

Miika Varjonmaa

MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN VAIKUTUKSET ELINKAARIKUSTANNUKSIIN UUSISSA ASUINKERROSTALOISSA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: professori Arto Saari
väitöskirjatutkija Ulrika Uotila
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Miika Varjonmaa: Maalämpöjärjestelmän vaikutukset elinkaarikustannuksiin uusissa asuinkerrostaloissa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2021

Maalämpöjärjestelmien käyttö rakennusten lämmittämisessä on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Tämä johtuu osaltaan järjestelmien ympäristöystävällisyydestä ja pienestä hiilijalanjäljestä, mutta myös sen matalista käyttökustannuksista. Myös lainsäädännöllä on pyritty vaikuttamaan siihen, että rakennusten käyttämästä energiasta yhä suurempi osa tuotettaisiin uusiutuvalla energialla ja energiatehokkailla menetelmillä. Suomessa tilojen lämmittämisen energiansäästö-potentiaali onkin suuri, sillä yli kaksi kolmasosaa suomalaisten asuinrakennusten energiankulutuksesta kului tilojen lämmittämiseen vuonna 2019.

Maalämpöjärjestelmien ongelma on, että niiden investointikustannukset ovat korkeat verrattuna muihin energiantuottotapoihin. Johtuen kuitenkin järjestelmän matalista käyttökustannuksista sen elinkaarikustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Energian hinnan noustessa järjestelmän alkuinvestointi on mahdollista maksaa takaisin jo hyvissä ajoin rakennuksen elinkaaren aikana. Työn tarkoituksena oli tutkia maalämpöjärjestelmien elinkaarikustannuksia uusissa asuinkerrostalokohteissa ja laskea investointien nettonykyarvoja sekä takaisinmaksuaikoja käyttäen nettonykyarvomenetelmää.

Työn teoriaosuus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena, jonka pohjalta saatiin selville maahan porattavien energiakaivojen olevan tehokkain maalämpöjärjestelmätyyppi. Työtä varten saatiin referenssikohteiksi neljä uudisrakenteista asuinkerrostaloa, joiden lämmitysmuotona on maalämpö. Kohteista saatujen tietojen pohjalta laskettiin maalämpöinvestointien nettonykyarvot vertaamalla näiden elinkaarikustannuksia yleisesti käytössä olevaan kaukolämpöön. Laskelmissa haluttiin selvittää, millaisia kustannussäästöjä uusissa asuinkerrostaloissa voidaan tehdä valitsemalla maalämpö rakennuksen lämmitysjärjestelmäksi.

Työn tuloksena saatiin kaikkien kohteiden investointien takaisinmaksuajaksi alle 20 vuotta käyttäen nettonykyarvomenetelmää. Huomioiden, että asuinkerrostalojen taloudellinen pitoaika vaihtelee tyypillisesti 30-40 vuoden välillä, voidaan investointeja pitää oikein kannattavina. Maalämpöjärjestelmät voidaan siis katsoa kannattaviksi sijoituksiksi myös uudisrakenteisissa asuinkerrostaloissa. Merkittävimmät kustannussäästöt kohteissa tehdään järjestelmien huomattavasti matalammilla käyttökustannuksilla, mitkä myös kasvavat energian hinnan noustessa.

Virhettä tuloksiin voivat aiheuttaa osittain puutteelliset lähtötiedot kohteista, jonka johdosta jotkin laskennassa käytetyistä lähtötiedoista perustuvat oletuksiin. Toisaalta laskennassa ei myöskään huomioitu esimerkiksi rakennuksen vaihtoehtoisesta kaukolämpöön liittämisestä aiheutuvia kustannuksia tai järjestelmän huoltamisesta aiheutuvia kustannuksia, jotka toisaalta nostavat vertailussa maalämpöjärjestelmän kannattavuutta. Lisäksi maalämpöjärjestelmän korkea energiatehokkuus ja ympäristöystävällisyys voi luoda rakennuksen omistajalle tai käyttäjälle erilaisia mahdollisia hyötyjä, joiden arvon mittaaminen on tällaisessa toteutuksessa haastavaa.

Avainsanat: maalämpö, geoterminen energia, maalämpöpumppu, lämpökaivo, energiakaivo, elinkaarikustannus, ylläpitokustannus, asuinkerrostalo

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Miika Varjonmaa: The effects of a GSHP system on life cycle costs in new apartment buildings

Master of Science Thesis

Tampere University

Degree Programme in Civil Engineering

May 2021

The use of GSHP systems in heating buildings has increased substantially in recent years. This is partly due to the environmental friendliness of the systems and their small carbon footprint, but also because of their low operating costs. Legislation has also sought to promote the use of renewable energy and energy efficient systems in buildings even more. Indeed, in Finland the energy saving potential of space heating is high, as more than two thirds of energy consumed in Finnish residential buildings was used for space heating in 2019.

