

Alina Mustakoski

# AURINKOLÄMMÖN VARASTOIMINEN MAALÄMPÖKAIVOON

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
05/2022

# TIIVISTELMÄ

Alina Mustakoski: Aurinkolämmön varastoiminen maalämpökaivoon

Storing of solar heat with vertical ground heat exchanger

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka

Toukokuu 2022

---

Maalämpöpumppu on tehokas tapa tuottaa edullista ja vähäpäästöistä lämpöenergiaa rakennusten käyttöön. Ympäristöystävällisinä ja taloudellisina energiantuotantomuotoina maalämpöjärjestelmät ovat viime vuosina selvästi yleistyneet myös Suomessa. Vastaavasti myös aurinkolämpöjärjestelmät ovat kasvattaneet osuuttaan osana rakennusten lämmitystä. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, miten aurinkolämpöä voidaan varastoida maalämpökaivoon, ja mitä hyötyjä tällä järjestelyllä voidaan saavuttaa. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Työn alussa käydään läpi maalämpöpumpun toimintaperiaate ja sen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät sekä lämmönlähteenä toimivan energiakaivon toimintaperiaate. Tämän jälkeen esitellään aurinkolämpöjärjestelmän toimintaa, erilaisia aurinkokeräintyypppejä ja keräimen hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Työ etenee tarkastelemaan aurinko- ja maalämpöjärjestelmien yhdistämistä ja aurinkolämmön varastointia maalämpökaivoon. Aiheesta tehtyjen tutkimusten avulla selvitetään, mitä hyötyjä ja ongelmakohtia aurinkolämmön varastoinnilla maalämpökaivoon on.

Aiheesta tehtyjen tutkimusten perusteella selviää, että varastoimalla aurinkolämpöä maalämpökaivoon ei saavuteta juurikaan hyötyjä oikein mitoitettujen maalämpökaivojen tapauksessa. Järjestelmän kokonaishyötysuhdetta kuvaava tehokerroin ei parane merkittävästi varastoinnin seurauksena, jos kaivo on mitoitettu oikein vastaamaan lämmitettävän kohteen energiantarvetta. Järjestelmän hyötysuhteen voidaan kuitenkin huomata paranevan varastoinnin vaikutuksesta tapauksissa, joissa energiakaivo on lämmitettävään kohteeseen nähden alimitoitettu.

Aurinkolämmön varastointi maalämpökaivoon mahdollistaa maalämpökaivon syvyyden lyhentämisen ilman merkittäviä tehonalenemia. Kaivon syvyyttä voidaan lyhentää järjestelmän eri osien koosta ja toiminnasta riippuen jopa 20 % verrattuna tilanteeseen, jossa varastointia ei tehdä. Tämä mahdollistaa maalämpökaivojen hyödyntämisen yhä laajemmin esimerkiksi alueilla, joissa pohjavesivarannot rajoittavat kaivojen syvyyksiä. Lisäksi voidaan huomata, että aurinkolämmön varastointi maalämpökaivoon vähentää maalämpökaivojen keskinäisiä, niiden toimintaan haitallisesti vaikuttavia vuorovaikutuksia toistensa lämmönkeruukentissä. Varastoimalla aurinkolämpöä maalämpökaivoihin mahdollistetaan kaivojen vapaampi sijoittelu lähemmäs toisiaan esimerkiksi entistä tiheimmillä asuinalueilla.

Ilmastonmuutosta halutaan hillitä ja tarve vähäpäästöiselle lämmöntuotannolle on suuri. Aurinkolämmön varastoinnin avulla maalämpöjärjestelmät voivat yleistyä yhä laajemmin ja maalämpö voi vahvistaa asemaansa yhtenä uusiutuvan energiantuotannon kulmakivenä.

Avainsanat: Maalämpö, aurinkolämpö, aurinkolämmön varastointi, vähäpäästöinen lämpöenergia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ.....	3
2.1 Maalämpöpumppu .....	3
2.2 Energiakaivo .....	5
3. AURINKOLÄMPÖ .....	7
3.1 Aurinkolämpöjärjestelmän osat .....	7
3.2 Aurinkokeräimet .....	7
3.2.1 Tasokeräin .....	8
3.2.2 Tyhjiöputkikeräin .....	9
3.3 Aurinkokeräimen hyötysuhde .....	10
4. AURINKOLÄMMÖN VARASTOINTI MAALÄMPÖKAIVOON .....	13
4.1 Aurinko- ja maalämpöjärjestelmän yhdistäminen .....	13
4.2 Hyödyt aurinkolämmön varastoisessa maalämpökaivoon.....	15
4.3 Ongelmakohdat aurinkolämmön varastoisessa maalämpökaivoon.	18
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	20
LÄHDELUETTELO .....	22

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$COP$	Lämpökerroin, Coefficient of performance
$COP_{max}$	Maksimi lämpökerroin
$T_l$	Lämpöpumpun lämmön vastaanottajan lämpötila
$T_h$	Lämpöpumpun lämmönlähteen lämpötila
$q$	Lämpövirran tiheys
$\lambda$	Lämmönjohtavuus
$\frac{\Delta T}{\Delta n}$	Lämpötilagradientin jyrkkyys
$\eta$	Hyötysuhde
$Q$	Aurinkokeräimen absorboima energia
$I$	Aurinkokeräimelle osuva auringon säteilyenergia
$T_i$	Aurinkokeräimen lämmönsiirtonesteen sisäänmenolämpötila
$T_a$	Aurinkokeräimen ympäristön lämpötila
$\tau$	Aurinkokeräimen suojalasin läpäisykerroin
$\alpha$	Absorptiopinnan absorptiokerroin
$U_L$	Aurinkokeräimen kokonaislämmönläpäisykerroin
$F$	Aurinkokeräintyyppille ominainen lämmönpoistokerroin
$\eta_0$	Aurinkokeräimen lämpöhäviötön hyötysuhde
$T_m$	Lämmönkeruunesteen keskimääräinen lämpötila
$a_1$	Ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin aurinkokeräimelle
$a_2$	Toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin aurinkokeräimelle

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät maapallolla selvästi, ja tilanteen korjaamiseksi onkin tehty töitä jo pidemmän aikaa. Myös energiantuotanto on murroksessa, ja entistä tehokkaampien tapojen kehittäminen uusiutuvan energian tuottamiseksi on tärkeää. Euroopan Unioni on direktiivissään asettanut tavoitteeksi, että uusiutuvan energian osuuden tulisi olla vähintään 32 % lopullisesta energiankulutuksesta vuoteen 2030 mennessä [1]. Suomen vastaava tavoite on jopa 50 % energian loppukulutuksesta [2, s. 11]. Lisäksi energiantuotanto on yhä useammin pientä ja hajautettua, eli energia pyritään tuottamaan lähellä kulutuspaikkaansa. Nämä asiat ovat vaikuttaneet siihen, että niin maa- kuin aurinkolämpöjärjestelmätkin ovat yleistyneet selvästi myös Suomessa. Jos nämä kaksi järjestelmää voitaisiin yhdistää niin, että se tehostaisi molempien järjestelmien toimintaa, voisi se toimia yhtenä ratkaisuna energiantuotannon muutokseen.

Maalämpöpumppu on Suomessa yleinen tapa rakennuksen lämmityksen järjestämiseksi. Se on ympäristöystävällinen, säävarma ja etenkin käyttökustannuksiltaan edullinen tapa tuottaa lämpöä. Maalämpöpumpun tuottama lämpö ei kuitenkaan aina riitä sellaisenaan kattamaan koko kohteen lämmöntarvetta, etenkin jos kohde on kooltaan iso. Lisäksi jos lämpökaivosta otetaan paljon lämpötehoa eikä sinne varastoida lämpöä, se voi jäähtyä ajan myötä [3, s. 275–276]. Tällöin myös lämmönkeruunesteen lämpötila ja samalla pumpun hyötysuhde jäävät alhaisemmiksi. Maaperän ja maalämpökaivon lämpötila vaihtelevat myös vuodenaikojen mukaan, ja kylmimmillään ne ovat kevään alkaessa lämmityskauden jälkeen. Varastoimalla aurinkolämpöä järjestelmään voidaan lämpenemistä talven jäljiltä tehostaa. [4] Aurinkolämpöä voidaan varastoida maalämpökaivon lämmittämällä piirissä kiertävää lämmönkeruunestettä, jolloin maalämpöpumpun lämpökerroin paranee [5, s. 58]. Myös aurinkokeräimen hyötysuhde voidaan saadaan pidettyä korkeampana maalämpöpiirin matalan lämpötilan avulla [4].

