



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TOMMI ERONEN
**KAUSILÄMPÖVARASTON KÄYTTÖ RAKENNUSTEN LÄMMI-
TYKSEEN JA JÄÄHDYTYKSEEN**

Diplomityö

Tarkastajat: Tohtori Henrik Tolvanen
ja Yliopistonlehtori Seppo Syrjälä
Tarkastajat ja aihe hyväksytyt
30.8.2017 Teknisten tieteiden tiede-
kunnassa

TIIVISTELMÄ

TOMMI ERONEN: Kausilämpövaraston käyttö rakennusten lämmitykseen ja jäähdytykseen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 72 sivua

Syyskuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Voimalaitostekniikka

Tarkastajat: Tohtori Henrik Tolvanen ja Yliopistonlehtori Seppo Syrjälä

Avainsanat: kausilämpövarasto, jäähdytys, lämmitys, aurinkokeräin

Kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteet ja kasvava kilpailu lämmityksen hinnasta on luonut tarpeen kehittää parempia ratkaisuja rakennusten lämmön- ja jäähdytyksentarpeen kattamiseksi. Tässä työssä on kuvattu simulointimalli, jonka avulla pystytään mitoittamaan kausilämpövarasto lämmitysjärjestelmään, jossa tuotetaan koko lämmöntarve aurinkolämmöllä. Kausilämpövarasto on suunniteltu niin, että sen avulla pystytään myös jäähdyttämään asuntoja kesällä.

Simulointimalli on luotu Comsol Multiphysics ohjelmistolla, jonka avulla kausilämpövaraston toimintaa pystytään tarkastelemaan. Esimerkkikohteena työssä käytettiin Tampereella sijaitsevan asunto-osakeyhtiön lämmönkäytön tuntimitattua dataa. Lämmöntuotantoon simulointimallissa käytettiin Tanskassa sijaitsevan aurinkolämpövoimalan tunneittain mitattua tuotantodataa. Kulutuksen ja tuotannon välinen ero joko säilöttiin tai käytettiin kausilämpövarastosta. Mitoitusehtona käytettiin säiliön yläpään lämpötilaa, joka ei saanut laskea normaalina vuotena alle 50 °C:n keväällä. Säiliön pohjakerroksen lämpötila ei myöskään saanut nousta yli 15 °C elokuun loppuun mennessä.

Simulointimallin herkkyyttä testattiin kaikkien tärkeimpien parametrin muutokselle useita kertoja ja tulokset tallennettiin Excel-tiedostoon. Tulokset muuttuivat kuitenkin oletettavalla tavalla parametreja muutettaessa. Työhön löytyi vertailukohteeksi vastaavalla lämmönkulutuksella oleva rakennus, joka lämmitettiin kokonaan aurinkolämmöllä. Kyseisessä järjestelmässä päädyttiin saman kokoiseen kausilämpövarastoon kuin tässä työssä.

Työssä saadut tulokset osoittavat, että tarkastellun asunto-osakeyhtiön lämmityksen ja jäähdytyksen tarve pystytään kattamaan kokonaan 356 m²:llä aurinkolämpökeräimiä, joiden ylituotanto kesällä ohjataan 1400 m³:n kausilämpövarastoon. Aurinkolämmöllä lämmitettävän kausilämpövaraston hintaa verrattiin maalämpöön ja kaukolämpöön. Aurinkolämpöjärjestelmän kausilämpövarastolle arvioitiin suurin kustannus, mitä se saisi maksaa kuutiometriltä, että päästäisiin samaan energian hintaan kaukolämmön kanssa 30 vuoden tarkastelujaksolla. Maksimihinnaksi saatiin 137 €/m³ 1400 m³ säiliölle.

ABSTRACT

TOMMI ERONEN: Design a seasonal thermal energy storage for building heating and cooling

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 72 pages

September 2017

Master's Degree in Mechanical Engineering

Major: Power Plant Technology

Examiners: Doctor of Science Henrik Tolvanen and University lecturer Seppo Syrjälä

Keywords: Seasonal thermal energy storage, cooling, heating, solar collector

Goals for lowering greenhouse gas emissions and growing competition for lowest thermal energy price has developed a need to create better solutions for covering heat load of buildings. In this master's thesis Simulation model is described for sizing seasonal thermal energy storage in heating system where whole energy need is covered by solar collectors. Seasonal thermal energy storage is designed in a way that apartments can be also cooled in summer.

The simulation model has been created by Comsol Multiphysics software. Theory of seasonal thermal energy storage can be tested by the simulation model. Hourly measured heat load data for the model is from condominium in Tampere. Heat production data is from Danish solar collector field and it's also hourly measured. Difference between production and consumption is either stored or used from the seasonal thermal energy storage. Minimum temperature of 50 °C on top of the storage in spring was used as design condition. Bottom layer of the storage was also designed to stay cooler than 15 °C to the end of august.

Sensitivity of simulation model was tested by changing all major parameters multiple times and results were saved to Excel file. The results changed in a presumable way when values of the parameters were changed. Solar heated building with similar heat load was found for a benchmark to simulation model. In this building same size seasonal thermal energy storage was used.

Results of this master's thesis conclude that examined condominium total heating and cooling load can be covered with 356 m² of solar collectors when overproduction in summer is saved in seasonal thermal energy storage that has volume of 1400 m³. Solar heated system price was compared to district heating and to ground source heat pump. Maximal investment cost was calculated for solar heated system that could compete with district heating in 30-year period. For 1400 m³ seasonal thermal energy storage specific cost should be under 137 €/m³.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Kemian ja Biotekniikan laitokselle sekä Kone- ja tuotantotekniikan laitokselle. Työ tehtiin pyynnöstäni, koska halusin tarkastella kausilämpövarastollisen aurinkolämpöjärjestelmän teknistaloudellisia mahdollisuuksia Suomessa. Haluaisin kiittää ohjaajiani Henrik Tolvasta ja Seppo Syrjälää hyvistä kommentteista työhön.

Tampereella 6.10.2016

Tommi Eronen

SISÄLLYSLUETTELO

LISTA KUVISTA JA TAULUKOISTA	VI
1. JOHDANTO	1
2. LÄMMÖN KAUSIVARASTOINNIN TEKNIIKAT	4
2.1 Lämmönsiirron muodot.....	4
2.2 Lämpötilaeroon perustuva kausilämpövarasto.....	6
2.2.1 Porakaivo	8
2.2.2 Vesisäiliö.....	8
2.3 Faasimuutokseen perustuva kausilämpövarasto.....	9
2.4 Kemialliseen reaktioon perustuva kausilämpövarasto	10
3. LÄMMÖN TUOTANTO KAUSILÄMPÖVARASTOON.....	11
3.1 Aurinkolämpökeräimet	11
3.1.1 Tyhjiöputkikeräimet.....	12
3.1.2 Tasokeräimet	13
3.1.3 Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon keräimet	15
3.1.4 Yhdistetty tasokeräin ja lämpövarasto	17
3.2 Jäähdytysveden tuotanto	18
3.3 CHP-laitokset	18
3.4 Maalämpöpumppu.....	19
4. LÄMMÖNJAKOLAITTEISTO	20
4.1 Kausilämpövaraston diffuusori	20
4.2 Lämmönvaihtimet	22
4.3 Vesikiertoiset kattosäteilypaneelit.....	23
4.4 Tuloilmapatteri	24
5. TYÖSSÄ TARKASTELTAVA KOHDE.....	27
5.1 Lämmönkulutus.....	27
5.2 Kausilämpövaraston rakennusmateriaali.....	29
5.2.1 Betoni	30
5.2.2 Ruostumaton teräs.....	30
5.2.3 Polymeerikalvo	30
5.2.4 Kohteeseen suunniteltu rakennusmateriaali.....	31
5.3 Suunnitelma kausilämpövarastollisen aurinkolämpöjärjestelmän rakentamisesta	31
5.3.1 Pohjaveden syvyyden tarkistus	31
5.3.2 Maaperänäytteen ottaminen	32
5.3.3 Rakennusmateriaalin valinta	32
5.3.4 Kuopan kaivaminen säiliölle.....	32
5.3.5 Säiliön rakentaminen.....	32
5.3.6 Säiliön tiiveyden tarkastaminen	33
5.3.7 Säiliön täyttäminen	34
5.3.8 Aurinkokeräimien asentaminen	35

5.3.9	Veden pumppausjärjestelmä	37
5.3.10	Aurinkokeräimien kiertovesipumppu	37
5.3.11	Lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppu	38
6.	JÄRJESTELMÄN MITOITTAMINEN	39
6.1	Simulointityökalu	39
6.1.1	Mallin geometria	40
6.1.2	Käytettävät materiaalit	42
6.1.3	Laskentaverkko	42
6.2	Säiliön geometria	43
6.3	Ratkaistava yhtälöryhmä	44
6.4	Herkkyysanalyysi	46
7.	SIMULOINTIMALLIN TULOKSET	47
7.1	Tilavuuden ja latauslämpötilan vaikutus	47
7.2	Rakennusmateriaalin vaikutus	51
7.3	Maan lämmönjohtavuuden vaikutus	51
7.4	Tulosten vertailu olemassa oleviin kohteisiin	55
8.	LASKUT	58
8.1	Kausilämpövaraston lämpöenergia	58
8.2	Aurinkolämpökeräimet	59
8.3	Lämmönkäytön jakautuminen	59
8.4	Jäädytys	60
8.5	Ilmanvaihto	61
9.	KUSTANNUSTEN ARVIOIMINEN	63
9.1	Kustannusten laskenta	63
9.2	Järjestelmän taloudellinen optimointi	65
9.3	Kustannusten vertailu muihin järjestelmiin	68
9.3.1	Kaukolämpö	68
9.3.2	Maalämpö	68
9.4	Tuet ja avustukset	71
10.	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET	74

LISTA KUVISTA JA TAULUKOISTA

Kuva 1. Lämpövaraston energiatiheys	7
Kuva 2. Tyhjiöputkikeräimen havainnekuva (Muhammad et al. 2016).....	12
Kuva 3. Tuhatta asukasta kohden kumulatiivinen asennettu aurinkolämpökapasiteetti (Mauthner et al. 2013).....	13
Kuva 4. Tasokeräin pienellä kaasunpaineella (Henshall et al. 2016).....	14
Kuva 5. Tyypillisen PVT-keräimen rakenne (Chow 2010).....	15
Kuva 6. Aurinkoa seuraavan ja kiinteään paneelin tuotannon erot kesällä ja talvella (Eke & Senturk 2012).....	16
Kuva 7. Yhdistetty lämpövarasto ja aurinkokeräin (Mohamad 1997)	17
Kuva 8. Prosessikaavio aurinkolämmöllä lämmitetyistä taloista (Schmidt et al. 2004).....	20
Kuva 9. Kausilämpövaraston diffuusorit, joista vettä tuodaan ja viedään lämmönvaihtimille.....	21
Kuva 10 Tyypillisen levylämmönsiirtimen periaatekuva (Ray et al. 2014).....	22
Kuva 11 Kattosäteilypaneeli ylhäältäpäin katsottuna (Lindab 2016)	23
Kuva 12 Rivoitettu vastavirtalämmönvaihdin (Horst et al. 2013)	24
Kuva 13. As. Oy Luhtavilla (Paikkatietoikkuna 2016)	27
Kuva 14. Lämpimän käyttöveden kulutuksen jakautuminen eri kuukausille (Ahmed et al. 2015).....	28
Kuva 15. As. Oy Luhtavillan kaukolämmön kulutus (Tampereen kaukolämpö 2015).....	29
Kuva 16. Veden tiheys lämpötilan funktiona	35
Kuva 17. Laskentamallista tehty 3D-kuva	41
Kuva 18. Laskentamallin geometria betonisäiliölle	41
Kuva 19. Kausilämpövaraston laskennassa käytetty laskentaverkko.....	43
Kuva 20. Lierion ulkopinta-ala tilavuuden funktiona	44
Kuva 21. Kausilämpövaraston yläkerroksen lämpötila ensimmäisen kolmen vuoden aikana	47
Kuva 22. Säiliön pohjakerroksen lämpötila ensimmäisen 3 vuoden aikana	48
Kuva 23. Säiliön pintakerroksen lämpötila 3 ensimmäisen vuoden aikana	49
Kuva 24. Maan lämpötila kaukana säiliöstä 1,5 m syvyydellä	49
Kuva 25. Aikasarja maan pintakerroksen lämpötilasta eri lämmönjohtavuuden arvoilla.....	50
Kuva 26. Kausilämpövaraston pohjakerroksen lämpötila ensimmäisen kolmen vuoden aikana	50
Kuva 27. Säiliön kyljen lämpöhäviö maan lämmönjohtavuuden arvolla 2 W/(mK).....	51
Kuva 28. Maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus säiliön kyljen lämpöhäviöön	52
Kuva 29. Säiliön yläpään lämpöhäviö eri maaperän lämmönjohtavuuden arvoilla.....	53
Kuva 30. Säiliön yläleikkauksen lämpötila eri maaperän lämmönjohtavuuksilla	54
Kuva 31. Kausilämpövaraston veden virtaussuunnan ja lämpötilan muutos.....	54

Kuva 32. Isotermittä kausilämpövarastossa toisen vuoden elokuun lopussa.....	55
Kuva 33. Omakotitalon kausilämpövaraston toiminta Kanadassa (Hugo & Zmeureanu 2012).....	56
Kuva 34. Veden massavirta tuloilmapatterissa ulkolämpötilan funktiona.....	61
Kuva 35. Savosolarin suuren keräimen hyötysuhdekäyrä (Savosolar 2016).....	66
Kuva 36. Eristemateriaalin kustannus eri kokoisille säiliölle	67
Kuva 37. Sähkön hinnan vaihtelua Suomessa 15 – 28.6.2016.....	69

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined heat and power - yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
GIF	Graphic interchange Format
LTO	Lämmöntalteenotto
PEVCD	Plasma enhanced chemical vapour deposition
PV	Photovoltaic
PVD	Physical vapor deposition
PVT	Photovoltaics thermal – yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon keräin
RH	Relative humidity – ilman suhteellinen kosteus
A	pinta-ala [m^2]
a_i	annuiteettitekijä [-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa [$kJ/(kg \cdot K)$]
E	energia [J]
E_a	vuodessa käytetty energia [J]
F	fluidiin vaikuttavien ulkoisten voimien vektori [N]
g	putoamiskiihtyvyys [m/s^2]
H	nostokorkeus [m]
h_f	faasimuutosentalpia [J/kg]
h_{kork}	huoneiston korkeus [m]
Δh	entalpiaero [J/kg]
I	yksikkö- eli identiteettimatriisi [-]
k	lämmönjohtavuus [$W/(m \cdot K)$]
L	paksuus [m]
m	massa [kg]
n_p	ilmanvaihtoluku [1/h]
T	lämpötila [$^{\circ}C$]
ΔT	lämpötilaero [$^{\circ}C$]
u	virtausnopeusvektori [m/s]
V	tilavuus [m^3]
Q	lämpömäärä [J]
Q_p	tilavuusvirta pumpussa [m^3/s]
q	lämpövirranvektori [W/m^2]
r	säde [m]
x	kaukolämpövaraston hinta [€]
ε	emissiviteetti [-]
μ	dynaaminen viskositeetti [$Pa \cdot s$]
σ	Stefan-Bolzmännin vakio [$W/(m^2 \cdot K^4)$]
ρ	tiheys [kg/m^3]
v	tilavuusvirta [m^3/s]
Φ	lämpövirta [W]
∇	vektori differentiaalioperaattori [-]
∇^2	Laplacen operaattori [-]
$\partial T/\partial t$	lämpötilan ensimmäinen osittaisderivaatta ajan suhteen [-]

1. JOHDANTO

Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä aiheutuu noin 18 % suomalaisten kasvihuonekaasupäästöistä (Heljo et al. 2003). EU-15 maissa lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotanto vastaa 84 % asuinrakennusten loppuenergiankäytöstä (Balaras et al. 2007). Päästöjen lisäksi lämmityksen aiheuttamia kustannuksia pyritään vähentämään. Eräs ratkaisu näihin ongelmiin voi olla aurinkolämpöjärjestelmä lämmön kausivarastolla. Tällaisesta ratkaisusta aiheutuu päästöjä ainoastaan komponenttien valmistamisesta ja purkamisesta sekä vettä kierrättävän pumpun sähköntuotannosta.

Jos halutaan tuottaa Suomen olosuhteissa lähes sata prosenttia rakennuksen lämpöenergian tarpeesta aurinkolämmöllä, on kausilämpövaraston tarve ilmeinen. Aurinkolämpökeräimien tuotantohuippu on kesällä, kun lämmityksen sekä lämpimän käyttöveden tarve on pienimmillään. Talvella vastaavasti lämpöenergian tarve on suurimmillaan ja lämmön tuotanto pienimmillään. Lämmön varastointiteknologioita on monia erityyppisiä. Eniten käytetty on kuitenkin veden lämpötilaeroon perustuva varasto, mitä tässäkin työssä tarkastellaan.

Veteen on helppo varastoida energiaa, koska vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti, halpa yksikköhinta eikä se ole myrkyllistä. Näistä syistä vaihtoehtoisilla materiaaleilla on energian varastoinnissa hyödynnettävä faasimuutosta tai kemiallista reaktiota, jotta päästään pienempiin kokonaiskustannuksiin kuin vedellä.

Aurinkokeräimillä lämmitettäviä kausilämpövarastoja on tällä hetkellä eniten Tanskassa. Maailman suurin aurinkolämpöjärjestelmä kausilämpövarastolla sijaitsee Vojensin kaupungissa. Kanadassa on aurinkolämmöllä ja kausilämpövarastolla lämmitetty asuinalue, jolla on päästy korkeimpaan aurinko-osuuteen tilojen lämmityksessä. Aurinkolämmöllä pystyttiin kattamaan viidentenä vuotena aloituksesta 97 % tilojen lämmityksen vaatimasta energiasta (Sibbitt et al. 2012).

Aurinkolämpöjärjestelmiä yleisesti oli vuoden 2014 loppuun mennessä asennettuna 410,2 GW edestä. Kiinassa aurinkokeräimien asennettu teho oli 289,5 GW ja Euroopassa 47,5 GW. (Melorose et al. 2015)

Tässä diplomityössä esitetään mitoitustyökalu aurinkolämmöllä lämmitettävälle kausilämpövarastolle, jossa pyritään 100 % aurinko-osuuteen lämpöenergian tarpeesta. Tavoitteena on tuottaa rakennuksiin lämpöenergiaa ja jäädytystä mahdollisimman pienillä kasvihuonekaasupäästöillä. Tästä johtuen sähköä pyritään käyttämään mahdollisimman vä-

hän energian tuottamiseen. Mallikohteena laskennassa käytetään Tampereen Mäyränmäessä sijaitsevan As. Oy Luhtavillan lämmönkäyttödataa. Kohde on mallinnettu kaukolämpöverkosta erillisenä järjestelmänä. Mitoitustyökalun avulla on tarkoitus saada selville vesitilavuuden ja aurinkokeräimien määrä järjestelmälle.

Suurin haaste kausilämpövarastollisen aurinkolämpöjärjestelmän toteuttamisessa aiheutuu materiaalien ja työn hinnasta. Vaikka järjestelmällä saataisiin pienimmät kasvihuonekaasupäästöt lämmitysenergiaa kohden, sen täytyy olla myös kustannustehokas. Tavoitteena on päästä samoihin tai pienempiin lämmityskustannuksiin kuin vastaavilla fossiiliin polttoaineisiin perustuvilla järjestelmillä. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteista on sovittu viimeksi Pariisin ilmastokokouksessa 2015. Fossiilisia polttoaineita käyttävillä järjestelmillä on myös se riski, että niiden muuttuvia kustannuksia ei pysty ennustamaan tulevaisuuteen. Työssä tarkasteltavalla järjestelmällä taas suurin riski on sitä varten otetun lainan koron kasvaminen. Lämmitysjärjestelmän kustannukset muodostavat kuitenkin ainoastaan pienen osan asunnon kokonaiskustannuksista.

Aurinkolämpöjärjestelmän kustannukset ovat kokonaan investointikustannuksia ja rakennusvaiheen jälkeen käyttö on lähes ilmaista. Investointikustannuksia voidaan pienentää vähentämällä lämpöenergian tarvetta per asukas ja liittämällä tarpeeksi monta asuntoa samaan järjestelmään. Kausilämpövarastosta saadaan aina suhteellisesti kustannustehokkaampi suurentamalla sen kokoa. Kustannustehokkuuden parantuminen johtuu siitä, että varaston lämpöhäviö tapahtuu säiliön ulkopinnan kautta. Aina, kun varaston tilavuus kaksinkertaistetaan, sen ulkopinta-ala kasvaa ainoastaan ~60 %. Käytettävän rakennusmateriaalin kustannukset vähenevät suhteellisesti ulkopinta-alan ja tilavuuden suhteen parantuessa. Rakentamisvaiheessa on monia töitä joiden hinta ei riipu järjestelmän koosta, jolloin näiden suhteellinen kustannus on pienempi suuremmassa järjestelmässä.

Jäähdytysjärjestelmät ovat yleistyneet rakennuksissa. Isaac & van Vuuren (2009) arvioi, että jäähdytyksen energiankäyttö olisi yhtä suuri lämmitysenergian käytön kanssa 2070-luvulla. Tällä hetkellä jäähdytysenergian käyttö on noin 3 % lämmitysenergian käytöstä. Jylhä et al. (2015) arvioivat, että Suomessakin lämmitykseen käytetty energia vähenee ja jäähdytykseen käytettävä energia kasvaa.

Tässä työssä esitetään kausilämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamiseksi kaksi uutta toimenpidettä, joita ei ole aiemmin yhdistetty aurinkolämpöjärjestelmiin. Työssä tarkastellaan mahdollisuutta jäähdyttää rakennuksia kausilämpövaraston pohjakerroksen kylmällä vedellä, joka on talven aikana jäähdytetty tuloilmapatterin avulla. Veden lisäjäähdytyksestä saadaan talvella enemmän lämpövirtaa, koska vesi on luovuttanut lämpönsä tuloilmaan. Toinen etu saadaan, kun kesällä rakennuksen jäähdytyksellä pystytään nostamaan veden lämpötilaa ennen sen pumppaamista aurinkolämpökeräimille.

Silloin, kun rakennuksessa on jäähdytyksen tarvetta, kausilämpövaraston pohjalta pumppattava vesi voidaan kierrättää sisäkatossa olevien kattosäteilypaneelien kautta ennen aurinkokeräimille menoa. Tällöin sähköä kuluu ainoastaan noin 20-50 W kiertovesipumppulla, kun taas kompressorikäyttöinen ilmastointi käyttää noin 600-850 W samankokoisen tilan jäähdyttämiseen. Tilojen lämpenemistä pyritään estämään passiivisesti aurinkolämpökeräimillä, jotka vähentävät rakennusta lämmittävää säteilykuormaa. Aurinkokeräimiä voidaan asentaa ikkunoiden yläpuolelle, jolloin niistä saadaan suurempi hyöty ympäri vuoden. Kesällä keräin estää suoraa säteilyä sisään, jolloin jäähdytyksen tarve on pienempi (Chou et al. 2016). Talvella pienessä kulmassa tuleva auringon säteily pääsee sisälle lämmittämään rakennusta.

2. LÄMMÖN KAUSIVARASTOINNIN TEKNIIKAT

Kolme seuraavaksi esitettävää lämmönvarastointiteknologiaa eroavat merkittävästi toisistaan molekyylitasolla tarkasteltuna. Käsitellyt tekniikat ovat lämpötilaero, faasimuutos ja kemiallinen reaktio. Lämpötilaeroon perustuvassa lämpövarastossa molekyyleillä on enemmän liike-energiaa kuumassa vedessä kuin kylmässä. Faasimuutokseen perustuvaa lämpövarastoa ladattaessa lämmön tuonnilla rikotaan materiaalin yhtenäinen kiderakenne, tähän joudutaan käyttämään lämpöä, joka saadaan takaisin kiderakenteen muodostuessa uudelleen. Kiderakenteen hajoaminen ja uudelleen muodostuminen on yksi esimerkki faasimuutoksesta. Kemialliseen reaktioon perustuvassa lämpövarastossa itse molekyylin sidoksia muutetaan. Tällaiseen kausilämpövarastoon etsitään ainepareja, joiden yhdistämisestä vapautuu lämpöä ja erottamiseen joudutaan käyttämään lämpöä.

Tässä työssä tarkastellaan kausilämpövarastoa, jossa energia varastoidaan lämmittämällä säiliön vettä. Tähän menetelmään päädyttiin, koska se on toistaiseksi luotettavin ja halvin kausilämpövarastointitekniikka. Kausilämpövaraston veden käytössä pyritään suurimpaan mahdolliseen jäähtymään. Tällöin voidaan saavuttaa parempi energiatiheys kuin parafiinin faasimuutoksella, joka on noin 26,4 kWh/m³ (Colella et al. 2012). Faasimuutosmateriaalien ollessa melko kalliita tämä johtaa jo lähes suoraan siihen, että veden lämpötilaeroon perustuva teknologia on näistä kahdesta halvempi ratkaisu. Kemialliseen reaktioon perustuvassa lämpövarastossa taas voi olla hyvin suuri tilavuuden energiatiheys, joten tämän tyyppinen kausilämpövarasto täytyy laskea tarkemmin kannattavuuden selvittämiseksi.

2.1 Lämmönsiirron muodot

Mitotettaessa aurinkolämmöllä lämmitettävää kausilämpövarastoa on käsiteltävänä kaikkia kolmea lämmönsiirron eri muotoa: johtumista, konvektiota ja säteilyä. Tapaus on ajasta riippuva eli transientti, koska aurinkolämmöntuotanto, lämmönkäyttö ja ulkolämpötila vaihtelevat suuresti eri vuodenaikoina. Tästä johtuen lämmönsiirto-ongelman ratkaiseminen kestää kauemmin kuin ajasta riippumattoman stationäärin tilanteen laskeminen.

Johtumista tapahtuu aurinkolämpökeräimen rakenteissa, lämmönsiirtonesteestä putkiin, kausilämpövaraston vedestä säiliön rakenteisiin ja säiliötä ympäröivässä maassa. Stationääriä johtumislämmönsiirtoa voidaan arvioida yhtälöstä (1):

$$\Phi = \frac{kA\Delta T}{L}, \quad (1)$$

missä Φ on lämpövirta [W], k on kappaleen lämmönjohtavuuden arvo [W/(m·K)], A on pinta-ala [m²], ΔT on lämpötilaero kappaleen yli [K] ja L on kappaleen paksuus [m]. Yhtälö (1) on voimassa 1-ulotteiselle tapaukselle. Nyt tarkasteltavassa tilanteessa on kuitenkin transientti johtuminen, jolloin kappaleen lämpeneminen täytyy huomioida. Yhtälöön täytyy lisätä aikariippuvuus, kappaleen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Tästä päästään muotoon, joka on esitetty yhtälössä (2):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0, \quad (2)$$

missä ρ on väliaineen tiheys [kg/m³], $\frac{\partial T}{\partial t}$ on lämpötilan osittaisderivaatta ajan suhteen [K/s], ja ∇T on lämpötilan muutos matkan suhteen [K/m]. Tämän työn lämmönsiirto-ongelmassa pakotettua konvektiota tapahtuu ilmassa ja vedessä luonnollista konvektiota. Konvektio aiheutuu, kun fluidin tiheys muuttuu lämpötilan muuttuessa. Konvektio syntyy fluidiin lämmön johtuessa siihen, ja tiheyseron synnyttyä fluidi lähtee liikkumaan putoamiskiihtyvyyden vaikutuksesta. Lähellä kausilämpövaraston seinämää vesi jäähtyy ja sen tiheys kasvaa, jolloin seinämää lähinnä oleva vesikerros lähtee virtaamaan alaspäin. Aurinkolämpökeräimien sisällä taas absorptiolevyä lähinnä oleva ilmakerros lämpenee muuta ilmaa kuumemmaksi ja lähtee nousemaan ylöspäin. Molemmissa tapauksissa tätä lämmönsiirron muotoa kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. Pakotettua konvektiota taas ilmenee aurinkolämpökeräimen ulkopinnalla, silloin kun ulkona tuulee.

Kaivettaessa kausilämpövarasto maan alle päästään pienempiin lämpöhäviöihin, koska säiliöstä pois johtunut lämpö ei lähde ilmapirtauksen mukana pois. Ympäröivä maa alkaa lämmentä lämpöhäviöstä, ja lämmennyt maa pienentää edelleen johtumista.

Säteilylämmönsiirto on lämmöntuonnissa tärkein muoto tässä järjestelmässä, koska auringosta tuleva säteily lämmittää aurinkolämpökeräintä. Lämpöhäviöiden kannalta säteily ei ole merkittävä, kun kausilämpövarasto on kaivettuna maan alle. Säteilylämmönsiirtohäviötä tapahtuu aurinkolämpökeräimen lasista ympäristöön, lämpökeräimen sisällä absorptiolevyistä lasiin sekä lämpökeräimen takalevystä ullakolle. Pinnan lähettämää säteilylämmönsiirtoa voidaan arvioida yhtälöstä (3), (Mills 1999):

$$q_{sät} = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3)$$

missä ε on pinnan emissiviteetti [-], σ on Stefan-Bolzmännin vakio $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴) ja T on pintalämpötila [K]. Yhtälöstä (3) nähdään, että pinnan lähettämä säteily lisääntyy hyvin voimakkaasti pinnanlämpötilan kasvaessa, koska lämmönsiirto on verrannollinen pinnan lämpötilan neljänteen potenssiin.

Säteilylämmönsiirto on summa pintaan tulevasta ja siitä lähtevästä säteilystä. Pintaan tuleva säteily taas lasketaan näkyvyyskertoimien ja ympäristöstä tulevan säteilyn avulla. Näkyvyyskertoimien määrittäminen on olennaista, kun optimoidaan keräimien asennuskulmaa.

Aurinkokeräimistä saataisiin paras tuotanto, jos keräin olisi aina kohtisuorassa kulmassa aurinkoon nähden. Tällöin näkyvyyskertoimen arvo on suurin. Aurinkopaneeleilla on parempi käyttää seurantaa, koska sähkökaapelia on helpompi taivuttaa kuin vesiputkea. Seurantalaitteistossa on kaksi sähkömoottoria, jotka kääntävät paneelia niin, että se on jatkuvasti kohtisuorassa aurinkoon nähden. Aurinkopaneeleilla seurannasta on talvella enemmän hyötyä aurinkoisena päivänä, koska paneelin hyötysuhde on talvella kylmässä ilmassa korkeampi kuin kesällä kuumassa (Du et al. 2016). Aurinkokeräimillä hyötysuhteen muutos taas on toisin päin. Aurinkokeräimen hyötysuhde laskee, kun ympäristön lämpötila laskee. Hyötysuhteen tippuminen johtuu kasvaneesta lämpöhäviöstä aurinkokeräimestä ympäristöön.

Käytettäessä lämpöä kausilämpövarastosta pääasiallinen lämmönsiirtomuoto on pakotettu konvektio vesivirrassa, millä päästään hyvin suureen tehotiheyteen. Lämmitettävä ja lämpöä luovuttava vesivirta tulee toisiaan vastaan lämmönvaihtimessa.