The problem with GSHP systems is their high investment costs compared to other forms of energy production. Due to their low operating costs, however, their life cycle costs are considerably lower. As the energy prices increase, it is possible to pay the initial investment back well in advance during the life cycle of the building. The purpose of the thesis was to research life cycle costs of a GSHP system in new residential apartment buildings and to calculate net present values and payback time periods of the investments using the net present value method.

The theoretical part of the study is carried out as a literature study, on the basis of which it was found out that boreholes drilled in the ground are the most efficient type of geothermal systems. Four newly built residential apartment buildings with geothermal heating were used as references for the study. Based on the data obtained by the reference buildings, the net present values of the geothermal investments were calculated by comparing their life cycle costs with commonly used district heating. The purpose of the calculations was to find out what kind of cost savings could be made in new apartment buildings by choosing geothermal heating as the building's heating system.

The result of the study was that the investments' payback times in all of the reference buildings were less than 20 years, when the net present value method was used. Considering that the economic life of an apartment building typically varies between 30-40 years, the investments can be considered very profitable. Therefore, geothermal systems can also be found as profitable investments in newly built residential apartment buildings. The main cost savings in the reference buildings are made with their significantly lower operating costs, with the savings increasing as the energy prices rise.

Errors in the calculations may occur because of partly incomplete data received from the reference buildings, as a result of which some of the data used is based on assumptions. On the other hand, for example, the costs caused from alternatively connecting the building into district heating or maintaining such a system were not taken into account, which in turn increases the profitability of the geothermal system. In addition, the high energy efficiency and environmental friendliness of a geothermal system can bring various benefits imaginable to the user or the owner of the building, the measurement of which is more challenging in this kind of study.

Keywords: ground source heating, geothermal energy, ground source heat pump (GSHP), borehole, life cycle cost (LCC), maintenance cost, residential apartment building

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän diplomityö on tehty NCC Suomi Oy:n ehdottaman aiheen pohjalta. Työ toteutettiin pääosin kirjallisuustutkimuksena, jonka tukena käytettiin viittä haastattelua eri alojen asiantuntijoiden kanssa. Työn tulosten laskentaa varten tehty osio perustuu NCC Suomi Oy:n todellisista kohteista saatuihin tietoihin.

Työn alkuun saattaminen ei ollut helppoa, sillä työn aihe vaihtui vielä aivan tutkimusprosessin alkuvaiheessa useampaan otteeseen ja diplomityösopimuksen saamisessa kesti huomattavasti odottamaani pidempään. Lopulta odotus palkittiin ja pääsin kuitenkin aloittamaan työni vielä joulukuun 2020 puolella. Tästä erityinen kiitos NCC Suomi Oy:n Janne Alholle, joka vei asiaa diplomityösopimukseni allekirjoittamisesta nopeasti eteenpäin ja vastasi osaltaan myös diplomityön ohjaamisesta. Kiitos myös työni pääasialliselle ohjajalle professori Arto Saarelle.

Jotakuinkin seitsemän vuotta sitten sain tiedon opiskelupaikasta Tampereella ja siten uusista haasteista uusissa maisemissa. Tuota hetkeä muistellessa on todella vaikeaa tajuta, miten nopeasti opiskeluaika on niin ikään omalla kohdallani vierähtänyt. Toki se kuusi vuotta, jonka mittaiseksi oma opiskeluaikani muodostui, on pitkä aika, mutta myös uskomattoman nopeasti sen saa kulumaan, mikäli onnistuu ympäröimään itsensä toinen toistaan upeammilla ihmisillä. Ja näin ainakin itse koen onnistuneeni.

Suurimmat kiitokset haluan antaa kaikille niille ystäville, joita olen opiskelupiireistä saanut, ja jotka tekivät näistä vuosista ikimuistoisia. Ilman teitä ja teidän kanssanne vietettyjä hetkiä tie valmistumiseen ei olisi ollut näin vaivaton taivaltaa. Kiitos lähimmät opiskelutoverit sekä ainejärjestö- ja seuratoiminnan kautta tutuksi tulleet henkilöt. Kiitos kotopuolen kaverit, joiden kanssa vietetyt viikonloput ja lomapäivät ovat tuoneet rentoutumista opiskelijan arkeen. Lopuksi vielä kiitokset perheelleni, joka on kannustanut ja tukenut minua koko opiskelujeni ajan.