Työn tarkoituksena on selvittää, onko aurinkolämmön varastoiminen maalämpökaivoon kannattavaa ja millaisia hyötyjä sillä saadaan aikaan. Työssä tutkitaan, miten tällainen varastointi voidaan toteuttaa ja miten se vaikuttaa maalämpöpumpun toimintaan, esimerkiksi sen tehoon ja lämpökertoimeen. Tarkoituksena on tutkia myös sitä, miten järjestely vaikuttaa aurinkolämpöjärjestelmän hyötysuhteeseen. Työssä keskitytään lämpökaivoa hyödyntävään maalämpöjärjestelmään, koska se on muita vaihtoehtoja yleisempi

ratkaisu ja aurinkolämmön varastoinnista lämpökaivoon saadaan mahdollisesti maaperävarastointia suurempi hyöty [4]. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten pohjalta.

Aluksi teoriaosuudessa käydään läpi maalämpöjärjestelmän ja aurinkolämpöjärjestelmän toimintaperiaatteet. Sen jälkeen käsitellään mahdolliset tavat varastoida aurinkolämpöä maalämpökaivoon ja selvitetään, onko tällaisesta varastoinnista hyötyä järjestelmien toiminnalle. Lopuksi käydään läpi, millaisia vaikutuksia aurinkolämmön varastoinnilla maalämpökaivoon on ja millaisissa olosuhteissa varastointi on kannattavaa.

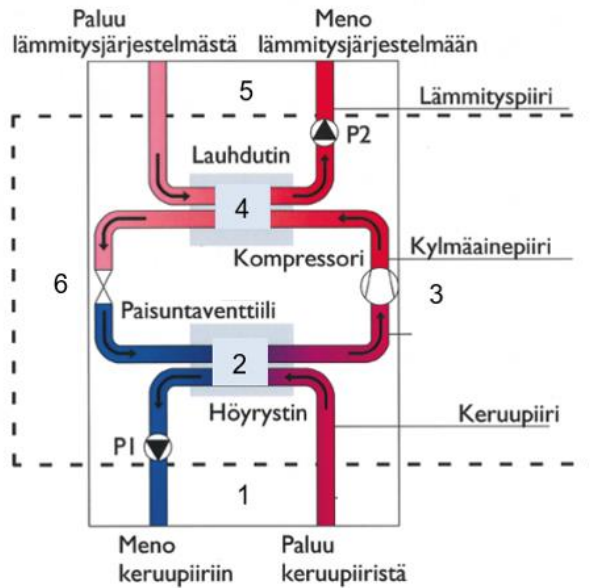
## 2. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ

Maalämpö on maaperään, kallioperään tai veteen varastoitunutta alun perin auringosta peräisin olevaa energiaa, joka varastoituu maaperään auringon säteilyn ja esimerkiksi sateiden mukana. Syvemmillä maassa esiintyy myös geotermistä energiaa, joka on syntynyt radioaktiivisten aineiden hajotessa. Kotitalouksien maalämpöpumppujen kaivot ovat tavallisesti alle 300 metriä syviä ja hyödyntävät siten pääosin maaperään varastoitunutta auringon lämpöenergiaa. [6, s. 7] Maalämpö on vähäpäästöinen ja uusiutuva lämpöenergian lähde.

### 2.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumpulla saadaan maaperän lämpöenergiaa siirrettyä rakennuksen käyttöön ulkopuolisen sähköenergian avulla. Maalämpöpumppu siirtää kompressorin avulla lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Lämmön siirtämiseksi tarvitaan sähköenergiaa, mutta sen osuus on kuitenkin vain noin kolmasosa lämpöpumpun avulla saatavaan lämpöenergiaan nähden [7, s. 78]. Siten lämpöpumppu on käyttökustannuksiltaan verrattain edullinen lämmitysmuoto.

Kuvassa 1 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate. Maan alle energiakaivoon kulkevassa keruuputkessa liikkuu lämmönkeruunestettä. Neste kiertää putkessa ja lämpenee maaperään varastoituneen lämpöenergian vaikutuksesta (vaihe 1). Keruuneste nostetaan pumpun avulla ylös ja siirretään höyrystimelle, jossa lämpö siirtyy kylmäainepiiriin ja saa siellä kiertävän kylmäaineen höyrystymään (vaihe 2). Kylmäainepiirissä on kompressori, joka puristaa kylmäainehöyryn korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan (vaihe 3). Lauhduttimessa kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia ja myös kompressorin ottama sähköenergia siirtyvät rakennuksen lämmityspiiriin ja kylmäaine lauhtuu takaisin nesteeksi (vaihe 4). Lämmitysverkostoon pumpun avulla siirtyvä lämpö (vaihe 5) lämmittelee rakennusta esimerkiksi vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän kautta. Sillä voidaan lämmitteellä myös käyttövettä. Kylmäaine puolestaan jatkaa kiertoaan paisuntaventtiiliin, jossa sen painetta lasketaan. Sen jälkeen se ohjataan takaisin höyrystimelle (vaihe 6). [3, s. 269], [6, s. 10–12]



**Kuva 1: Lämpöpumpun toimintaperiaate, muokattu lähteestä [6, s. 12]**

Tehokerroin eli COP (Coefficient of Performance) on tärkeä lämpöpumpun toimintaa kuvaava suure. Se kuvaa saadun lämpötehon suhdetta kulutettuun sähkötehoon

$$COP = \frac{\text{saatu lämpöteho (kW)}}{\text{kulutettu sähköteho (kW)}} \quad (1)$$

Lämmitettävään veteen siirtynyt lämpöteho määritellään yksikön sisään- ja ulostulon lämpötilaeron sekä veden virtausnopeuden avulla. Kulutetulla sähkötehoilla puolestaan tarkoitetaan kompressorissa kulutettua ulkopuolista sähkötehoa. Maalämpöpumpun COP-arvo on tyypillisesti suuruudeltaan 3–4. [8, s. 16–17] Teoreettinen maksimiarvo tehokertoimelle saavutetaan käänteisen Carnot-prosessin avulla. Tällöin tehokertoimeksi saadaan

$$COP_{max} = \frac{T_l}{T_l - T_h} \quad (2)$$

missä  $T_l$  on lämmitysverkoston lämpötila, johon lämpö siirtyy (lauhtumislämpötila) ja  $T_h$  lämmönlähteen lämpötila (höyrystymislämpötila). [9, s. 93–94] Todellisuudessa tehokerroin on selvästi Carnot-tehokerrointa pienempi, mutta kaavasta voidaan kuitenkin havaita, että tehokerroin on sitä parempi, mitä pienempi on lämpötilaero systeemiin lämpöä antavan ja sitä vastaanottavan lähteen välillä. Silloin kompressori tarvitsee vähemmän ulkopuolista sähköenergiaa nostaakseen höyryn paineen ja lämpötilan sopivalle tasolle [8, s. 17]. Lämpötilaeroa voidaan pienentää ja tehokerrointa parantaa nostamalla lämmönlähteen lämpötilaa, eli esimerkiksi varastoimalla lämpöä lähteeseen.

## 2.2 Energiakaivo

Energia- tai lämpökaivolla tarkoitetaan maalämpöjärjestelmässä lämmön siirtoon käytettyä maa- ja kallioperään porattua reikää. Kaivon syvyys on yleensä 120–300 m. Kaivossa kiertää putki, jonka sisässä kulkee lämmönkeruunestettä. Kaivo täyttyy tyypillisesti pohjavedellä, mutta joskus se täytyy täyttää erikseen. Tarpeen vaatiessa kaivon tyhjäksi jäänyttä yläosaa voidaan täyttää myös esimerkiksi bentoniitilla lämmönsiirron parantamiseksi. [6, s. 33]

Energiakaivon lämmönsiirto tapahtuu pääosin johtumalla ympäröivästä maa-aineksesta keruunesteeseen. Tätä johtumista kuvaa Fourierin lämmönjohtavuuslaki

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta n} \quad (3)$$

missä  $q$  on lämpövirrantiheys,  $\lambda$  väliaineen lämmönjohtavuus ja  $\frac{\Delta T}{\Delta n}$  lämpötilagradientti ympärillä olevassa maaperässä. Lämpötilagradientti vaihtelee ajan ja kuormituksen mukaan koko kaivon käyttöajan ja vielä sen jälkeenkin. Vaikutus on nopeinta kaivon läheisyydessä, mutta se voi ulottua jopa kymmenien metrien etäisyydelle. Myös pohjaveden virtaukset vaikuttavat lämpötilagradienttiin. [3, s. 274]