Voidaan siis arvioida, että merkittävin lämmönsiirron muoto on lämmöntuotannossa säteily, lämpöä käytettäessä pakotettu konvektio ja kausilämpövaraston lämpöhäviössä transientin johtumisen lämmönsiirto.

2.2 Lämpötilaeroon perustuva kausilämpövarasto

Yhden vesikuutiometrin varastoima lämpöenergia per lämpötilaero voidaan arvioida yhtälöstä (4):

$$E = mc_p(T)\Delta T = \rho(T)Vc_p(T)\Delta T, \quad (4)$$

missä m on veden massa [kg], $c_p(T)$ veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)], ΔT lämpötilaero vettä käytettäessä [°C], $\rho(T)$ on veden tiheys [kg/m³] ja V on kausilämpövaraston sisältämä vesitilavuus [m³]. Ominaislämpökapasiteetti ja tiheys ovat yhtälössä (4) lämpötilan funktioita.

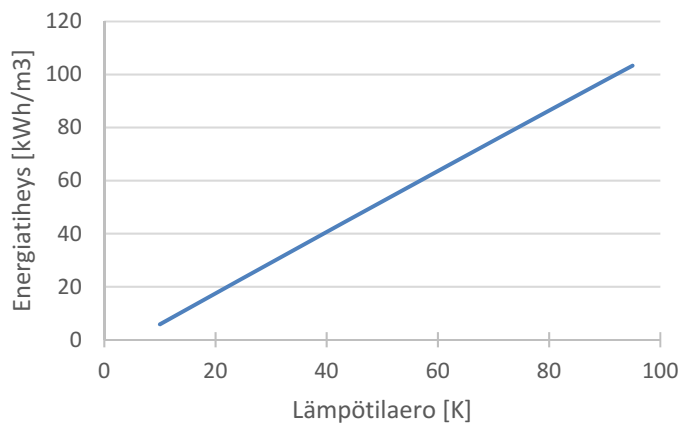
Jaetaan yhtälö (4) tilavuudella ja lämpötilaerolla, jolloin saadaan yhtälö (5):

$$\frac{E}{V\Delta T} = \rho c_p, \quad (5)$$

missä E on lämpövaraston sisältämä energia [J]. Lämpötilaero yhtälöön (5) saadaan varaston maksimilämpötilasta ja lämpötilasta, joka vedellä on lämmönvaihtimen jälkeen lämmitettäessä lattialämpöpiirin vettä tai lämpimän käyttöveden vettä. Lämpötilaeroa voidaan yrittää kasvattaa jäädyttämällä vettä edelleen tuloilmapatterissa, jos ulkoilman lämpötila on pienempi kuin veden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen. Varaston maksimilämpötila on noin 95 °C ja alhaisin lämpötila tuloilmapatterin jälkeen noin 5 °C . Lämpötilaeroksi saadaan siis 90 °C , jolloin yhtälöstä (6) saadaan:

$$\frac{E}{V} \approx 371 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \approx 103 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}. \quad (6)$$

Tähän energiatiheyteen päästään suurimmalla lämpötilaerolla. Jos varaston korkeimman kohdan lämpötila laskee ja samalla veden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen on korkeampi, voi lämpötilaero jäädä paljon pienemmäksi. Lämpövaraston energiatiheys lämpötilaeron funktiona on esitetty kuvassa 1. Lämpökapasiteetin ja tiheyden arvot ovat otettu jokaiseen pisteeseen niitä kuvaavilla funktioilla. Kuvassa 1 kylmä lämpötila on koko ajan 5 °C ja korkeampaa lämpötilaa kasvatetaan.



Kuva 1. Lämpövaraston energiatiheys

Kuvasta 1 nähdään, että energiatiheys on miltei lineaarinen lämpötilaeron suhteen, joten alkupisteen lämpötilalla ei juuri ole merkitystä. Lineaarisuus johtuu siitä, että ominaislämpökapasiteetti ja tiheys eivät muutu paljon tällä välillä.

Vertailtaessa kausilämpövarastointitekniikoiden hyviä ja huonoja puolia, veden lämpötilaeroon peruvalla kausilämpövarastolla on eniten tilavuutta, mutta sen käyttämä materiaali on hyvin halpa ja luotettava käytössä. Nämä seikat johtavat siihen, että edelleen halvin tapa varastoida lämpöä on lämmittää vettä suuressa säiliössä.

2.2.1 Porakaivo

Aurinkokeräimien tuottamaa lämpöä voidaan varastoita suoraan maahan porattuihin kairoihin. Järjestelmä voi toimia maalämpöpumpun kanssa tai ilman.

Sibbitt et al. (2012) tutkivat Kanadassa järjestelmää, jossa 52 omakotitaloa lämmitettiin porakaivojärjestelmällä, johon ylimääräistä aurinkolämpöä varastoitiin. He eivät käyttäneet maalämpöpumppua vaan kesällä lämmitettiin noin 34 000 m³ maata aurinkolämpökeräimillä, joita oli asennettu autotallin katolle 2293 m². Porakaivojen lisäksi järjestelmässä oli kuuma- ja kylmävesisäiliö, joiden yhteistilavuus oli 240 m³. Porakaivossa on 144 kappaletta 35 metriä syviä reikiä, joissa on 6 putkea sarjassa ja 24 rinnakkaista putkistoa. Järjestelmällä päästiin 97 % aurinko-osuuteen tilojen lämmityksessä viidentenä vuotena toiminnan alkamisesta. Jokaisen talon katolla on erillinen lämpimän käyttöveden tuotantojärjestelmä, johon on suunniteltu 50 % aurinko-osuus ja loput tuotetaan kaasulämmittimellä. (Sibbitt et al. 2012)

Vaikka Sibbittin tutkimusryhmän esittelemässä järjestelmässä päästään korkeaan aurinko-osuuteen tilojen lämmityksessä niin lämpimän käyttöveden tuotannossa se jää suhteellisen pieneksi. Huonompi lämpimän käyttöveden tuotanto johtuu siitä, että maahan varastoitaessa lämpöä lämmönjohtavuus putkistosta maahan on alhaisempi kuin veteen ja maan ominaislämpökapasiteetti on pienempi kuin vedellä. Maan lämpötilan pitäisi olla selvästi yli 60 °C, että lämmintä käyttövettä voitaisiin tuottaa ilman lämpöpumppua.

Uusissa rakennuksissa Suomessa lämpimän käyttöveden tuotannon kuluttama energia korostuu jatkuvasti, koska lisäeristyksellä on saatu tilojen lämmityksen vaatimaa energiaa pienemmäksi. Lämpimän käyttöveden energian kulutusta voitaisiin pienentää asentamalla lämmöntalteenotolla varustettu suihkukaappi (McNabola & Shields 2013). Jos lämpimän käyttöveden osuus on merkittävä kokonaisenergian käytöstä, porakaivoista saadaan ilman lämpöpumppua pienempi osuus lämpöenergiasta kuin vesisäiliöön perustuvalla kausilämpövarastolla.

2.2.2 Vesisäiliö

Varastoitaessa aurinkolämpökeräimien tuotantoa vedellä täytettyyn säiliöön, päästään eroon porakaivon lämmönsiirtoputkiston pienen lämmönjohtumisen ongelmasta. Vesi voidaan syöttää suoraan säilöön, jolloin erillistä lämmönvaihdinta ei tarvita. Vesisäiliössä tarvitaan kuitenkin diffuusori, joka hidastaa virtausnopeuden suuttimissa ja syöttää veden oikean lämpöiseen kerrokseen.

Jotta vesisäiliöllä päästään parempaan tulokseen taloudellisesti kuin porakaivolla, on suuremman aurinko-osuuden katettava korkeammat kustannukset, jotka aiheutuvat säiliön rakentamisesta.

Kaukolämpövarastona käytettäviä vesisäiliötä voidaan tehdä moneen eri muotoon. Tässä työssä laskettiin erilaisia lieriöitä sekä maata vasten tehtäviä polymeerikalvosäiliöitä. Rakennettaessa kausilämpövarastoa polymeerikalvolla joudutaan käyttämään muotoa, jossa maavallit ovat noin 45° kulmassa. Jos käytettäisiin jyrkempää seinämää olisi korkeampi vaara sortumiselle.

2.3 Faasimuutokseen perustuva kausilämpövarasto

Kausilämpövaraston materiaalina voidaan käyttää myös materiaalia, joka muuttaa olo-
muotoaan lataus- ja purkusyklin aikana. Faasimuutos voi olla kiinteästä nesteeksi tai nesteestä kaasuksi. Jälkimmäisen kanssa ongelmaksi muodostuu suuri tilavuuden muutos.

Suurin osa varastoitavasta energiasta tulee tässä tapauksessa faasimuutoksesta ja se voidaan laskea yhtälön (7) mukaan:

$$E = h_f m + mc_p \Delta T, \quad (7)$$

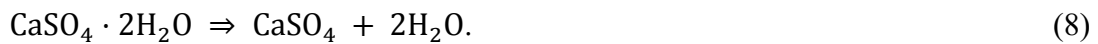
missä $mc_p \Delta T$ ottaa huomioon materiaalin lämpötilan muutoksen. Termi h_f vastaa materiaalin faasimuutosentalpiaa [J/kg]. Työssä tarkasteltavaan kausilämpövarastoon hyvän faasimuutosmateriaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat suuri faasimuutosentalpia, halpa hinta, myrkyttömyys ja useiden lataus-purku-sykliden kesto. Nämä kriteerit ovat hankala täyttää. Ongelmana faasimuutosmateriaaleilla on niiden hinnan ja faasimuutosentalpian suhde veteen nähden. Veden veroton hinta Tampereella on 1,15 €/t (Tampereen vesilaitos 2016). Eräs tutkittu faasimuutosmateriaali on $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, jonka hinta on noin 2670 €/t ja faasimuutosentalpia 167 – 175 kJ/kg (Kenisarin & Mahkamov 2007). Vastaava energiatiheys saavutettaisiin siis vesivarastolla, jossa lämpötilaero olisi 41 °C. Tämä on kuitenkin helppo saavuttaa ja $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$:n hinnan ollessa noin 2600 kertaa suurempi kuin veden, tämän faasimuutosmateriaalin käyttö ei ole kilpailukykyistä. Jos tehdään pieni kausilämpövarasto voi faasimuutokseen perustuva tekniikka olla kilpailukykyinen vesisäiliön kanssa, koska säiliön koon pienentyessä sen suhteellinen lämpöhäviö kasvaa, jolloin vesisäiliöön joudutaan laittamaan paljon tilavuutta lämpöhäviötä kompensoimaan.

Rezaei et al. (2013) tutkivat faasimuutosmateriaalien soveltuvuutta lämmitysjärjestelmiin. Parhaimmaksi aineeksi heidän materiaaleista osoittautui A58, jonka kemiallista koostumusta ei kerrottu. Materiaalin sulamispiste on 58°C lämpötilassa, mikä on optimaalinen lämpimän käyttöveden tuotannolle. Materiaalilla oli hyvä faasimuutoksen entalpia 132 kJ/kg. Kyseistä materiaalia käytettiin näistä syistä edustamaan faasimuutosmateriaalia tässä työssä.

2.4 Kemialliseen reaktioon perustuva kausilämpövarasto

Kolmesta vertailtavasta tekniikasta pienimpään säiliön tilavuuteen päästäisiin hyödyntämällä kemiallista reaktiota, koska tällä tekniikalla voidaan saavuttaa suurin energiatiheys. Lämpöhäviöt ympäristöön olisivat merkityksettömät, koska materiaalit voidaan säilöä ympäristön lämpötilassa, jolloin lämpöhäviötä tulee ainoastaan reaktion aikana säiliöstä.

Aurinkolämmöllä ladattavaan kausilämpövarastoon etsitään materiaalia, joka pystytään lataamaan noin sadan asteen lämpötilassa. Eräs tällainen materiaali on kalsiumsulfaatti-dihydraatti, joka voidaan ladata 89 °C lämpötilassa ja johon pystytään sitomaan noin 388 kWh/m³ lämpöenergiaa (Pinel et al. 2011). Tämä on noin 4 kertaa enemmän kuin vedellä vastaava arvo. Tapahtuva kemiallinen reaktio ladattaessa on reaktioyhtälön (8) mukainen:



Varastoa purettaessa vesi sekoitetaan uudestaan kalsiumsulfaatin kanssa ja lämpöenergiaa vapautuu eksotermisessä reaktiossa.

Valittavalle aineparille pätee lähes samat valintakriteerit kuin faasimuutoslämpövaraston kanssa, mutta tässä etsitään aineita, joilla on suuri reaktioentalpia. Näillä materiaaleilla täytyy myös huomioida kemiallisen reaktion nopeus. Tulevaisuudessa lämmön kausivarastointi voi perustua kemialliseen reaktioon, koska varastointisäiliön tilavuus voi olla merkittävästi pienempi kuin muilla tekniikoilla.

3. LÄMMÖN TUOTANTO KAUSILÄMPÖVARASTOON

Kausilämpövarastoa kannattaa ladata ylijäämälämmöllä tai lämmöllä, jota on saatavilla ainoastaan osan aikaa vuodesta. Aurinkolämpöä käytetään laajasti maailmassa lämpimän käyttöveden tuotantoon kesällä, mutta rakennusten lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotanto talvella vaativat kausilämpövaraston useimmissa tapauksissa. Jos kausilämpövarastolla on tarkoitus jäähdyttää rakennuksia kesällä, talvella voidaan tuottaa kylmää vettä lämpövarastoon. Tuloilmapatterilla voidaan myös jäähdyttää lattialämpöpiiriltä tai kattosäteilijöiltä tulevaa vettä edelleen kylmemmäksi. Tällä saavutettaisiin useita etuja. Tuloilmaa saataisiin lämmitettyä ennen lämmöntalteenottoa (LTO), joka vähentää jäätymistä. Lämmityspaneelija tarvittaisiin vähemmän asuntoihin, jos osa lämmöstä tuodaan jo tuloilmakanavassa. Lämpövaraston energia kasvaa lineaarisesti, jos lämpötilaeroa saadaan kasvatettua. Talvella tuotetulla kylmällä vedellä voidaan jäähdyttää asuntoja, kun kylmä vesi pumpataan säiliön pohjalta asuntojen kattosäteilijöihin lämpenemään ja tämän jälkeen aurinkolämpökeräimelle. Vastaavat lämmitys- ja jäähdytysenergiat pystytään tuottamaan rakennukseen lämpöpumpulla, mutta tässä työssä etsitään vaihtoehtoa, jolla on vielä pienemmät kasvihuonekaasupäästöt.

Tässä työssä tarkastellaan järjestelmää, joka mitoitetaan kattamaan lähes 100 % kohteen lämmöntarpeesta normaalina vuotena. Tällä tavalla vältetään toisen lämmitysjärjestelmän kustannuksilta. Nyt tarkasteltavan kohteen varajärjestelmänä toimivat sähkövastukset, joilla lämmitettäisiin vettä ainoastaan muutama aste, jos lämpövaraston vesi on jäähtynyt oletettua enemmän. Jos aurinkolämpöjärjestelmä mitoitettaisiin kattamaan ainoastaan 50 % lämmöntarpeesta, jouduttaisiin käyttämään huomattavan paljon rahaa rinnakkaiseen järjestelmään. Tanskassa on nähtävissä sama suuntaus järjestelmien kehityksessä, jossa tavoitellaan yhä suurempaa aurinko-osuutta (Trier 2015).

3.1 Aurinkolämpökeräimet

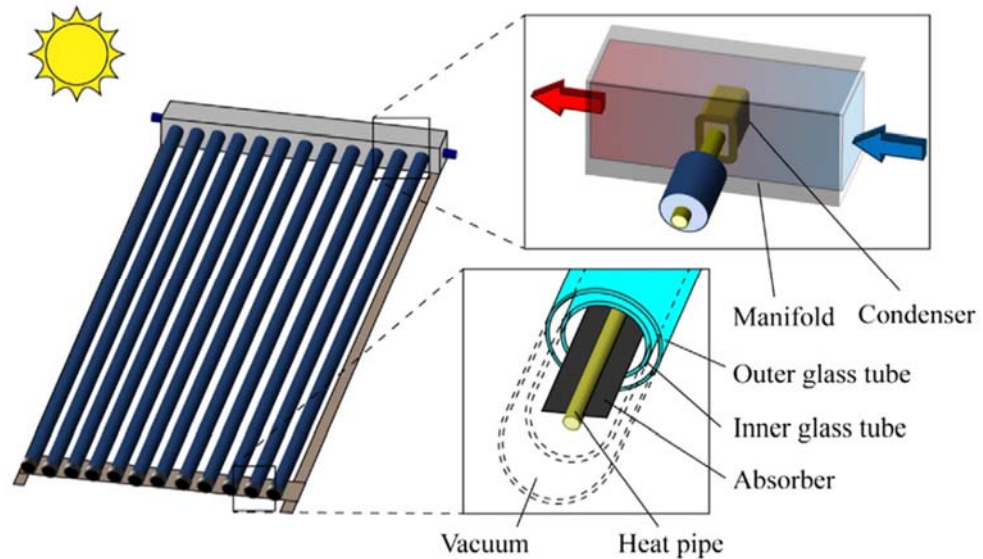
Suurin osa kausilämpövarastoista ladataan kesän aikana aurinkolämpökeräimillä. Nykyään on valittavana kahden tyyppisiä keräimiä. Suurissa järjestelmissä käytetään useimmiten tasokeräimiä ja pienemmissä kohteissa tyhjiöputkikeräimiä.

Aurinkokeräin on yksinkertainen laite, jossa auringon säteily lämmittää mustaa levyä, joka edelleen lämmittää vettä. Aurinkokeräimellä päästään tyypillisesti noin 650 W lämpövirtaan per neliometri korkeimman säteilytehon aikaan. Suurissa aurinkolämpövoimailoissa voidaan päästä alle 200 €/m² asennetun lämpökeräimen hintaan (Epp 2014). Tällöin yhden watin hinnaksi voidaan laskea 0,3 €.

3.1.1 Tyhjiöputkikeräimet

Tyhjiöputkikeräimessä on lämpöputki, jossa työaine höyrystyy putken alapäässä aurin-
gonsäteilyn vaikutuksesta. Työaine lauhdutetaan putken yläpäässä pienemmässä lämpö-
tilassa, missä energia siirtyy lämmitettävään vesivirtaukseen. Höyrystettäessä ja lauhdut-
taessa työainetta lämmönsiirto on tehokasta pinta-alayksikköä kohden.

Tyhjiöputkikeräimen rakenne on esitetty kuvassa 2:

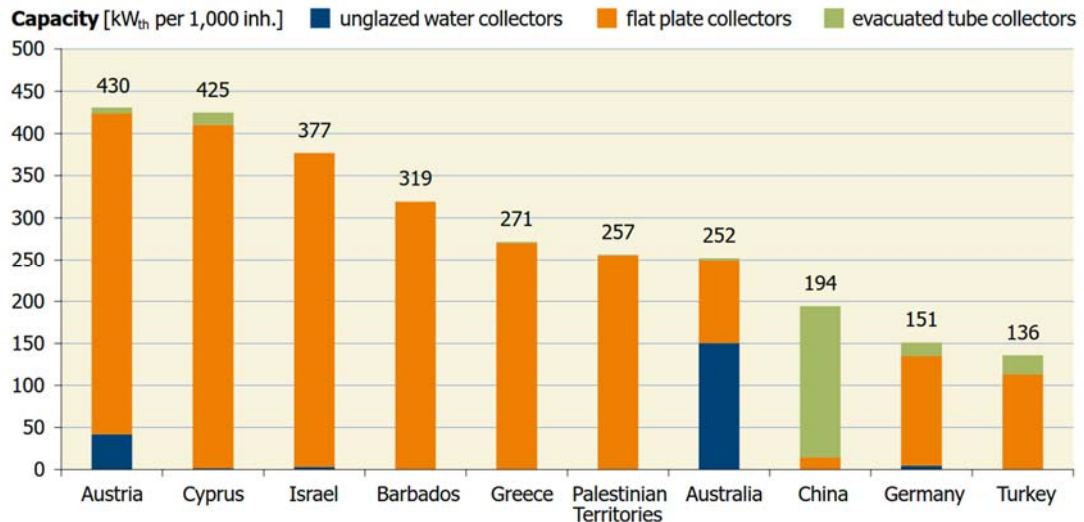


Kuva 2. Tyhjiöputkikeräimen havainnekuva (Muhammad et al. 2016).

Kuvassa 2 ulomman ja sisemmän lasiputken välistä on pumpattu ilmaa pois. Lasiputken pyöreä muoto kestää paremmin paineen, joka pyrkii painamaan putken kasaan. Vastaava alipaine ympäristöön nähden rikkoisi tukemattoman tasokeräimen lasin, koska tasomainen muoto kestää painetta huonommin.

Tyhjiöputkikeräimen pienempi lämpöhäviö ympäristöön korkeilla lämpötiloilla saadaan aikaan alhaisella kaasunpaineella lasiputkessa. Tällöin luonnollinen konvektio on tehotonta putkessa, koska lämmönsiirtoainetta on hyvin vähän. Absorptiopinnan emissiviteetti pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi putken pinnankarheutta pienentämällä (Nakar & Feuermann 2016).

Kiinassa tyhjiöputkikeräimien osuus 2011 asennetuista keräimistä on yli 90 % (Mauthner et al. 2013). Kuvassa 3 on esitetty maita, joissa on eniten asennettua kapasiteettia aurinkolämpökeräimiä.



Kuva 3. Tuhatta asukasta kohden kumulatiivinen asennettu aurinkolämpökapasiteetti (Mauthner et al. 2013)

Kuvasta 3 nähdään, että Kiina erottuu selvästi joukosta suurella tyhjiöputkikeräimien osuudella. Syy tähän on tyhjiöputkikeräimien halpa hinta Kiinassa (Qiu et al. 2015). Kiinassa suoran auringonpaisteen määrä on vähentynyt monissa paikoissa ilmansaasteiden suuren määrän takia. Tyhjiöputkikeräin toimii paremmin muuttuvissa olosuhteissa kuten hajasäteilyn aikana (Zambolin & Del Col 2010). Tämä voi selittää osittain tyhjiöputkikeräimien suuren määrän Kiinassa. Australiassa suuri lasittomien keräimien osuus selittyy korkealla ympäristön lämpötilalla, jolloin keräimiä ei tarvitse eristää yhtä hyvin.

3.1.2 Tasokeräimet

Tasokeräimissä lämmitettävä vesi virtaa suoraan keräimen pienissä kanavissa. Tasokeräimistä on tyypillisesti suurempi lämpöhäviö ympäristöön varsinkin talvella. Etuna on keräimen halvemmat valmistuskustannukset.

Tällä hetkellä (5/2016) maailmassa eniten yhteen paikkaan tasokeräimiä on asennettu Tanskassa Vojensin kaupungissa. Vojensissa on 70 000 m² tasokeräimiä lämmittämässä kausilämpövarastoa, jonka vesitilavuus on noin 203 000 m³. (Groth et al. 2016) Lämpöä käyttää noin 2000 kiinteistöä Vojensin kaukolämpöverkosta. Aurinkolämpökeräimet on asennettu käyttämättömälle pellolle.

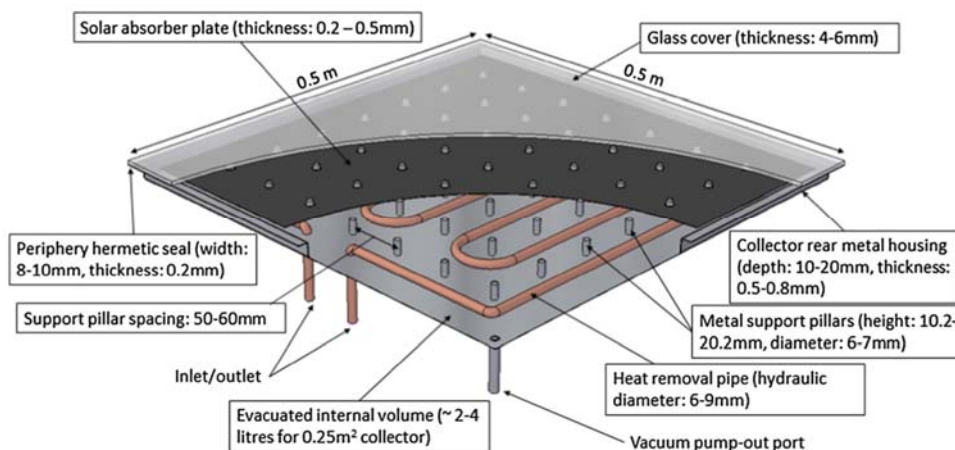
Suomessa Savosolar Oy valmistaa tasokeräintä, jolla on maailmanennätys hyötysuhde. Lämpötilaeron ollessa nolla keräimen hyötysuhde on noin 90 %. Noin 10 % säteilyä heijastuu siis pois, kun lämpöhäviöitä ei ole. Kun lämpötilaero keräimen keskilämpötilan ja ympäristön lämpötilan välillä on 60 °C niin hyötysuhde on noin 40 %. (Savosolar 2016) Hyötysuhde on esitetty tarkemmin kuvassa 35. Hyötysuhde mitataan suoralla säteilyllä, jonka intensiteetti on 1000 W/m². Savosolarin aurinkokeräin eroaa tyypillisistä tasokeräi-

mistä siinä, että koko keräimen alalla kulkee lämmitettävää vettä pienissä kanavissa. Tyyppillisessä tasokeräimessä keräinalalla oli vain muutamia kupariputkia juotettuna tai hitsattuna keräinlevyyn.

Savosolarin tasokeräimen pinnoite on hyvin säteilyä absorboivaa materiaalia. Se on valmistettu PVD (Physical vapor deposition) ja PEVCD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) tekniikoilla. Näissä tekniikoissa kappale pinnoitetaan korkeassa alipaineessa, jolloin saadaan puhdas ja tiivis pinnoite. PEVCD tekniikassa pinnalla tapahtuu myös kemiallinen reaktio (Vuoristo 2016).

Savosolar Oy:n tasokeräimillä on hyvän lämmönsiirron ja pinnoitteen ansiosta korkea vuosituotanto, joka on noin 500 kWh/m² Etelä-Suomessa. Tehtaalla on kasattu 15,2 m² yksikkö, jossa on yhdessä 4 keräintä. Tällöin asennus on nopeaa. (Savosolar 2016)

Ehrmann & Reineke-Koch (2012) tutki tasokeräimiä, joihin oli asennettu kaksikerros lasi ja sisemmän lasin pintaan emissiviteettiä pienentävä pinnoitus. Lasien välissä oli ilman ja argonin seos vähentämässä lämpöhäviötä. He onnistuivat kehittämään keräimen, jolla oli parempi hyötysuhde korkeammilla lämpötiloilla tai pienellä auringon säteilyllä. Käyttötarkoitukseen sopivaa pinnoitettua lasia ei ollut kaupallisesti saatavilla, mutta sellainen pinnoitusmenetelmä kehitettiin tutkimuksessa onnistuneesti. Kuvassa 4 on esitetty Henshall et al. (2016) tutkimus tasokeräin, jonka sisällä on pieni kaasunpaine.

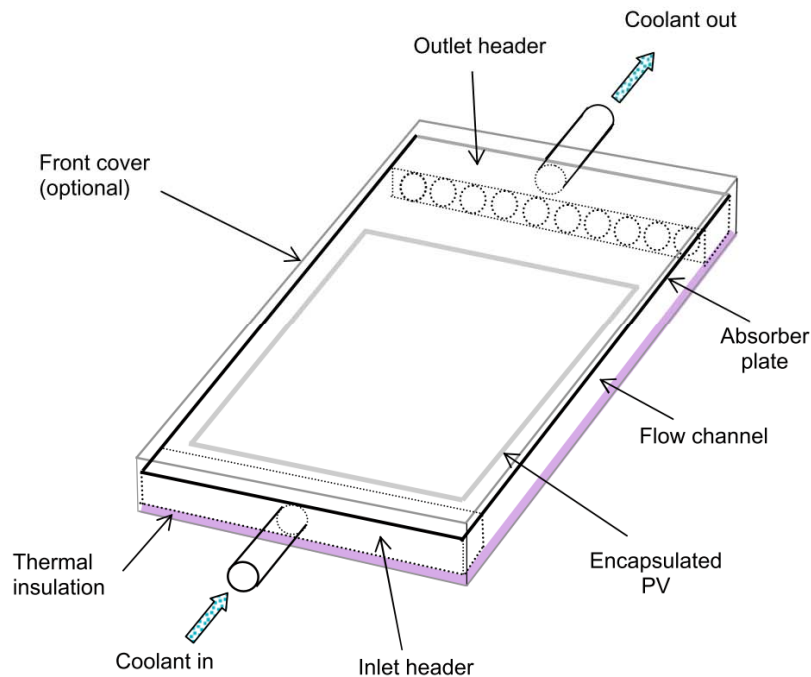


Kuva 4. Tasokeräin pienellä kaasunpaineella (Henshall et al. 2016)

Kuvassa 4 esitetyn tasokeräimen lämpöhäviön vähentämisen idea on sama kuin tyhjiöputkikeräimessä, mutta tässä sama on pyritty toteuttamaan tasokeräimellä. Lasia on tuke massassa metalliset pilarit, koska ympäristön paine pyrkii painamaan lasin kasaan. Tämän tyyppisellä keräimellä päästäisiin parempaan tuotantoon kylmemmässä ilmassa, kuin normaalilla tasokeräimellä, koska keräimen sisällä konvektio on vähäistä. Erona tyhjiöputkikeräimeen on tasainen etulasi, joka on halvempaa kuin putken muotoon tehty lasi.