Tampereella, 18.5.2021

Miika Varjonmaa

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Työn rakenne	2
1.3 Tutkimustyyppi ja tutkimusmenetelmät	2
1.4 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	3
1.5 Tutkimuksen rajaukset	4
2. EU:N DIREKTIIVI RAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUDESTA JA SUOMEN RAKENNUSLAINSÄÄDÄNTÖ	5
2.1 Rakentamista ohjaavat direktiivit ja nZEB	5
2.1.1 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EPBD)	6
2.1.2 Direktiivin muutos 2018/844/EU	7
2.1.3 Uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi (RES)	8
2.1.4 Energiatehokkuusdirektiivi (EED)	8
2.2 Suomen lainsäädäntö	9
2.2.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999)	9
2.2.2 Vesilaki (587/2011)	9
2.2.3 Ympäristönsuojelulaki (86/2000)	10
2.2.4 Rakentamismääräyskokoelma	10
2.2.5 Ohjeellisia etäisyyksiä maalämpökaivolle eri kohteista	10
3. GEOTERMISEN LÄMMÖN JA MAALÄMMÖN HYÖDYNTÄMISPERIAATE	12
3.1 Geoterminen energia	12
3.2 Maalämpö	14
3.3 Lämmön siirtymismekanismit	14
3.4 Maalämpöpumpun toimintaperiaate	15
3.4.1 Maalämmön käyttäminen jäähdytystarkoituksiin	16
3.4.2 COP-luku	18
3.4.3 SCOP-luku ja SPF-luku	19
3.4.4 Osatehomitoitus ja täystehomitoitus	19
3.5 Pumpun tehokkuuteen vaikuttavat tekijät	20
4. MAALÄMPÖ SUOMESSA	22
4.1 Maalämmön käytön kehitys Suomessa	23
4.2 Suomen maa- ja kallioperän ominaisuudet	23
5. ERILAISET MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄT	27
5.1 Avoimet keruupiirit	27
5.2 Suljetut keruupiirit	28
5.2.1 Suoran ja epäsuoran kierron järjestelmät	29
5.2.2 Vaakakeruupiirit	30
5.2.3 Energiakaivot	30
5.3 Maalämpöjärjestelmien sovelluksia	32
5.4 Järjestelmistä saatavan energian määrä	33

6. PYSTYSUUNTAISEN MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	36
6.1 Maan jäähtyminen pitkällä aikavälillä	36
6.2 Energiakaivon suunnittelu ja mitoittaminen	38
6.2.1 Keruuaineen lämpötilan laskeminen.....	39
6.2.2 Lämmön siirtymisen resistanssin huomioiminen.....	41
6.2.3 Keruuaineen pumppaamisen ja virtauksen vaikutukset	41
6.2.4 Energiakaivon lämmönvastuksen minimointi.....	42
6.2.5 Keruuaineen lämpötilan ja COP-luvun luomat rajoitukset.....	43
6.2.6 Energiakentät.....	44
6.2.7 Maan lataaminen ja käyttäminen energiavarastona	45
6.2.8 TRT-mittaus	47
6.3 Laskuesimerkki	48
7. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN ELINKAARIKUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN	
51	
7.1 Elinkaariajattelun taustaa	51
7.2 Elinkaarikustannusten laskenta.....	53
7.3 Herkkyysanalyysi	55
7.4 Maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannustekijät.....	55
7.4.1 Yleisiä havaittuja maalämmön kustannustekijöitä.....	56
7.4.2 Kustannustekijöiden suuruus	56
8. REFERENSSIKOHTEIDEN TARKASTELU	58
8.1 Energian hinnat, hintojen kehitys ja laskentakorkokanta	58
8.2 Referenssikohde 1	61
8.2.1 Referenssikohde 1 lähtötiedot.....	63
8.2.2 Referenssikohde 1 kannattavuuden laskeminen	64
8.3 Referenssikohdeet 2 ja 3	67
8.3.1 Referenssikohde 2 lähtötiedot.....	67
8.3.2 Referenssikohde 2 kannattavuuden laskeminen	68
8.3.3 Referenssikohde 3 lähtötiedot.....	71
8.3.4 Referenssikohde 3 kannattavuuden laskeminen	71
8.4 Nettonykyarvot pidemmällä tarkasteluajanjaksolla	73
8.5 Herkkyysanalyysit	74
9. TULOSTEN ARVIOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET	78
9.1 Referenssikohdeiden tulosten arviointi.....	78
9.2 Herkkyysanalyysien tulosten arviointi.....	80
9.3 Muita huomioita.....	80
9.4 Johtopäätökset, tutkimuskritiikki ja jatkotutkimusehdotukset	81
10. YHTEENVETO	84
LÄHTEET	87