Kuten Fourierin yhtälöstäkin (3) voidaan havaita, lämpötilagradientti on suoraan verrannollinen kaivosta siirtyvään lämpötehoon. Siirtyvä lämpöteho puolestaan vaikuttaa kaivon kuormitettavuuteen eli siihen, paljonko lämpöä sieltä voidaan ottaa. Koska kaivon kuormitettavuuden selvittämiseksi tarvittaisiin joko kaivon ympäristön lämpötilatrendin tai sen kuormitushistorian tuntemista, on se melko haastava määrittää. [3, s. 274–275]

Energiakaivojärjestelmä tulisi mitoittaa siten, että se kestää lämpötekniisesti yhtä kauan kuin rakenteellisestikin eli jopa 50–100 vuotta. Kaivon ja sen ympäristön lämpötilan taso pitäisi pysyä suotuisana läpi koko käyttöajan. Eniten tähän vaikuttaa kaivon vaikutusalueen nettolämpökuorma eli alueelle annettu lämpömäärä, josta on vähennetty sieltä otettu lämpö. Se voidaan ilmoittaa yksikössä  $\frac{\text{kWh}}{m_{\text{eff},V}}$  eli nettolämpömääränä tehollista porakaivometriä kohti, missä tehollinen porakaivometri tarkoittaa kaivon osuutta kalliolla, jonka vesi on täyttänyt. Irtomaaosuudella, jonka vesi on täyttänyt, lämmönsiirtokyky on noin kolmasosan kalliioon nähden ja sen osuus voidaan huomioida muuntamalla sen pituus teholliseksi porakaivometreiksi jakamalla kolmella. Yksittäisen kaivon kuormitettavuus on suuruusluokaltaan noin  $50\text{--}130 \frac{\text{kWh}}{m_{\text{eff},V}}$ . [3, s. 275–277]

Maaperän tehollinen lämmönjohtavuus vaikuttaa kaivon mitoitukseen. Kallion lämmönjohtavuus voi vaihdella merkittävästikin kivilajista riippuen. Lisäksi kallion lämmönjohtavuuteen vaikuttavat pohjaveden virtaukset sekä kaivon lämpövastus eli se, miten hyvin lämpö siirtyy kaivosta lämmönkeruunesteeseen. Lämmönvastuksen tulisi olla mahdollisimman pieni. Lämmönjohtavuutta ja lämpövastusta voidaan mitata TRT- eli lämmönvastetestin (Thermal response test) avulla. [3, s. 276], [6, s. 31] Myös maaperän alkulämpötila on huomioitava. Alkulämpötila vaihtelee jonkin verran kaivon sijainnin mukaan. Esimerkiksi Suomen eteläisimmissä osissa alkulämpötila on noin 6 °C kun taas pohjoisessa vastaava lämpötila on noin 2 °C. [6, s. 7]

Energiakaivon mitoituksessa on huomioitava myös alueella mahdollisesti sijaitsevat muut energiakaivot. Energiakaivojen etäisyyden toisistaan tulisi olla vähintään 20 metriä. Jos välimatka on pieni, ne vaikuttavat toisiinsa ja energiakaivon pitkäaikaissaanto pienee. Lisäksi keruuputken tyyppi ja materiaalien kestävyudet on otettava huomioon. [3, s. 276]

## 3. AURINKOLÄMPÖ

Aurinkolämpöjärjestelmä hyödyntää auringon lähettämää säteilyenergiaa varastoiden sen lämmöksi tehokkaasti säteilyä absorboivien pintojen ja lämpövaraston avulla. Aurinkokeräimet keräävät auringosta saapuvaa suoraa ja usein myös epäsuoraa eli diffuusia säteilyä. Aurinkolämpö on päästötön ja uusiutuva lämmönlähde ja sen suosio on kasvanut viime vuosina myös Suomessa.

### 3.1 Aurinkolämpöjärjestelmän osat

Aurinkolämpöjärjestelmä muodostuu tavallisesti aurinkokeräimestä, lämmönsiirtoputkistosta ja lämpövarastosta. Keräintyypejä on useita erilaisia ja ne ovat joko nestekiertoisia tai ilmakeräimiä. Lämpövarasto on tarpeen, sillä auringon säteilyn määrä ei ole enustettavaa ja vaihtelee paljon. [10, s. 78]

Aurinkolämpöjärjestelmän perusosiin kuuluvat lisäksi pumppuyksikkö, ohjausyksikkö, lämmönsiirrin, paisunta-astia sekä varolaitteet. Pumpun tehtävä on kierrättää lämmönkeruunestettä putkistossa aurinkokeräimen ja varaajan välillä. Lämpö siirtyy lämmönsiirtoputkistosta varaajaan lämmönsiirtimen kautta. Ohjausyksikkö seuraa lämpötiloja järjestelmässä ja käynnistää ja sammuttaa pumpun toiminnan tarvittaessa. Lämmönsiirto-putkistoon tarvitaan myös paisunta-astia, sillä putkistossa kulkevan nesteen tilavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Astia pitää putkiston paineen tasaisena. Varoventtiili puolestaan päästää nestettä ulos putkistosta, jos verkoston paine kasvaa liian suureksi. [11]

### 3.2 Aurinkokeräimet

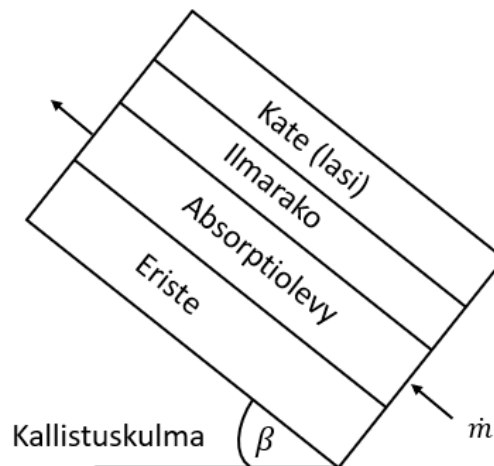
Aurinkokeräin on aurinkolämpöjärjestelmän keskeisin osa. Se absorboi tehokkaasti auringon lähettämää säteilyenergiaa keräten sen lämmöksi keräimessä kiertävään lämmönkeruunesteeseen, joka puolestaan kuljettaa lämmön eteenpäin lämmönsiirto-putkistoon ja edelleen lämpövarastoon.

Aurinkolämpökeräimiä on useita erilaisia. Nestekiertoiset taso- ja tyhjiöputkikeräimet ovat keräintyypeistä yleisimpiä. Tasokeräin voi olla joko katettu tai kattamaton. Aurinkolämpöä energiakaivoon varastoitaessa voidaan käyttää myös kattamatonta keräintä, sillä varastointia varten keruunesteen lämpötilan ei välttämättä tarvitse olla kovin korkea etenkin jos lämpö siirretään lämpöpumppujärjestelmän kylmälle puolelle [10, s. 84].

### 3.2.1 Tasokeräin

Tasokeräimen keskeisin osa on auringon säteilyä vastaanottava absorptiolevy, jonka tumma pinta absorboi tehokkaasti auringon säteilyä ja lämpenee. Absorptiolevy on tavallisesti päällystetty läpinäkyvällä kateella lämpöhäviöiden pienentämiseksi, mutta matalamman lämpötilan kohteissa kate ei ole aina tarpeen. Kate ja sen alle jäävä ilmarako auttavat kuitenkin ehkäisemään konvektio- ja säteilyhäviöitä absorptiolevystä ilmaan. Kate läpäisee hyvin auringosta tulevaa lyhytaaltoista säteilyä, mutta ei päästä absorptiolevyyn lähettämää pitkäaalloista lämpösäteilyä säteilemään pois keräimestä. [12, s. 125–126].

Absorptiolevyyn sitoutunut energia siirtyy lämmönsiirtoputkistoon. Lämmönsiirtoputket voivat olla upotettuna absorptiolevyyn tai sen pinnalla. Lämpö sitoutuu putkistossa kiertävään lämmönkeruunesteeseen ja kulkee putkiston kautta lämpövarastoon. [12, s. 125–126] Lämmönsiirtoputkistossa kiertävä lämmönkeruuneste on Suomen oloissa tyypillisesti pakkasta kestävä vettä, johon on lisätty sen jäätymisen estävää ainetta, esimerkiksi glykolia [10, s. 78]. Neste kiertää putkistossa joko luonnollisen konvektion tai pumppu vaikutuksesta. Keräimen alapinta ja sivut on hyvin eristetty lämpöhäviöiden minimoimiseksi. [12, s. 125–126] Myös putkiston materiaalin täytyy olla hyvin eristävää, ettei lämpö pääse karkaamaan siirtovaiheessa. Tasokeräimen rakenne on esitetty kuvassa 2.