3.1.3 Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon keräimet

Photovoltaic thermal PVT-keräimillä voidaan tuottaa samalla paneelilla sähköä ja lämpöä. Tuotettua tasavirtaa voidaan hyödyntää järjestelmän kiertovesipumpussa suoraan, joka tarvitsisi samaan aikaan sähköä, kun PVT-keräin tuottaisi. Aurinkolämpöjärjestelmissä keräimiä on monesti kytketty sarjaan. PVT-keräimet kannattaa asentaa ensimmäiseksi keräimiksi, jolloin kausilämpövaraston kylmä vesi tulee. Vettä kannattaa lämmittää mahdollisimman vähän näissä keräimissä. PVT-keräimen läpi tulee olla suurempi tilavuusvirta vettä kuin muiden keräimien läpi, koska tällöin vesivirta saa saman lämpövirran, mutta ei kerkeä lämmitä. Suurempi veden tilavuusvirta voidaan saavuttaa keräimien rinnan ja sarjaan kytkentöjen muokkauksella. Yhden PVT-keräimen läpi voi mennä sama tilavuusvirta, joka tämän jälkeen jakautuu neljälle normaalille aurinkokeräimelle. Tällöin PVT-keräimistä saadaan suurin etu, joka on aurinkosähkökennojen pitäminen viileänä korkean säteilyn intensiteetin aikana. Aurinkokennojen hyötysuhde ja tätä kautta teho tipuvat, jos aurinkopaneelin lämpötila nousee jäähdyttämättömänä (Al Harbi et al. 1998). PVT-keräimen periaate on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Tyypillisen PVT-keräimen rakenne (Chow 2010)

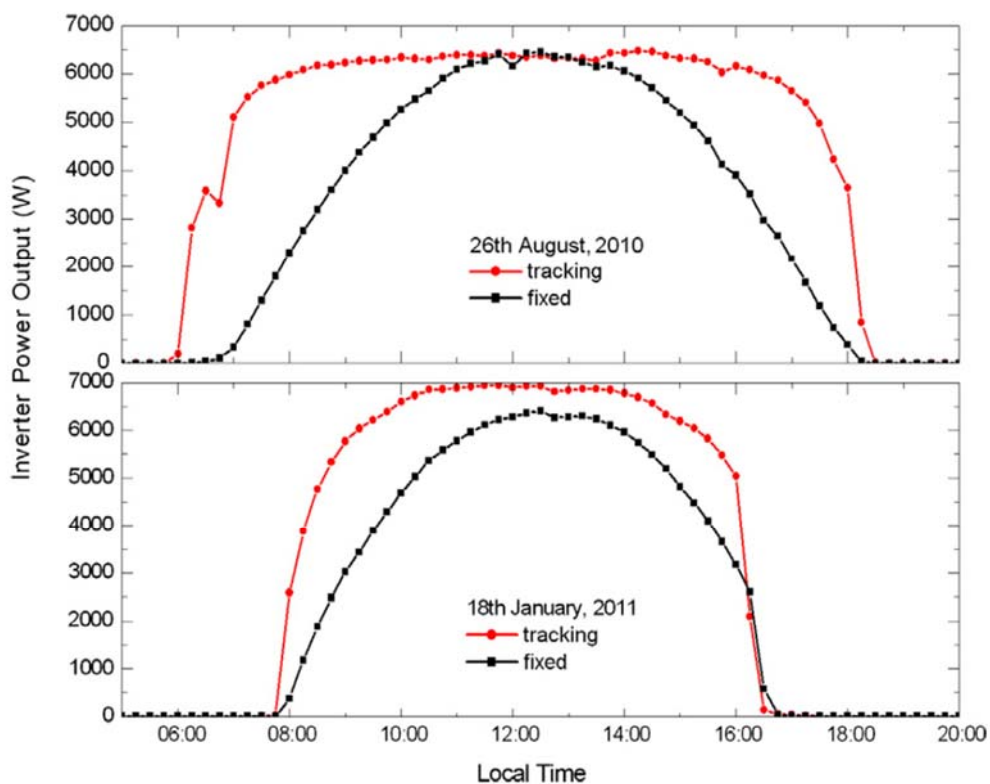
Aurinkopaneelin hinnasta suuri osa koostuu sitä tukevasta alumiinirakenteesta (Louwen et al. 2016). PVT-keräimellä tätä kustannusta ei oikeastaan olisi, koska kennot asennetaan suoraan lämpökeräimen pintaan. Tällöin myös aurinkolämpökeräimen pinnoittamisen kustannus jää pois.

Jouhara et al. (2016) tutki PVT-paneeleja, joissa oli lämpöputket. Lämmönkeruu muistuttaa tyhjiöputkikeräimiä. Kokeiden aikana jäähdyttämättömän PV-paneelin lämpötila

nousi 60 °C, kun taas PVT-paneelilla PV-paneelin lämpötila ei ylittänyt 35 °C:sta. Merkittävästi pienemmässä lämpötilassa toimiva PV-paneeli pystyy tuottamaan enemmän sähkötehoa, kuin auringon säteilyn lämmittämä paneeli.

Eke & Senturk (2012) tutkivat Turkissa aurinkoa seuraavan kaksiakselisen ja kiinteän PV-paneelin tuotantoa. PV-paneelin hyötysuhteen nouseminen kylmemmissä lämpötiloissa johti suurempaan tuotantotehoon talvella kuin kesällä. Kesällä aurinkoa seuraavan ja kiinteän paneelin huipputeho oli heidän järjestelmässä 6476 W ja 6451 W. Talvella aurinkoa seuraavan paneelin huipputeho oli 6942 W eli noin 7 % enemmän. Paneelin keskimääräinen lämpötila oli talvella 26 °C ja kesällä 50 °C.

Paneelien tuotannon vertailut on esitetty kuvassa 6:



Kuva 6. Aurinkoa seuraavan ja kiinteän paneelin tuotannon erot kesällä ja talvella (Eke & Senturk 2012)

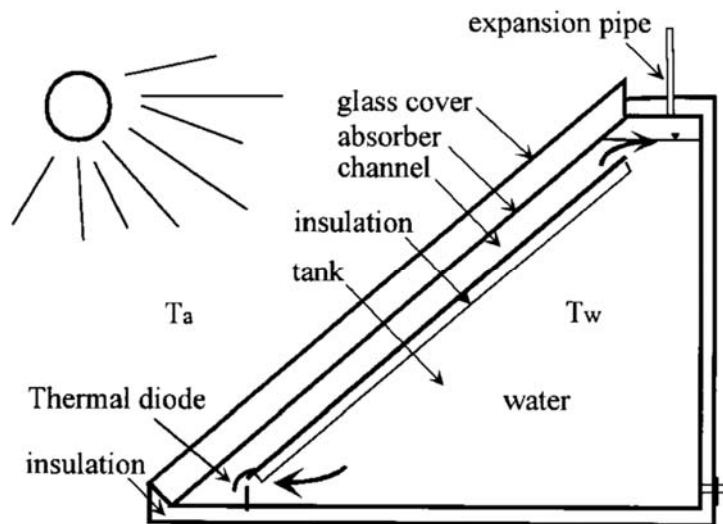
Kuvan 6 ylemmästä kohdasta voidaan selvemmin nähdä mistä talven suurempi tuotanto johtuu. Yleensä auringon vuotuisen säteilyn ilmoittavissa kuvaajissa saatava energia ilmoitetaan kWh/kk horisontaalille tasolle. Auringon paistaessa pienestä kulmasta horisontaalille tasolle ei tule juuri energiaa talvella. Kuvasta 6 voidaan kuitenkin nähdä, että tehokäyrä on hyvin jyrkkä auringon alettua paistamaan, jos käytetään seurantaa. Tästä voidaan tulkita, että jos aurinkopaneeli on kohtisuorassa kulmassa auringon säteilyyn nähden niin välissä oleva suurempi määrä ilmakehää ei juuri haittaa. Alemmasta kuvasta huoma-

taan, että vuorokauden huipputeho on talvella enemmän, kuin kesällä. Tämä johtuu pienemmästä ympäristön lämpötilasta, jolloin aurinkopaneeli toimii paremmalla hyötysuhteella ja siitä, että aurinkoon nähden kohtisuoralle tasolle tuleva säteilyteho ei ole alentunut merkittävästi.

Pilvisinä päivinä seurannasta ei ole apua, joten vuodessa seurannasta saatava hyöty riippuu paikasta. Paneeleja varjostavat rakennukset ja puut vähentävät myös saatavaa etua. Suomessa kesällä aurinko paistaa monissa paikoissa ympäri vuorokauden, jolloin seurannasta on hyötyä.

3.1.4 Yhdistetty tasokeräin ja lämpövarasto

Mohamad (1997) on kehittänyt järjestelmän, jossa aurinkolämpökeräin ja lyhyen ajan lämpövarasto on yhdistetty toisiinsa. Järjestelmän etelään osoittava kylki on optimaalisessa kulmassa aurinkoon nähden ja siinä on ensimmäisenä lasi ja tämän jälkeen on aurinkolämpökeräin, joka on suoraan kosketuksissa lämmitettävään veteen. Aurinkolämpökeräimen pinnan takana on levy, joka erottaa tämän suorasta kosketuksesta säiliön veteen. Tämän avulla järjestelmään saadaan luonnollisen konvektion avulla virtaus niin, että kylmä vesi säiliön pohjalta lähtee nousemaan keräimen takapintaa pitkin ylöspäin ja lämpenee samalla. Laitteistoon on asennettu terminen diodi, joka estää vesivirtauksen väärään suuntaan yöllä. Järjestelmä on esitetty kuvassa (7):



Kuva 7. Yhdistetty lämpövarasto ja aurinkokeräin (Mohamad 1997)

Tällaiseen järjestelmään voitaisiin vielä lisätä alumiinilla pinnoitettu eristelevy keräimen eteen, joka vähentäisi lämpöhäviötä yöllä ja heijastaisi lisää säteilyä keräimelle päivällä. Aurinkokeräimet voitaisiin mahdollisesti yhdistää kausilämpövarastoon, jos varaston sijoittaminen maan alle ei olisi mahdollista. Kausilämpövaraston sijoittaminen maan alle voi olla kallista paikoissa, joissa kallioperä on lähellä pintaa. Tällöin voidaan tarkastella tilannetta, missä tasokeräimet ja lämpövarasto on yhdistetty toisiinsa.

3.2 Jäähdytysveden tuotanto

Tässä työssä on tarkasteltu kausilämpövarastoa, jonka avulla rakennusta pystyisi sekä jäähdyttämään että lämmittämään. Jäähdytyksen tarpeen on arvioitu jatkuvan elokuun loppuun Tampereella. Kausilämpövaraston on oltava tarpeeksi korkea ja lämmityksestä tuleva vesi on jäähdytetty tarpeeksi alhaiseen lämpötilaan lämmityskaudella. Jäähdytysvesi tuotetaan kausilämpövarastoon lämmityskauden aikana. Vesi jäähdytetään riittävän alhaiseen lämpötilaan tuloilmapatterin ja lämpimän käyttöveden vastavirtalämmönvaihtimen avulla. Jäähdytysveden tuotannon toimivuus vastavirtalämmönvaihtimen avulla riippuu kiinteistölle tulevan talousveden lämpötilasta. Talousveden lämpötila on lähes vakio koko vuoden, jos se on pohjavettä.

Pintaveden lämpötila riippuu vuodenajasta. Länsi-Tampereella talousvesi on pohjavettä ja lämpötila vaihtelee 7-9 °C välillä. Itä-Tampereella talousvesi on pintavettä ja lämpötila vaihtelee 1-22 °C välillä. (Tampereen Vesi 2016) Rakennukselle tulevan talousveden lämpötila vaikuttaa järjestelmän toimintaa kuitenkin ainoastaan silloin kun ympäristön lämpötila on korkeampi kuin talousveden tulolämpötila. Ympäristön lämpötilan ollessa alhaisempi voidaan käytettyä vettä jäähdyttää edelleen tuloilmapatterissa. Suurin osa lämmöstä käytetään tähän aikaan vuodesta, kun rakennusta joudutaan lämmittämään.

3.3 CHP-laitokset

Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon laitoksilla voitaisiin tuottaa kesällä ylijäämä- lämpöä kausilämpövarastoon. Sähkölle on kysyntää kesälläkin, mutta lämpöä tarvitaan ainoastaan lämpimän käyttöveden tuotantoon. Alhainen lämmöntarve kesällä on johtanut siihen, että laitoksille on rakennettu turbiineja lauhdeperällä, joita voidaan ajaa kesällä. Lämpö menee tällöin hukkaan järveen tai mereen.

McDaniel & Kosanovic (2016) mallinsivat Massachusettsin CHP-laitoksen yhdistämistä kausilämpövarastoon. Tutkimuksessa mallinnettiin kesällä tuotetun ylimääräisen lämmön syöttämistä porakaivolämpövarastoon. Tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, että kausilämpövaraston investointikustannuksen takaisinmaksuaika olisi 9 vuotta. Kustannusta verrattiin erittäin vähän rikkiä sisältävään dieseliin, kun CHP-laitos käyttää maakaasua. Hintaa verrattiin dieseliin, koska CHP-laitoksen lisäksi kampuksella tuotetaan höyryä kattiloilla, jotka käyttävät lämmityskaudella dieseliä. Näiden kattiloiden käyttöä dieselillä voitaisiin välttää hyödyntämällä kausilämpövarastoa järjestelmässä. Kyseisen kampuksen tilanne on kuitenkin erityinen, koska maakaasun käyttöä lämmityskaudella rajoittaa sen huono saatavuus. Muualla investointi ei välttämättä ole kannattava, koska huomattavasti dieseliä halvempia polttoaineita on saatavilla. Suomessa on monessa kaukolämpöverkossa kaukolämpöakkuja, mutta nämä ovat paljon lyhemmän vaihtelun tasaamiseksi tarkoitettuja kuin kausilämpövarastot.

3.4 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumpulla voitaisiin siirtää lämpöä kausilämpövarastoon halvan sähkön hinnan aikana. Nykyään kuluttajillakin on mahdollisuus tehdä sähköenergian ostoon sopimus, joka vaihtelee tunneittain Nord Pool spot-hinnan mukaisesti. Jos maalämpöpumpun kanssa käytetään kausilämpövarastoa, tulee maalämpöpumpusta työssä tarkasteltavalle kohteelle hyvin pieni. Kohteessa vuodessa käytetyn lämpöenergian ollessa 141 MWh saadaan 8000 h huipunkäyttöajalla arvioitua keskitehoksi noin 17,6 kW. Maalämpöpumppu, jota käytettäisiin 8000 h vuodessa, vaatisi normaalista poikkeavan lämpökaivomitoituksen. Normaalisti maalämpöpumpun kompressoria käytetään vähemmän aikaa vuodesta.

Lämmönkeruuputkea ympäröivä maa alkaa jäähtyä liikaa, jos maalämpökaivosta otetaan enemmän lämpöä kuin sinne ehtii johtua ympäristöstä. Jäätyminen alentaa laitteiston lämpökerrointa. (You et al. 2016) Lämpökaivoa voitaisiin lämmittää kesällä rakennuksista poistettavalla lämmöllä ja aurinkolämpökeräimillä. Tällainen järjestely on yksi käytetyistä teknologioista kausilämpövarastointiin (Emmi et al. 2015).

Maalämpöjärjestelmän käyttökustannukset ovat kaukolämmön ja aurinkolämmöllä lämmitetyn kausilämpövaraston välissä. Maalämpöpumppu ja -kaivo ovat kohtuullisen suuri investointi, mutta kustannuksia aiheutuu käytöstäkin, koska sähköä kuluu noin kolmannes siitä mitä lämpöä tuotetaan (Han & Yu 2016).

Maalämpöjärjestelmän investointikustannukset koostuvat pääasiassa asennustöistä, lämpökaivon porauksesta, lämpöpumpusta, lämpövarastosta ja liuoskiertolaitteistosta maaperään. Arvioidaan mitä kausilämpövarasto saisi maksaa maalämpöpumpun kanssa yhtälöstä (9):

$$\text{Kaukolämmön hinta} - \text{lämmöntuotannon hinta} = \frac{a_i \cdot x}{E_a}, \quad (9)$$

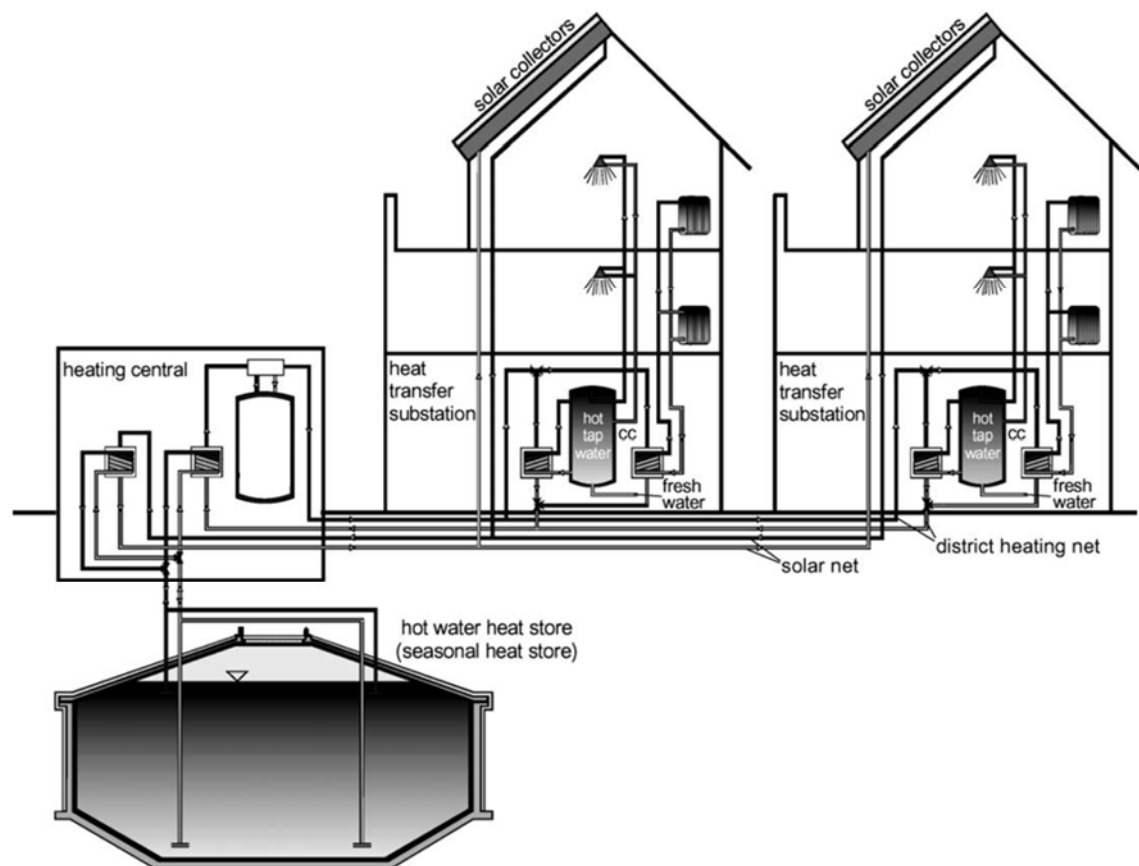
missä oikealla puolella nimittäjässä termi E_a kuvaa käytettävää vuotuista lämpöenergian määrää [kWh] ja termi x kausilämpövaraston hintaa [€], jolloin yhtälön yksiköksi tulee [€/kWh]. Termi x on ratkaistava kausilämpövaraston maksimihinta millä päästään samaan lämmön hintaan kuin kaukolämmöllä. Annuiteettitekijä voidaan laskea yhtälöstä (10):

$$a_i = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 0,065, \quad (10)$$

missä n on pitoaika vuosina ja i on korkokanta.

4. LÄMMÖNJAKOLAITTEISTO

Aurinkolämmöllä lämmittävä kausilämpöjärjestelmä vaatii neljä lämmönjakolaitetta, joista ainoastaan yksi eroaa normaalista käytännöstä. Lämpövarastoon asennettavaa veden tuonti ja vienti putkistoa tai diffuusoria ei ole normaaleissa lämmitysjärjestelmissä. Diffuusorin tarkoitus on hidastaa vesivirtaus mahdollisimman pieneksi sen tullessa kausilämpövarastoon. Kaukolämpövarastossa on hieman vastaava laite, mutta se on yleensä pelkästään säiliön pohjalla ja yläpäässä. Kuvassa 8 on esitetty prosessikaavio koko lämmitysjärjestelmästä.



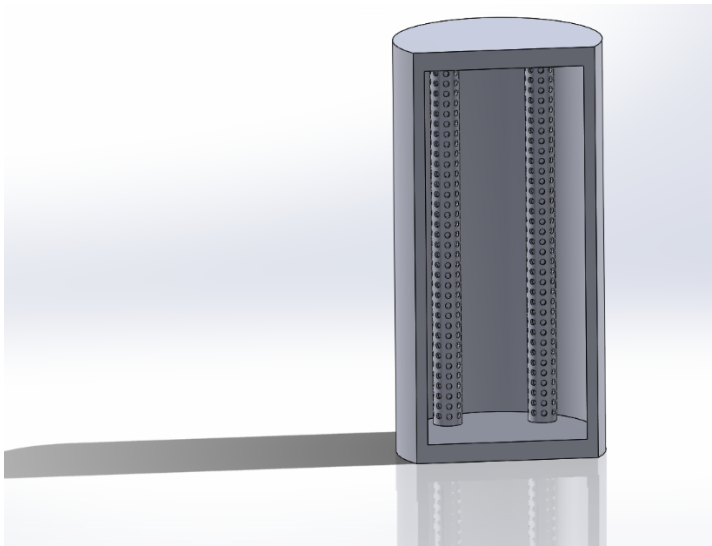
Kuva 8. Prosessikaavio aurinkolämmöllä lämmitetyistä taloista (Schmidt et al. 2004)

Kuvassa 8 nähdään kausilämpövarastossa oleva lämmöntuonti ja -vienti putkisto. Kausilämpövarastoon on jätetty tilaa veden lämpölaajenemista varten. Aurinkokeräimet on asennettu talojen etelään suuntautuvalle katolle.

4.1 Kausilämpövaraston diffuusori

Kausilämpövarastoon voidaan asentaa säiliön mittainen diffuusori, jolla vesi voidaan jakaa aina saman lämpöiseen kerrokseen (Pinel et al. 2011). Tällä tavalla kesällä voidaan

tuottaa kuumempaa vettä, kuin talvella. Säiliön korkuisessa diffuusorissa veden tuontiin ja ventiin olevia reikiä on koko diffuusorin matkalla. Tällöin vesi pystytään syöttämään aina oikean lämpöiseen kerrokseen. Konvektio säiliön sisällä kasvaisi, jos vettä syötettäisiin väärän lämpöiseen kerrokseen. Tällainen diffuusori mahdollistaa oikean lämpöisen veden pumppaamisen säiliöstä ulos. Tilojen lämmitykseen käytetään noin 40 °C lämpöistä vettä, kun taas lämmin käyttövesi lämmitetään noin 55 °C:n lämpötilaan.



Kuva 9. Kausilämpövaraston diffuusorit, joista vettä tuodaan ja viedään lämmönvaihtimille

Kausilämpövaraston auki leikatussa 3D kuvassa nähdään säiliön kaksi kolmesta diffuusorista. Veden sisään ja ulosvirtaukset kausilämpövarastoon halutaan tehdä mahdollisimman pienillä nopeuksilla. Erilämpöiset vesikerrokset pysyvät tällöin sekoittumattomina. Pieniin virtausnopeuksiin päästään, kun käytetään putkistoa, jossa on useampi ulostai sisäänvirtauskanava. Jatkuvuusyhtälöstä nähdään, että jos virtauskanavan poikkipintaa pienennetään niin virtausnopeus kasvaa. Jatkuvuusyhtälö on esitetty yhtälössä (11):

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2, \quad (11)$$

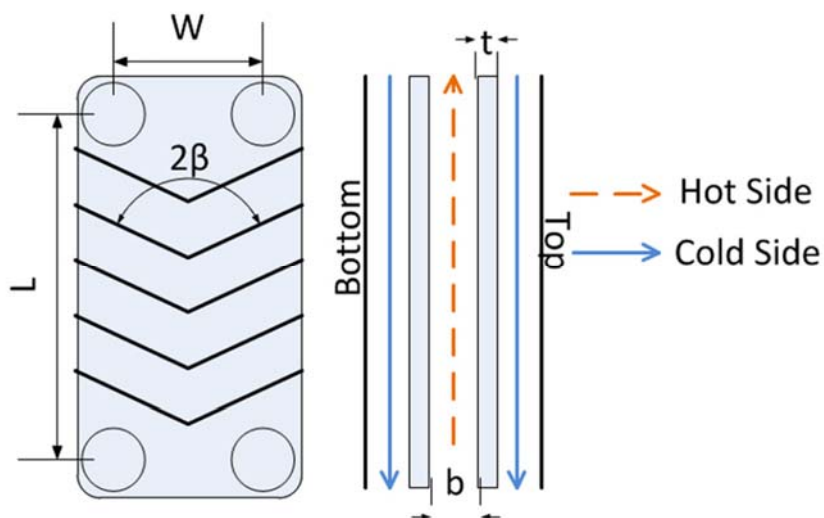
missä A_1 on säiliöön tulevan päälinjan halkaisija ja A_2 on putken kylkeen porattujen reikien yhteispinta-ala. Ulosvirtauspinta-alaa mitoitettaessa on kuitenkin löydettävä taloudellinen optimi diffuusorin koolle. Vertailtavina on asennetun putken hinta ja menetetty lämpöenergia eri lämpöisten vesikerrosten sekoittuessa nopeammasta virtausnopeudesta säiliön sisällä. Sekoittuminen on järjestelmän sisäinen lämpöhäviö ja se saadaan osittain takaisin seuraavalla latausjaksolla.

Aurinkolämpökeräimillä voidaan käyttää suoraan kausilämpövaraston vettä ilman lämmönvaihdinta, jos lämpökeräimet asennetaan ns. drain-back tekniikan mukaisesti, jossa keräimet tyhjennetään vedestä lämpötilan laskiessa lähelle nollaa (Bokhoven et al. 2001). Tällä tekniikalla aurinkolämpökeräimiin ei tarvitse laittaa vesi-glykoli seosta jäätymisen estämiseksi. Ylikuumentumisen suojaus on helpompaa, jos sähkönsyöttö pumpulle loppuu. Ylipainesuojan lauetessa järjestelmä tyhjenee automaattisesti vedestä.

Glykoli-vesi täytteisille järjestelmillekin on mahdollista tehdä sähköverkosta ja pumpusta riippumaton jäähdytysjärjestelmä. Tällainen voi hyödyntää lämpötilaerosta johtuvaa nostevoimaa ja termoelementtejä, joilla tuotetaan sähköä nestettä jäähdyttävillä puhaltimille. Glykoli-vesi seos voi vanhentua ennenaikaisesti, jos se kuumenee liikaa (Martinez et al. 2014).

4.2 Lämmönvaihtimet

Lämpimän käyttöveden tuottamiseksi tarvitaan lämmönvaihdin, koska veden on oltava laadultaan juomakelpoista. Lämmönvaihdintyyppinä kannattaa tässä tapauksessa käyttää vastavirtalämmönvaihdinta. Tekniikka on sama kuin useimmissa taloissa, jotka on kytketty kaukolämpöverkkoon. Levylämmönsiirrin, jolla lämmin käyttövesi voidaan tuottaa kausilämpövaraston energiaa hyödyntämällä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Tyypillisen levylämmönsiirtimen periaatekuva (Ray et al. 2014)

Kuvassa 10 esitetyssä levylämmönsiirtimessä on ainoastaan yksi kuuma virtaus, mutta käytännössä levyjä on kasattuna useampi päällekkäin. Levylämmönsiirtimen hyvä puoli on, että sen tehoa pystytään muuttamaan helposti, kun levyjä vain kasataan lisää päällekkäin.

Lämmönvaihdin, jolla tuotetaan lämmin käyttövesi on tärkeä komponentti järjestelmässä. Lämmönvaihtimen on oltava vastavirtalämmönvaihdin, jolla saadaan jäähdytettyä tulo- puolen vesi mahdollisimman alas. Alhainen paluulämpötila on tärkeämpää aikana, jolloin ulkoilman lämpötila on yli 5 °C, jolloin vettä ei pystytä jäähdyttämään enää tuloilmapat- terilla.

4.3 Vesikiertoiset kattosäteilypaneelit

Tuotaessa tai poistettaessa lämpöä rakennuksista tässä työssä on suunniteltu käytettävän kattoon sijoitettavia vesikiertoisia paneeleja, koska tällöin järjestelmästä tulee yksinker- taisempi. Vaihtoehtona olisi ollut käyttää lattialämmitystä ja konvektoreita jäähdytetyn ilman jakeluun. Vesikiertoisten paneelien lämmitys tai jäähdytysteho perustuu säteilyyn, jolloin tiloissa ei esiinny vedon tunnetta. Tällaisessa jäähdytysjärjestelmässä ei ole puhalti- mia joista aiheutuisi melua. Vesikiertoisilla paneeleilla päästään jäähdytystehoon, joka on noin 30 – 60 W/m² ja lämmitystehoon, joka on noin 40 – 80 W/m². Lämmitystehosta noin 80 % on säteilyä ja 20 % luonnollista konvektiota. (Mirieli et al. 2002) Lindab Oy:n kattosäteilypaneeli Atrium Plana on esitetty kuvassa 11 ylhäältä päin katsottuna.



Kuva 11 Kattosäteilypaneeli ylhäältäpäin katsottuna (Lindab 2016)

Vesikiertoiset kattosäteilypaneelit sopivat parhaiten uusiin kohteisiin, joissa lämmityksen ja jäähdytyksen tarve on pieni. Paneeleilla on suhteellisen pieni tehotiheys, jolloin niitä jouduttaisiin asentamaan hyvin paljon, jos lämmityksen tai jäähdytyksen tarve olisi suuri.

Jäähdytettäessä ilmaa vesikiertoisilla paneeleilla ilman suhteellista kosteutta mitataan jat- kuvasti, jotta vältetään kondensio-ongelmilta paneelin pinnalla. Paneelin veden tulopuo- lulle asennetaan anturi, joka mittaa kosteutta ja tietyn rajan ylittyessä virtaus katkaistaan hetkeksi, jolloin lämpötila nousee ja kondenssivettä ei pääse muodostumaan.

Jäähdytysteho, mikä huoneista saadaan poistettua esilämmittää aurinkokeräimille mene- vää vettä, jolloin ylimääräinen lämpö saadaan hyödynnettyä tulevana lämmityskautena. Jäähdytysteho voidaan laskea yhtälöstä (12):

$$\Phi_{\text{jäähd}} = \dot{m}_{\text{vesi}} c_p (T_{\text{lähtö}} - T_{\text{tulo}}), \quad (12)$$

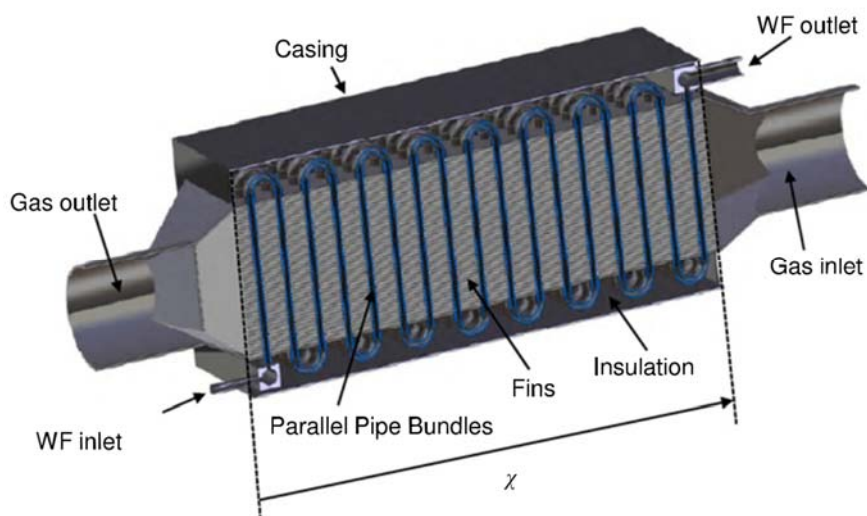
missä $\Phi_{\text{jäähd}}$ on huoneesta poistettava lämpövirta [W], \dot{m}_{vesi} on kattosäteilijöissä kulkevan veden massavirta [kg/s], c_p veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)] ja lämpötilaero [K] muodostuu paneelille tulevan ja sieltä lähtevän veden lämpötilaerosta.