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Ehdotetut nZEB-E-lukutasot eri rakennustyypeille FInZEB-hankkeen pohjalta. (Taltega: FInZEB-hanke (2013-2015), 2021).....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 2. HDR-menetelmän toimintaperiaate. Porareiät eivät usein ole täysin pystysuoria ja voivat sijaita useiden satojen metrien päässä toisistaan. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 35).....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 3. Lämpöpumpun toimintaperiaate ns. epäsuorassa järjestelmässä. Kuvassa 1 ja 3 lämmönvaihtimet, 2 kompressori, 4 paisuntaventtiili ja 5 kylmäaine. Kylmäainepiirissä kiertää kylmäaine, keruupiirissä keruuaine ja lämmityspiirissä esimerkiksi vesi. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 12).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 4. a) Vapaa jäähdytys b) Aktiivinen jäähdytys. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 147)</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 5. Maalämpöpumppujen määrän sekä sähkön ja kevyen polttoöljyn hinnankehitys 1976-2015. (SVT 2016, Maalämmön osuus lämmönlähteenä kasvussa, viitattu 21.4.2021).....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 6. Yksittäisen maalämpökaivon energiapotentiaalien erot alueittain 300 m syvyyteen saakka. (Geologinen Tutkimuskeskus 2019)</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 7. Maan peitepaksuus eri osissa Suomea. Syvyydet perustuvat kartan tekijän arvioihin ja ovat suuntaa antavia. (Geologinen tutkimuskeskus 2016)</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 8. Porareiän seinän ja keruuputken välin erilaisia täyttötapoja. a) Väli täyttyi vedellä b) Väli täytetään soralla/hiekalla c) Väli täytetään hyvin lämpöä johtavalla juotosaineella. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 187)</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 9. Erilaisia maalämpöjärjestelmiä. A) maan pintaan asennettava vaakakeruupiiri, B) kallioon porattava energiakaivo, C) vesistöön asennettu keruupiiri ja D) veden pumppaaminen kaivosta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 9).....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 10. Suoran kierron järjestelmä, kun keruupiiri on asennettu vaakatasoon lähelle maan pintaa. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 175)</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 11. Lämpökaivon syvyyteen ja kaivojen määrään vaikuttavia tekijöitä.....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 12. Tarvittavan keruuputkiston pituus suhteessa rakennuksen tilavuuteen. Kaavio on suuntaa antava, eikä sitä tule käyttää mitoituksen perusteena. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 8).....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 13. Lämmön keräämisen periaate aestiferista. Maan lämpötila porareiän reunoilla viilenee ajan saatossa ja saavuttaa lopulta ajan kuluessa vakaan tilan. (Banks 2012; An Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling, s. 289).....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 14. Porareikään siirtyvän lämmön muutos radiaalisesta virtauksesta kohti stationääritilaa. Eri vuosien lämpötilakäyrät ovat järjestyksessä 4 m, 9 m, 18 m, 23 m ja 27m etäisyydellä porareiästä. (Claesson & Eskilson 1987, Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal analyses and dimensioning rules, s. 11).....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 15. Virtaustyyppin muuttuminen laminaarisesta turbulentiin ja sen vaikutus energiakaivon resistanssiin. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 300)</i>	<i>42</i>

Kuva 16. Erilaisia energiakenttien muotoja. Muodot A-C ovat ruudukkomaisia malleja koostuen 36 kaivosta, malli D on 30 kaivosta koostuva "avoin" muoto. (Banks 2012, <i>An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling</i> , s. 320).....	45
Kuva 17. BTES-tyylinen energiavarasto. Energiakaivot kytketään sarjaan, ja lämpö joko otetaan tai syötetään kenttään aina sen keskustan kautta. (Cabeza 2015, <i>Advances in thermal energy storage systems: methods and applications</i> , s. 142).....	46
Kuva 18. Laskuesimerkin keruuaineen lämpötilan muutos ajan funktiona. 30 vuoden tarkasteluajanjakson päätteeksi esitetty myös lämpötila huippukuormituksen aikana.....	49
Kuva 19. Kiinteistön elinkaarikustannukset eriteltynä. (Saari 2004, <i>Elinkaarikustannusten laskenta</i> , s. 5).....	54
Kuva 20. Sähkön hinnan kehitys kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät sähköenergian, siirtomaksut ja verot. (Tilastokeskus 2021, <i>Energian hinnat [viitattu 20.4.2021]</i>).....	58
Kuva 21. Kaukolämmön hinnan kehitys kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät kaikki teho- ja energiamaksut, verot sekä muut kaukolämpöön liittyvät vuotuiset maksut. Hinnat eivät sisällä liittymismaksuja. (Energiateollisuus 2021, <i>Kaukolämmön hinta 1.1.2021 [viitattu 20.4.2021]</i>).....	59
Kuva 22. Sähkön hinnan kehityksen trendi, kun huomioidaan suorasähkölämmitteisen pientalon ja keskisuuren teollisuuden käyrät. (Tilastokeskus 2021, <i>Energian hinnat [viitattu 20.4.2021]</i>).....	60
Kuva 23. Kaukolämmön hinnan kehityksen trendi, kun huomioidaan rivitalon/pienkerrostalon ja kerrostalon käyrät. (Energiateollisuus 2021, <i>Kaukolämmön hinta 1.1.2021 [viitattu 20.4.2021]</i>).....	60
Kuva 24. Referenssikohteen 1 rakennuksen L energiakaivojen sijoittelu. B1-B6 kuvaavat kaivojen yläpäitä. Kaivon yläpäästä lähtevät paksu katkoviiva kuvaa kaivon poraussuuntaa, mikäli se on porattu kallistetusti.	62