**Kuva 2: Tasolevykeräimen rakenne, perustuu lähteeseen [13, s. 156]**

Katetun tasokeräimen hyötysuhde eli se, kuinka suuri osa auringon säteilystä saadaan siirrettyä lämmönsiirtonesteeseen, on noin 50 %. Se on selvästi suurempi kuin esimerkiksi valosähköistä ilmiötä hyödyntävillä aurinkokennoilla. [13, s. 155] Hyötysuhde on

suurin, kun tuotettava lämpötila on suhteellisen alhainen ja lämpötilaero ympäristön ja keräimen välillä pieni. [10, s. 95]

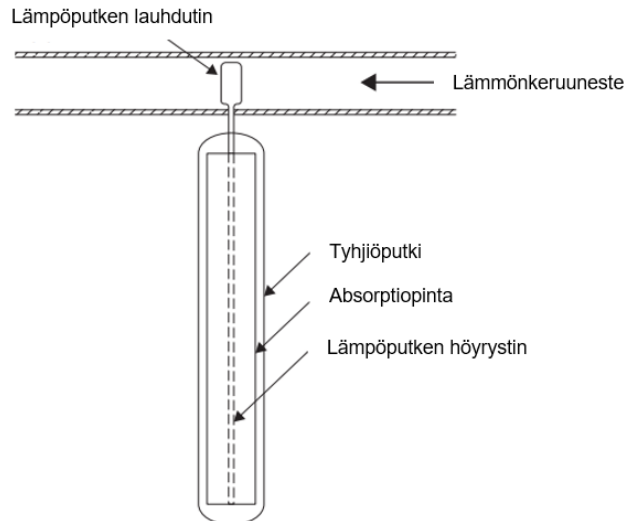
Tasokeräin pystyy hyödyntämään sekä auringon suoraa että diffuusiasäteilyä. Sen etuja ovat myös edulliset valmistuskustannukset ja pysyvä asento, jolloin auringon sijaintiin ei tarvitse kiinnittää huomiota. Keräimen asento on kohti päiväntasaajaa eli pohjoisella pallonpuoliskolla etelään päin. Kallistuskulma, jota on kuvassa 2 merkitty symbolilla  $\beta$  on sama kuin sijainnin leveysaste kulmavaihtelulla  $\pm 10\text{--}15\text{ }^\circ\text{C}$  käyttötarkoituksesta riippuen. Jos suurin tehontarve on talvella, optimaalinen kulma on noin leveyspiiri  $+10\text{ }^\circ\text{C}$  ja vastaavasti jos tehontarve on suurin kesällä niin leveyspiiri  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ . [12, s. 126–127]

### 3.2.2 Tyhjiöputkikeräin

Tasokeräimet soveltuvat hyvin aurinkoiseihin ja lämpimiin oloihin. Niiden hyödyt kuitenkin vähenevät kylmissä, pilvisissä ja tuulisissa oloissa ja silloin niiden sijaan voidaan käyttää myös tyhjiöputkikeräimiä. Putken ympärillä oleva tyhjiö pienentää merkittävästi konvektio- ja johtumislämpöhäviöitä ja toimii hyvänä eristeenä. Siten keräimen hyötysuhde säilyy hyvänä korkeissa toimintalämpötiloissa ja lämmöntuotto voi olla tasokeräintä parempaa etenkin kylminä vuodenaikoina. Tyhjiöputkikeräimet pystyvät hyödyntämään sekä suoraa että diffuusiasäteilyä. Ne keräävät tasokeräimiä paremmin säteilyä myös pienemmällä tulokulmilla. [12, s. 135–138] Tyhjiöputkikeräimet ovat kuitenkin tasokeräimiä kalliimpia. [14, s. 49]

Tyhjiöputkikeräimissä lämmönsiirto voi tapahtua joko läpivirtausperiaatteella tai lämpöputken (Heat pipe) avulla. Läpivirtausperiaatteella toimivissa keräimissä neste kulkee usein u-muotoisessa putkessa mustan absorptiopinnan alla. Yksilasisessa tyhjiöputkessa nesteputkessa kiinni oleva absorptiolevy sijaitsee putken sisällä tyhjiössä ja on malliltaan levymäinen. Kaksilasisessa tyhjiöputkessa absorptiolevy ja siinä kiinni oleva sylinterin mallinen lämmönsiirtolevy eivät ole tyhjiössä, vaan lasisylintereistä sisemmän alla. Lämpö siirtyy absorptiopinnasta johtumalla sylinterimäiseen metallipintaan, joka on kosketuksissa lämmönsiirtoputkeen. [10, s. 95–96], [11]

Heat pipe -keräimen toiminta perustuu lämpöputkiin, joiden sisällä oleva neste höyrystyy suhteellisen alhaisessa lämpötilassa. Keräimen rakenne on esitetty kuvassa 3. Lämpöputket sijaitsevat tyhjiöksi imettyjen putkien sisällä, ja myös Heat pipe -periaatteella toimivan keräimen tyhjiö voi olla joko yksinkertainen tai kaksinkertainen. Tyhjiön ja lämpöputken välissä on musta absorptiopinta, joka absorboi tehokkaasti auringon säteilyä. [10, s. 82–84], [12, s. 136–139]



**Kuva 3: Heat pipe -periaatteella toimivan aurinkokeräimen yhden putken rakenne, muokattu lähteestä [12, s. 137]**

Heat pipe -keräin hyödyntää faasimuutosta nesteestä kaasuksi kerätessään auringon energiaa talteen. Keräimessä käytetty helposti höyrystyvä neste muodostaa oman lämpöpiirinsä. Neste voi olla esimerkiksi alkoholia tai vettä, mutta putkessa vallitseva paine on tällöin oltava normaalia ilmanpainetta alhaisempi, jolloin höyrystymislämpötilakin on alhaisempi [11]. Putken sisässä neste höyrystyy absorptiopinnan keräämän lämmön vaikutuksesta ja höyryksi muuttunut neste nousee lämpöputken yläosiin ja luovuttaa lämpönsä lämmönkeruunesteeseen, joka kiertää yläosan putkistossa. Tiivistynyt neste puttaa takaisin lämpöputken pohjalle ja höyrystyy taas uudelleen. Lämmönkeruuneste, joka voi olla esimerkiksi vesi-glykoli seosta, kuljettaa lämmön sen käyttökohteeseen tai varastoon [10, s. 82–84], [12, s. 136–139]

### 3.3 Aurinkokeräimen hyötysuhde

Aurinkokeräimen hyötysuhde vaihtelee sen mallin ja ulkoisten olosuhteiden mukaan. Siihen vaikuttavat muun muassa keräimen suuntaus, kaltevuus, lämpöeristys, käytetyt lämmönsiirtoaineet ja -etäisyydet, materiaalit sekä lämpötilat aurinkokeräimen ympäristössä ja käyttökohteessa. Myös tuulisuus, varjot ja säteilyn tulokulma vaikuttavat hyötysuhteeseen. [10, s. 93] Tärkeimmät hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ovat keräimelle saapuvan säteilyn määrä, lämmönkeruunesteen sisääntulolämpötila ja ympäristön lämpötila. [14, s. 54]

Yleisesti ottaen hyötysuhde voidaan laskea kaavalla 4 keräimen absorboiman energian ja keräimelle osuvan säteilyenergian suhteena.