Aurinkokeräimien varjostamalle alueelle asuntojen katolla tulee vähemmän auringon säteilyä, jolloin varjostus toimii passiivisena jäähdytyksenä. Suuri osa tästä lämmöstä siirretään kausilämpövarastoon.

Kattosäteilypaneelille syöttöveden lämpötilana käytetään noin 40 °C ja paluuveden lämpötila on noin 14 °C alhaisempi eli 26 °C (Li et al. 2015). Tarkasteltavan kohteen lämmön käytön huipputehon ollessa 64 kW voidaan lämmitysveden massavirraksi laskea 14 °C lämpötilaerolla noin 1,1 kg/s. Tässä on oletettu, että koko huipputeho olisi muodostunut tilojen lämmityksen tarpeesta. Todellisuudessa osa tästä voi olla lämpimän käyttöveden tuotantoa saman aikaisesti.

4.4 Tuloilmapatteri

Lämmitysjärjestelmään on tässä työssä suunniteltu tuloilmapatteri, jolla jäähdytetään kattosäteilijöiltä tai lämmönvaihtimelta tulevaa vettä edelleen. Tuloilmapatterissa lämmön tuonti on tehokkaampaa kattosäteilijöihin nähden, koska putkisto on pakotetussa konvektiossa tuloilmakanavassa. Patteri on rivoitettu, mikä lisää edelleen lämmönsiirtoa, koska sen pinta-ala kasvaa. Yksi mahdollinen lämmönsiirintyyppi tuloilmapatterille on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Rivoitettu vastavirtalämmönvaihdin (Horst et al. 2013)

Kuvassa 12 esitettyä lämmönsiirrintä voidaan käyttää tuloilman lämmittämiseen. Lämmitettävä ilma virtaa putkessa kiertävää nestettä vastaan, jolloin neste saadaan jäädytettyä mahdollisimman lähelle tuloilman lämpötilaa haluttaessa. Tuloilman ollessa pakkasella näin ei kuitenkaan kannata tehdä, koska tarkoituksena on jäädyttää kausilämpövaraston pohjakerrokseen syötettävää vettä lähelle 0°C:sta.

Tuloilmapatteriin voidaan laittaa oma nestekierto, jossa käytetään glykolin ja veden seosta. Pakkasnestepiiri vaatii yhden lämmönsiirtimen lisää, mutta jäätymisriski saadaan poistettua. Jos glykolikiertoa ei käytetä tuloilmapatteri voidaan mitoittaa niin, että vesivirta ei ehdi jäätymään kovillakaan pakkasilla. Putken reunaan voi kuitenkin muodostua jäätä, joka voitaisiin sulattaa siten, että patterille ohjataan välillä poistoilmaa huoneista. Poistoilman ohjaus vaatisi ainoastaan yhden ohituskanavan ja venttiilin, jolla virtaus ohjataan haluttuun kanavaan.

Kaksi kausilämpövaraston toiminnan kannalta olennaisinta asiaa ovat mahdollisimman suuri jäähtymä lämpöä käytettäessä ja kuivat eristeet kausilämpövarastossa. Tuloilmapatteri on hyvä keino saada lämpötilaero mahdollisimman suureksi. Toinen vaihtoehto olisi käyttää lämpöpumppua, joka lisää järjestelmän investointi- ja käyttökustannuksia sekä kompleksisuutta.

Tuloilmapatterin lämmönvaihtimeen syötettävän vesivirran määrä voidaan laskea entalpiataseesta, jossa veden entalpia siirtyy lämmitettävään ilmaan. Yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\dot{m}_{vesi}\Delta h_{vesi} = \dot{m}_{ilma}\Delta h_{ilma}, \quad (13)$$

missä \dot{m}_{vesi} [kg/s] on tuloilmapatterin putkistossa virtaavan veden massavirta, Δh_{vesi} on veden entalpian muutos [J/kg], \dot{m}_{ilma} [kg/s] on tuloilmaputkessa virtaavan ilman massa-
virta ja Δh_{ilma} on ilman entalpian muutos [J/kg].

Lämmitystä säättävä automaatiojärjestelmä mittaa kuitenkin tilavuusvirtoja ja lämpötiloja, jolloin yhtälö voidaan avata muotoon:

$$\rho_{vesi}V_{vesi}A_p c_{p,vesi}(T_{sv} - T_{uv}) = \rho_i V_{ilma} A_{ivk} c_{p,ilma}(T_{si} - T_{ui}), \quad (14)$$

missä ρ on tiheys [kg/m³], V on virtausnopeus [m/s], A on kanavan poikkipinta-ala [m²] missä fluidi virtaa, c_p ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)].

Nykyisten rakentamismääräysten mukaan talon ilmatilavuuden täytyy vaihtua kerran kahdessa tunnissa (Ympäristöministeriö 2012). Arvioidaan poistettavaa ilman tilavuusvirtaa yhtälön (15) mukaisesti:

$$V_{poisto} = h_{kork} \cdot A_{pohja} \cdot n_p, \quad (15)$$

missä termi h_{kork} [m] kuvaa huoneiden korkeutta, A_{pohja} [m²] huoneistojen pohjan yhteispinta-alaa ja termi n_p ilmanvaihtolukua [1/h] eli kuinka monta kertaa tunnissa ilmatilavuus vaihdetaan.

5. TYÖSSÄ TARKASTELTAVA KOHDE

Tässä työssä tarkasteltavana kohteena käytetään As. Oy Luhtavillaa. Tarkoituksena on käyttää tätä asunto-osakeyhtiötä esimerkkinä, mikä lämmitettäisiin kausilämpövaraston ja aurinkolämmön avulla. Lämmönkäytön tietoja on saatu kohteesta Tampereen sähkölaitokselta. Taloyhtiössä on 1400 lämmitettävää neliötä, 30 asuntoa ja 54 asukasta. Rakennus sijaitsee Tampereella Vuoreksen Mäyränmäessä. Se on rakennettu 2013–2014 ja on energialuokaltaan A. Suurin tunnin keskiteho lämmönkäytössä on ollut 64 kW ja 1.6.2014 – 31.5.2015 välisenä aikana kului noin 141 MWh lämpöenergiaa. Paikkatietoikkunan nettisivulta on ladattu ilmakuva kohteesta joka on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. As. Oy Luhtavilla (Paikkatietoikkuna 2016)

Työssä käytettävä lämmönkulutus data on kuvaan 13:n ympyröidyistä rakennuksista.

5.1 Lämmönkulutus

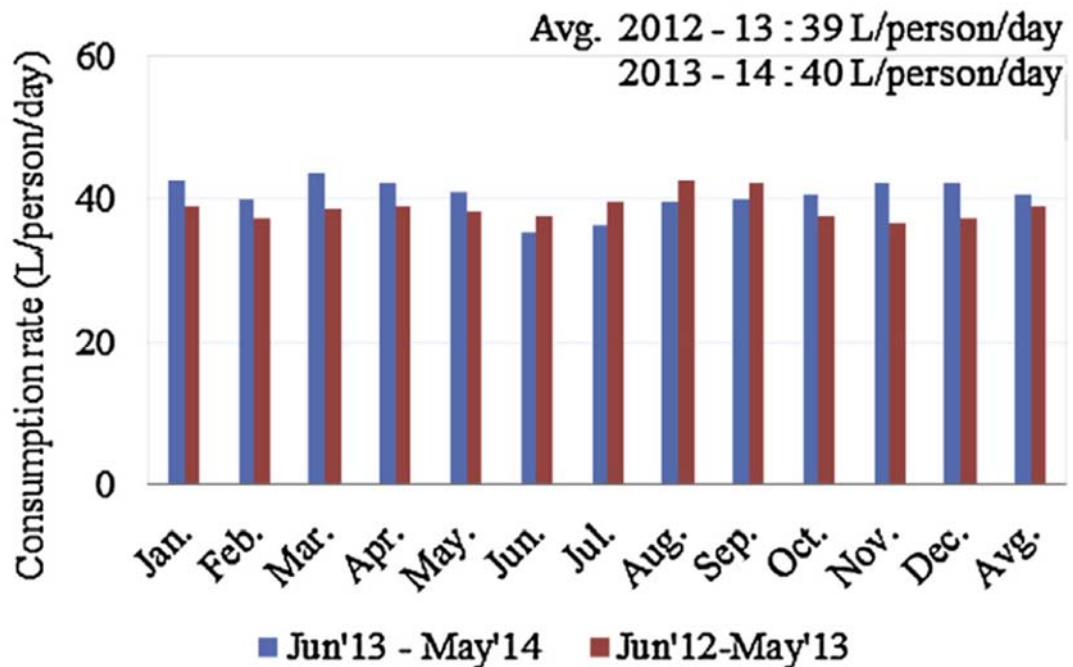
Tuotetun lämpöenergian käyttö jakautuu tilojen lämmitykseen, sekä lämpimän käyttöveden tuotantoon. Ahmed et al. (2015) tutki suomalaisten lämpimän käyttöveden kulutusta. Tutkimuksessa tarkasteltiin 379 asukkaan lämpimän käyttöveden kulutusta kahden vuoden ajan. Keskiarvoksi saatiin 43 L/(d·henk.) ja mediaaniksi 35 L/(d·henk.). Keskiarvo oli tässä siis 3 L päivässä vähemmän kuin Suomen rakentamismääräyksissä.

Lämpimän käyttöveden tuotannon vaatima energia henkilölle vuorokaudessa voidaan laskea yhtälöstä (16):

$$E = mc_p(T_{\text{lähtö}} - T_{\text{tulo}}), \quad (16)$$

missä m on lämmitettävän veden massa [kg], $T_{\text{lähtö}}$ on kuumavesiputkeen menevä vesi ja T_{tulo} on kaupungin vesijohtoverkosta tulevan veden lämpötila [K].

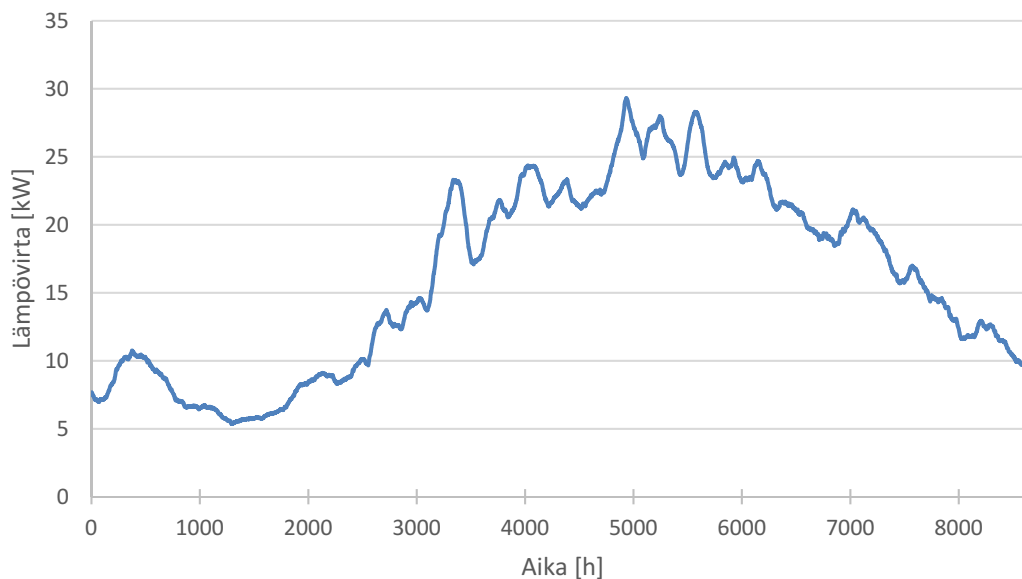
Lämpimän käyttöveden kulutus jakautuu melko tasaisesti vuoden jokaiselle kuukaudelle, jos tarkastellaan rakennusta, missä on paljon asukkaita. Tällöin yksittäisten ihmisten pois-saolo ei näy kulutuksessa. (Ahmed et al. 2015) Kuvassa 14 on esitetty lämpimän käyttöveden kulutuksen jakautuminen kahden vuoden aikana.



Kuva 14. Lämpimän käyttöveden kulutuksen jakautuminen eri kuukausille (Ahmed et al. 2015)

Lämmön kausivarastoinnin kannalta lämpimän käyttöveden tasainen kulutus ympäri vuoden on edullista. Tasainen jakauma vähentää kausivarastoinnin tarvetta, koska lämpöä voidaan käyttää keräimiltä suoraan kesällä.

As. Oy Luhtavillan lämmönkäytön viikon keskiteho kaukolämpöverkosta aikana 1.6.2014 – 31.5.2015 on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. As. Oy Luhtavillan kaukolämmön kulutus (Tampereen kaukolämpö 2015)

Kuvasta 15 nähdään, että keskimääräisen kulutuksen huippu on noin 5000 h päässä aloitushetkestä, joka on kesäkuun ensimmäinen päivä. Kulutushuippu on siis lähellä vuodenvaihdetta. Yksittäinen kulutuspiikki, joka kyseisen aikavälin huippuarvo ajoittuu taas maaliskuun alkuun.

Lämmönkäytön pienin arvo As. Oy Luhtavillassa löytyy heinäkuun viimeisenä päivänä klo 13, jolloin tunnin keskiteho on käynyt nollassa. Samaan aikaan on normaalina vuotena odotettavissa suurin lämmöntuotanto aurinkokeräimiltä. Tästä syystä lämpövarasto on oleellinen osa tehokasta aurinkolämmön hyödyntämistä.

5.2 Kausilämpövaraston rakennusmateriaali

Kausilämpövarastolle optimaalinen rakennusmateriaali määräytyy lämmönkäytön määrän ja käytettävissä olevan maa-alan mukaan (Heller 2000). Teräksestä ja betonista pystytään tekemään monen muotoisia säiliöitä, mutta polymeerikalvolla säiliön eri geometriat ovat rajallisemmat. Yleisesti on oletettu, että terässäiliö on kilpailukykyinen 20 000 m³ saakka (Heller 2000). Tästä suuremmissa säiliöissä huonommasta geometriasta aiheutunut suurempi lämpöhäviö ei enää haittaa, koska se on suhteellisesti hyvin pieni.

Kausilämpövarastoa rakennettaessa paikan päällä tehtäviä töitä pyritään vähentämään kustannusten säästämiseksi. Tästä johtuen kausilämpövarasto, joka pystyttäisiin kasamaan nopeasti elementeistä rakennustyömaalla olisi kustannustehokas. Säilön täytyy kuitenkin olla täysin vesitiivis, jolloin elementtien liitoskohdille aiheutuu tarkat vaatimukset ja näiden täyttäminen voi olla hankalaa.

5.2.1 Betoni

Betonista valmistettu kausilämpövarasto pystytään valamaan optimaaliseen muotoon lämmönsiirron osalta. Haittapuolena betonissa on korkeampi veden diffusiviteetti ja korkeampi todennäköisyys halkeamiseen verrattuna teräksiseen säiliöön. Veden diffusiviteettiä voidaan alentaa asentamalla säiliön sisäpinnalle ohut teräskalvo tai käyttämällä tiiviimpiä betonilaatuja (Schmidt et al. 2004).

Betoninen säiliö voidaan valaa paikan päällä tai koota elementeistä, jotka on valmistettu tehtaalla. Elementeistä säiliön kokoaminen olisi nopeaa ja säästäisi kustannuksia työntekijöiden palkoista. Pumpatun k35 lujuusluokan betonin kuutiometrin hinta on noin 215 €. Hinta-arvio sisältää kuljetuksen 10 km päähän sekä 10 h kestävän pumppauksen. Kustannusarviota kysyttiin Rudus Oy:stä, joka sijaistaa Tampereella Nekalassa.

Normaalissa käyttötilanteessa betonisäiliön ei tarvitse kestää ympäröivän maan jäätymistä, koska lämpöä vuotaa jatkuvasti ulos säiliöstä, jolloin maa pysyy selvästi nollan yläpuolella. Mahdollisessa vuototilanteessa säiliö pitäisi tyhjentää, että halkeama päästään korjaamaan. Säiliöstä ulos vuotava vesi kuljettaa seinämää tukevaa maata pois seinämän ympäriltä. Seinämän takana oleva aukko kannattaa täyttää betonilla uuden vuodon ehkäisemiseksi.

5.2.2 Ruostumaton teräs

Kuten betonistakin valmistettu säiliö, teräksinen pystytään rakentamaan optimaaliseen muotoon. Ruostumattomasta teräksestä tehdyssä säiliössä etuna betoniseen nähden on rakenteen lujuuden ja korroosionkeston helpompi arvioitavuus sekä se, että erillistä höyrysulkua ei tarvita. Teräksellä ongelmaksi muodostuu suurempi lämpöhäviö sekä paikan päällä tehtävät hitsaustyöt (Novo et al. 2010).

5.2.3 Polymeerikalvo

Polymeerikalvosta valmistettu kausilämpövaraston etuna on kalvon halpa hinta ja säiliön nopea valmistus. Polymeerikalvoa voi tilata suurissa rullissa, joiden levittäminen kuopan reunalta on nopeaa. Muottia ei tarvitse valmistaa eikä säiliölle kaivettua kuoppaa tukea erikseen kaivuuvaiheessa, koska säiliön reunat jäävät lopullisesti tähän muotoon. Huonona puolena tällä rakennusmateriaalilla on siitä valmistetun kausilämpövaraston suurempi pinta-alan tilavuuden suhde, joka johtaa suurempiin lämpöhäviöihin. Suuremmissa varastoissa hieman kasvanut lämpöhäviö ei ole ongelma, koska pinta-alan ja tilavuuden suhde paranee aina säiliön koon kasvaessa.

Maailman suurin kausilämpövarasto vesisäiliö sijaitsee Tanskan Vojens kaupungissa. Sen tilavuus on 203 000 m³. Säiliö on rakennettu käyttäen saksalaisen firman GSE Lining

Technologyn valmistamaa polymeerikalvoa. Säiliön avulla Vojensin kaukolämpöverkossa päästään yli 60 % aurinko-osuuteen. Kausilämpövaraston kustannukset olivat noin 50 miljoonaa Tanskan kruunua eli noin neljä miljoonaa euroa. Säiliön ominaiskustannukseksi saadaan tällöin 20 €/m³. Aurinkokeräimet Vojensin aurinkolämpöjärjestelmään on toimittanut Arcon Solar. Aurinkokeräimiä pystyttiin asentamaan pellolle noin 1000 m² päivässä. (Epp 2014) Voimalassa on nyt kokonaisuudessaan noin 70 000 m² aurinkolämpökeräimiä (Ramboll 2016).

Suurissa kaukolämpövarastoissa päästään kustannustehokkaaseen lämmön kausivaraustoinnin hintaan. Suhteellisesti alentunut hinta johtuu osittain säiliön parantuneesta pinta-alan ja tilavuuden suhteesta.

5.2.4 Kohteeseen suunniteltu rakennusmateriaali

Tässä työssä tarkasteltavan kausilämpövaraston rakennusmateriaaliksi valittiin betoni, sen ollessa terästä halvempi. Kohteeseen suunniteltava säiliö ei ole niin suuri, että polymeerikalvoa olisi voitu käyttää. Polymeerikalvosäiliöllä suhteellinen lämpöhäviö olisi ollut liian suuri, koska tilavuutta ei ole riittävästi.

5.3 Suunnitelma kausilämpövarastollisen aurinkolämpöjärjestelmän rakentamisesta

Kaikki kohteessa käytettävät komponentit ja järjestelmät ovat hyvin tunnettuja. Aurinkokeräimiä on asennettu vuosikymmeniä Suomessakin. Ainut lisäys tässä tulee kausilämpövaraston yhdistämisestä järjestelmään. Teollisuudessa on paljon tietotaitoa kaukolämpöakkujen valmistamisesta, jotka ovat pitkälti samanlaisia kuin kausilämpövarasto, mutta niiden käytön sykli on lyhempi.

Kaukolämpöakun tehtävä on toimia huippukulutusten tasaajana jolloin erillistä voimalaitosta ei tarvitse rakentaa. Kaukolämpöakusta pystytään ottamaan suuria lämpövirtoja, koska rajoittava tekijä on lämmönsiirtimen pinta-ala.

Lämmityksen automaatiojärjestelmä kausilämpövarastolla lämmitetyssä tai jäädytetyssä rakennuksessa saattaa erota yleisistä käytännöistä. Lämmitysveden jäädyttäminen riittävän alhaiseen lämpötilaan on tässä järjestelmässä tärkeää. Alhainen paluulämpötila saadaan kuitenkin toteutettua muutaman lämpötila-anturin ja venttiilin lisäyksellä järjestelmään.

5.3.1 Pohjaveden syvyyden tarkistus

Maan alle sijoitettavan kausilämpövaraston eristeiden tulee pysyä kuivana sekä sisältä että ulkoa tulevalta kosteudelta. Eristeet kannattaa sijoittaa kahden täysin vedenpitävän kalvon väliin. (Bokhoven et al. 2001) Pohjaveden syvyys vaikuttaa kausilämpövaraston

rakentamiseen. Helppointa on rakentaa säiliö paikkaan, missä pohjavesi on läpi vuoden paljon säiliön alapuolella.

5.3.2 Maaperänäytteen ottaminen

Järjestelmän mallintamista ja kaivuutöiden mitoittamista varten heti kausilämpövaraston suunnitteluvaiheessa tulevasta kohteesta kannattaa ottaa maaperästä näyte. Tästä saadaan selville kallioperän syvyys ja maan lämmönjohtavuuden arvot. Maaperän oikealla lämmönjohtavuuden arvolla järjestelmä saadaan mitoitettua tarkemmin.

5.3.3 Rakennusmateriaalin valinta

Kausilämpövarastoja on rakennettu useimmiten betonista, teräksestä tai polymeerikalvolla (Heller 2000). Polymeerikalvo asennetaan muotoon rakennettua maata vasten ja siitä on tyypillisesti tehty vain suuria säiliöitä pinta-alan ja tilavuuden suhteen ollessa huonompi kuin muilla rakennusmateriaaleilla. Halvimpiin investointikustannuksiin päästään kuitenkin polymeerikalvolla, koska sen neliömetrihinta on terästä ja betonia halvempi (Heller 2000).

5.3.4 Kuopan kaivaminen säiliölle

Helppointa kausilämpövaraston rakentaminen olisi uudiskohteeseen, jossa tehdään muutenkin töitä kaivinkoneella perustuksille. Jos maaperä on helposti sortuvaa, joudutaan kuoppaa kaivamaan lähes 45 asteen kulmaan. 20m korkean säiliön vaatima kuoppa olisi noin 30m leveä, kun pohjalle tehdään tilaa 10m leveälle säiliölle. Syvempi kuoppa saadaan kaivettua pienemmällä koneella, kun kaivinkoneelle kaivetaan rampit kuoppaan, joita pitkin kuopan pohjalle voi ajaa. Kaivettu maa olisi hyvä saada säilöttyä väliaikaisesti tontille. Kuopan seinämän kulman ollessa 45 astetta 1500 m³ säiliölle kaivettavan kuopan maatilavuus olisi noin 7000 m³. Maa-aineksen pois kuljettaminen olisi kallista.

Jos säiliön syrjäyttämää maata ei voida kasata säiliön päälle, voidaan säiliö kaivaa sellaiseen syvyyteen, että syrjäytetty maa saadaan kasattua säiliön reunoille. Tällöin maa ei aiheuta ylimääräistä painetta säiliön rakenteelle.

5.3.5 Säiliön rakentaminen

Betonista valettavan kausilämpövaraston rakentaminen alkaa raudoituksen tekemisellä ja valumuotin kasaamisella. Valumuotin rakentamisesta aiheutuu kustannuksia. Pienempiin kustannuksiin voitaisiin päästä, jos valumuotti tuotaisiin paikalle suurempina elementteinä. Elementit voisivat mahdollistaa muotin uudelleenkäytön.

Tehtaalla esivalmistettuja betonielementtejä on käytetty kausilämpövaraston rakentamiseen Tanskassa, mutta näissä on esiintynyt halkeamia elementtien liitoskohdissa. (Heller 2000)

Käytettäessä kevyempiä betonilaatuja elementeissä teräskalvon asennus on välttämätöntä, ettei höyry läpäise betonia ja kastele eristeitä. Teräskalvon käyttö elementeissä voisi kuitenkin olla hyödyllistä, jos sillä saataisiin poistettua halkeamien aiheuttamat ongelmat. Elementteihin voitaisiin asentaa jo tehtaalla teräskalvot pintaan molemmille puolille elementtiä, jolloin rakennustyömaalla saumat vain hitsattaisiin kiinni.

Normaalisti betonisäiliöitä valmistettaessa säiliön sisään kasataan rakennustelineet, joiden päältä raudoitukset ja teräskalvot voidaan asentaa. Korkeiden rakennustelineiden kasaus on vaarallista ja hidasta työtä. Elementeistä valmistettavan säiliön rakentamisessa voitaisiin käyttää muita menetelmiä.

Säiliön pohjalaatan valamisen ja pinnoittamisen jälkeen sen päälle voitaisiin nostaa henkilönostin, josta saumojen hitsaustyö voidaan tehdä. Henkilönostimen nostamiseen voidaan käyttää samaa nosturia, jolla betonielementit asennetaan. Betonista valettavan säiliön rakentamisessa tästä ei olisi apua, koska rakennustelineet joudutaan asentamaan raudoituksen tekoa varten.

Elementeistä tehdyn säiliön seinämät voitaisiin pinnoittaa myös yläpäädyistä teräslevyllä. Yläreunan pinnoitus mahdollistaisi sen, että seinämien ollessa valmiina henkilönostin voidaan nostaa pois ja koko säiliön kansi voidaan laskea päälle. Kannen ollessa paikallaan yläreuna tarvitsisi hitsata kiinni ainoastaan ulkopuolelta.

Säiliön ulkopuolella saumojä voitaisiin hitsata samalla henkilönostimella, jota käytettiin aikaisemmin sisällä. Työhön soveltuva Kuukulkija Haulotte HA 20 PX on leveydeltään 2,38 m, joten vähintään tämän verran täytyy olla tukevaa tasaista maata säiliön ulkoreunalla.

5.3.6 Säiliön tiiveyden tarkastaminen

Kübler et al. (1997) raportoi Rottweiliin rakennetusta 600 m³ lämpövarastosta. Säiliö oli rakennettu betonista ja vesitiiveyden takaamiseksi oli asennettu 0,5 mm vahvuinen teräskalvo betonin pintaan. Hitsaussauman tekoa varten ruotsalainen yhtiö Conswede Ab oli tehnyt sähköiseen resistanssiin perustuvan hitsauslaitteen, jolla levyjen saumat saatiin hitsattua nopeasti. Laitetta oli aikaisemmin käytetty maakaasuvarastojen hitsauksessa, ja säiliöt oli testattu onnistuneesti 200 bariin asti. Rottweilin säiliötä testattaessa käytettiin kuitenkin ainoastaan 0,05 barin ylipainetta ympäristöön nähden, koska kausilämpövarasto ei ole paineistettu.

Paineistuksen jälkeen varaston vuotoa tarkkailtiin laitteistolla, jolla pystyttiin havaitsemaan 10^{-4} säiliötilavuus/päivä vuoto. Ensimmäisen testin aikana 4 – 5 tunnin sisällä huomattiin nopea paineen aleneminen. Vuoto oli kohdista, missä koneen tekemä sauma ja käsin hitsattu sauma yhdistyivät. Nämä vuodot korjattiin, minkä jälkeen varastosta saatiin tiiviimpi.

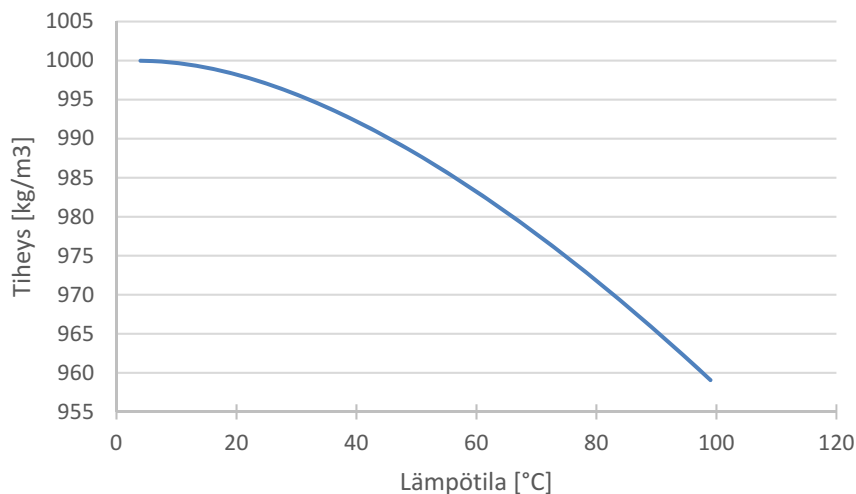
Hampurissa 4500 m^3 ja Friedrichshafenissa $12\,000 \text{ m}^3$ kausilämpövarastoon asennettiin $1,2 \text{ mm}$ vahva teräskalvo takaamaan vesihöyrytiiveyden. Hannoverissa 2750 m^3 säiliössä taas käytettiin tiheämpää betonilaatua, jonka kanssa teräskalvoa ei tarvittu. (Schmidt et al. 2004) Rakennustyömaalla säiliön valmistamisen pitäisi edetä nopeasti, koska paikalla tehtävät työt maksavat enemmän. Betonilaatu jolla on pieni höyryn läpäisevyys voi olla kustannustehokas vaihtoehto, jos rakennustyömaalla ei tarvitse asentaa teräskalvoa säiliön pintaan.

Säiliön vesitiiveys on tärkeää, koska kuivan eristemateriaalin lämmönjohtavuus on noin $0,04 \text{ W/(mK)}$ ja vedellä 10 °C lämpötilassa lämmönjohtavuus on noin $0,6 \text{ W/(mK)}$. Veden lämmönjohtavuus on siis noin 15 kertaa korkeampi kuin eristemateriaalin. Eristeen pieni lämmönjohtavuus perustuu ilmaonkaloihin, jotka ovat pieniä. Riittävän pienissä onkaloissa konvektio ei pääse toimimaan. Onkaloiden täytyessä vedellä eristeen lämmönjohtavuus kasvaa.

5.3.7 Säiliön täyttäminen

Kausilämpövarasto on tässä työssä suunniteltu täytettävän vesijohtoverkon vedellä. Korroosion vähentämiseksi vedestä täytyy höyrystää siihen liuennut ilma pois. Tällöin säiliöön pitkäksi aikaa jäävä vesi ei aiheuta korroosiota säiliön teräskalvoon.

Säiliön täytössä täytyy huomioida veden laajaneminen sen lämmitessä. Veden tiheyden muutos lämpötilan funktiona on esitetty Kuvassa 16:



Kuva 16. Veden tiheys lämpötilan funktiona

Vesijohtoverkosta otettaessa 4 °C lämpötilassa olevaa vettä sen tiheys on noin 999,97 kg/m³. Veden lämpötilan kasvaessa 99 °C:seen sen tiheys tippuu 959,07 kg/m³: n. Tästä voidaan laskea, että 20 m korkeaan säiliöön on jätettävä 82 cm vedelle tilaa laajentua. Tässä on oletettu pystysuora säiliön seinämä.