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Energiakaivon poraamisen suositteletäisyyksiä eri kohteisiin. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 25)</i>	<i>11</i>
<i>Taulukko 2. Erilaisten maalämpöjärjestelmien energiantuottoja ja maksimitehoja. (Aittomäki 1983, Maaperä ja vesistöt lämmönlähteinä; Kukkonen 2000, Geothermal Energy in Finland; Leppäharju 2008, Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät)</i>	<i>34</i>
<i>Taulukko 3. Laskuesimerkin lähtötiedot.</i>	<i>48</i>
<i>Taulukko 4. Rakennuksen L lähtötiedot.</i>	<i>63</i>
<i>Taulukko 5. Rakennusten K ja J lähtötiedot.</i>	<i>63</i>
<i>Taulukko 6. Referenssikohteen 1 laskennan loput lähtötiedot.</i>	<i>64</i>
<i>Taulukko 7. Referenssikohteen 1 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.</i>	<i>64</i>
<i>Taulukko 8. Rakennuksen L ja rakennusten K ja J kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.</i>	<i>65</i>
<i>Taulukko 9. Referenssikohteen 1 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.</i>	<i>66</i>
<i>Taulukko 10. Referenssikohteen 2 lähtötiedot.</i>	<i>68</i>
<i>Taulukko 11. Referenssikohteen 2 laskennan loput lähtötiedot.</i>	<i>69</i>
<i>Taulukko 12. Referenssikohteen 2 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.</i>	<i>69</i>
<i>Taulukko 13. Referenssikohteen 2 kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.</i>	<i>70</i>
<i>Taulukko 14. Referenssikohteen 2 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.</i>	<i>70</i>
<i>Taulukko 15. Referenssikohteen 3 lähtötiedot.</i>	<i>71</i>
<i>Taulukko 16. Referenssikohteen 3 laskennan loput lähtötiedot.</i>	<i>72</i>
<i>Taulukko 17. Referenssikohteen 3 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.</i>	<i>72</i>
<i>Taulukko 18. Referenssikohteen 3 kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.</i>	<i>73</i>
<i>Taulukko 19. Referenssikohteen 3 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hintojen nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.</i>	<i>73</i>
<i>Taulukko 20. Investointien nettonykyarvot vuosina 20, 25, 30, 35 ja 40 alkuinvestoinnista.</i>	<i>74</i>
<i>Taulukko 21. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön ja energian hinnan vuotuinen nousu on 3 %.</i>	<i>74</i>
<i>Taulukko 22. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön ja energian hinnan vuotuinen nousu on 4 %.</i>	<i>75</i>
<i>Taulukko 23. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön hinnan vuotuinen nousu on 2 % ja kaukolämmön 5 %.</i>	<i>75</i>
<i>Taulukko 24. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 5 %.</i>	<i>76</i>
<i>Taulukko 25. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 3 %.</i>	<i>76</i>
<i>Taulukko 26. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 2 %.</i>	<i>77</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

COP	Lämpökerroin (Coefficient of Performance)
E-luku	Energialuku [kWh_E/m^2]
EED	Energiatohokkuusdirektiivi (Energy Efficiency Directive)
EED	Earth Energy Designer, energiakenttien simulointiin käytetty tietokoneohjelma
EGS	Tehostettu geoterminen lämmöntuottojärjestelmä (Enhanced Geothermal System)
EPBD	Rakennusten energiatohokkuusdirektiivi (Energy Performance of Buildings Directive)
GSHP	Maalämpöpumppu (Ground Source Heat Pump)
HDR	HDR-menetelmä (Hot Dry Rock)
LCC	Elinkaarikustannukset (Life Cycle Costs)
nZEB	Lähes nollaenergiarakennus (near Zero Energy Building)
nZEB E-luku	FInZEB-hankkeen pohjalta ehdotettu E-luvun raja-arvo lähes nollaenergiarakennukselle
FInZEB	Vuonna 2015 valmistunut hanke, jonka tarkoitus oli kehittää lähes nollaenergiarakennuksen määritelmä Suomessa
RakMk	Suomen Rakentamismääräyskokoelma
RES	Uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi (Renewable Energy directive)
SCOP	Lämpöpumpun vuosikerroin (Seasonal Coefficient of Performance)
SPF	Keskimääräinen vuotuinen lämpökerroin (Seasonal Performance Factor)
TRT	Terminen vastetestti (Thermal Response Test)
λ	lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]
γ	Eulerin vakio (0,5772)
C_P	ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
D	kaivon syvyys [m]
$E(u)$	Theisin yhtälö
I_0	investointikustannus
P	teho [W]
q	lämmönsiirron teho [W/m]
M	ylläpitokustannus
O	käyttökustannus
R_b	kaivon seinän lämmönvastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
R_E	maan lämmönvastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
R_e	Reynoldsin luku
r	laskentakorkokanta
r_b	kaivon säde [mm]
S_{vc}	tilavuuslämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$]
S tai S_N	jäännösarvo
T_0	maan häiritsemätön (luonnontilainen) lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_b	kaivon seinän lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{s,b}$	stationääritilaa vastaava lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
t	aika [s]
t_s	stationääritilaa vastaava ajankohta [s]