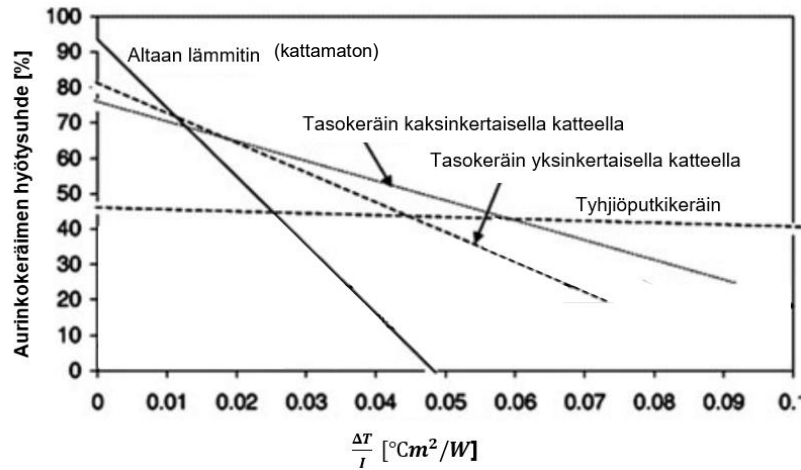
$$\eta = \frac{Q}{I} = F\tau\alpha - \frac{FU_L(T_i - T_a)}{I} \quad (4)$$

missä  $Q$  kuvaa keräimen absorboimaa energiaa ja  $I$  kerääjälle osuvaa säteilyenergian määrää.  $T_i$  on keräimelle menevän nesteen lämpötila,  $T_a$  keräimen ympäristön (ulkoilman) lämpötila,  $\tau$  keräimen suojalasin läpäisykerroin,  $\alpha$  absorptiopinnan absorptiokerroin ja  $U_L$  lämmönläpäisykerroin koko keräimelle.  $F$  kuvaa keräintyypille ominaista lämmönpoistokerrointa, joka määritetään todellisen keräimestä hyödyksi saadun energian ja keräimestä hyödyksi saadun energian suhteena siinä tilanteessa, kun absorptiopinnan ja keräimeen menevän lämmönkeruunesteen lämpötilat ovat samat. [15, s. 13–14]

Toisaalta aurinkokeräimen hyötysuhde voidaan määrittää myös kaavalla

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{I} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{I} \quad (5)$$

missä  $I$  on auringon säteilyteho,  $T_m$  lämmönkeruunesteen keskimääräinen lämpötila ja  $T_a$  ympäröivän ilman lämpötila.  $a_1, a_2$  ja  $\eta_0$  ovat termisiä parametrejä, jotka määritetään kaupallisille aurinkokeräimille ja ne vaihtelevat keräimestä riippuen.  $a_1$  ja  $a_2$  ovat ensimmäisen ja toisen kertaluokan lämpöhäviökertoimia ja  $\eta_0$  lämpöhäviötön hyötysuhde. Lämpöhäviötön hyötysuhde kuvaa tilannetta, jossa lämpötilaero ympäröivän ilman ja keräimen välillä on nolla. [10, s. 93–94] Kuvassa 4 on esitetty erilaisten nestekiertoisten aurinkokeräinten hyötysuhteita keräimen ja ympäristön lämpötilaeron ja keräimelle osuvan säteilyn funktiona.



**Kuva 4: Erilaisten nestekiertoisten aurinkokeräimien hyötysuhteita.  $\Delta T$  kuvaa lämmönkeruunesteen keskimääräisen lämpötilan ja ympäristön lämpötilan eroa ja  $I$  keräimelle osuvaa auringon säteilyä. [14, s. 14]**

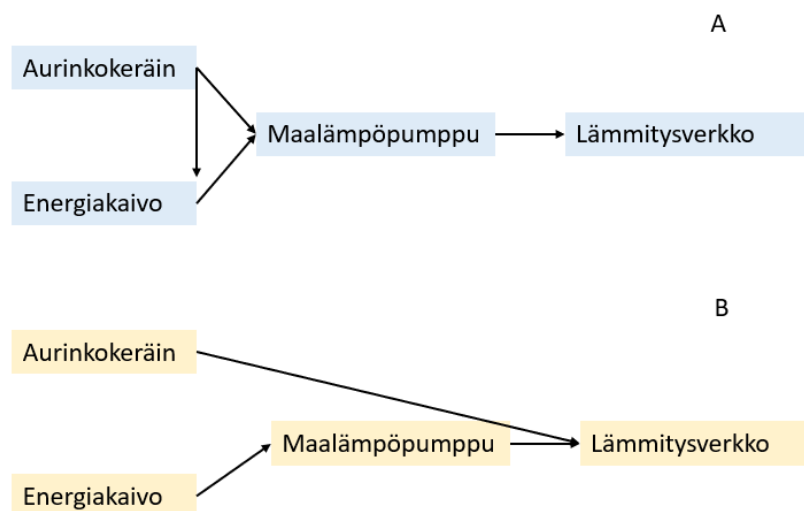
Kaavasta 5 ja kuvasta 4 voidaan havaita, että tasokeräinten hyötysuhde pienenee, jos lämpötilaero ympäristön ja keräimen välillä kasvaa. Jos auringosta tulevan säteilyn määrä pienenee, hyötysuhde heikkenee. Tyhjiöputkikeräimellä hyötysuhde pysyy puolestaan melkein vakiona lämpötilaeron ja saapuvan säteilyn muuttuessa.

## 4. AURINKOLÄMMÖN VARASTOINTI MAALÄMPÖKAIVOON

Aurinko- ja maalämpöjärjestelmät voidaan yhdistää toisiinsa monin eri tavoin. Kytkehtävät voidaan luokitella kuuma- ja kylmäpuolikytkentöihin. Kylmäpuolella kytkentä voidaan tehdä keruupiirin energiakaivoon lähtevään tai sieltä palaavaan päähän. Aurinkolämpöä energiakaivoon varastoitaessa kytkentä tehdään tavallisesti maalämpöpumpun kylmä- eli höyrystinpuolelle ja lämmönkeruupiirin alkupäähän. Näin aurinkokeräimen tuottama lämpö saadaan ohjattua energiakaivoon.

### 4.1 Aurinko- ja maalämpöjärjestelmän yhdistäminen

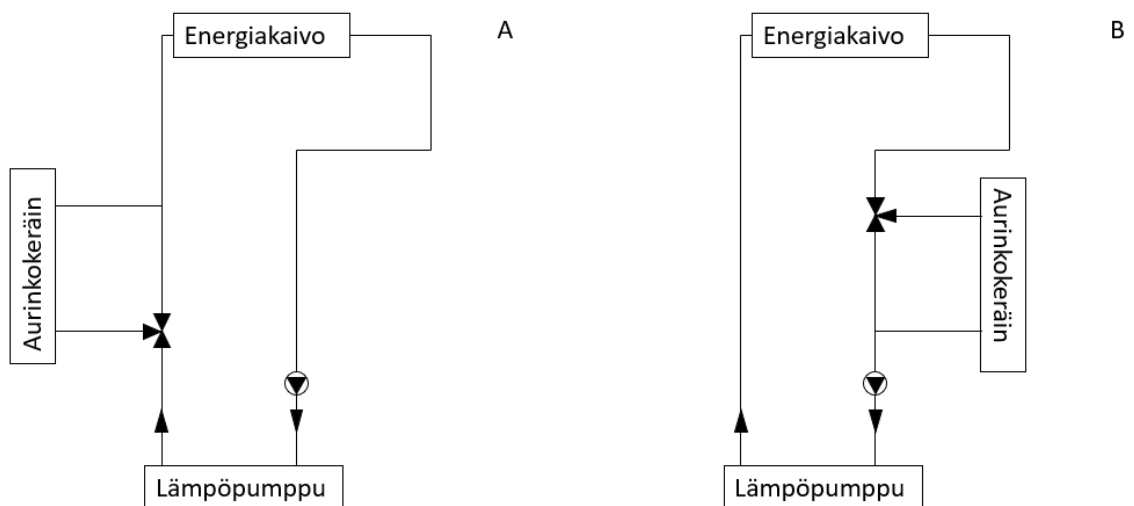
Kuumapuolikytkennässä aurinkolämpöjärjestelmä kytketään nimensä mukaisesti maalämpöpumpun lämpimälle puolelle, eli lauhdutinpuolelle (kuva 1, kohta 5). Tällöin aurinko- ja maalämpöjärjestelmät toimivat ikään kuin rinnakkain ja molemmilla tuotetaan osa tarvittavasta lämpöenergiasta. Kylmäpuolikytkennässä aurinkolämpö puolestaan siirretään maalämpöjärjestelmän lämmönkeruupiiriin (kuva 1, kohta 1). Kuva 5A havainnollistaa kytkentää maalämpöpumpun kylmäpuolelle ja 5B kuumapuolelle. Kytkentä voi olla myös kylmä- ja kuumapuolikytkennän yhdistelmä. Tässä työssä keskitytään kylmäpuolikytkentään, sillä energiaa kaivoon varastoitaessa aurinkolämmön siirto tehdään juuri maalämpöjärjestelmän keruupiiriin. [16, s. 76–77]



**Kuva 5: Aurinko- ja maalämpöjärjestelmän kytkentävaihtoehdot: Kohta A kuvaa aurinkolämpöjärjestelmän kytkentää maalämpöpumpun kylmäpuolelle ja B kuumapuolelle.**