5.3.8 Aurinkokeräimien asentaminen

Kausilämpövarastoa lämmittävät aurinkolämpökeräimet voidaan asentaa mahdollisuuksien mukaan kohteen katolle. Joissain tapauksissa talojen katot on suunniteltu aurinkokeräimiä varten niin, että katto muodostuu kokonaan aurinkokeräimistä. Tällä saadaan laskeutua järjestelmän kustannuksia, kun kattoa ei tarvitse rakentaa erikseen (Lottner et al. 2000).

Näissä taloissa katto on suunnattu etelään ja se on asennettu optimaaliseen kulmaan sijainnin mukaan. Lumen sataminen keräimien päälle hankaloittaa optimointia. Jos keräimet asennetaan niin suureen kulmaan, että lumi valuu useimmiten katolta pois, niin silloin kesällä saadaan tuotettua vähemmän lämpöä. Kesän tuotannolle optimoitu kulma aiheuttaa lumen kasaantumisen keräimien päälle talvella. Lämpöä voitaisiin yrittää ajaa joissain tilanteissa keräimille päin talvella. Tarkoituksena olisi, että lumien valuttua pois pystytäisiin tuottamaan enemmän lämpöä, kuin valuttaminen vaati. Lumen poistaminen lämmön avulla olisi helposti automatisoitavissa oleva prosessi ja turvallinen, koska ihmisen ei tarvitse mennä katolle.

Munari Probst & Roecker (2007) tutkivat insinöörien ja arkkitehtien kanssa taloihin integroitavia aurinkolämpökeräimiä. Järjestelmiä arvioitiin niiden ulkonäön ja teknisten ominaisuuksien perusteella. Parhaimmat pisteet molemmilta arvostelijaryhmiltä sai talo, jossa aurinkokeräimet oli integroitu parvekkeen kaidelevyiksi. Tällä tavalla saadaan kuitenkin tuotettua niin vähän lämpöä, että se ei ole tässä työssä tarkasteltavan järjestelmän

kanssa vertailtavissa. Tutkimuksessa sai hyvät pisteet järjestelmä, jossa koko talon katto rakentui aurinkolämpökeräimistä. Talon katon kokoisella järjestelmällä saadaan tuotettua koko talon lämmöntarve, jos kerroksia ei ole liikaa.

As. Oy Luhtavillan luhtitaloissa kattopinta-alaa on noin 400 m² per talo ja luhtitaloja on asunto-osakeyhtiössä kaksi. Talojen katto poikkeaa vaakatasosta muutaman asteen. Tasakatonle asennettaessa aurinkolämpökeräimiä tietylle pinta-alalle saadaan asennettua keräinalaa noin kolmannes katon alasta. Nyt talon katon ollessa hieman nostetussa kulmassa kohti kaakkoa voidaan keräimiä asentaa hieman enemmän kuin 1/3 suhteella, mitä käytetään yleisesti arvioitaessa aurinkokeräimien maksimimäärää tasakatonle. Jos käytetään suhdelukua 0,45 niin saadaan 800 m² kattoalalle asennettua maksimissaan noin 360 m² aurinkolämpökeräimiä, mikä riittää tuottamaan kohteen koko lämmöntarpeen. As. Oy Luhtavillan erillistaloihin ja ulkorakennuksiin, jotka eivät varjostu puista kuuluu vielä lisäksi noin 670 m² kattopintaa, jolle voitaisiin asentaa keräimiä.

Integroiduissa järjestelmissä, joissa koko talon katto koostuu aurinkolämpökeräimistä, saadaan vielä etua keräimen takalevyn lämpöhäviöstä. Keräimen takalevy on talon ullakolla, jolloin lämpö johtuu sinne. (Anderson et al. 2009)

Chou et al. (2016) tutki aurinkokeräimiä, jotka asennettaisiin etelään suunnattujen ikkunoiden yläpuolelle varjostamaan keskipäivän säteilyä. Tällaisella järjestelmällä saadaan lisättyä talon pinnoille asennettavaa keräinalaa sekä vähennettyä rakennusten jäähtymisen tarvetta. Kuvattu järjestelmä voisi toimia hyvin Suomessakin, missä talvella pienellä kulmalla tuleva auringon säteily pääsisi sisään ja kesällä keräin ottaisi auringon säteilyn vastaan eivätkä asunnot lämpenisi liikaa. Vaikka aurinkolämpökeräimen takalevy lämpee päivällä, lämpösäteily ei pääsisi asuntoon sisään, koska ikkunat läpäisevät huonosti pitkäaaltoista säteilyä.

Järjestelmään voidaan asentaa eri tyyppisiä keräimiä sarjaan. Tasokeräimet ovat halvempia kuin tyhjiöputkikeräimet, mutta tyhjiöputkikeräimillä päästään parempaan hyötysuhteeseen lämpötilaeron kasvaessa nesteen ja ympäristön välillä. Baek et al. (2007) tutki järjestelmää, johon oli asennettu tasokeräimiä ja tyhjiöputkikeräimiä sarjaan. Tasokeräimiä oli apertuurialalta asennettu 427 m² ja tyhjiöputkikeräimiä vastaavasti 460 m². Tasokeräimen keskimääräinen hyötysuhde oli 38,5 % ja tyhjiöputkikeräimen 56,7 %. Kuumemmaksi lämmitettäessä vesi siis kannattaa olla paremmin eristetyissä keräimissä ja lämmittämisen alkupäässä halvemmissä vähemmän eristetyissä keräimissä, kun lämpötilaero ympäristöön on pienempi.

Apertuuriala on se aurinkokeräimen pinta-ala, jolta keräin aurinkokeräin absorboi säteilyä keräinlevyyn, ja jonka aurinko näkee sen ollessa kohtisuorassa kulmassa keräimeen nähden. Tyhjiöputkikeräimessä absorptiopintaa on keräimen molemmin puolin, mutta

kohtisuoraa auringon säteilyä keräin voi saada vain teholla, joka määräytyy absorptiolevyn halkaisijan mukaan. Keräimien bruttopinta-ala taas ei anna oikeaa kuvaa keräimen mahdollisesta vuosituotannosta, koska bruttopinta-ala tulee keräimen ulkomitoista.

5.3.9 Veden pumppausjärjestelmä

Aurinkokeräimien ja lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppujen pumppaustehon tarve on hyvin pieni, mutta sitä voidaan arvioida yhtälöstä (17):

$$P = \frac{\rho g H Q_p}{\eta}, \quad (17)$$

missä ρ on pumpattavan nesteen tiheys [kg/m^3], g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2], H on nostokorkeus [m], joka koostuu fyysisestä korkeuserosta ja kitkahäviöistä ja Q_p on pumpattava tilavuusvirta [m^3/s].

Yhtälö (17) ei ota huomioon veden lämpenemistä keräimillä, mikä pienentää tiheyttä ja täten pumppaustehoa. Jotta yhtälöstä (17) pystyttäisiin laskemaan pumppausteho tarvitsi arvioida ensin koko järjestelmän kitkavastukset.

5.3.10 Aurinkokeräimien kiertovesipumppu

Järjestelmään voidaan asentaa pumput, joiden pyörimisnopeutta pystyy säätämään taajuusmuuttajan avulla. Aikaisemmin on käytetty vakionopeudella pyöriviä pumppuja ja kuristusta, koska taajuusmuuttajia ei ollut saatavilla. Nykyään taajuusmuuttaja on kuitenkin hyvin kannattava investointi. Lämpökeräimien jälkeistä lämpötilaa mitataan ja veden virtausnopeus säädetään siten, että päästään aina haluttuun lämpötilaan eri auringon säteilyn intensiteeteillä.

Swan & Allen (2010) on tutkinut aurinkokeräimien kiertovesipumppuja, joita ajetaan harjattomilla tasavirtamoottoreilla. Tutkimuksessa pumpattiin kahden tasokeräimen lämmitteä vesi-glykoli seosta aurinkokeräimien ja käyttövesisäiliön välillä. Järjestelmässä oli 1,7 baarin paine ja 1,4 l/min tilavuusvirta, jolloin virtaus vaati 4 watin tehon. Pumpun ja moottorin yhdistetty hyötysuhde oli 50 %, jolloin järjestelmään valittiin 16 W aurinkopaneeli. Moottori oli yhdistetty pumppuun magneetilla, jolloin dynaamista tiivistettä ei tarvittu.

Harjattomassa tasavirta moottorissa on taajuusmuuttaja, koska moottorissa täytyy aktiivoida aina oikeaan aikaan tietty käämitys staattorilla. 2/3 virran muunnoksista jää kuitenkin pois tällaisella järjestelmällä.

Swanin tutkimuksessa ei mainita aurinkokeräimien pinta-alaa, mutta ne ovat tasokeräimillä tyypillisesti 2 m^2 /keräin, jolloin pumpun moottori vaatii sähköä 2 W/m^2 . Tällä

tavalla arvioituna työssä tarkasteltavat aurinkolämpökeräimet tarvitsevat noin 712 W pumppaustehon 356 m² keräinalalta. Pumppaustehontarve pystyttäisiin tuottamaan kolmella 310 W aurinkopaneelilla, jotka maksavat nykyään noin 180 €/kpl (Ev-power 2016). Jos paneelin huipunkäyttöajaksi oletetaan 900 tuntia, nämä paneelit tuottaisivat vuodessa noin 837 kWh sähköä. Kuluttajalle sähkön hinnan ollessa kokonaisuudessaan noin 0,14 €/kWh (Tampereen Sähkölaitos 2016) paneelien takaisinmaksuaika olisi noin 4,6 vuotta.

5.3.11 Lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppu

Jäähdytys-, lämmitys- ja lämpimän käyttöveden tuotantojärjestelmä vaatii toisen kiertovesipumpun. Tuotettaessa kausilämpövaraston vedestä lämmintä tai kylmää vettä kattosäteilijöille, tarvitaan kaksi pumppua. Toinen pumpuista kierrättää kausilämpövaraston vettä lämmönvaihtimen toisella puolella ja toinen pumpuista kierrättää lämmitysjärjestelmän vettä lämmönvaihtimen toisella puolella. Talon puolen nopeus säädetään lämmitystarpeen mukaan ja kausilämpövaraston puolen nopeus säädetään niin, että lämmönvaihtimelta lähtee oikean lämpöistä vettä kattosäteilijöille.

Lämmin käyttövesi voidaan tuottaa lämmönvaihtimessa suoraan sen tullessa kaupungin vesijohtoverkostosta paineella, jolloin tässä ei tarvita toista pumppua eikä pienempiä käyttövesisäiliöitä. Käyttövesisäiliöstäkin on aina lämmönhukkaa ympäristöön, joten nyt välttyään tältä. Kaukolämmöllä lämmitetyissä taloissa pyritään mahdollisimman pieniin sopimusvesivirtoihin, jolloin kuukausimaksut ovat pienemmät, mutta tässä järjestelmässä siitä ei ole ongelmaa. Ainoastaan lämmönvaihtimien investointikustannus kasvaa hieman.

Lämpimän käyttöveden putkiston vetoihin ja eristykseen on kiinnitettävä erityistä huomiota tässä, koska vettä ei voida nyt kierrättää takaisin säiliölle kuten yleensä tehdään.

6. JÄRJESTELMÄN MITOITTAMINEN

Tämän työn pääasiallinen tarkoitus on tehdä laskentamalli, jolla voidaan mitoitaa ja simuloida lämmön kausivarasto eri kohteisiin. Muuttujia ovat mm. lämmöntarve, maaperän koostumus, aurinkokeräimien määrä, säiliön geometria ja kaivuusyvyys.

Vaikka tässä työssä on tarkasteltu tiettyä taloyhtiötä, jolle tiedetään lämmönkulutus ja sen jakautuminen vuoden ympäri, voidaan mallilla kuitenkin mitoitaa minkä tahansa muunkin rakennuksen lämmitysjärjestelmä.

6.1 Simulointityökalu

Järjestelmän mitoittamiseksi tehty simulointityökalu tehtiin Comsol Multiphysics ohjelmistolla. Comsol Multiphysics ohjelmistosta on valittu neljä eri fysiikkapakettia käyttöön tämän lämmönsiirto-ongelman ratkaisemiseksi: laminaari virtaus, lämmönsiirto nesteessä, lämmönsiirto kiinteässä aineessa ja lämmönsiirto huokoisessa materiaalissa.

Tämän jälkeen on tehty mallin geometria sekä kohdat, joista halutaan mitata keskiarvolämpötiloja. Seuraavaksi on asetettu oikeat materiaalit mallin jokaiseen kohtaan. Käytettävät materiaalit ovat vesi, teräs, betoni, eriste ja maa.

Laskettavan alueen reunoille on asetettu lämpötilareunaehto tarpeeksi kauas säiliöstä 4 °C ja maan pinnalle on annettu reunaehto pakotettu lämmönsiirto ilmavirtaan. Tällä on pyritty mallintamaan tuulta, jolle on laitettu keskiarvo 5 m/s. Ilman lämpötila muuttuu laskentamallissa jokaisella tunnilla. Lämpötilat on saatu Tampereen Sähkölaitokselta.

Laminaari virtaus säiliöön sisälle tai ulos on laskettu sen hetkisen kulutuksen ja aurinkolämmön tuotannon välisenä erotuksena. Aurinkolämmön tuotannolle on käytetty Seaby aurinkolämpövoimalan tuotantolukuja. Voimala sijaitsee Pohjois-Tanskassa alueella, jonka vuosittainen säteily on noin 1000 kWh/(m²a) eli sama kuin Tampereella. Säteilyn jakauma on kuitenkin epäedullisempi Suomessa, joka johtaa suurempaan kausilämpövarastoon ja lämpöhäviöihin.

Energian käytön ja tuotannon välisestä erosta jokaiselle tunnille on laskettu säiliöön sisään tai ulos tuleva massavirta yhtälön (18) mukaisesti:

$$\dot{m} = \frac{E_{tuotanto} - E_{kulutus}}{c_p \Delta T} \quad (18)$$

Yhtälöstä (18) nähdään veden massavirran kasvavan, jos veden lämpötilaero keräimissä pienenee. Massavirta pienenee, jos aurinkokeräimiltä saatava tuotanto pienenee.

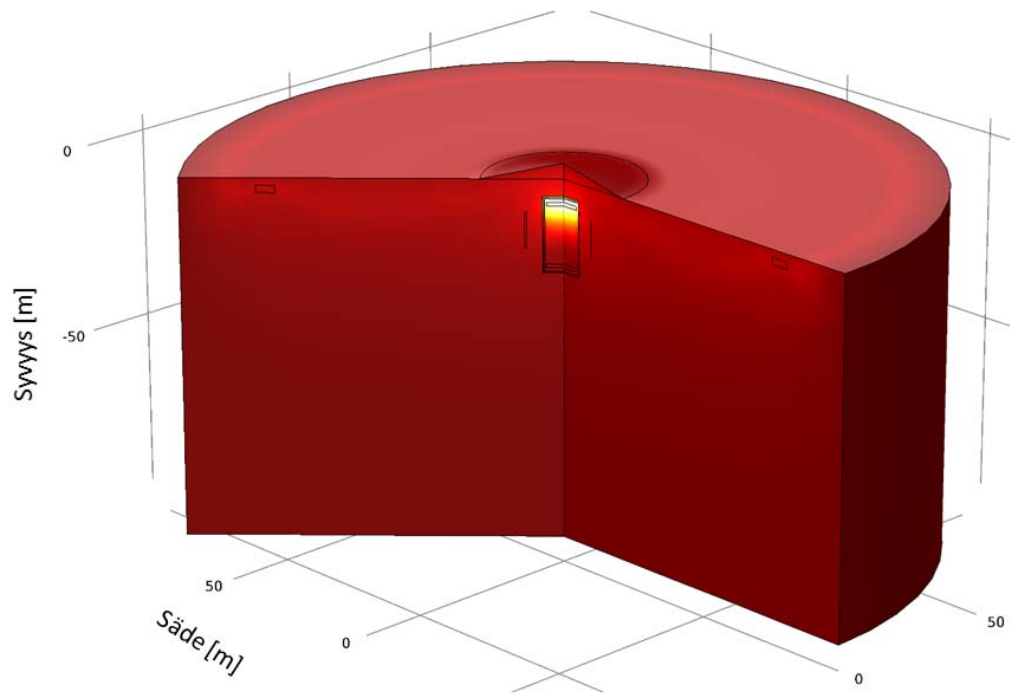
Mallin tarkastelujaksona pidettiin kolme vuotta, koska tänä aikana maaperä lämpenee ja lämpötilat muuttuvat enemmän. Tarkastelujaksoa pidennettiin viiteen vuoteen, josta huomattiin, että merkittävää muutosta ei enää tapahdu kolmannen vuoden jälkeen. Kokeen jälkeen palattiin kolmen vuoden tarkastelujaksoon.

Tarkoituksena on löytää säiliön yläpään alhaisin lämpötila keväällä kolmantena vuotena, joka suuruus täytyisi olla noin 65 °C, jos pyritään saamaan auringosta noin 100 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta.

6.1.1 Mallin geometria

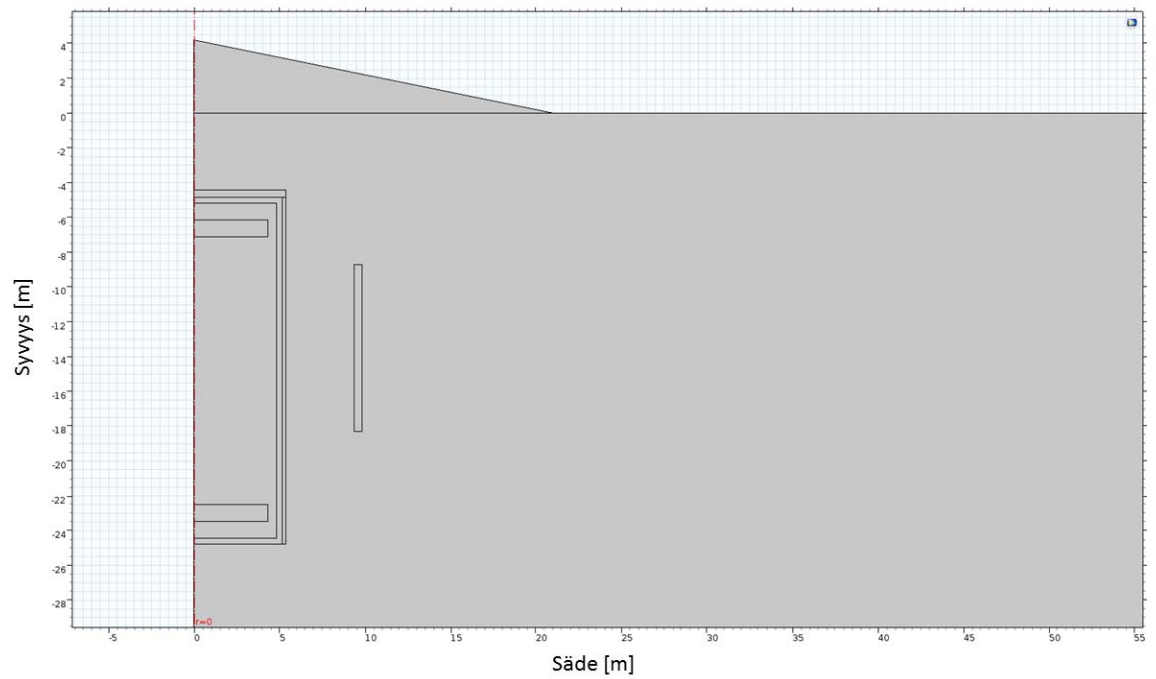
Simuloitavasta kausilämpövarastosta tehtiin Comsol Multiphysics ohjelmistolla yksinkertainen malli. Geometriaan ei lisätty vettä syöttävää diffuusoria vaan vesi tulee säiliöön sen yläpäästä ja poistuu sen pohjalta. Diffuusorin mallintamiseksi tehtävästä olisi pitänyt luoda 3D-malli, jonka ratkaiseminen kestää huomattavasti kauemmin kuin 2D-mallin.

Säiliön reunoja ei pyöristetty todelliseen muotoon, koska pyöristys olisi vaikuttanut laminaariin sisäänvirtaukseen haitallisesti laskentamallissa. Häiriötön laminaari virtaus menisi säiliön keskeltä lävitse ja reunat jäisivät kylmäksi. Ongelma aiheutuu ainoastaan siitä, että laminaari malli ei sisällä lainkaan turbulenssia, jolloin lämmin vesivirtaus ei menisi seinämän lähelle. Pyörähdyssymmetrinen 2D-malli on esitetty kuvassa 17 kolmiulotteisena mallina.



Kuva 17. Laskentamallista tehty 3D-kuva

Kuvassa 18 on esitelty laskentamalli edestä katsottuna 2D leikkauksena.



Kuva 18. Laskentamallin geometria betonisäiliölle

Kuvasta 18 nähdään suorakaiteen muotoiset palat säiliön pohjalla, yläosassa ja sivussa. Näistä alueista tallennetaan lämpötilan arvoja jokaiselta tunnilta. Kuvassa säiliön päällä oleva kolmion muotoinen pala maata on säiliön syrjäyttämä maa-aines, joka on kasattu säiliön päälle.

6.1.2 Käytettävät materiaalit

Comsol Multiphysics ohjelmistosta käytettävillä materiaaleilla monet aineominaisuudet riippuvat lämpötilasta. Taulukkoon 1 on koottu materiaalien aineominaisuuksia keskilämpötilassa 45 °C.

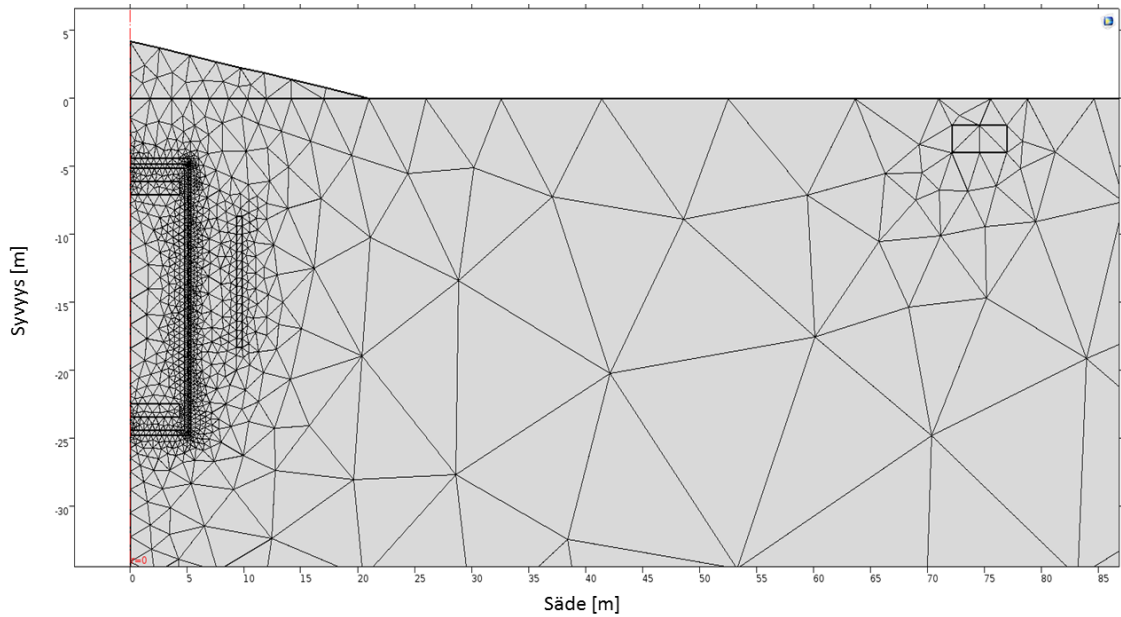
Taulukko 1.

Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/(mK)]	Ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]	Tiheys [kg/m ³]
Vesi	0,638	4194	988
Maa	0,121	8,5	1600
Betoni	3,28	750	2400
Teräs	17	500	7500
Eriste	0,088	29,6	210

Taulukossa 1 on annettu määrän betonin lämmönjohtavuuden arvo. Käytettäessä teräskalvoa betoni ei pääse kastumaan ja tällöin betonin lämmönjohtavuus on pienempi.

6.1.3 Laskentaverkko

Laskentaverkon tiheyttä harvennettiin, kunnes huomattiin tulosten muuttuvan ja tästä päätettiin hieman tiheämpään verkkoon. Laskentaverkko on tiheintä kausilämpövaraston seinämän kohdalla ja harvinta maa-alueen keskellä. Tällä tavalla laskentaa saadaan nopeutettua ilman, että tulokset vääristyvät. Käytetty laskentaverkko on esitetty kuvassa 15. Comsol Multiphysics ohjelmistossa termodynamiikan paketissa oletusmuoto laskentaelementille on kolmio, jota tässäkin työssä käytettiin. Kolmion muotoisilla elementeillä pystytään verkottamaan minkä tahansa muotoinen kappale ja siksi se on oletusmuoto elementille.



Kuva 19. Kausilämpövaraston laskennassa käytetty laskentaverkko

Laskenta-aikaa säästetään, kun verkko ei ole yhtä tiheää joka kohdasta. Tulokset eivät kuitenkaan vääristy, jos harvennus tehdään oikeaan kohtaan. Ympäröivän maan kohdalta laskentaverkkoa harvennettiin ja malli laskettiin samoilla parametreilla, jotta pystyttiin näkemään pysyvätkö tulokset saman. Tarkastuksen jälkeen harvennettua verkkoa käytettiin. Kuvan 19 oikeassa yläreunassa nähdään laskentaverkon tiheyden kasvavan jälleen. Suorakaiteen muotoinen pala on tehty maan pintalämpötilan tallentamista varten, ja laskentaverkko on tiheämpää palan ympärillä.

6.2 Säiliön geometria

Säiliön geometria vaikuttaa veden lämpötilakerrostumisen säilymiseen. Pallon muotoisella säiliöllä kerrostuminen olisi parasta ja lämpöhäviöt pienimmät (Yang et al. 2016). Pallon muotoinen säiliö on kuitenkin hankala toteuttaa käytännössä. Teräksestä valmistettu pallo olisi luultavasti toteutuskelpoinen, mutta tässäkin tarvittaisiin kahteen suuntaan taivutettuja levyjä, joiden saatavuus tässä kokoluokassa on hankalaa.

Pallon ulkopinta-ala voidaan laskea yhtälöstä (19):

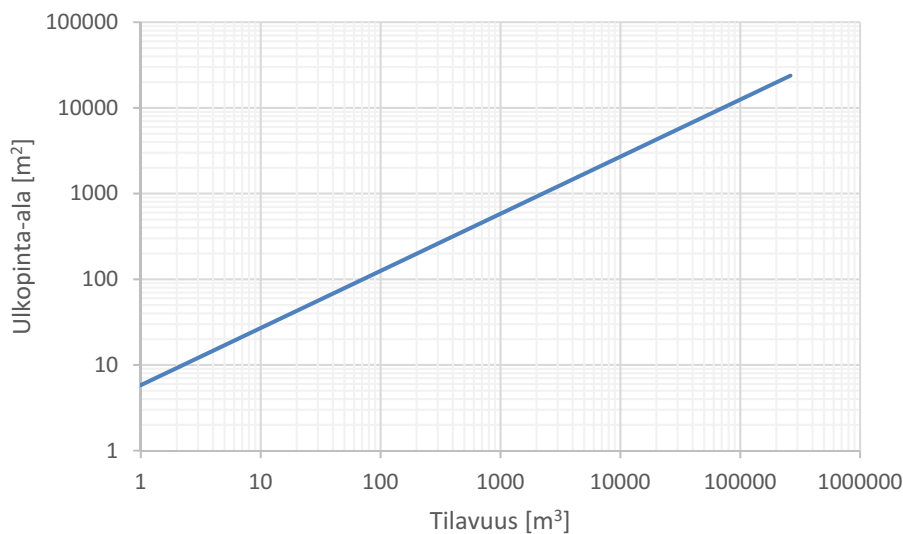
$$A = 4\pi r^2, \quad (19)$$

missä r on pallon säde [m].

Lieriölle, jonka korkeus on $2r$, ulkopinta-ala saadaan yhtälöstä (20):

$$A = A_{pohja} + A_{katto} + A_{seinät} = 2(\pi r^2) + 4\pi r^2 = 6\pi r^2. \quad (20)$$

Kuvassa 20 on esitetty graafisesti, miten lieriön ulkopinta-ala kasvaa tilavuuden funktiona. Lasketussa tapauksessa lieriön korkeus oli kaksi kertaa sen halkaisijan suuruinen. Parempaan pinta-alan ja tilavuuden suhteeseen oltaisiin päästy lieriöllä, jonka korkeus on saman suuruinen kuin halkaisija. Kaksi kertaa halkaisijan suuruista korkeutta käytettiin, koska tämän muotoisella säiliöllä pystytään myös jäähdyttämään rakennusta kesällä. Optimaalinen pinta-alan ja tilavuuden suhde ei siis ole kokonaisuuden kannalta paras, jos kausilämpövarastoa käytetään jäähdytykseenkin. Kaivussyvyyden kustannus sekä ulkovaipan häviö asettavat kuitenkin maksimin korkeuden ja halkaisijan suhteelle, mitä järjestelmässä kannattaa käyttää.



Kuva 20. Lieriön ulkopinta-ala tilavuuden funktiona

Kuvasta 20 huomataan, että funktio on suora logaritmisella asteikolla. Säiliön tilavuus kasvaa eksponentiaalisti nopeammin kuin sen ulkopinta-ala.

6.3 Ratkaistava yhtälöryhmä

Comsol Multiphysics ohjelmistolla ratkaistaan tässä työssä lämmönsiirron transientti johtumistehtävä. Mallissa säiliötä ladattaessa kuuma vesi virtaa säiliön yläpäästä sisään ja purettaessa kylmä vesi tulee säiliön pohjalta. Vaikka malli ei huomioi veden konvektiota niin saatu lämpötilajakauma on realistinen, koska veden lämpötila nousee aina ylöspäin mentäessä. Epäfysikaalinen lämpötilajakauma muodostuisi, jos vesi ei liikkuisi säiliössä latauksen ja purkamisen aikana. Tällöin malliin, joka ei huomioi konvektiota syntyisi

kuumin kohta vesimassan keskelle, eikä sen yläpäähän, minne se todellisuudessa muodostuu konvektion vaikutuksesta.

Seuraavaksi on esitetty yhtälöryhmä, jonka Comsol Multiphysics ratkaisee laskentamallissa. Huokoisen materiaalin lämmönsiirtoyhtälö:

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (21)$$

$$\mathbf{q} = -k_{eff} \nabla T, \quad (22)$$

missä $(\rho c)_{eff}$ kuvaa huokoisen materiaalin tehollista tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin arvoa, \mathbf{u} kuvaa huokoisessa materiaalissa virtaavan fluidin vektorimuotoista nopeuskenttää [m/s] ja \mathbf{q} kuvaa lämpövirran vektorikentän [W/m²].

Huokoisen materiaalin ja kiinteiden kappaleiden lämmönsiirtoyhtälö eroaa toisistaan tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönsiirtokertoimen tehollisilla arvoilla (ρ , C_p ja k)_{eff}.