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Kestävä kehitys ja vihreät arvot ovat olleet kasvava trendi rakennusalalla viimeisten vuosien aikana. Kehityksen suunnan jatkuessa samanlaisena ne tulevat olemaan yhä tärkeämpiä kokonaisuuksia alalla myös tulevaisuudessa. Niin kansainväliset kuin kansalliset asetukset ja tavoitteet esimerkiksi hiilijalanjäljen pienentämisen suhteen niin ikään pakottavat rakennusalaa etsimään yhä ympäristöystävällisempiä ja energiatehokkaampia ratkaisuja rakennuksille.

Yksi yhä yleistyvistä rakennusten lämmitysjärjestelmistä on maalämpö. Sen selkeinä etuina ovat energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys ja pienet hiilidioksidipäästöt, sillä suurin osa (yleensä vähintään kaksi kolmasosaa) järjestelmän tuottamasta energiasta on peräisin maasta. Toinen merkittävä etu saavutetaan maalämpöjärjestelmän vähäisillä käyttökustannuksilla, sillä järjestelmän toimintaan tarvittava energiamäärä on huomattavasti pienempi kuin siitä saatavan energian määrä. (Banks 2012; Motiva 2012) Suomessa maalämpöjärjestelmiä on toteutettu enemmän lähinnä pientaloihin, mutta osin vähäisten käyttökustannusten ja toisaalta energian hinnan nousun takia myös suuremmissa rakennuksissa kiinnostus on herännyt mahdollisuuksiin tuottaa sen tarvitsema lämmitysenergia maalämmöllä (Juvonen & Lapinlampi 2013).

Alhaiset käyttökustannukset verrattuna muihin lämmitysvaihtoehtoihin ja toisaalta myös maalämpöjärjestelmien vähäinen huoltotarve ovat suurimpia syitä sille, miksi maalämpöjärjestelmien elinkaarikustannukset ovat pieniä. Ongelmana maalämmön valitsemisessa rakennuksen lämmitysjärjestelmäksi on kuitenkin sen kalliit investointikustannukset verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Järjestelmän vähäiset elinkaarikustannukset voivat kuitenkin aiheuttaa sen, että korkea investointikustannus on maksanut itsensä takaisin jo muutamassa vuodessa rakennuksen elinkaaren aikana. Tätä tutkitaan myös tässä opinnäytetyössä referenssikohteiden avulla.

Maalämpöjärjestelmien elinkaarikustannuksista on tehty myös aikaisempia opinnäytteitä, mutta näistä moni on keskittynyt saneerauskohteisiin, pienempiin rakennuksiin tai muihin kuin asuinkerrostaloihin. Tässä työssä referenssikohteet ovat uudisrakenteisia asuinkerrostaloja.

1.2 Työn rakenne

Työ aloitetaan lainsäädäntökatsauksella, jonka tarkoituksena on antaa lukijalle kuva siitä, mikä ohjaa isommassa kuvassa rakentamista Suomessa ja mitä tarkempia säädöksiä Suomen lainsäädännössä on. Vielä tärkeämpää on, että lukijalle syntyy käsitys siitä, kuinka paljon lainsäädäntö sisältää vaateita rakennusten korkeampaan energiatehokkuuteen ja ohjaa näin myös isommassa mittakaavassa rakentamista kohti hiilineutraalimpaa tulevaisuutta.