Aurinkolämpöjärjestelmän kytkentä maalämpöjärjestelmän kylmäpuolelle voidaan tehdä joko keruupiirin lähtevään tai palaavaan päähän. Lähtevään päähän kytketyssä järjestelmässä aurinkokeräimellä kerätään lämpöä ja se ohjataan venttiilin kautta määllämpöjärjestelmän lämmönkeruupiirin alkupäähän, jos keräimen lämpötila on suurempi kuin höyrystimeltä palaavan keruunesteen lämpötila. Kytkentä on esitetty kuvassa 6A. Tämä kytkentätapa mahdollistaa aurinkokeräimen keräämän lämpöenergian varastoinnin energiakaivoon. Kytkentä on helppo toteuttaa, sillä sitä varten tarvitaan vain yksi ylimääräinen venttiili. Mitä kylmempi lämpötila höyrystimeltä palaavalla keruunesteellä on, sitä parempi on aurinkokeräimen hyötysuhde. [16, s. 125–126]

Keruuputken palaavaan päähän kytketyssä järjestelmässä aurinkokeräin kytketään sarjaan energiakaivon perään. Kytkentä on esitetty kuvassa 6B. Tämä kytkentä mahdollistaa aurinkokeräimen käytön laajemmalla lämpötilavälillä, myös kun energiakaivosta palaavan nesteen lämpötila on lähellä nollaa. Kytkennällä saadaan kasvatettua lämmönkeruunesteen sisäänmenolämpötilaa lämpöpumppuun. [16, s. 126–128] Tämä kytkentätapa ei mahdollista lämmön suoraa lataamista energiakaivoon.



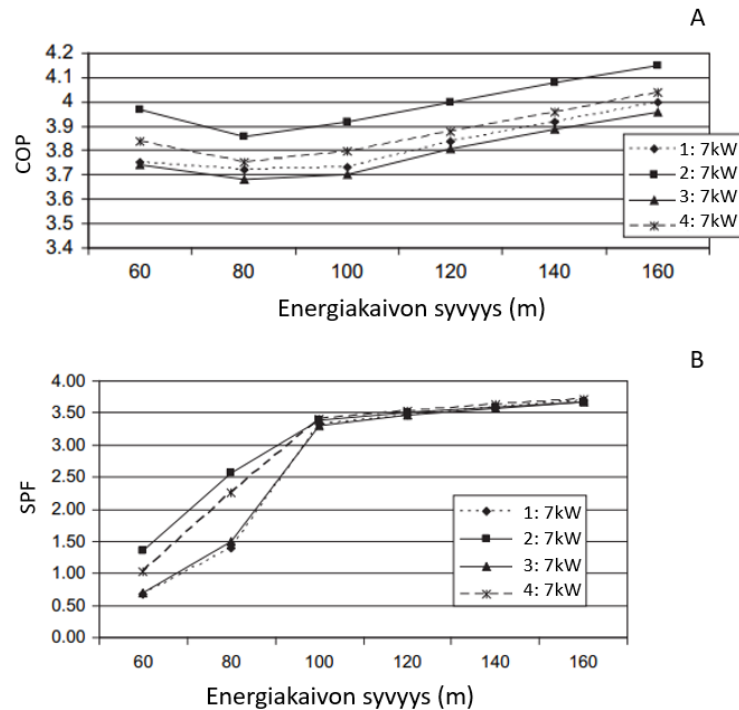
**Kuva 6: Kylmäpuolikytkennän eri muodot. A kohdassa aurinkokeräin on kytketty ennen energiakaivoa, jolloin energiaa voidaan varastoida kaivoon. B kohdassa aurinkokeräin on kytketty energiakaivon perään ennen lämpöpumppua, jolloin lämmönkeruunestettä saadaan lämmitettyä lisää. ☻ kuvaa pumppua ja ☒ venttiiliä. Perustuu lähteeseen [16, s. 126–127]**

Lämpöpumpun ja lämmönkeräinten väliin voidaan sijoittaa myös lämpövarasto, josta lämpö siirretään lämpöpumpulle. Jos energiaa on ylimäärin, sitä voidaan myös varastoida tästä välivarastosta energiakaivoon. [16, s. 126–128]

## 4.2 Hyödyt aurinkolämmön varastoisessa maalämpökaivoon

Lundin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa [17] tutkittiin erilaisten aurinko- ja maalämpöjärjestelmien kytkentätapoja ja vertailtiin niiden lämpötiloja höyrystimen sisäänmenossa sekä lämpöpumpun tehokerrointa. Maalämpökeräimenä toimi 60–100 metriä syvä porakaivo, aurinkokeräimenä pinta-alaltaan 10 m<sup>2</sup> tasokeräin. Lämpöpumpun teho oli 7 kW ja kohteen vuotuinen energiatarve 29400 kWh/vuosi. Eri kytkentävaihtoehtoina olivat maalämpöjärjestelmä ilman aurinkolämpöä (1), aurinkolämmön syöttö kokonaan maalämpökaivoon lämpöpumpun kautta (2), aurinkolämmön käyttö kokonaan käyttöveden lämmitykseen (3) ja yhdistelmä, jossa kesällä aurinkolämpö käytettiin kokonaan käyttöveden lämmitykseen ja talvella kokonaan energiakaivon lataamiseen lämpöpumpun kautta (4). Tutkimuksessa korkein höyrystimelle menevä lämpötila ja tehokerroin COP saatiin aikaan kytkennöillä 2 ja 4. Tästä voidaan päätellä, että energiakaivon lataaminen aurinkolämpöä kaivoon varastoimalla on kannattavaa. Kuvassa 7A on esitetty COP arvojen kehitys eri kytkentätavoilla porakaivon syvyyden funktiona.

Huomioitavaa kuitenkin on, että tehokerrointa COP laskettaessa ei oteta huomioon lisäenergiälähteiden ja tarvittavien pumppujen sähkönkulutusta, pelkästään kompressorin kuluttama sähköenergia. SPF-kerroin (Seasonal Performance Factor) kuvaa koko käyttökauden hyötysuhdetta ja se voidaan määrittää tehokertoimen COP tavoin sillä erotuksella, että huomioidaan kompressorin kuluttaman sähkötehon sijaan koko systeemin kuluttama sähköteho eli kompressorin, pumppujen ja lisäenergiälähteiden kulutus yhteensä. [17] Kuvassa 7B on esitetty SPF-kertoimen kehitys eri kytkentätavoilla kaivon syvyyden funktiona. Kuvasta huomataan, että SPF-kerroin ei parane juuri lainkaan aurinkolämmön varastoisesta energiakaivoon, kun kyseessä on yli 100 metriä syvä porakaivo. Matalammilla kaivoilla hyöty on kuitenkin selkeämpää.



**Kuva 7: Kuvassa 7A on esitetty maalämpöpumpun tehokerroin COP erilaisille aurinko- ja maalämmön kytkentävaihtoehdoille energiakaivon syvyyden funktiona. Kuvassa 7B vastaava esitys SPF-kertoimelle. Muokattu lähteestä [17, s. 5]**

Myös Bertman on päätenyt samankaltaisiin tuloksiin SPF-kertoimen muutoksista tutkimuksessaan, jossa vertailtiin maa- ja aurinkolämpöjärjestelmien eri kytkentätapoja [18]. Kylmäpuolen kytkentää edusti maalämpöjärjestelmä energiakaivolla, jonka kanssa sarjaan kytkettiin 15 m<sup>2</sup> kokoinen kattamaton aurinkokeräin. Mittausten perusteella SPF-kerroin ei parantunut syvillä energiakaivoilla verrattuna tilanteeseen, jossa maalämpöjärjestelmä toimi yksinään, mutta matalilla alle 80 metriä syvillä kaivoilla parannus aurinkolämmön varastoinnin seurauksena oli selkeä. Tutkimuksen mukaan vielä hieman parempiin tuloksiin päästään, jos aurinkokeräin kytketään maalämpöpiiriin suoran kytkennän sijaan glykolivaraston kautta.