Lämmönsiirtoyhtälö kiinteissä kappaleissa:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (23)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T. \quad (24)$$

Lämmönsiirtoyhtälö nesteille on esitetty yhtälöissä (25) ja (26):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (25)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T. \quad (26)$$

Laminaaria kokoonpuristumatonta virtausta kuvaavat yhtälöt:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}, \quad (27)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (28)$$

Yhtälö (27) on Navier-Stokes-yhtälön matriisimuoto. Termi ρ on fluidin tiheys [kg/m³], $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ on nopeuden muutos ajan suhteen [m/s²], \mathbf{u} [m/s] on vektorimuotoinen nopeuskomponentti ja termi \mathbf{I} [-] on identiteettimatriisi eli yksikkömatriisi. Eksponentti T merkitsee

operaation $\nabla \mathbf{u}$ [1/s] transpoosia. Termi \mathbf{F} [N] kuvaa fluidiin vaikuttavia ulkoisia voimia vektorimuodossa. Termi μ kuvaa fluidin dynaamista viskositeettia. Yhtälö (28) kertoo, että tarkastellaan kokoonpuristumatonta virtausta.

6.4 Herkkyysanalyysi

Tärkeimpien parametrien muutoksen vaikutusta kausilämpövaraston toimintaan tarkasteltiin. Maaperälle annettiin erisuuruisia lämmönjohtavuuden arvoja väliltä 0,1 – 3 W/(mK). Eristevahvuuksia muutettiin väliltä 0 – 2 m. Betoniseinälle annettiin vahvuuksia 0.1 – 0.3 m väliltä. Säiliön upotussyvyydelle annettiin arvoja 0 – 5 m.

Suurin vaikutus tuloksiin oli kuitenkin säiliön koolla ja aurinkokeräimien määrällä. Aurinkokeräimien määrää muutettiin 311 – 380 m² välillä. Säiliön vesitilavuutta muutettiin välillä 700 - 2000 m³.

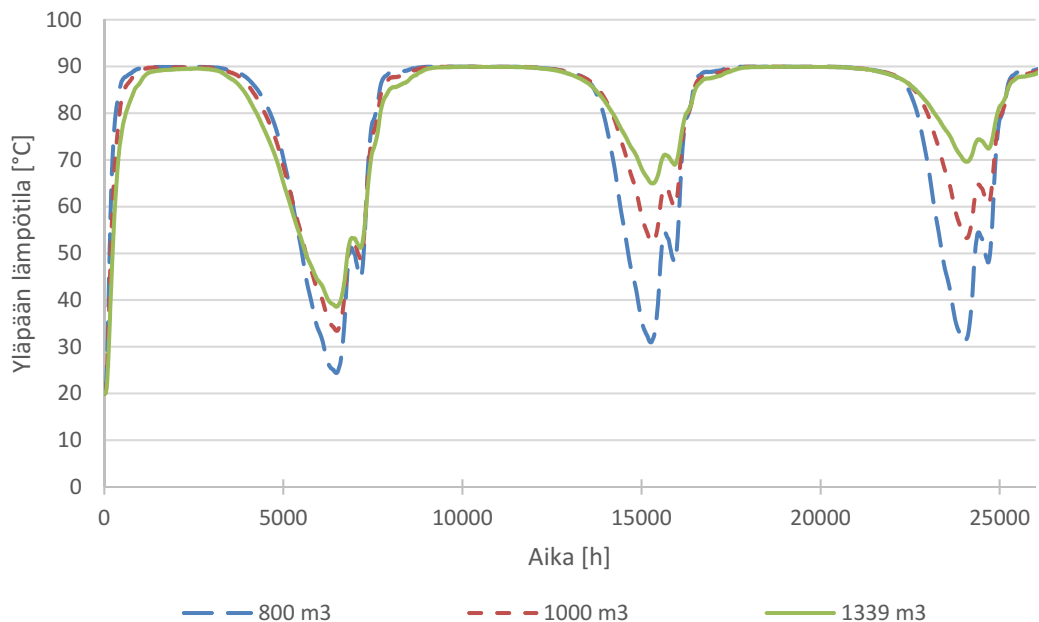
Kaikki tapaukset tallennettiin Excel-tiedostoon 8 mitattavan tiedon osalta. Näitä olivat säiliön keskiarvolämpötila sekä lämpötila säiliön yläpäässä ja pohjalla. Maaperän lämpötila 4 m etäisyydellä säiliön kyljestä sekä kaukana säiliöstä 1,5 m syvyydellä. Lämpövirta säiliön kyljestä sekä yläpäästä maaperään ja virtausnopeus säiliössä. Eri parametrien vaikutukset tuloksiin analysoitiin.

Ratkaistusta simulointimallista otettiin aina GIF tiedosto isotermien muutoksesta jokaisella ajan hetkellä. GIF-tiedostosta nähdään vielä paremmin säiliön latautumisen ja purkautumisen kulku isotermien perusteella.

7. SIMULOINTIMALLIN TULOKSET

7.1 Tilavuuden ja latauslämpötilan vaikutus

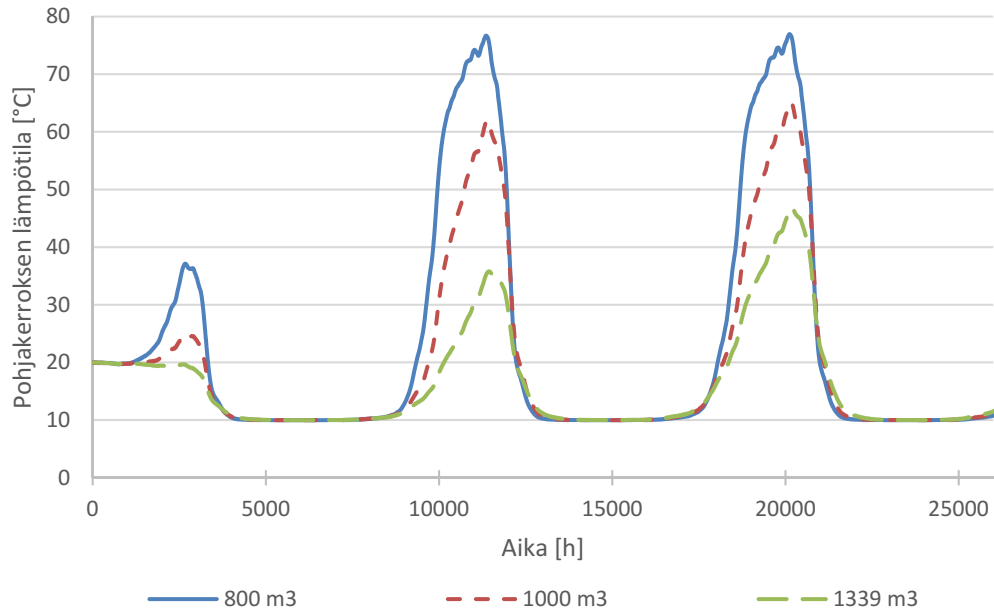
Kuvaajassa on esitetty säiliön yläpään lämpötila kolmella eri parametrin arvolla. Muutettava parametri on ollut säiliön tilavuus, kun muut parametrit on pidetty vakiona. Tässä ajossa veden paluulämpötila oli 10 °C ja latauslämpötila 90 °C. Eristettä oli 0,2 m ja aurinkokeräimien määrä 311 m².



Kuva 21. Kausilämpövaraston yläkerroksen lämpötila ensimmäisen kolmen vuoden aikana

Kuvaajasta voidaan arvioida, että lähes sadan prosentin aurinko-osuuteen lämmityksessä ja lämpimän käyttöveden tuotannossa päästäisiin kausilämpövaraston tilavuuden ollessa noin 1000 m³. Kausilämpövaraston keskiarvolämpötila käy suurimmillaan 80°C:ssa 1000 m³:n säiliöllä. Tätä lämpötilaa voidaan käyttää, kun arvioidaan eri väliaineiden kustannuksia kausilämpövarastoon.

Seuraavassa kuvaajassa on esitetty samasta laskennasta säiliön pohjakerroksen lämpötila ensimmäisen kolmen vuoden ajalta.

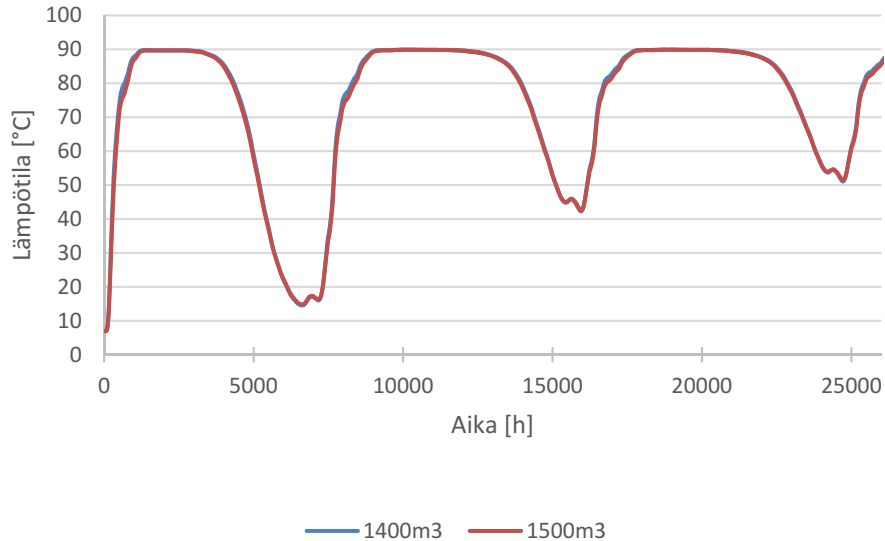


Kuva 22. Säiliön pohjakerroksen lämpötila ensimmäisen 3 vuoden aikana

Kuvasta 22 huomataan, että tämän kokoinen säiliö ei riitä, jos sen avulla on tarkoitus myös jäähdyttää rakennuksia elokuun loppuun saakka. Elokuun loppua vastaa kuvaajassa ajan hetki 19 680 h, jolloin 1339 m³ säiliön pohjakerros on noin 40 °C lämpötilassa.

Ongelmaa lähdettiin korjaamaan kasvattamalla säiliön vesitilavuutta, halkaisijan ja korkeuden suhdetta sekä lämpötilaeroa.

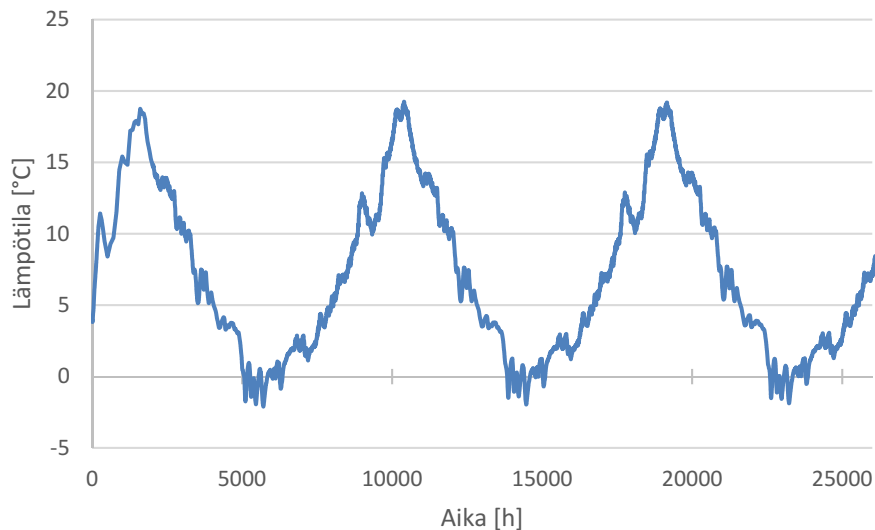
Kuvaajassa 23 on esitetty 1500 m³ ja 1400 m³ säiliön pintakerroksen lämpötilat ensimmäisen kolmen vuoden aikana. Nolla hetki kuvaajassa on 1.6.2014. Säiliön latauslämpötila oli 90 °C ja paluuveden lämpötila 7 °C.



Kuva 23. Säiliön pintakerroksen lämpötila 3 ensimmäisen vuoden aikana

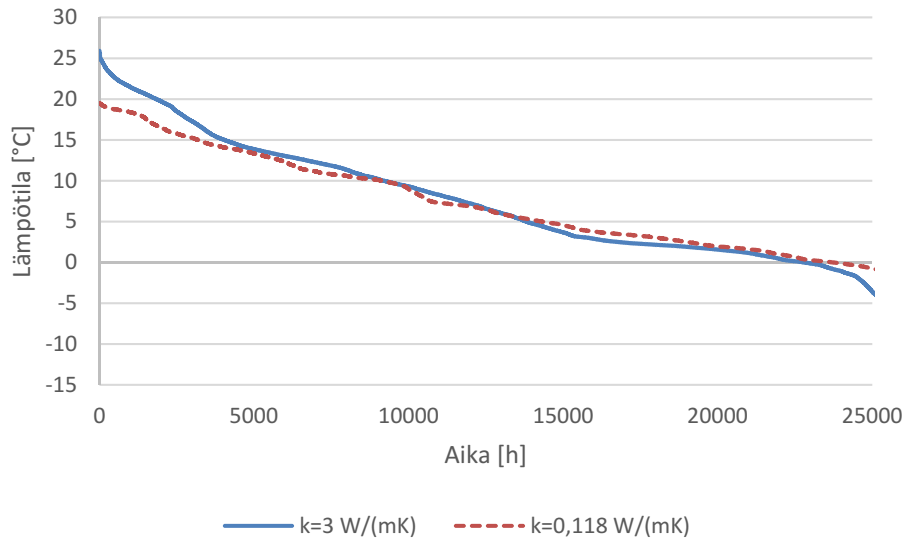
Kuvasta 23 huomataan, että säiliössä on lämmityksen tarpeeseen tilavuutta jo ylimäärin, koska 100 m^3 lisäys ei vaikuta enää lämpötiloihin.

Kuvassa 24 on esitetty maan pintakerroksen lämpötila kaukana säiliöstä 1,5 m syvyydellä, kun on käytetty Comsol Multiphysics ohjelmiston sovitetta maaperän lämmönjohtavuudelle. Mallinnuksen lämpötila-alueella sovite antaa noin $0,118 \text{ W}/(\text{mK})$ lämmönjohtavuuden arvon.



Kuva 24. Maan lämpötila kaukana säiliöstä 1,5 m syvyydellä

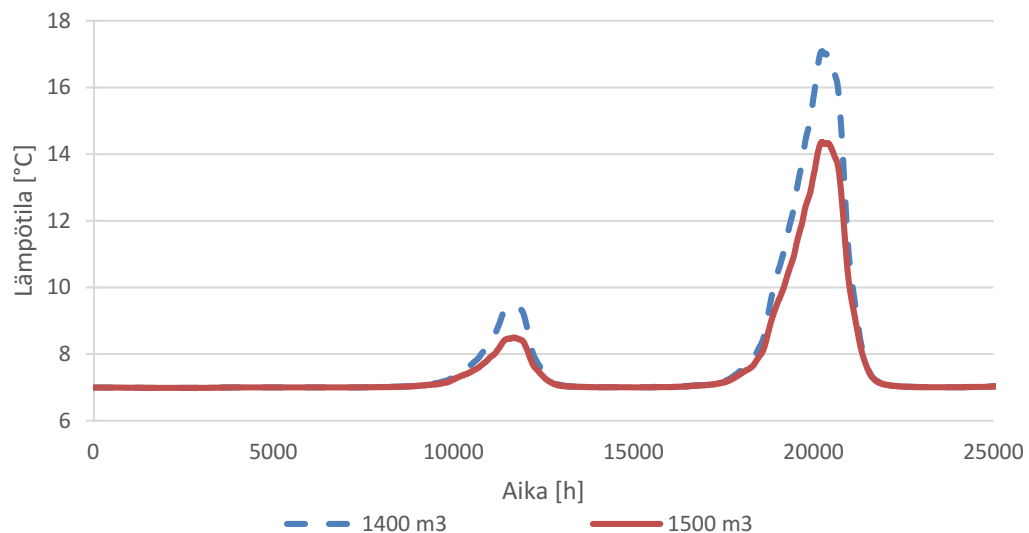
Kuvasta 24 nähdään maan lämpötilan käyvän noin -3°C :ssa alimmillaan. Seuraavaan kuvaajaan on tehty aikasarja käyttäen lämmönjohtavuuden arvoa $3 \text{ W}/(\text{mK})$ sekä materiaalikirjaston sovitetta maaperän lämmönjohtavuudelle.



Kuva 25. Aikasarja maan pintakerroksen lämpötilasta eri lämmönjohtavuuden arvoilla

Kuvasta 25 nähdään pintakerroksen lämpötilan käyvän sekä alhaisemmassa lämpötilassa talvella että korkeammassa kesällä lämmönjohtavuuden arvon ollessa suurempi. Tulos on looginen.

Seuraavassa kuvaajassa on esitetty säiliön pohjakerroksen leikkauksen keskilämpötila ensimmäisen kolmen vuoden aikana.

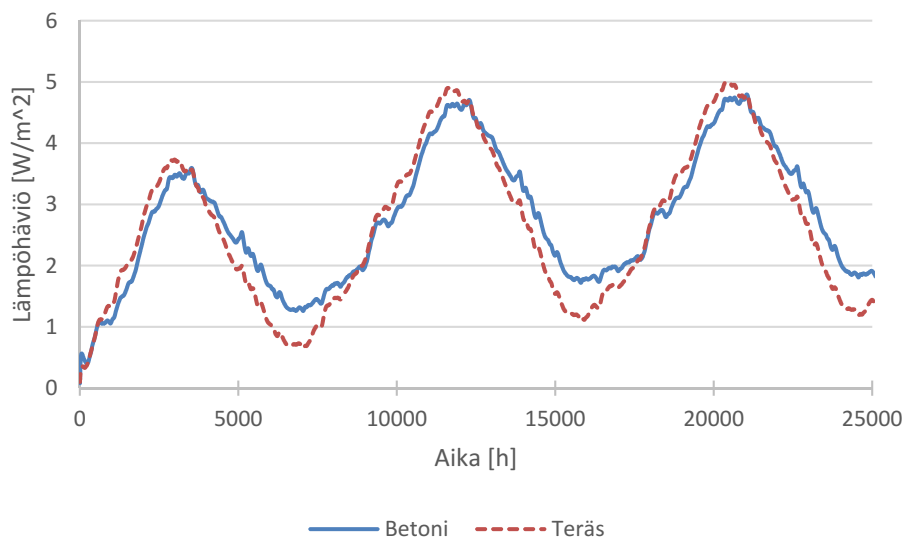


Kuva 26. Kausilämpövaraston pohjakerroksen lämpötila ensimmäisen kolmen vuoden aikana

Kuvasta 26 huomataan, että ensimmäisen vuoden latauksen lämpö ei ehdi johtua pohjakerrokseen. Seuraavana kahtena vuotena nähdään jo hieman nousua. Viive aiheutuu lyhyestä latausjaksosta ensimmäisenä kautena, kun tuotanto aloitettiin kesäkuussa. Toinen merkittävä tekijä on lämmön johtumisen etenemisnopeus vedessä. Elokuun lopussa kolmantena vuotena 1400 m^3 pohjakerroksen lämpötila on $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 1500 m^3 $11,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Eli 1400 m^3 säiliökin riittää kohteen jäähtytykseen.

7.2 Rakennusmateriaalin vaikutus

Teräsrakenteisen säiliön lämpöhäviön oletettiin olevan betonista säiliötä suurempi, koska teräksen lämmönjohtavuuden arvo on noin 5 kertaa suurempi kuin betonin. Seinämän materiaaliksi muutettiin teräs ja lämpöhäviön suuruus laskettiin uudelleen. Kuvassa 27 on sekä betonisen että teräksisen kausilämpövaraston kyljen lämpöhäviö.



Kuva 27. Säiliön kyljen lämpöhäviö maan lämmönjohtavuuden arvolla $2 \text{ W}/(\text{mK})$

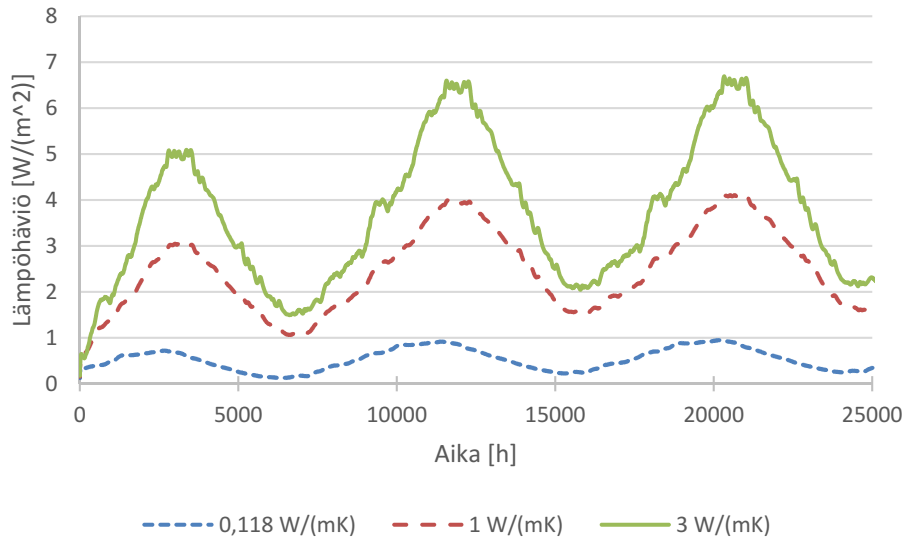
Kuvasta 27 nähdään, että materiaalien välillä ei ole suurta eroa, vaikka teräksen lämmönjohtavuuden arvo on noin 5 kertaa suurempi kuin betonilla. Lämpöhäviön ollessa likimain sama molemmilla materiaaleilla, valmiin säiliön hinta määrää kumpaa materiaalia kannatta käyttää.

7.3 Maan lämmönjohtavuuden vaikutus

Comsol Multiphysics ohjelmistolla mallia voidaan ajaa monta kertaa peräkkäin parametric sweep toiminnolla, joka muuttaa aina tiettyä parametria ajojen välillä. Maaperän lämmönjohtavuuden vaikutusta kausilämpövaraston toimintaan arvioitiin tällä tavalla. Maaperälle annettiin lämmönjohtavuuden arvoja $0,118 \text{ W}/(\text{mK})$, $1 \text{ W}/(\text{mK})$ ja $3 \text{ W}/(\text{mK})$. En-

simmäinen lämmönjohtavuuden arvo vastaa Comsolin materiaalipankissa olevan maaperän lämmönjohtavuuden arvoa kyseisessä lämpötilassa. Kaksi seuraavaa arvoa on arvioitu homogeeniselle maaperälle ja graniitille.

Kuvassa 28 on esitetty maaperän lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutus 1400 m³ kausilämpövaraston kyljen lämpöhäviöön.

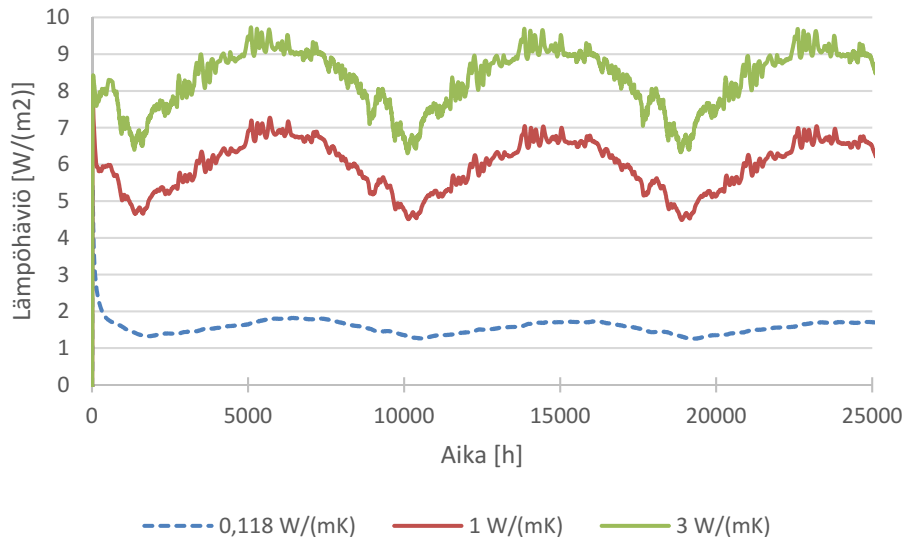


Kuva 28. Maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus säiliön kyljen lämpöhäviöön

Kuvasta 28 nähdään selvästi, että lämpöhäviö nousee, kun maaperän lämmönjohtavuuden arvo kasvaa. Maaperän lämmönjohtavuuden arvoa nostettaessa 0,118 W/(mK):stä 3 W/(mK):n eli noin 25 kertaiseksi, suurin lämpöhäviö nousee ainoastaan 6,5 kertaiseksi. Tulokset on saatu eristevahvuuden ollessa 0,2 m ja eristeen lämmönjohtavuuden arvon ollessa 0,04 W/(mK).

Keskimääräisiksi lämpöhäviön arvoiksi saatiin 0,52 W/m², 2,45 W/m² ja 3,68 W/m². Säiliön kyljen pinta-alan ollessa 582 m² saadaan lämpöhäviöiksi 2671 kWh/a, 12494 kWh/a ja 18746 kWh/a. Suurimman lämpöhäviön arvo on siis noin 370 € vuodessa, kun aurinkolämmöntuotantohinta on 19,5 €/MWh. Ylimääräinen lämpö täytyy kuitenkin varastoida, jolloin kausilämpövaraston hinta täytyy sisällyttää arvioon. Oletetaan aurinkolämmölle kokonaishinta 100 €/MWh, joka on hieman alhaisempi kuin kaukolämmön kokonaishinta. Tällöin voidaan laskea parempi arvio lämpöhäviön kustannukselle. Hinnat on esitetty taulukossa 2.

Kuvassa 29 on esitetty säiliön yläpään lämpöhäviö jokaisella eri maaperän lämmönjohtavuuden arvolla.



Kuva 29. Säiliön yläpään lämpöhäviö eri maaperän lämmönjohtavuuden arvoilla

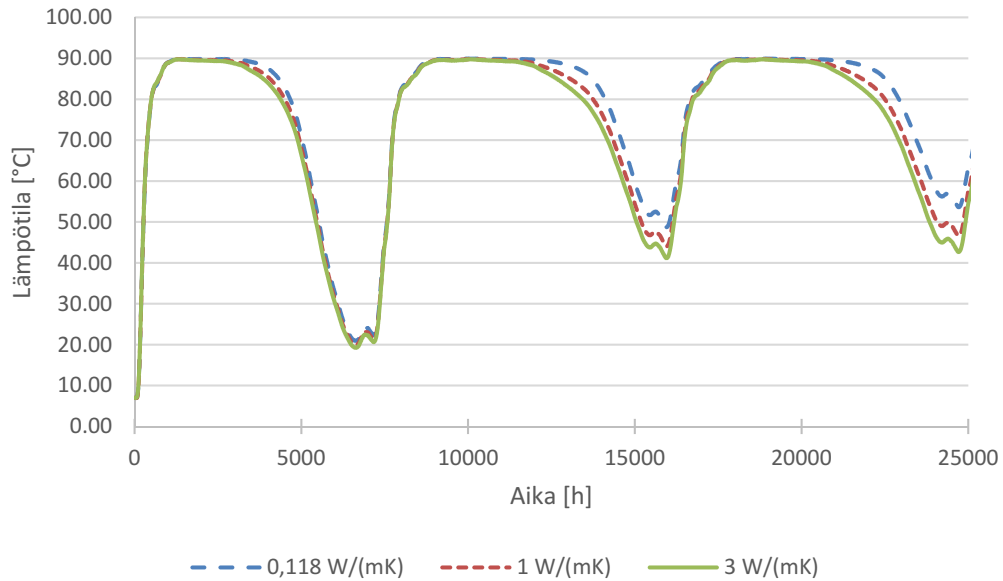
Kuvasta 29 nähdään, että säiliön yläpään lämpöhäviön maksimiarvo on kasvanut noin 5,5 kertaiseksi kun lämmönjohtavuuden arvo kasvatettiin 25 kertaiseksi. Keskimääräiset lämpöhäviön arvot olivat näissä $1,6 \text{ W/m}^2$, 6 W/m^2 ja $8,3 \text{ W/m}^2$. Vuotuisiksi lämpöhäviöiksi saataisiin siis noin 1000 kWh/a , 3800 kWh/a ja 5300 kWh/a yläpäädyn pinta-alan ollessa 73 m^2 .

Yhdistetyt vuotuiset lämpöhäviöt ja häviöiden kustannukset on kerätty taulukkoon 2:

Taulukko 2.

Maaperän lämmönjohtavuuden arvo	Yläpinnan lämpöhäviö vuodessa [kWh/a]	Kylkien lämpöhäviö vuodessa [kWh/a]	Kokonaislämpöhäviö vuodessa [kWh/a]	Kokonaislämpöhäviön kustannus [€/a]
0,118 W/(mK)	1000	2671	3671	367
1 W/(mK)	3800	12 494	16 294	1629
3 W/(mK)	5300	18 764	24 064	2406

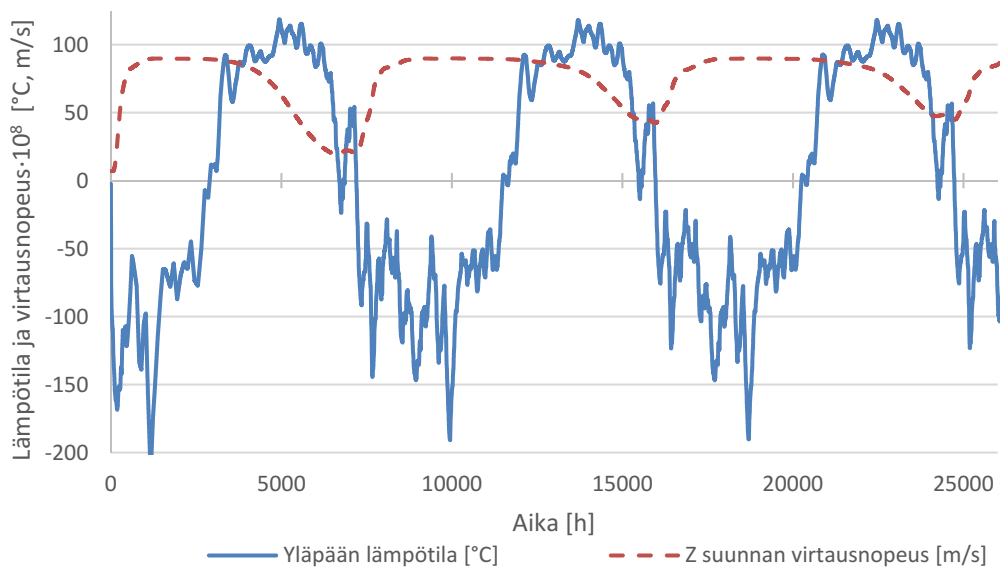
Kuvassa 30 on esitetty säiliön yläleikkauksen lämpötila kolmen ensimmäisen vuoden aikana, jokaisella eri lämmönjohtavuuden arvolla.