Luvussa 3 esitetään lyhyesti, mistä maalämpöjärjestelmistä saatava energia on peräisin. Luvussa selitetään maalämpöpumpun toimintaperiaate ja olennaisimpia syitä sille, miksi maalämpöä käytetään ja millaisiin erilaisiin tarkoituksiin sitä voidaan käyttää. Luvussa 4 tarkastellaan tarkemmin maalämmön käytön nykytilannetta Suomessa sekä Suomen maa- ja kallioperän soveltuvuutta maalämmön käyttöönottoon. Luvussa 5 esitellään erilaisia maalämpöjärjestelmiä, näiden hyviä ja huonoja puolia sekä merkittävimpiä suunnittelu- ja toteutustekijöitä. Luku päättyy katsaukseen järjestelmien tehokkuudesta, mikä osoittaa sen, miksi juuri pystysuuntaiset energiakaivot ovat tehokkain tapa myös asuin-kerrostaloissa lämmöntuottoon maalämmöllä.

Luvussa 6 perehdytään tarkemmin pystysuuntaisen maalämpöjärjestelmän suunnitteluun ja useammista energiakaivoista koostuvaan järjestelmään. Luvun lopussa esitetään mitoitus esimerkki yhdelle energiakaivolle. Luku 7 käsittelee tarkemmin elinkaariajattelua ja elinkaarikustannuksia. Luvussa esitettävät kaavat toimivat pääasiallisena pohjana luvun 8 referenssikohteiden tulosten laskennalle, missä kohteista saatujen lähtötietojen pohjalta lasketaan kohteiden maalämpöinvestointien nettohyötyarvo sekä investointien takaisinmaksuaika käyttäen nettohyötyarvomenetelmää. Kohteiden taustatiedoissa esitetään myös haastatteluissa esille tulleita erikoispiirteitä kyseisissä kohteissa, joiden vaikutusta arvioidaan niin suunnitteluun, lähtötietoihin kuin laskentatuloksiinkin.

Luvussa 9 esitetään kootusti työn ja laskennan merkittävimmät johtopäätökset sekä tulosten kriittinen arviointi. Luvun 10 yhteenvedossa esitetään lyhyesti koko työn kulku ja merkittävimmät tulokset sekä pohditaan niiden merkitystä.

1.3 Tutkimustyyppi ja tutkimusmenetelmät

Työn teoriaosuus on toteutettu pääosin kirjallisuustutkimuksena ja se on työn pääasiallinen tutkimustyyppi. Lähteinä on käytetty maalämpöjärjestelmistä sekä elinkaarikustannusten laskennasta kertovaa kirjallisuutta, rakennusalan julkaisuja, aiempia tutkimuksia sekä verkkosivuja. Tulosten laskennan tueksi toteutettiin myös kaksi haastattelua, joissa

haastateltiin referenssikohteiden suunnittelussa mukana olleita henkilöitä. Näiden lisäksi toteutettiin kolme muuta haastattelua, joissa haastateltiin maalämpöjärjestelmien toteutukseen ja huoltoon sekä Suomen maa- ja kallioperään sekä pohjavesialueisiin erikoistuneita eri yritysten ammattilaisia. Yhteensä työtä varten toteutettiin viisi haastattelua.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn päätutkimuskysymys on:

- Miten uudisrakennuksen kokonaiskustannuksia voidaan pienentää maalämmön avulla?

Muita kysymyksiä ovat:

- Miten maalämpöjärjestelmän investointikustannuksia voidaan saada laskettua?
- Mitä eroja maalämpöjärjestelmien välillä on? Onko toteutustapojen kannattavuudessa eroja?
- Mahdollistaako maalämmön käyttö tulevaisuudessa Suomessa myös nollaenergiarakentamisen?

Työn tarkoituksena on vastata tutkimuskysymyksiin kirjallisuustutkimuksen, haastattelujen ja työn laskentatulosten tulkinnan kautta. Työssä tutkitaan erilaisia maalämpöjärjestelmiä, niiden mitoittamiseen ja suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ja maalämmön valitsemisen vaikutuksia lämmitysjärjestelmän kokonaiskustannuksiin. Järjestelmän elinkaarikustannuksiin vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan herkkyyksianalyysillä kahta lähtöarvoa varioimalla, jotta saadaan selville, mille lähtöarvon muutokselle tulokset ovat kaikkein herkimpiä. Työn tulosten on tarkoitus osoittaa, että maalämpöjärjestelmään investoiminen on myös suurissa kohteissa kannattava vaihtoehto, vaikka sen investointikustannukset ovat korkeat. Työssä halutaan myös osoittaa, että matalammat maalämpöjärjestelmän käyttökustannukset verrattuna vaihtoehtoisiin lämmitysjärjestelmiin osoittavat sen, että painottamalla käytön aikaisia elinkaarikustannuksia investointipäätöksissä voidaan tehdä kustannussäästöjä pidemmällä aikavälillä, kun tarkasteluajanjakso on riittävän pitkä.