Kaivon mitoitusta määrittää energiakaivon lämmönkeruunesteen sisäänmenolämpötilan alaraja, joilla suojataan materiaaleja vahingoilta. Säädökset vaihtelevat alueittain, ja monella alueella on käytössä absoluuttinen lämpötilaraja, joka voi olla esimerkiksi -3°C -1 °C. Jos lämpötilaraja alittuu, vaihtoehtoinen lämmitysmuoto voi korvata lämpöpumppua tarvittavan ajan. Kaivo tulisi mitoittaa siten, että lämpötilaraja ei alittuisi ainaakaan usein. Aurinkokeräimen kytkeminen maalämpöpiiriin kylmäpuolelle mahdollistaa minimisisäänmenolämpötilan nousun noin 1-2 °C:lla [16, s. 143]. Muutosta voidaan pitää vakiona koko kaivon mitalta. Bertmanin tutkimuksessa selvisi, että lämpötilan muutoksen

ansiosta energiakaivon syvyyttä voitiin lyhentää 10–20 % ilman merkittävää SPF-kertoimen laskua. [18] Myös toisessa Bertmanin simulaatiossa SPF-arvo ja kokonaissähkönkulutus pysyivät lähes samana energiakaivoa lyhennettäessä 110 metristä 90 metriin kun kaivon varastoiitiin kesäisin aurinkolämpöä 15 m<sup>2</sup> aurinkokeräimellä. [16, s. 156] Energiakaivon lyhentäminen mahdollistaa energiakaivojen hyödyntämisen yhä useammilla alueilla, esimerkiksi sellaisilla, jossa kaivon syvyyttä on rajoitettu pohjavesien suojelemiseksi.

Lundin yliopiston tutkimuksessa [17] systeemin 2 eli energiakaivoa lataavalla kytkennällä sähkönkulutusta saatiin pienennettyä selvästi matalilla, alle 100 metriä syvillä energiakaivoilla. Sähkönkulutus ei juuri pienentynyt tätä syvempien porakaivojen tapauksessa. Suurimmat säästöt saatiin aikaan kytkennällä 4, jossa energiakaivoa ladattiin talviaikaan. Siinä energiakaivo palautui kesällä luonnostaan hieman, kun kaivosta ei otettu energiaa. Tutkimuksen mukaan kesällä kaivon ladattu aurinkolämpö ei myöskään olisi säilynyt kaivossa seuraavaan talveen saakka eikä siitä olisi ollut hyötyä etenäkään oikein mitoitetuilla kaivoilla. Talvella kaivosta otetaan paljon lämpöä ja silloin aurinkolämmön varastointi kaivon on kannattavaa, erityisesti matalien ja alimitoitettujen kaivojen tapauksessa. [17] Aurinkolämmön varastointi kaivon on siis järkevää, jos halutaan nostaa kaivon lämpötilaa alimitoitettutilanteessa. Näin voi käydä esimerkiksi silloin, jos useat kaivot sijaitsevat lähekkäin, lämmitettävää rakennusta laajennetaan tai lämmitystarve muuten kasvaa.

Jos energiakaivot sijaitsevat lähellä toisiaan, ne ottavat lämpöä samasta maa-aineksesta ja vaikuttavat tällöin toistensa toimintaan laskemalla ympäröivän maaperän lämpötilaa. Aurinkolämmön lataamisesta maalämpökaivon onkin tutkitusti hyötyä tilanteissa, joissa energiakaivot sijaitsevat lähekkäin ja vaikuttavat toinen toisiinsa. Kylmempi lämmönlähde nimittäin johtaa lämpöpumpun huonompaan tehokkuuteen. Mitä enemmän kaivoja alueella on ja mitä lyhyemmät ovat niiden väliset etäisyydet, sitä suurempi on kaivojen vaikutus toistensa lämpötiloihin. [16, s. 7,58-59,156] Aurinkolämmön varastointi mahdollistaa vaikutusten minimoimisen ja kaivojen vapaamman sijoittelun.

Bertmanin esimerkkilaskennassa neljän kaivon sijaitessa 15 m etäisyydellä toisistaan ja niiden ollessa vähäisellä 65 kWh/m käytöllä, laskee niiden lämpötila toistensa vaikutuksesta noin 3–4 °C ajan kuluessa. Aurinkolämmöllä ladatuilla kaivoilla lämpötilanalenema on merkityksetön jopa hyvin pienillä kaivojen etäisyyksillä. [16, s. 225]

Energiakaivojen vaikutus toisiinsa tulee olemaan huomioitavaa, jos maalämpöpumput yleistyvät lämmitysmuotona myös taajaan asutuilla kaupunkialueilla. Lataamalla kaivoja aurinkolämmöllä, tai vaihtoehtoisesti jollain muulla lämmönlähteellä, voidaan ehkäistä

kaivojen viilenemistä runsaan kulutuksen ja lähellä olevien kaivojen vaikutuksesta. Aurinkolämpö on hyvä energialähdekaivon lataamiseen, sillä sillä voidaan tuottaa matalalämpötilaista lämpöenergiaa suhteellisen edullisesti.

Tavallisesti aurinkokeräimen hyötysuhde paranee, jos sen sisäänmenolämpötila laskee säteilyvoimakkuuden ja ulkolämpötilan pysyessä vakiona. Kylmäpuolikytkennässä, jossa aurinkokeräin on kytketty sarjaan ennen energiakaivoa (kuva 6A), aurinkokeräimen sisäänmenolämpötila on sama kuin lämpöpumpun höyrystimeltä poistuvan nesteen lämpötila. Höyrystimeltä poistuvan nesteen lämpötilan lasku tarkoittaa kuitenkin lämpöpumpun höyrystymislämpötilan laskua, mikä näkyy lämpöpumpun pienempänä COP-arvona. Kullekin systeemille on olemassa optimaalinen aurinkokeräimen sisäänmenolämpötila, joka vastaa parasta hyötysuhdetta ja tehokerrointa koko järjestelmän kannalta. [19]

### **4.3 Ongelmakohtat aurinkolämmön varastoisessa maalämpökaivoon**

Aurinkolämmön varastoisella maalämpökaivoon saavutettavien hyötyjen lisäksi ilmenee joitakin ongelmakohtia, joiden takia varastoiminen ei ole aina kannattavaa. Haitaksi voi tulla lämmönkeruunestettä kierrättävän pumpun sähkönkulutus, joka voi kasvaa suuremmaksi kuin kulutuksen säästöt lämpöpumpussa, jos latausta tehdään aina kun mahdollista. [17] Tällöin varastoisella ei saavuteta hyötyjä.

Aurinkolämmön varastoiminen maalämpökaivoon mahdollistaa matalampien energiakaivojen hyödyntämisen. Kuitenkin jos kaivoja alimitoitetaan ja kylminä talvipäivinä käytetään lämmityksen tukena sähköä sähköverkosta, voi se johtaa kalliisiin virtapiikkeihin verkossa. [18] Erityisesti kylmimpinä talvikuukausina voidaan joutua turvautumaan korvaavaan sähkölämmitykseen, mikä lisää kulutusta [16, s. 157]. Vuodenaikojen vaihtelut tuleekin ottaa huomioon lämmitysjärjestelmää mitoittaessa.

Aurinkolämpöjärjestelmän kytkeminen maalämpöjärjestelmän lisäksi ei ole ilmaista. Usein parantunut järjestelmän vakaus ja kaivon lyhennys eivät riitä kattamaan investointikustannuksia [18]. Etenkään oikein mitoitettujen kaivojen tapauksessa aurinkolämmön varastoisesta maalämpökaivoon ei tavallisesti saada investointikustannuksia kattavaa hyötyä. Alimitoitettujen kaivojen tapauksessa varastointi on kuitenkin usein kannattavaa. Pohjavesien virtaukset voivat kuljettaa lämpöä energiakaivon läheisyyteen ja nostaa kaivon lämpötilaa, mistä on hyötyä maalämpöpumpun toiminnalle. Virtaukset voivat kuitenkin

kin vaikuttaa haitallisesti aurinkolämmön varastointiin porakaivoon. Virtauksen ollessa voimakasta ne voivat kuljettaa varastoitua lämpöä pois kaivon lähiympäristöstä, eikä varastoinnista ole tällöin samanlaista hyötyä. [20]

Kun järjestelmässä on useita eri komponentteja ja lämpöä siirretään paljon, nousee ongelmaksi häviöiden ketjuuntuminen. Aurinkolämpöjärjestelmässä, maalämpöjärjestelmässä ja niiden välisessä lämmönsiirrossa syntyy kaikissa häviöitä. Tällöin järjestelmän kokonaishyötysuhde voi jäädä melko alhaiseksi.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Aurinkolämmön varastoisella maalämpökaivoon saavutetaan joitakin hyötyjä, mutta siihen liittyvät ongelmakohdat ovat kuitenkin niin merkittäviä, että käytännössä järjestely ei ole yleistynyt käyttöön laajassa mittakaavassa. Joissain tilanteissa varastointi on kuitenkin järkevää, ja parantaa lämmitysjärjestelmän tehokkuutta kokonaisuutena.