Kuva 30. Säiliön yläleikkauksen lämpötila eri maaperän lämmönjohtavuuksilla

Kuvasta 30 nähdään, että maaperän suurimmalla lämmönjohtavuuden arvolla 3 W/(mK) säiliön yläleikkauksen lämpötila tippui keväällä 45 °C. Suurimman ja pienimmän lämmönjohtavuuden arvon välillä on noin 10 °C lämpötilaero suurimmillaan, vaikka lämpöhäviön suurin arvo nousi 25 kertaiseksi.

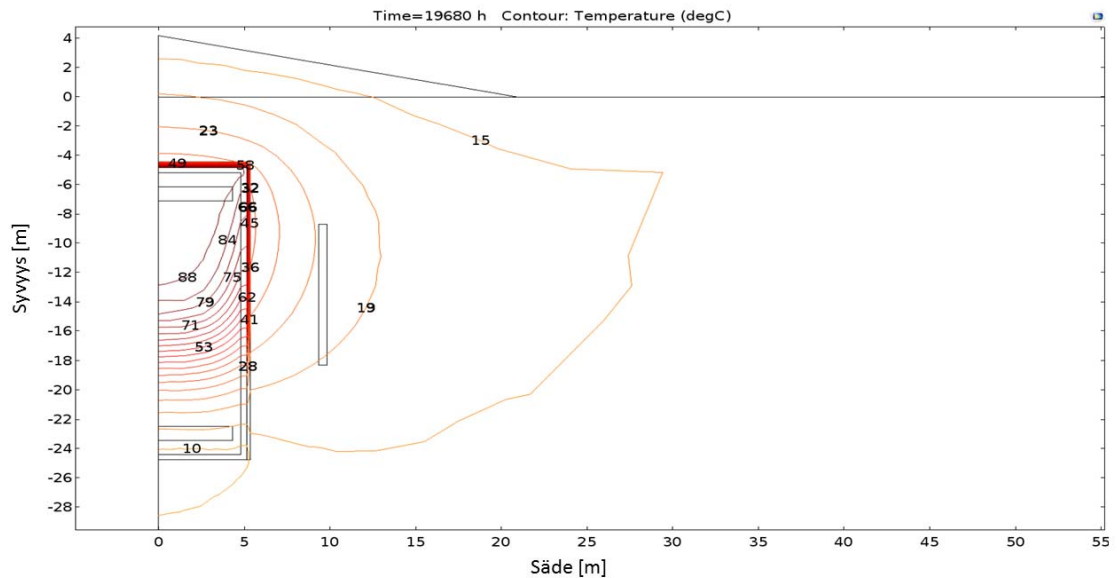
Mallia ajettiin vielä maaperän lämmönjohtavuuden arvolla 3 W/(mK) ja tarkasteltiin samalla säiliön yläpään lämpötilaa ja veden yhden viikon keskimääräistä virtausnopeutta.



Kuva 31. Kausilämpövaraston veden virtaussuunnan ja lämpötilan muutos

Kuvasta 31 nähdään, että hetkellä jolloin säiliön yläpään lämpötila on pienimmillään veden viikon keskimääräinen virtausnopeus käy nollassa. Aurinkokeräimien tuotanto ja rakennuksen lämmönkulutus ovat hetkellisesti tasapainossa.

Kuvassa 32 on esitetty kausilämpövaraston isothermien jakautuminen.



Kuva 32. Isothermit kausilämpövarastossa toisen vuoden elokuun lopussa

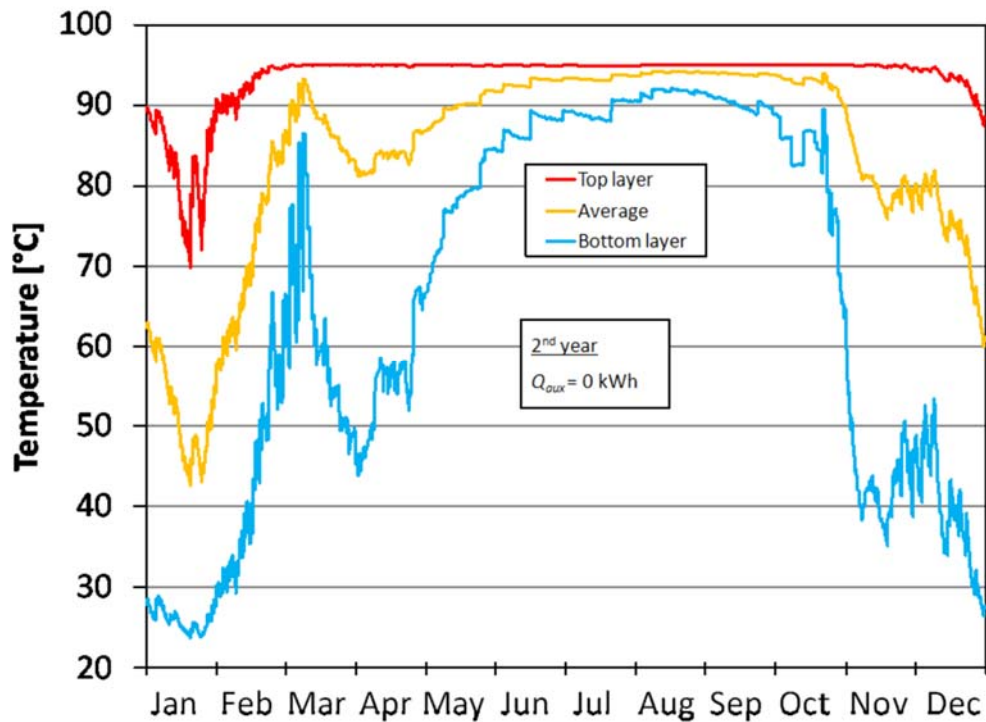
Suurin isothermien tiheys on eristeen kohdalla säiliön yläpäässä. Tästä voidaan päätellä, että eriste toimii mallissa halutulla tavalla. Kuvasta 32 voidaan nähdä, kuinka kausilämpövarastosta vuotanut lämpö on lämmittänyt ympäröivää maata. Isothermien sijainti on tallennettu kohdasta, joka vastaa toisen vuoden elokuun loppua. Säiliön on tällöin lähes täyteen ladattu ja pohjakerroksen vedellä pitäisi vielä pystyä jäädyttämään asuntoja.

7.4 Tulosten vertailu olemassa oleviin kohteisiin

Vertailtavia kohteita tälle työlle löytyy pääasiassa Ruotsista, Saksasta ja Tanskasta. Näissä maissa lämmönkausivarastointia on yritetty toteuttaa jo useamman kymmenen vuoden ajan (Lottner et al. 2000; Heller 2000).

Durão et al. (2014) mallinsi saman kokoista järjestelmää lämmöntarpeeltaan, mitä tässä työssä on käsitelty. He mallinsivat kasvihuoneen, jonka lämmöntarpeesta katettaisiin 100 % aurinkolämmöllä. He saivat samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia: 1500 m³ säiliö ja 340 m² keräintä riittäisi kattamaan lämmöntarpeen. Heidän järjestelmässä päästiin pienimpiin kokonaiskustannuksiin mitoittamalla järjestelmä 100 % aurinkolämmölle verrattuna siihen, että olisi käytetty osittain lämpöpumppua. Kyseiselle järjestelmälle kustannusten todettiin olevan aina hieman yli 200 000 €, kun käytetään 100 % aurinko-osuutta.

Hugo & Zmeureanu (2012) tutkivat aurinkokeräimillä ja kausilämpövarastolla lämmitettyä omakotitaloa Montrealissa. Heidän tutkimuksen kohteena toimi 1990-luvulla rakennettu omakotitalo, jossa oli 186 lämmitettävää neliötä ja vuotuinen kokonaisenergiankäyttö 26 156 kWh. Lämpöä tuotettiin 53 m²:llä aurinkolämpökeräimiä, joilla pystyttiin kattamaan tilojen ja lämpimän käyttöveden tuotanto lähes kokonaan. Järjestelmän kokonaiskustannukset olivat kuitenkin noin 40 000 Kanadan dollaria, joten järjestelmä takaisinmaksuaika oli yli 55 vuotta.



Kuva 33. Omakotitalon kausilämpövaraston toiminta Kanadassa (Hugo & Zmeureanu 2012)

Kuvaajasta nähdään, että säiliön yläkerroksen lämpötila pysyy tarkasti maksimilämpötilan arvossa lähes koko vuoden. Alimmallakin lämpötilalla 70 °C pystytään vielä tuottamaan lämmintä käyttövettä. Säiliö on täyteen ladattu elokuun lopussa, jolloin pohjakerroksen lämpötila nousee yli 90 °C.

Kausilämpövarasto on sijoitettu kellarin lattialle, josta se nousee ensimmäiseen kerrokseen asti. 5,2m korkeaan kausilämpövarastoon mahtuu 27 m³ vettä. (Hugo et al. 2010)

Bauer et al. (2010) keräsi tietoa yhdestätoista rakennetusta aurinkolämmöllä lämmitetystä kausilämpövarastosta Saksassa. Varastointiteknologioita oli neljää eri tyyppistä: vesisäiliö, maan ja veden täyttämä säiliö, porakaivo ja pohjavesisäiliö. Eri tyyppiset säiliöt sopivat eri kohteisiin. Eggensteinissa käytettiin maan ja veden täyttämää säiliötä. Kausilämpövarasto oli koulun pihassa. Täytyi varmistaa, ettei kukaan loukkaannu, vaikka säiliö repeäisi täysin. Muissa tarkastelluissa kohteissa vesisäiliöt osoittautuivat toimiviksi. Järjestelmien rakennuskustannukset ja lämpöhäviöt olivat suuret. Seuraavissa järjestelmissä

Bauerin mukaan tulisi kiinnittää erityistä huomiota säiliön geometriaan, paluulämpötiloihin, järjestelmän integroitavuuteen ja eristeiden kuivana pysymiseen. Porakaivojärjestelmistä huomattiin niiden toimivan ainoastaan lyhyemmän aikavälin varaston kanssa, koska lämpövirta, joka säiliöön voidaan viedä tai tuoda on suhteellisen pieni.

8. LASKUT

8.1 Kausilämpövaraston lämpöenergia

Lasketaan lämmitykseen käytettävän kausilämpövaraston täyden latauksen sisältämä hyödyllinen energia. Yhtälöstä (30) voidaan laskea lukuarvo, jota voidaan verrata vuodessa käytettävään lämpöön. Laskettaessa tarvittavan vesisäiliön kokoa As. Oy Luhtavillan Comsol Multiphysics ohjelmistolla saatiin selville, että noin 1000 m^3 säiliöllä saataisiin tuotettua 100 % lämmöntarpeesta.

Säiliön keskilämpötila oli korkeimmillaan noin $82 \text{ }^\circ\text{C}$ ja pienimmillään noin $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Tästä saadaan yhtälöön lämpötilaero. Nyt voidaan laskea kausilämpövaraston sisältämä lämpöenergia sijoittamalla lukuarvot yhtälöön (4):

$$E = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \text{ m}^3 \cdot 4185 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (82 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) = 2,59 \cdot 10^{11} \text{ J}.$$

Tulosta voidaan verrata As. Oy Luhtavillassa vuodessa käytettävään kokonaislämpöenergiaan. Jaetaan tulos vuodessa käytetyllä lämpöenergialla:

$$\frac{E_{\text{säiliö}}}{E_{\text{kok}}} = \frac{2,59 \cdot 10^{11} \text{ J}}{5,08 \cdot 10^{11} \text{ J}} = 0,51. \quad (29)$$

Yhtälöstä (30) nähdään, että kausilämpövarastoon on tarkasteltavassa kohteessa varastoitava kesän aikana noin puolet vuodessa käytettävästä lämpöenergiasta.

Yhtälöstä (4) voidaan ratkaista säiliöltä vaadittava tilavuus, jos energiatiheys tiedetään. Käytetään laskuun kalsiumsulfaattidihydraattia, jonka energiatiheys on 388 kWh/m^3 . Ratkaistaan vaadittava tilavuus:

$$V = 2,59 \cdot \frac{10^{11} \text{ J}}{1,4 \cdot \frac{10^9 \text{ J}}{\text{m}^3}} = 185 \text{ m}^3$$

Säiliön koko pienenisi noin 81 % vesisäiliöön verrattuna ja tällainen säiliö voitaisiin asentaa maan päälle eristämättömänä. Laskettaessa 185 m^3 säiliön dimensioita saadaan halkaisijaksi ja korkeudeksi 6,2 m, jos käytetään säiliötä, jonka korkeus on yhtäsuuri kuin sen halkaisija. Kemialliseen reaktioon perustuva kausilämpövarasto voi siis olla taloudellinen vaihtoehto, jos järjestelmä saadaan toimimaan luotettavasti. Kemialliseen reaktioon

perustuvassa kausilämpövarastoja resursseja voidaan käyttää muiden yksityiskohtien ratkaisemiseksi huomattavasti enemmän, koska itse säiliö rakentamisen kustannukset eivät ole enää niin suuret. Ongelmaksi kemiallisen reaktion lämpövarastoissa on muodostunut oikeiden materiaalien löytäminen tai hyvien materiaalien toimimattomuus prototyypeissä (Pinel et al. 2011).

8.2 Aurinkolämpökeräimet

Kausilämpövarastosta aurinkolämpökeräimille pumpattava veden massavirta voidaan laskea yhtälöstä (19):

$$\dot{m} = \frac{356 \text{ m}^2 \cdot 634 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{4185 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (90 \text{ }^\circ\text{C} - 7 \text{ }^\circ\text{C})} = 0,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

Suurin massavirta on kesällä latausjakson aikana, kun lämmön kulutusta ei ole. Maksimi massavirran arvoksi on saatu 0,65 kg/s lämpötilaeron ollessa 83 °C ja keräinalan ollessa 356 m². Suurin tuotantoteho neliömetriltä keräinalaa on 634 W jolloin kokonaisteho kohteessa on ollut noin 226 kW. Eli noin 3,5 kertaa suurempi kuin kohteen huippukulutus lämmityskaudella.

Savosolar Oy:n suuria keräimiä käytettäessä yhden yksikön apertuuriala on 14,83 m². 356 m² järjestelmään tarvittaisiin 24 kappaletta Savosolarin isoja keräimiä.

8.3 Lämmönkäytön jakautuminen

Tarkastellaan lämpimän käyttöveden osuutta tilojen lämmityksestä. Lasketaan tilanne huoneistossa, jossa on 50 m² lattiapinta-alaa ja kaksi asukasta. Käytetään yhtälöä (4) arvioitaessa lämpimän käyttöveden tuottamiseen kuluva lämpöenergiaa. Otetaan rakentamismääräyksistä suunnitteluarvo lämpimän käyttöveden kulutukselle $\frac{46 \text{ kg}}{\text{d} \cdot \text{henk}}$. Kuuma- ja kylmälämpötila saadaan yhtälöön arvioimalla mahdollinen lämpötila, missä talousvesi tulee kiinteistöön ja lämpötila missä vesi syötetään kuumavesiputkeen.

$$E = 46 \text{ kg} \cdot 4185 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (65 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ }^\circ\text{C}),$$

$$E = 11,6 \text{ MJ} = 3,2 \text{ kWh}.$$

Kahden ihmisen vuoden lämpimän veden käyttökseen saadaan siis noin 2340 kWh. Tilojen lämmityksen tarpeen ollessa A energialuokan talossa noin 70 kWh/m² saadaan asunnon lämmityksen energiantarpeeksi vuodessa noin 3500 kWh, joten lämpimän käyttöveden osuus koko lämmönkulutuksesta on noin 40 %. Lämpimän käyttöveden energiankulutuksen suuri osuus johtaa siihen, että tavoiteltaessa korkeaa aurinko-osuutta on lämpövarastosta saatava keväälle asti noin 65 °C lämpöistä vettä. Ilman lämpöpumppua käytettävä porakaivojärjestelmä ei sovellu tähän, mutta tilojen lämmitykseen se soveltuu (Sibbitt et al. 2012).

8.4 Jäädytys

Päivällä aurinkokeräimien tuotannon ollessa huipussaan noin 226 kW veden massavirta on noin 0.65 kg/s. Tästä voidaan arvioida jäädytyksen huipputehoa asuntoihin. Oletetaan, että kausilämpövarastosta saadaan vielä 7 °C lämpötilassa olevaa vettä, ja se lämpenee 20 °C asuntojen kattosäteilypaneeleissa. Jäädytysteho voidaan laskea yhtälöstä (12):

$$P_{\text{jäähd}} = 0,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4185 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (20 \text{ °C} - 7 \text{ °C}) \approx 35 \text{ kW}.$$

Huipputuotannon aikaan jokaiseen asuntoon saataisiin noin 1,2 kW jäädytysteho, mikä luultavasti riittää tämän kokoisissa asunnoissa. Tulos on merkittävä lämmöntuotannonkin osalta. 35 kW jäädytystehosta saatava lämpö vastaavat noin 59 neliometriä aurinkolämpökeräimiä, jos aurinkolämpökeräimillä huipputuotanto on tyypillisesti hieman yli 600 W/m².

Jäädytyksen tarpeen kattamiseksi tarvitaan noin 40–50% lisää vesitilavuutta kausilämpövarastoon. Jäädytys saadaan kuitenkin tämän jälkeen tehtyä ilmaiseksi ja siitä saadaan jopa tuottoa seuraavalle lämmityskaudelle.

Parhaimmat tulokset mallinnuksessa saatiin jäädytysveden tuotannolle, kun säiliölle käytettiin dimensioita, joissa korkeus oli neljä kertaa säteen suuruinen. Tulokset on esitetty Kuvissa 19 ja 23. Säiliön yläkerroksen lämpö ei johdu säiliön pohjakerrokseen asti syklin aikana, kun säiliöllä on riittävästi korkeutta halkaisijaan nähden. Säiliöstä ei kuitenkaan voi tehdä juuri tätä korkeampaa, koska muuten kaivuu kustannukset nousevat liian suureksi.

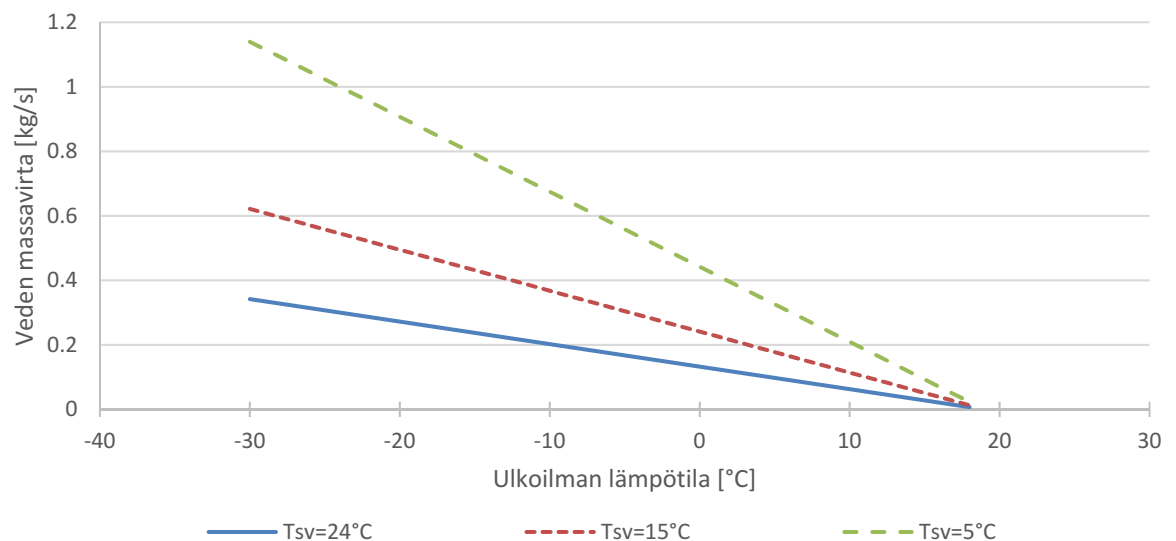
Jäädytyspaneelien teho riippuu niiden lämpötilaerosta huoneilmaan. Säiliön pohjakerroksen lämpötila mitoitettiin pysymään alle 15 °C elokuun loppuun saakka. Mitä alemmas lämmitysvesi saatiin jäädytettyä lämmityskaudella, sitä helpommin asetettu ehto toteutui.

8.5 Ilmanvaihto

Arvioidaan rakentamismääräysten mukaista poistettavaa tilavuusvirtaa rakennuksesta yhtälön (15) mukaisesti:

$$V_{poisto} = 2,5 \text{ m} \cdot 1400 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \frac{1}{h} = 1750 \frac{\text{m}^3}{h}.$$

Ilman tilavuusvirran mukaan voidaan seuraavaksi arvioida tuloilmapatterille syötettävää vesivirtaa. Tehdään seuraavat oletukset: veden poistumislämpötilaksi tuloilmapatterin jälkeen 4°C , veden sisäänvirtauslämpötila $5 - 24^\circ\text{C}$ ja ilmavirran lämpötilaero veden lämpötilaan nähden 5°C vastavirtalämmönvaihtimen lopussa. Nyt voidaan laskea tarvittava virtausnopeus vedelle sijoittamalla yhtälön (14) tulos yhtälöön (15). Tulokset ovat esitetty kuvassa 21.



Kuva 34. Veden massavirta tuloilmapatterissa ulkolämpötilan funktiona

Lämmityksen tarve tai lämpimän käyttöveden tuotanto määrää veden tilavuusvirran alun perin, joten tätä ei muuten voida säätää suuremmaksi.

Oletetaan, että lämmityksen huipputehon aikana kattosäteilijöiltä tuleva vesi voidaan jäähdyttää tuloilmapatterissa 4°C lämpötilaan. Tällöin lämpötilaero on 36°C syöttöveden lämpötilan ollessa 40°C . Veden massavirraksi saadaan ainoastaan $0,43 \text{ kg/s}$. Sama lämmitysteho saataisiin siis noin 60% pienemmällä massavirralla.

Tuloilmapatterin avulla kausilämpövaraston vettä voitaisiin jäähdyttää lämmityskaudella lähelle 4°C . Kesällä jäähdytyksen tarpeen aikana tätä vettä voidaan pumpata ensin kon-

densoivalle tuloilmapatterille. Suomen rakentamismääräysten mukaan ilman kosteus tulisi olla lähellä suhteellista kosteutta RH 45 % (Ympäristöministeriö 2012). Kesällä ulkoilman absoluuttinen kosteus on noin 10 g/kg kuivaa ilmaa. Kesällä ilmaa jäädytettäessä on riski tulla lähelle kastepistettä. Talvella ilmaa lämmitettäessä ulkoilman suuri suhteellinen kosteus pienenee, koska lämpötilaa nostetaan. Tuloilmaa jäädytettäessä tuloilmapatterissa syöttöveden lämpötilan ollessa 4 °C kosteutta tiivistyy tuloilmapatterin lämmönvaihtimen pinnoille, josta se on ohjattava viemäriin.

Tuloilmapatterissa lämmennyt vesi voidaan tämän jälkeen syöttää kattosäteilypaneeleille lämpenemään edelleen. Kondensioriski sisätiloissa pienenee, kun kattosäteilypaneeleille ei syötetä liian kylmää vettä.

9. KUSTANNUSTEN ARVIOIMINEN

Tässä työssä aurinkolämmöllä lämmitettävän kausilämpövaraston kokonaiskustannuksia arvioitiin aurinkokeräimien, asennustyön, säiliön rakennusmateriaalien, työntekijöiden ja kaivuun osalta. Säiliön rakennusmateriaalit sisältävät mm. betonin, raudoituksen, teräskalvon, eristeet, polymeerikalvon ja diffuusorin säiliön sisälle. Säiliön kaivuussa huomiointiin kaivuutyö, kuopan tuenta ja salaojitus. Betonisäiliön valumuotin teko ja purku arvioitiin. Säiliön syrjäyttämän maan poiskuljetusta ei tarvita, koska maa-aines voidaan levittää säiliön päälle, jolloin se toimii lisäeristeenä.

9.1 Kustannusten laskenta

Kausilämpövaraston avulla toimivan aurinkolämpöjärjestelmän kustannusten ollessa täysin investointikustannuksia täytyy sopia jokin ajanjakso mille energian hinta lasketaan. Järjestelmän komponenttien toiminta on hyvin ennustettavissa. Vettä kierrättävät pumput ovat järjestelmän ainoat liikkuvat osat, ja nekin ovat luotettavia toiminnaltaan. Tästä johtuen voidaan käyttää suhteellisen pitkää pitoaikaa 30 vuotta. Tällä on merkittävä vaikutus laskennalliseen energian hintaan.

Huoneistoihin tulevat lämmityspaneelit ja talon lämmönvaihtimet jätetään tässä ulkopuolelle, koska niiden hinta ei sisälly kaukolämmön eikä maalämmönkään energian hintaan.

Investoinnin pitoajaksi otettiin 30 vuotta ja korkokannaksi 5 %.

Suurissa järjestelmissä tasolämpökeräimien asennetuksi hinnaksi on saatu noin 150 – 200 €/m². 500 kWh/m² vuosituotannolla ja edellä lasketulla annuiteettitekijällä suoraan tuotetun aurinkolämmön hinnaksi saadaan 19,5 – 26 €/MWh. Joten vertailtaessa kaukolämmön hintaan voidaan ratkaista hinta, joka on käytettävissä lämmönkausivaraston rakennukseen yhtälön mukaisesti (9):

$$107 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - 19,5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = \frac{0,065x \text{ €}}{141 \text{ MWh}},$$

$$x \approx 190\,000 \text{ €}.$$

Annuiteettitekijä on laskettu yhtälöstä (10). Kausilämpövarasto saisi maksaa 1500 m³ koisena noin 127 €/m³, jotta päästäisiin samaan hintaan kaukolämmön kanssa. Vastavasti 1400 m³ säiliö saisi maksaa 136 €/m³:ltä, että päästäisiin kaukolämmön kanssa samaan energian hintaan 30 vuoden aikana. Kun säiliön hintaan lisätään 356 m² aurinkokeräimien kustannus 150 €/m² hinnalla saadaan järjestelmän maksimihinnaksi 244 000 €.

Nakkila Works Oy:ltä pyydettiin tarjousta 1500 m³ terässäiliön rakentamisesta. Säiliön mitat olivat tässä tarjouksessa 12,7 m halkaisija ja korkeus 12 m. Tarjous sisältää ainoastaan säiliön ja eristeet, lämmönvaihtimet, diffuusori ja perustukset maksavat lisää. Tarjouksen hinnaksi saatiin 350 000 €, jonka lisäksi 150 mm eristys kylkeen ja 250 mm kattoon olisi maksanut 100 000 €.

Hinnaksi per kuutiometri saataisiin näillä hinnoilla 233 €/m³ ja 300 €/m³. Hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa.

Nakkila Works Oy:n tarjouksesta huomataan sen ylittävän edellä lasketun lämpövaraston maksimihinnan, jolla päästäisiin 30v aikana samaan energianhintaan kaukolämmön kanssa.

Tiedettäessä varastoitavan energian tarve voidaan vertailla eri tyyppisten kausilämpövarastojen väliaineen kustannusta. Tarvittava lämpöenergian suuruus varastossa on $2,59 \cdot 10^{11}$ J. Lasketaan taulukkoon 3 ensin vaadittavat määrät kutakin väliainetta. Käytetään vedelle lämpötilaeroa 62°C, joka on laskettu minimikeskiarvolämpötilasta 20°C ja kausilämpövaraston korkeimmasta keskiarvolämpötilasta 82°C.

Taulukko 3

Lämpövaraston tyyppi	Energiatiheys [MJ/m ³]	Tiheys [kg/m ³]	Tarvittava massa [kg]	Tarvittava tilavuus [m ³]
Veden lämpötilaero	259	1000	1 000 000	1000
Faasimuutos	120	910	1 964 000	2158
Kemiallinen reaktio	1400	1281	237 000	185

Kolmen eri tyyppisen lämpövaraston ominaishinnat on esitetty taulukossa 4. Yhdistämällä tiedot taulukosta 3 saadaan laskettua jokaisen lämpövarastotyyppin hinta.

Taulukko 4

Lämpövaraston tyyppi	Hinta [€/m ³]	Hinta [€]	Lähde
Veden lämpötilaero	1,15	1150	(Tampereen vesilaitos 2016)
Faasimuutos A58	5269	11 370 502	(Rezaei et al. 2013)
Kemiallinen reaktio CaSO ₄ · 2H ₂ O	10	1850	(Statista 2016)

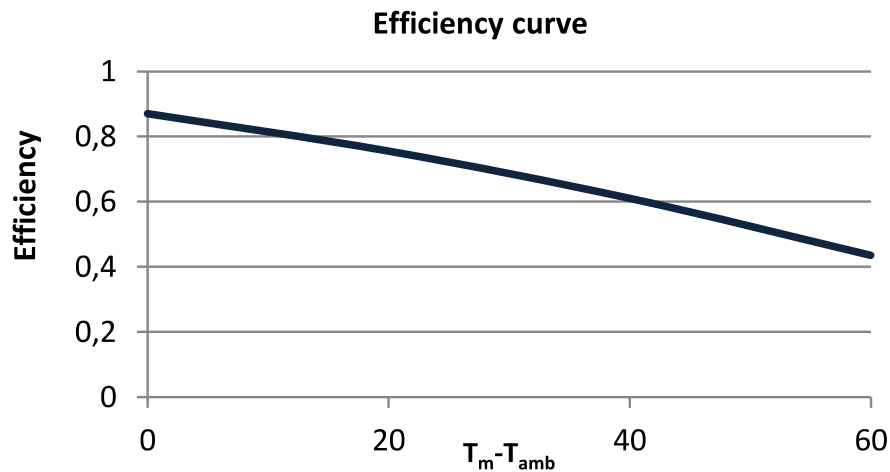
Taulukosta 4 nähdään jälleen faasimuutosmateriaalin korkea hinta. Kemialliseen reaktioon perustuva kausilämpövarasto olisi vertailun paras, koska se vie hyvin vähän tilaa ja voidaan säilyttää ulkona. Ongelmia on ratkaistavana järjestelmässä ennen kaupallistamista. Tämän jälkeen lämpötilaeroon perustuva vesisäiliö kausilämpövarastona on lupausvaihtoehto.

9.2 Järjestelmän taloudellinen optimointi

Tavoitteena on luoda lämmitysjärjestelmä pienimmillä mahdollisilla kustannuksilla, joka kattaa noin 100 % lämmityksen tarpeesta normaalina vuotena. Mallin huomioivia muutujia on aurinkokeräinten määrä, rakennusmateriaalien ja kaivuun hinta, aurinkolämpökeräimen hyötysuhteen muutos lämpötilan funktiona, säiliön kaivuusyvyys ja eristevävyys.

Savosolar Oy:n aurinkolämpökeräimelle on määritetty hyötysuhde lämpötilaeron funktiona, jossa lämpötilaero on virtaavan nesteen keskilämpötilan ero ympäristön lämpötilaan. Jos lämpötilan funktiona kasvavaa hyötysuhteen laskua ei huomioitaisi, kuumen veden lämpötila tankissa menisi aina maksimilämpötilaan 95 °C, koska tällöin kausilämpövarastolla olisi vähiten tilavuutta.

