eikä sitä tarvitse erikseen varastoida tai varastoinnissa voidaan hyödyntää olemassa olevia kaukolämpöverkon varastoja.

Laskelmien tavoitteena oli löytää nk. win-win -tilanteita kaukolämpöyhtiön ja aurinkolämmön tuottajan välille. Aurinkolämmön tuottaja investoi aurinkokeräinjärjestelmään ja sen kaukolämpöverkkoliitäntään, joten uuden tilanteen lämpökaupan on katettava aurinkolämmön tuotantokustannukset (tässä esimerkklaskelmassa 42 €/MWh). Kaukolämpöyhtiö ei tee investointeja, vaan ainoastaan käy lämpökauppaa asiakkaan kanssa uusin ehdoin, joten sen osalta kaupankäynnin kannattavuusrajaksi otettiin positiivinen tulos aikaisempaan lämpökauppaan verrattuna. Kaukolämpötariffin oletettiin koostuvan kahdesta myyntihinnasta, kesä- ja talvihinnasta, jotka kumpikin ovat voimassa 6 kuukautta (kesätariffi 1.4. - 30.9.). Kaukolämmön tuotantokustannusten oletettiin olevan 90 % myyntihinnasta, sekä kesällä että talvella. Kaukolämpöverkon osalta oletettiin, että kuormia on aina riittävästi kaiken verkkoon syötetyn aurinkolämmön hyödyntämiseksi. Toisin sanoen kaikki aurinkolämpötuotanto, sekä sen tuotantokohteessa kulutettu että kaukolämpöverkkoon syötetty, vähentää kaukolämpöyhtiön tuotantokustannuksia.



Laskelmissa muuteltiin yhtäältä kausihintasuhdetta (kaukolämmön myyntihinta talvella/kesällä), toisaalta aurinkolämmön ostohintaa, jota muuteltiin ostokerroimen avulla. Ostokerroin tarkoittaa aurinkolämmön ostohintaa kaukolämpöverkkoon syötettäessä jaettuna kaukolämmön myyntihinnalla eli jos ostokerroin on yksi, kaukolämpöyhtiö myy kaukolämpöä ja ostaa aurinkolämpöä samaan hintaan. Jos ostokerroin on nolla, kaukolämpöyhtiö ei maksa kaukolämpöverkkoon syötetystä aurinkolämmöstä mitään.

Kuvassa 5.5 on esitetty kaukolämmön minimitalvihinta, jolla aurinkolämpökauppa tuottaa vähintään yhtä hyvän tai paremman tuloksen sekä kaukolämpöyhtiölle että aurinkolämmön tuottajalle kuin pelkkä kaukolämpökauppa, edellä selostetuina oletuksin.



Kuva 5.5. Kaukolämmön minimitalvihinta win-win -tilanteen saavuttamiseksi (ostokerroin = aurinkolämmön ostohinta/kaukolämmön myyntihinta); kaukolämmön tuotantokustannukset = $0,9 \times$ kaukolämmön myyntihinta; kesähinta voimassa 1.4.–30.9.; aurinkolämmön tuotantokustannukset 42 euro/MWh

Kuvasta 5.5 nähdään esimerkiksi, että kausihintasuhteella yksi (sama hinta vuoden ympäri) ja ostokerroimella 0,8, kaukolämmön talvihinnan on oltava vähintään 48 euro/MWh, jotta aurinkolämpökauppa olisi kummankin kaupankäyjän edun mukaista. Kausihintasuhteen ollessa 2 (talvihinta kaksi kertaa kesähintaa kalliimpi) ja ostokerroimen 0,8, kaukolämmön talvihinnan on oltava vähintään noin 80 euro/MWh, jotta win-win -tilanne saavutettaisiin. Tässä tapauksessa siis kaukolämmön talvihinta olisi noin 80 euro/MWh, kesähinta noin 40 euro/MWh ja aurinkolämmön ostohinta (kesäkaudella) noin 32 euro/MWh. Talvikaudella aurinkolämpöä ei nettomääräisesti riitä kaukolämpöverkkoon myytäväksi (ks. kuva 5.4)

Jos ostokerroin olisi 0,6 ja kausihintasuhte edelleen 2, kannattavuusrajalta kaukolämmön hinta talvella olisi 94 euro/MWh, kesällä 47 euro/MWh ja aurinkolämmön ostohinta 28,2 euro/MWh. Jos kausihintasuhte on suurempi kuin 2 ja ostokerroin 0,8, molemminpuolista hyötyä ei voi saavuttaa.