Aurinkolämmön varastoinnilla maalämpökaivoon saavutetaan parannusta maalämpöpumpun hyötysuhdetta kuvaavaan tehokertoimeen. Tutkimusten mukaan COP-kerroin paranee aurinkolämmön varastoimisen vaikutuksesta verrattuna tilanteeseen, jossa lämpöä ei varastoida energiakaivoon. COP-kertoimen laskennassa otetaan kuitenkin tavallisesti huomioon vain lämpöpumpun kompressorissa tapahtuva sähkönkulutus.

Jos COP-kertoimen sijaan tarkastellaan koko järjestelmän sähkökulutuksen huomioivaa SPF-kerrointa, aurinkolämmön varastoinnin tuoma parannus ei ole useinkaan merkittävä. SPF-kerroin paranee varastoinnin vaikutuksesta ainoastaan matalien, alimitoitettujen kaivojen tapauksessa. Maalämpöpumpun ja koko systeemin hyötysuhteen kannalta varastointi on siis järkevää tilanteissa, joissa energiakaivo on syystä tai toisesta energian tarpeeseen nähden liian matala. Oikein mitoitettun kaivon tapauksessa aurinkolämpöjärjestelmän kytkeminen maalämpöpumpun kuumapuolelle on kuitenkin järjestelmän tehokkuuden kannalta kylmäpuolikytkentää parempi vaihtoehto.

Varastoinnin vaikutukset aurinkokeräimen hyötysuhteeseen eivät ole aivan yksiselitteiset. Aurinkokeräimen hyötysuhde paranee, jos sen sisäänmenolämpötila laskee, kun keräimelle osuva säteilyvoimakkuus ja ulkolämpötila pysyvät vakioina. Kylmäpuolikytkennässä aurinkokeräimen sisäänmenolämpötila on lämpöpumpun höyrystimeltä poistuvan nesteen lämpötila. Höyrystimeltä poistuvan nesteen lämpötilan lasku tarkoittaa kuitenkin lämpöpumpun höyrystymislämpötilan laskua, mikä näkyy lämpöpumpun pienempänä COP-arvona. Kullekin systeemille on olemassa optimaalinen aurinkokeräimen sisäänmenolämpötila, joka vastaa parasta hyötysuhdetta koko järjestelmän kannalta.

Aurinkolämmön varastointi maalämpökaivoon mahdollistaa energiakaivon syvyyden lyhentämisen ilman merkittävää SPF-kertoimen laskua. Lyhennyksen suuruus vaihtelee järjestelmästä riippuen, esimerkiksi sen mukaan, minkä kokoiset aurinkokeräimet ovat käytössä ja kuinka suuri on kohteen energiantarve. Tutkimusten mukaan kaivosta voidaan varastoinnin avulla tehdä jopa 20 % matalampi verrattuna tilanteeseen, jossa lämpöä ei varastoida.

Matalampien kaivojen käyttö mahdollistaa energiakaivojen ja maalämmön hyödyntämisen yhä useammilla alueilla, esimerkiksi sellaisilla, jossa pohjavesiesiintymät rajoittavat kaivojen syvyyttä. Matalampi kaivo myös pienentää maalämpöjärjestelmän investointikustannuksia. Erityisesti Suomen oloissa vuodenaikojen ja tehontarpeen vaihtelu on kuitenkin otettava huomioon kaivoa mitoittaessa, sillä alimitoitettu kaivo voi johtaa kalliisiin virtapiikkeihin sähköverkosta erityisesti talvella, kun tehontarve on suuri ja auringosta saatava energia vähäistä.

Lisäksi lämmön varastointi maalämpökaivoon mahdollistaa kaivojen sijoittelun lähemmäs toisiaan. Varastointi vaimentaa kaivojen haitallista vaikutusta toistensa lämmönkeuruukenttiin. Tämä mahdollistaa energiakaivojen hyödyntämisen entistä paremmin myös taajaan asutuilla alueilla.

Aurinkolämpöjärjestelmän kytkeminen maalämpöjärjestelmän rinnalle ei ole ilmaista. Usein parantunut järjestelmän vakaus ja kaivon syvyyden lyhennys eivät riitä kattamaan investointikustannuksia. Tällöin aurinkolämmön varastoiminen maalämpökaivoon ei ole taloudellisesti järkevää. Myös järjestelmän käyttökustannukset voivat kasvaa, sillä sähkökulutus lisääntyy aurinkolämpöjärjestelmän myötä. Poikkeuksena ovat matalat, tehontarpeeseen nähden alimitoitettut kaivot, joiden kohdalla lämmön varastoinnin avulla saadaan usein aikaan sähkökulutuksen pienenemistä.

Vaikka aurinkolämmön varastoiminen maalämpökaivoon on monessa tilanteessa kannattamatonta, on siitä monia hyötyjäkin. Varastoinnin avulla voidaan tehostaa maalämpöjärjestelmän toimintaa alimitoitustilanteessa, jos esimerkiksi kohteen tehontarpeessa tapahtuu muutoksia tai energiakaivo on merkittävästi jäähtynyt ajan mittaan. Varastoinnin mahdollistamat matalammat energiakaivot ja kaivojen vapaampi sijoittelu lähemmäs toisiaan mahdollistaa maalämpökaivojen hyödyntämisen yhä laajemmin ja myös entisestään tiivistyvillä asuinalueilla. Aurinkolämmön varastoinnin avulla maalämpöjärjestelmät voivat yleistyä yhä laajemmin ja vahvistaa asemaansa yhtenä uusiutuvan energian tuottamisen kulmakivenä.

# LÄHDELUETTELO

- [1] "Directive (EU) 2018/ 2001 of the European Parliament and of The Council - of 11 December 2018 - on the promotion of the use of energy from renewable sources", s. 128.
- [2] R. Huttunen ja Energiaosasto, "Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030", 23. tammikuuta 2017. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79189> (viitattu 21. helmikuuta 2022).
- [3] J. Heinonen ja E. Sandberg, "Ilmastointiteknikka. Osa 1, Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille". Talotekniikka-Julkaisut, Helsinki, 2014.
- [4] "Maalämpöpiirin hyödyntäminen aurinkolämmön varastoinnissa", *Motiva*. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/maalampopiirin\\_hyodyntaminen\\_aurinkolammon\\_varastoinnissa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/maalampopiirin_hyodyntaminen_aurinkolammon_varastoinnissa) (viitattu 21. helmikuuta 2022).
- [5] T. Kakriainen, "Aurinko- ja maalämmön hybridijärjestelmä palvelutalossa", 2020, Viitattu: 21. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/122172>
- [6] J. Juvonen ja T. Lapinlampi, *Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*. Ympäristöministeriö, 2013. Viitattu: 21. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40953>
- [7] J. Säteri, "Lämmitys 2000: lämmitysjärjestelmien oikea käyttö ja kunnossapito". Suomen LVI-liitto, Helsinki, 1999.
- [8] Chartered Institution of Building Services Engineers, "Ground source heat pumps". CIBSE, London, 2013.
- [9] D. Banks, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. New York, United Kingdom: John Wiley & Sons, Incorporated, 2012. Viitattu: 9. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=922367>
- [10] B. Erat, "Aurinkoenergia Suomessa". Into, Helsinki, 2016.
- [11] "Aurinkolämpöjärjestelmät", *Motiva*. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat) (viitattu 2. maaliskuuta 2022).
- [12] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Second edition. Saint Louis: Elsevier Science & Technology, 2014.
- [13] M. E. Mackay, *Solar Energy : An Introduction*. Oxford: OUP Oxford, 2015.
- [14] R. K. McMordie, "Solar energy fundamentals: by Robert K. McMordie ; edited by Mitchel C. Brown, Robert S. Stoughton." Fairmont Press, Lilburn, GA, 2012.
- [15] F. Reda, *Solar Assisted Ground Source Heat Pump Solutions*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Viitattu: 4. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-49698-6>

- [16] E. Bertram, *Heat Pump Systems with Vertical Ground Heat Exchanger and Uncovered Solar Thermal Collectors - dynamic simulation, measurement and dimensioning*. Dortmund: Monsenstein und Vannerdat, 2015.
- [17] E. Kjellsson, G. Hellström, and B. Perers, "Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings", *Energy*, vol. 35, pp. 2667–2673, 2010.
- [18] E. Bertram, "Solar Assisted Heat Pump Systems with Ground Heat Exchanger – Simulation Studies", *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 505–514, 2014.
- [19] Y. Bi, T. Guo, L. Zhang and L. Chen, "Solar and ground source heat-pump system", *Appl. Energy*, vol. 78, pp. 231–245, 2004.
- [20] G. Hellström, "Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers", *Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology*, 1998.