Kuvassa 35 on esitetty Savosolar Oy:n keräimen hyötysuhteen riippuvuus nesteen keskilämpötilan ja ympäristön lämpötilan erotuksena.



Kuva 35. Savosolarin suuren keräimen hyötysuhdekäyrä (Savosolar 2016)

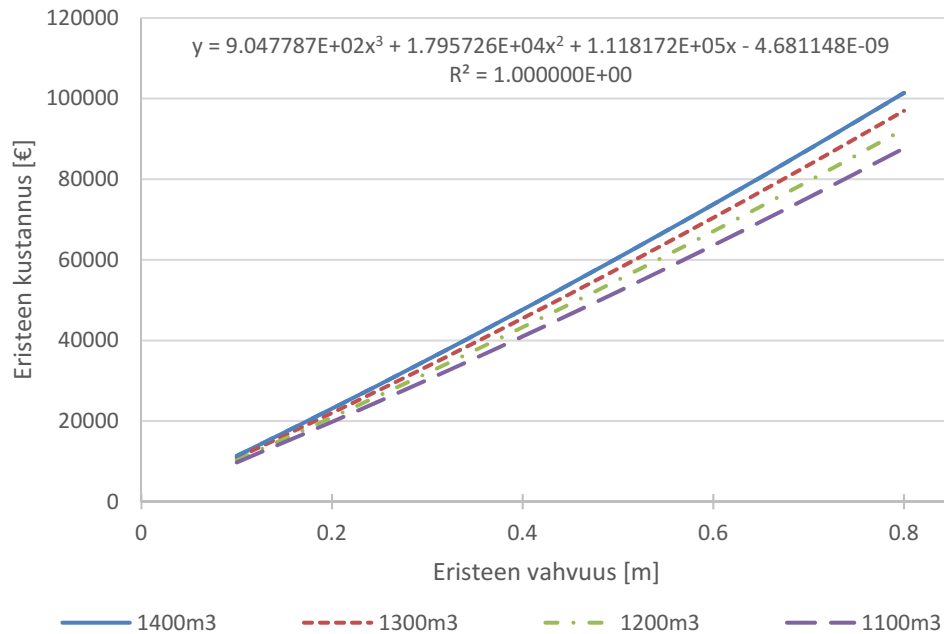
Kausilämpövaraston lämpöhäviön huomattiin pienenevän, kun säiliö kaivettiin syvemmälle maahan. Kaivuussyvyydelle löytyy optimaalinen kohta, kun tiedetään mitä kaivuu maksaa eri syvyyksille.

Samaan tapaan kausilämpövaraston eritykselle etsitään optimaalista vahvuutta, kun tiedetään, mitä eristeet ja aurinkokeräimillä tuotettu lämpö maksavat.

Mallia joudutaan yksinkertaistamaan huomattavasti optimointia varten, koska normaaleissa ajoissa laskenta kesti kerralla noin kolme tuntia. Monimuuttujaoptimoinnissa laskentakierroksia voi olla tuhansia.

Ensimmäinen yksinkertaistus on saada kolmannen vuoden tilanne tallennettua niin, että optimoinnissa voidaan lähteä tästä liikkeelle ja laskea aina vain vuosi kerrallaan. Säiliöön syötettävälle ja sieltä poistettavalle massavirralle voidaan antaa yhtälö, joka kuvaa hyvin todellista tilannetta, mutta ei heilahtele ajan funktiona yhtä paljon. Samanlainen yksinkertaistus voidaan tehdä ulkolämpötiloillekin. Liian suuri yksinkertaistus voi kuitenkin johtaa virheellisiin tuloksiin. Tämän takia mallia kannattaa ajaa ensin tarkemmilla asetuksilla ja sen jälkeen yksinkertaistetuilla. Jos lopputulos ei poikkea liikaa ensimmäisestä voidaan yksinkertaistusta käyttää.

Eristemateriaalin kustannusta laskettiin 1400 m³ säiliölle, jonka korkeus on 4 kertaa säteen suuruinen. Säiliön sisäsäde on noin 4,81 m ja betoniseinän vahvuuden ollessa 0,2 m säiliön ulkosäde, jonka päälle eriste asennetaan on 5,01 m. Säiliön sisäpuolen korkeus on 19,2 m. Eristettä on asennettu kaksi kertaa enemmän säiliön yläpäähän kuin kylkiin. Kuvaajassa on ilmoitettu kyljen eristevahvuus. Sama tehtiin tämän jälkeen 1300 m³, 1200 m³, ja 1100 m³ säiliöille. Säiliöiden eristemateriaalin kustannuksesta tehtiin Kuva 36.



Kuva 36. Eristemateriaalin kustannus eri kokoisille säiliölle

Eristemateriaalin hintaa laskettaessa on käytetty Finnfoamin eristeelle ominaishintaa 144 €/m^3 . Kuvaan 36 tehtyä sovitetta voidaan käyttää, kun etsitään järjestelmälle kustannusten pienintä arvoa. Sovite on tehty 1400 m^3 säiliölle. Käytettäessä eristemateriaalia vähemmän joudutaan tätä kompensoimaan asentamalla lisää aurinkolämpökeräimiä.

Eristeen lisäksi kausilämpövaraston lämpöhäviötä voidaan vähentää sen geometrian optimoinnilla. Vertaillaan seuraavaksi pallon ja lieriön ulkopinta-alojen suhteita saman kokoisille säiliöille.

Lasketaan kausilämpövaraston ulkopinta-ala pallolle, jonka tilavuus on 1500 m^3 ja säde $7,1 \text{ m}$ yhtälöstä (19):

$$A = 4\pi \cdot (7,1\text{m})^2 = 634\text{m}^2.$$

1500m^3 lieriölle säde on $6,2\text{m}$ ja ulkopinta-alaksi saadaan yhtälöstä (20):

$$A = 6\pi \cdot (6,2\text{m})^2 = 725\text{m}^2.$$

Eli lieriön ulkopinta-ala on noin 14,5 % enemmän kuin pallolla. Pienempi ulkopinta-ala pallolla johtaa siihen, että vesitilavuuttakin voitaisiin käyttää pallosäiliössä vähemmän, mikä johtaisi edelleen pienempiin lämpöhäviöihin.

Materiaalikustannukset riippuvat säiliön ulkopinta-alasta, joten pienemmällä ulkopinta-alalla saadaan halvempi kausilämpövarasto. Pallon ja lieriön välistä lämpöhäviön eroa pystyttiin tässä työssä kuitenkin mallintamaan ainoastaan stationäärissä tapauksessa, koska veden virtausta pallosäiliöön ei osattu mallintaa Comsol Multiphysics ohjelmistolla.

9.3 Kustannusten vertailu muihin järjestelmiin

Aurinkolämpökeräimillä ja kausivarastolla toteutetun lämmitysjärjestelmän kustannuksia vertailtiin kaukolämpöön ja maalämpöön. Nämä valittiin, koska kaukolämpö on Tampereella taajamassa yleisin lämmitysmuoto. Maalämpö on vaihtoehto, jolla on suuremmat investointikustannukset, mutta pienemmät päästöt ja käyttökustannukset (Bayer et al. 2012).

Motivan mukaan Suomessa kaukolämmön ominaispäästö on keskimäärin 183 kg CO₂/MWh, kun taas sähköntuotannon ominaispäästö on 209 kg CO₂/MWh (Motiva 2016). Maalämpöpumpun lämpökerroin on noin 3 (Han & Yu 2016). Näiden tietojen avulla voidaan laskea, että maalämpöpumpulla tuotetun lämmön päästöt ovat Suomessa noin 60 % pienemmät kuin kaukolämmön päästöt.

9.3.1 Kaukolämpö

Tampereen kaukolämmön hinnastosta voidaan lukea kohdetta vastaavat tiedot sopimusvesivirran ollessa 3,0 m³/h. Liittymishinta on 20 212 € ja perusmaksu 388 €/kk hinnat sisältävät 24 % alv. Perusarvo energiamaksulle on 69,32 €/MWh ja joulukuusta helmikuulle tulee 10 % korotus sekä kesäkuusta elokuulle 20 % alennus.

Arvioidaan vuoden kokonaiskustannuksia perusmaksulla ja jaetaan liittymismaksu tasan 30 vuoden ajalle. Energiamaksuista tulee 1.6.2014 – 31.5.2015 ajalle yhteensä 9742 € ja kuukausimaksuista 4656 € sekä jaetusta liittymismaksusta 674 €. Jolloin kokonaiskustannukseksi saadaan 14 398 € ja energian käytön ollessa 141 MWh saadaan kokonaishinnaksi 107 €/MWh.

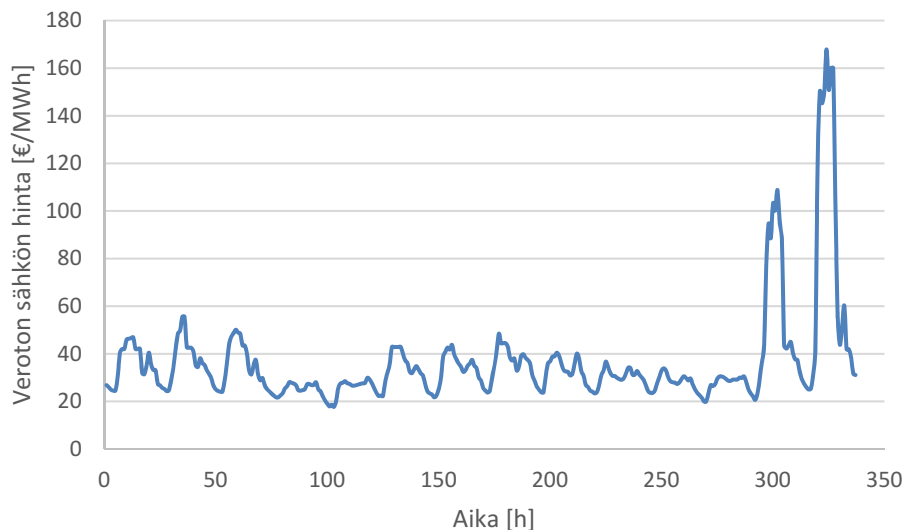
9.3.2 Maalämpö

Tällä hetkellä Nord Poolissa ja Suomen sähköverkossa vallitsee tilanne, jossa Suomen hinta on arkena noin 60 €/MWh päivällä ja yöllä noin 25 €/MWh sisältäen 24 % alv. Hinnat vaihtelevat mm. vesivoiman ja ydinvoiman tuotannon mukaan sekä ilman lämpötilan mukaan.

Sähkön siirron verollinen hinta Tampereella on tällä hetkellä (6/2016) 56,5 €/MWh. Tästä päästään noin 82 €/MWh kokonaishintaan yöajalle, jos kuukausimaksuja ei sisällytetä hintaan. Maalämpöpumpun lämpökertoimen ollessa noin 3 saadaan lämmön hinnaksi noin 27 €/MWh. Lämpökerroin kuvaa miten paljon lämpöpumppu pystyy siirtämään lämpöä lähteestä hyötykäyttöön per käytetty määrä sähköä.

As. Oy Luhtavillan lämmönkäytön huipputehon mukaan tarvittaisiin noin 25 kW sähkömoottorilla oleva maalämpöpumppu, jolle tarvittaisiin 63A liitäntä sähköverkkoon. Moottorin koko on laskettu, käyttäen lämpökerrointa 3. Tämän kuukausimaksu on Tampereen sähkölaitoksella 3,16 €/kk sisältäen verot. Kuukausimaksuista tulisi siis noin 0,3 €/MWh lisäys lämmön energiamaksuun oletuksella 141 MWh vuoden käytölle.

Kokonaishinta yöllä tuotetulle lämmölle täytyy kuitenkin arvioida noin 30 €/MWh, koska Nord Poolin hinnoissa on suurta vaihtelua, kuten nähdään Kuvasta 37.



Kuva 37. Sähkön hinnan vaihtelua Suomessa 15 – 28.6.2016

Päivälle laskettuna vastaava kokonaishinta tuotetulle lämmölle olisi noin 40€/MWh. Lasketut hinnat eivät sisällä maalämpöpumpun investointikustannusta, joka on merkittävän suuri.

Jyvitetään maalämpöpumpun investointikustannus samalla tapaa seuraavalle 30 vuodelle kuten aurinkolämpöjärjestelmän kustannus. Annuiteettitekijä on tällöin sama kuin yhtälöstä (11) laskettu eli 0,065.

Lasketaan seuraavaksi mitä maalämpöpumppu saa enintään maksaa, jotta päästäisiin samaan energianhintaan kaukolämmön kanssa. Käytetään yhtälöä (9):

$$107 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - 40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = \frac{0,065x \text{ €}}{141 \text{ MWh}},$$

$x \approx 150\,000$ €.

Ratkaistaessa sama yhtälö yöllä tuotetulla lämmöllä saadaan maksimi hinnaksi maalämpöpumpulle noin 150 000 €. Hintaero jouduttaisiin käyttämään lämpövarastoon, minne ylimääräinen lämpö säilötään. Itse rakennustakin voidaan käyttää lyhyen aikavälin lämpövarastona, mutta lämpötila sisätiloissa ei saa nousta 24 °C:seen.

Sisätiloissa pystyttäisiin tällä tavalla pitämään paremmin sama lämpötila talvella, kun lämpötila laskee nopeasti. Jos rakennukseen on lämpötilaennusteen perusteella varastoitu energiaa hieman ennen ulkolämpötilan laskua, voidaan sähköä käyttää vähemmän suurimman kulutuksen aikaan. Lattialämmitykseen perustuva maalämpöjärjestelmä on normaalisti hidas reagoimaan ulkoilman lämpötilamuutoksiin, mikä vähentää asumismukavuutta.

Eri järjestelmien vertailu on koottu taulukkoon 5. Laitteiston maksimi hinta perustuu samaan kuin laskuissa eli 30 vuoden tarkastelujaksolle, 5 % korkokannalle ja laskuun millä hinnalla päästään samaan kustannukseen kaukolämmön kanssa. Minkään järjestelmän hintaan ei ole arvioitu huollon kustannusta. Kaikki tarkastellut järjestelmät vaativat kuitenkin erittäin vähän huoltoa verrattuna esimerkiksi hakelämpölaitokseen, mitä täytyy nuohota. Taulukossa 3 päästöt on otettu lämmöntuotannon päästöistä. Kaikista järjestelmistä siis puuttuu komponenttien valmistamisen päästöt ja esimerkiksi rakennusten kiertovesipumppujen sähköntuotannon päästöt.

Taulukko 5

Järjestelmä	Energian kokonaishinta [€/MWh]	Laitteiston maksimihinta [€]	Energian tuotannon hinta [€/MWh]	Päästöt [kgCO ₂ /MWh]
Kaukolämpö	107	0	107	183
Maalämpö	107	150 000	40	70
Aurinkolämpö	107	244 000	0	0

Taulukosta 5 nähdään, että järjestelmään, jossa on pienet lämmöntuotannon kustannukset voidaan investoida enemmän rahaa alussa päästen samaan kokonaishintaan tarkastelujaksolla. Tavoitteena on lämmöntuotannon päästöjen vähentäminen kaukolämpöön verrattuna. Taulukosta 5 nähdään, millä investointikustannuksella päästöjen vähennys onnistuu ilman, että energian hinnaksi tulee suurempi 30 vuoden tarkastelujaksolla. Kaukolämpö

on huonompi järjestelmä kahteen seuraavaan verrattuna jäähdytyksen osalta, koska se joudutaan tuottamaan ja mahdollisesti jakelemaan erillisellä järjestelmällä.

9.4 Tuet ja avustukset

Työ- ja elinkeinoministeriö voi myöntää uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä edistäville uuteen teknologiaan perustuvilla hankkeilla energiatukea enintään 40 %. Tavanomaiselle aurinkolämpöhankkeelle tukea voidaan myöntää 20 %. (TEM 2016)

Suomessa ei ole vielä yhtään aurinkolämmöllä lämmitettävää kausilämpövarastoa, joten aurinkolämmöllä lämmitettävä kausilämpövarasto saatetaan luokitella uuden teknologian luokkaan, jolloin tukea voitaisiin saada 40 %.

Työ- ja elinkeinoministeriön sivuilla sanotaan: ”Tukea ei myöskään myönnetä lämmöntuotantohankkeille, jos hankkeen seurauksena siirrytään kaukolämmöstä erilliseen lämmöntuotantoon.” Työssä tarkasteltava laitos saatettaisiin lukea pieneksi kaukolämpöverkoksi, koska tässä lämmitetään neljää toisistaan erillään olevaa rakennusta.

10. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä esitettiin simulointimalli kausilämpövarastollisen aurinkolämpöjärjestelmän mitoittamiseksi. Työssä tarkasteltiin tiettyä taloyhtiötä, jonka lämmönkäyttö tiedettiin. Kausilämpövarasto mitoitettiin niin, että sen avulla pystytään täyttämään rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen tarve kokonaan.

Comsol Multiphysics ohjelmistolla kuvattiin betoninen kausilämpövarasto, joka oli maahan kaivettu vesisäiliö. Tämän mallintamiseksi käytettiin ohjelmistosta kolmea fysiikkapakettia: lämmönjohtuminen kiinteissä kappaleissa, lämmönjohtuminen huokoisessa materiaalissa ja laminaari vesivirtaus. Mallin avulla kuvattiin säiliöön ladattavan ja purettavan lämmönhukkaa. Aurinkolämpökeräimien vuosituotannon ja asunto-osakeyhtiön kulluttaman lämmön jakauma tiedettiin. Näiden tietojen pohjalta pystyttiin luomaan malli, jonka avulla laskettiin tarvittavan kausilämpövaraston koko.

Lämpö tuotetaan kausilämpövarastoon aurinkokeräimillä ja jäähdytysvesi kylmällä ilma-
virralla tuloilmapatterissa. Kausilämpövaraston ollessa riittävän korkea sekä lämmitysvesi että jäähdytysvesi pystytään säilömään samaan säiliöön. Tavanomaisissa lämmitysjärjestelmissä lämpöä luovuttavan veden jäähtymä ei ole keskeisessä osassa järjestelmän taloudellisuuden kannalta. Mahdollisimman suuri jäähtymä lämpöä käytettäessä on kuitenkin tärkeää kausilämpövaraston kanssa. Veteen säilötty energia kasvaa lineaarisesti lämpötilaeron kasvaessa. Paluulämpötilaa pyritään tämän takia laskemaan lähelle nollaa. Kausilämpövaraston pohjakerroksen kylmällä vedellä pystytään jäähdyttämään asuntoja seuraavana kesänä ilman lämpöpumpua.

Jos samalla kausilämpövarastolla pyritään sekä jäähdyttämään että lämmittämään rakennuksia on sen geometriaa tarkasteltava lähemmin. Työssä päädyttiin käyttämään säiliön mitoille suhdetta, jossa korkeus on kaksi kertaa halkaisijaa suurempi. Aurinkokeräimiksi suunniteltiin käytettävän Savosolar Oy:n suuria keräimiä 24 kappaletta. Keräimien yhteispinta-ala olisi tällöin 356 m². Kausilämpövaraston tilavuuden ollessa 1400 m³ sekä lämmityksen että jäähdytyksen tarve pystyttäisiin kattamaan kokonaan.

Aurinkolämpöjärjestelmän kustannuksia verrattiin kaukolämpöön ja maalämpöön, jonka kanssa käytettäisiin kausilämpövarastoa. Kaukolämmön energian kokonaishinnaksi saatiin taloyhtiölle laskettua 107 €/MWh. Maalämpöjärjestelmän kausilämpövarastolle, asennukselle ja muille laitteistoille saatiin arvioitua maksimihinta 150 000 €, jolla päästäisiin samaan energian hintaan kaukolämmön kanssa 30 vuoden tarkastelujaksolla. Kaukolämmön- ja sähkönhinta tulee luultavasti muuttumaan tällä aikavälillä. Aurinkolämpöjärjestelmän 1400 m³:n kausilämpövarastolle saatiin laskettua maksimihinta 137 €/m³, jolla päästäisiin samaan energian kokonaishintaan kuin kaukolämmöllä 30 vuoden tarkastelujaksolla.

Työssä kuvatun järjestelmän tärkein tarkoitus on pitää rakennusten sisäilma lähellä ihanteellista lämpötilaa käyttäjille ympäri vuoden kustannustehokkaasti ja mahdollisimman pienillä kasvihuonekaasupäästöillä. Saatujen tulosten perusteella tavoite on realistinen. Vastaavaa järjestelmää ei ole vielä 2016 vuonna esitelty missään muualla.

LÄHTEET

- Ahmed, K., Pylsy, P. & Kurnitski, J., 2015. Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings. *Energy and Buildings*, 97, pp.77–85.
- Anderson, T.N. et al., 2009. Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector. *Solar Energy*, 83(4), pp.445–455.
- Baek, N.-C. et al., 2007. EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOLAR DISTRICT HEATING SYSTEM.
- Balaras, C.A. et al., 2007. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment*, 42(3), pp.1298–1314. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305004671> [Viitattu 3.6.2016].
- Bauer, D. et al., 2010. German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Solar Energy*, 84(4), pp.612–623.
- Bayer, P. et al., 2012. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), pp.1256–1267. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004771> [Viitattu 3.6.2016].
- Bokhoven, T., Van Dam, J. & Kratz, P., 2001. Recent experience with large solar thermal systems in The Netherlands. *Solar Energy*, 71(5), pp.347–352. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001249> [Viitattu 7.2.2016].
- Chou, D.-C., Chang, C.-S. & Chang, J.-C., 2016. Energy conservation using solar collectors integrated with building louver shading devices. *Applied Thermal Engineering*, 93, pp.1282–1294.
- Chow, T.T., 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), pp.365–379.
- Colella, F., Sciacovelli, A. & Verda, V., 2012. Numerical analysis of a medium scale latent energy storage unit for district heating systems. *Energy*, 45(1), pp.397–406.
- Du, Y. et al., 2016. Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios. *Energy Conversion and Management*, 108, pp.60–67.
- Durão, B., Joyce, A. & Mendes, J.F., 2014. Optimization of a seasonal storage solar system using Genetic Algorithms. *Solar Energy*, 101, pp.160–166. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13005586> [Viitattu 10.3.2016].
- Ehrmann, N. & Reineke-Koch, R., 2012. Selectively coated high efficiency glazing for

- solar-thermal flat-plate collectors. *Thin Solid Films*, 520(12), pp.4214–4218.
- Eke, R. & Senturk, A., 2012. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Solar Energy*, 86(9), pp.2665–2672.
- Emmi, G. et al., 2015. Solar Assisted Ground Source Heat Pump in Cold Climates. *Energy Procedia*, 82, pp.623–629. Saatavilla: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215026594> [Viitattu 14.6.2016].
- Epp, B., 2014. Denmark: 37 MW Field with 203,000 m³ Storage Underway. *Global Solar Thermal Energy Council*, pp.1–6. Saatavilla: <http://www.solarthermalworld.org/content/denmark-37-mw-field-203000-m3-storage-underway>.
- Ev-power, 2016. Ev-power. Saatavilla: <http://www.ev-power.eu/Solar-Panels/Solar-panel-GWL-Sunny-Poly-310Wp-72-cells-EUFREE-MPPT-35V.html?cur=1> [Viitattu 8.6.2016].
- Groth, N.B., Fertner, C. & Grosse, J., 2016. Urban Energy Generation and the Role of Cities. *Journal of Settlements and Spatial Planning*, (5), p.5.
- Han, C. & Yu, X. (Bill), 2016. Performance of a residential ground source heat pump system in sedimentary rock formation. *Applied Energy*, 164, pp.89–98. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191501569X> [Viitattu 1.6.2016].
- Al Harbi, Y., Eugenio, N.N. & Al Zahrani, S., 1998. Photovoltaic-thermal solar energy experiment in Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 15, pp.483–486.
- Heljo, J., Nippla, E. & Nuuttila, H., 2003. Rakennusten energiankulutus ja co2-ekv päästöt Suomessa. Saatavilla: http://www.tut.fi/ee/Materiaali/Ekorem/EKOREM_Loppuraportti_051214.pdf [Viitattu 30.5.2016].
- Heller, A., 2000. 15 Years of R&D in central solar heating in Denmark. *Solar Energy*, 69(6), pp.437–447. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001183> [Viitattu 26.5.2016].
- Henshall, P. et al., 2016. Constant temperature induced stresses in evacuated enclosures for high performance flat plate solar thermal collectors. *Solar Energy*, 127, pp.250–261.
- Horst, T.A. et al., 2013. Dynamic heat exchanger model for performance prediction and control system design of automotive waste heat recovery systems. *Applied Energy*, 105, pp.293–303.
- Hugo, A. & Zmeureanu, R., 2012. Residential Solar-Based Seasonal Thermal Storage Systems in Cold Climates: Building Envelope and Thermal Storage. *Energies*, 5(12), pp.3972–3985. Saatavilla: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/10/3972/htm> [Viitattu 25.5.2016].

- Hugo, A., Zmeureanu, R. & Rivard, H., 2010. Solar combisystem with seasonal thermal storage. *Journal of Building Performance Simulation*.
- Isaac, M. & van Vuuren, D.P., 2009. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), pp.507–521.
- Jouhara, H. et al., 2016. The performance of a heat pipe based solar PV/T roof collector and its potential contribution in district heating applications. *Energy*.
- Jylhä, K. et al., 2015. Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy and Buildings*, 99, pp.104–116.
- Kenisarin, M. & Mahkamov, K., 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), pp.1913–1965.
- Kübler, R., Fisch, N. & Hahne, E., 1997. High temperature water pit storage projects for the seasonal storage of solar energy. *Solar Energy*, 61(2), pp.97–105.
- Li, R. et al., 2015. Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system. *Energy and Buildings*, 86, pp.58–65.
- Lindab, 2016. Atrium Plana.
- Lottner, V., Schulz, M. & Hahne, E., 2000. Solar-Assisted District Heating Plants: Status of the German Programme Solarthermie-2000. *Solar Energy*, 69(6), pp.449–459. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001250> [Viitattu 2.6.2016].
- Louwen, A. et al., 2016. A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 147, pp.295–314.
- Martinez, A., Astrain, D. & Rodriguez, A., 2014. Zero-power-consumption thermoelectric system to prevent overheating in solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), pp.1103–1112.
- Mauthner, F., Weiss, W. & Spörk-Dur, 2013. *Solar Heat Worldwide*, Saatavilla: <https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2015.pdf>.
- McDaniel, B. & Kosanovic, D., 2016. Modeling of combined heat and power plant performance with seasonal thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 7, pp.13–23.
- McNabola, A. & Shields, K., 2013. Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower drains. *Energy and Buildings*, 59, pp.44–49.
- Melrose, J., Perroy, R. & Careas, S., 2015. Solar heat worldwide. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1.
- Mills, A.F., 1999. *Basic heat and mass transfer*,

- Mirieli, J., Serres, L. & Trombe, A., 2002. Radiant ceiling panel heating–cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions. *Applied Thermal Engineering*, 22(16), pp.1861–1873. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943110200087X> [Viitattu 29.5.2016].
- Mohamad, A., 1997. Integrated solar collector–storage tank system with thermal diode. *Solar Energy*, 61(3), pp.211–218. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X97000467> [Viitattu 6.6.2016].
- Motiva, 2016. CO₂-päästökertoimet. Saatavilla: http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet [Viitattu 3.6.2016].
- Muhammad, M.J. et al., 2016. Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, pp.6–15.
- Munari Probst, M. & Roecker, C., 2007. Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST). *Solar Energy*, 81(9), pp.1104–1116.
- Nakar, D. & Feuermann, D., 2016. Surface roughness impact on the heat loss of solar vacuum heat collector elements (HCE). *Renewable Energy*, 96, pp.148–156.
- Novo, A. V. et al., 2010. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Applied Energy*, 87(2), pp.390–397. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002694> [Viitattu 13.11.2015].
- Paikkatietoikkuna, 2016. Saatavilla: http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta?ver=1.17&zoomLevel=13&coord=330869.969_6815000.501&mapLayers=24+100+default&showMarker=true.
- Pinel, P. et al., 2011. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), pp.3341–3359. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211100150X> [Viitattu 5.8.2015].
- Qiu, S., Ruth, M. & Ghosh, S., 2015. Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, pp.580–588.
- Ramboll, 2016. SOUTH-JUTLAND STORES THE SUN ’ S HEAT IN THE WORLD ’ S LARGEST PIT. , (May 2015), pp.2015–2017. Saatavilla: <http://www.ramboll.com/projects/re/south-jutland-stores-the-suns-heat-in-the-worlds-largest-pit-heat-storage>.

- Ray, D.R., Das, D.K. & Vajjha, R.S., 2014. Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, pp.732–746.
- Rezaei, M. et al., 2013. Performance and cost analysis of phase change materials with different melting temperatures in heating systems. *Energy*, 53, pp.173–178.
- Savosolar, 2016. Home - Savosolar - The Sun Rises from the North. Solar thermal solutions. Saatavilla: <http://www.savosolar.fi/en/> [Viitattu 27.5.2016].
- Schmidt, T., Mangold, D. & Müller-Steinhagen, H., 2004. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy*, 76(1-3), pp.165–174. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03002937> [Viitattu 24.9.2015].
- Sibbitt, B. et al., 2012. The Performance of a High Solar Fraction Seasonal Storage District Heating System – Five Years of Operation. *Energy Procedia*, 30, pp.856–865. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021201613X> [Viitattu 4.3.2016].
- Statista, 2016. Gypsum price. Saatavilla: <https://www.statista.com/statistics/219363/wallboard-products-crude-price-in-the-us/>.
- Swan, L.G. & Allen, P.L., 2010. Integrated solar pump design incorporating a brushless DC motor for use in a solar heating system. *Renewable Energy*, 35(9), pp.2015–2026.
- Tampereen kaukolämpö, 2015.
- Tampereen Sähkölaitos, 2016. Saatavilla: <https://www.tampereensahkolaitos.fi> [Viitattu 8.6.2016].
- Tampereen Vesi, 2016. Vellamo. Saatavilla: <https://vellamo.tampere.fi/>.
- Tampereen vesilaitos, 2016. Tampereen vesilaitoksen hinnasto. Saatavilla: http://inter6.tampere.fi/material/attachments/3JUYQHVGc/Hinnasto_1.3.2016.pdf.
- TEM, 2016. Saatavilla: http://www.tem.fi/energia/energiatuki/tuen_maara.
- Trier, D., 2015. Towards Solar District Heating with More than 70% Solar Fraction. *Energy Procedia*, 70, pp.580–586. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215002854> [Viitattu 10.2.2016].
- Vuoristo, P., 2016. Materials_processing_1_Ex4.
- Yang, Z. et al., 2016. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification. *Renewable Energy*, 85, pp.31–44. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300410> [Viitattu

29.6.2015].

Ympäristöministeriö, 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto Määräykset ja ohjeet 2012. , pp.1–34.

You, T. et al., 2016. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. *Applied Energy*, 177, pp.515–536.

Zambolin, E. & Del Col, D., 2010. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), pp.1382–1396.