Aurinkolämmön tuotantokustannuksista on syytä huomata, että tuotannon liittämisestä kaukolämpöverkkoon ei oletettu aiheutuvan merkittäviä lisäkustannuksia, ts. laskelmissa käytetty 42 euro/MWh sisältää tässä tapauksessa kaukolämpöliitännän kustannukset.

Kahdensuuntaista lämpökauppaa suunniteltaessa on tärkeää varmistua, että kaikki tuotettu aurinkolämpö mahtuu verkkoon. Tariffi on rakennettava alusta asti siten, että hajautetun aurinkolämmön tuottajia kohdellaan tasaveroisesti ennalta määriteltyjen pelisääntöjen mukaisesti. Teknisestä näkökulmasta katsottuna vaihtelevaan kesäaikaiseen tuotantoon varautuminen saattaa jossain vaiheessa vaatia kaukolämpöyhtiöltä investointeja varastokapasiteettiin - erityisesti jos aurinkolämmön osuus kesäaikaisessa kaukolämmön tuotannossa kasvaa merkittäväksi.

5.4 Hajautettu aurinkolämpö kaukolämpöverkon rinnalla

Tässä tapauksessa tarkasteltiin, onko taloudellisesti kannattavaa asentaa kaukolämpöön kytkettyyn rakennukseen aurinkolämpöjärjestelmää esimerkiksi lämpimän käyttöveden tuottamiseksi. Laskelmissa oletettiin, että kaikki tuotettu aurinkolämpö voidaan hyödyntää joko pelkästään lämpimänä käyttövetenä tai vesikiertoisen lämmönjaon kautta myös tilalämmityksessä.

Tapauksessa laskettiin erilaisten Suomen markkinoilla olevien aurinkolämpöpakettien (keräimet, varaaja + automatiikka) tuottaman energian hintoja. Pakettien keräinten koot vaihtelivat välillä 4 m² – 9,5 m², joten ne edustavat tyypillisiä omakotitalomittakaavan järjestelmiä. Laitepakettien hinnat ovat niiden jälleenmyyjien verkkosivuillaan syyskuussa 2011 ilmoittamia arvonlisäverollisia hintoja. Pakettien asennuskustannukseksi oletettiin laskelmissa 500 € + 100 €/keräin. Keräintuottona käytettiin 514 kWh/m² (tasokeräin, keskilämpötila 60 °C) ja keräinten eliniäksi oletettiin 20 vuotta kuten aiemmissakin tapauksissa. Lasketuissa tapauksissa tuotetun energian hinta veroineen (sis. alv) vaihteli välillä 114 €/MWh ja 172 €/MWh (ks. taulukko 5.4).

Taulukko 5.4. Pientaloasiakkaille tarkoitettujen aurinkolämpöjärjestelmien tuottaman lämpöenergian hintoja

Tuotepaketti	Kustannus [€/MWh]
Paketti 1 (9,5 m ²)	114
Paketti 2 (5 m ²)	159
Paketti 3 (4 m ²)	172

Lopputuloksena voidaan todeta, että näillä hinnoilla aurinkolämpöpaketit kilpailevat ensisijaisesti sähkö- ja öljylämmitteisten rakennusten markkinoilla. Edellä mainitut paketit olivat omakotitaloihin suunnattuja ratkaisuja. On kuitenkin syytä huomata, että suuremmissa järjestelmissä aurinkolämmön hinta on oleellisesti alhaisempi, joten suurten lämmönkäyttäjien kannalta tilanne on erilainen.



6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän tutkimuksen perusteella ennen kaikkea suuret aurinkolämpöjärjestelmät ovat mahdollisia kaukolämpöverkon yhteydessä. Kustannukset keräinpinta-alaa kohti laskevat järjestelmän koon kasvaessa; samoin käy lämmön tuotantokustannuksille. Lisäksi lämmön varastoinnin hyötysuhde paranee varaston koon kasvaessa. Näin ollen kaukolämpöverkon piirissä keskitetyt aurinkolämpöjärjestelmät ovat energiataloudellisesti järkevämpiä kuin pienet hajautetut järjestelmät.

Tällä hetkellä tasokeräimet ovat vakiintunutta tekniikkaa, ja ne soveltuvat erityisesti ratkaisuihin, joissa lämpötilataso on alhainen. Tyhjöputkikeräinten yleistyessä ja niiden kustannusten laskiessa kaukolämmön menopuolelle aurinkolämpöä syöttävät järjestelmät ovat vähitellen tulossa kilpailukykyisiksi. Tyhjöputkikeräimillä on selkeä etu tasokeräimiin verrattuna: niiden lämmöntuotto säilyy hyvänä keräinten lämpötilan noustessa kaukolämmön menoveden vaatimalle tasolle.

Joissakin kaukolämpöverkoissa voi olla mahdollista löytää sellaiset tariffit, että hajautettu aurinkolämmön tuotanto ja verkkoon liittäminen tulee kannattavaksi sekä kaukolämpöyhtiölle että aurinkolämmön tuottajalle. Tällainen kahdensuuntainen lämpökauppa voisi myös antaa kaukolämpöyhtiölle arvokasta käytännön tietoa aurinkolämmön integroinnista kaukolämpöjärjestelmään ilman merkittäviä omia investointeja ja samalla mahdollisuuden kohottaa profiilia aurinkolämmön hyödyntäjänä sekä innovatiivisena lämpökaupan kävijänä.

Aurinkolämmön kausivarastointi on välttämättömyys, jos halutaan tuottaa aurinkolämmöllä merkittäviä osuuksia kaukolämmön kokonaistarpeesta tietyn kaukolämpöverkon alueella. Tämän tutkimuksen perusteella olisi suositeltavaa tutkia aihepiiriä tarkemmin ensinnäkin, koska jo nyt kausivarastosovelluksien kustannustaso näyttäisi olevan samalla suuruusluokkatasolla kuin pelkästään maalämpöä hyödyntävissä järjestelmissä ja toiseksi, koska järjestelmiin liittyy useita epävarmuustekijöitä, joita olisi tarpeen mallintaa ja tutkia perusteellisemmin.

Kokonaisuutena aurinkolämpö tarjoaa useita erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, kuten tämä selvitys osoitti. Erilaisten ratkaisujen soveltuvuus eri kaukolämpöverkkoihin riippuu kunkin verkon tuotantorakenteesta, minkä vuoksi tietty ratkaisu voi olla yhdessä verkossa kannattava ja toisessa kannattamaton. Ylipäätään kannattavuuden näkökulmasta aurinkolämpöjärjestelmien kannattavuus edellyttää kuitenkin samaa kustannustasoa niin keräinten kuin asennuskustannusten osalta kuin mihin on päästy edistyneimmissä aurinkolämmön hyödyntäjämaissa.



Lähteet

ESTIF Solar Thermal Markets in Europe – Trends and Market Statistics 2010, June 2011

Werner Weiss, Frantz Mauthner, Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2009, Solar Heating and Cooling Programme, IEA, Edition 2011

Success Factors In Solar District Heating, CIT Energy Management AB (Deliverable D2.1 of Solar District Heating (SDH) Project)

Jean-Christophe Hadorn, Storage solutions for solar thermal energy, Freiburg Solar Academy 2004

Solar industry – The first green shoots of recovery, Sarasin Bank & Cie AG 2010

Ekoviikin EU-aurinkolämpöjärjestelmien jatkoseurannan loppuraportti, Solpros 2004

Alanen R., Koljonen T., Hukari S., Saari P. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita 2003

Pesola A., Hagström M., Vanhanen J. Study on Distributed Energy Options in Skaftkärr Testbed. 2011.

Virtanen V. Energian varastointimuodot. 2010.