1.5 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimus rajataan vain asuinkerrostaloihin, sillä rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen eri rakennustyypeillä voi esiintyä paljon kohdekohtaisia eroja. Lisäksi työssä keskitytään pääasiassa pystysuuntaisten maalämpöjärjestelmien toteuttamiseen, sillä ne ovat myös suurissa rakennuksissa yleisin maalämpöjärjestelmätyyppi.

2. EU:N DIREKTIIVI RAKENNUSTEN ENERGIA-TEHOKKUUDESTA JA SUOMEN RAKENNUSLAINSÄÄDÄNTÖ

Suomalaista rakentamista ohjaavat oman lainsäädännön lisäksi Euroopan parlamentin ja neuvoston asettamat direktiivit. Vuonna 2010 astui voimaan Euroopan parlamentin ja neuvoston uudelleenlaadittu direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta. Sen mukaan 31. joulukuuta 2020 jälkeen kaikkien uudisrakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia (nZEB). Koska jäsenvaltioiden kesken vallitsee hyvin erilaiset ilmasto-olosuhteet, on direktiiviin asetettu, että jäsenvaltioiden tulee itse määrittellä yksityiskohtaisesti lähes nollaenergiarakennuksen kriteerit huomioiden mm. paikalliset olosuhteet (European Commission 2010).

Suomen hallituksen tavoitteena on, että Suomi on ensimmäinen hiilineutraali hyvinvointiyhteiskunta vuoteen 2035 mennessä. Vuosikymmenen vaihtuessa voimaan astunut direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta on osa rakennusalaan koskevia toimenpiteitä, joilla pyritään pääsemään vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteisiin. Vuonna 2017 Ympäristöministeriö teetti selvityksen, joka keskittyy rakennusten sekä rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen vähentämiseen Suomessa ja pyrkii edistämään rakennus- ja kiinteistöalalle asetettuja ilmastotavoitteita. Ilmastotavoitteisiin pääseminen edellyttää paljon toimenpiteitä eri toimialoilla, joista rakentamisen tärkeä osa-alue on rakennusten parempi energiatehokkuus. Rakennuksissa käytetään n. 40 % kaikesta Suomessa kulutettavasta energiasta, ja rakennusten osuus kaikista Suomen päästöistä on yli 30 %. (Rakennusteollisuus 2021) Tilojen lämmityksen osuus oli puolestaan suomalaisissa asuinrakennuksissa yli kaksi kolmasosaa rakennusten kokonaisenergiankulutuksesta vuonna 2019 (SVT 2021). Tämä osoittaa, että rakennusten lämmittämisessä on paljon potentiaalia energiatehokkaampaan tilojen lämmittämiseen.

2.1 Rakentamista ohjaavat direktiivit ja nZEB

Rakennusten energiatehokkuuslainsäädännön päätavoitteet ovat rakennusten energiatehokkuuden lisääminen, uusiutuvan energian käytön lisääminen energiantuotannossa sekä energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. (Ympäristöministeriö

2021) Rakennusalalla tämä tarkoittaa erityisesti uudisrakentamisessa korkeaa rakennusten energiatehokkuutta ja korjausrakentamisessa laajoja energiatehokkuuden parannustoimenpiteitä.

Direktiivejä on olemassa monia erilaisia, joista osa koskee energiankäyttöä eri aloilla yleisellä tasolla ja osa suuremmin pääasiassa rakennusalaa. Suomen lainsäädäntö pohjautuu EU:n direktiiveihin ja ohjaa rakentamista ja niiden lämmitysjärjestelmien käyttöä tarkemmin. Seuraavissa alaluvuissa on esitetty tärkeimpiä EU-direktiivejä, jotka luovat päälinjan energiatehokkaalle rakentamiselle.

2.1.1 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EPBD)

Direktiiveistä eniten rakennusalaa koskeva on EU:n direktiivi 2010/31/EU, josta käytetään myös yleisesti lyhennettä EPBD (eng. *Energy Performance of Buildings Directive*). EPBD:n 9 artiklassa annetaan määräyksiä koskien lähes nollaenergiarakennuksia, jonka mukaan 31.12.2020 jälkeen kaikkien uudisrakennusten on oltava lähes nollaenergiarakennuksia. Poikkeuksena ovat viranomaisten käytössä ja omistuksessa olevat uudisrakennukset, joiden on oltava lähes nollaenergiarakennuksia jo 31.12.2018 jälkeen.

EPBD:n johdanto-osan 17 kohdassa määritellään, että sellaisten rakennusten lukumäärän tulee kasvaa, jotka pystyvät ylittämään nykyiset energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset. Tällä tavoitellaan entistä suurempaa hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Jäsenvaltioiden tulee luoda myös kansalliset suunnitelmat lähes nollaenergiarakennusten määrän lisäämiseksi. (European Commission 2010)

Lähes nollaenergiarakennus eli nZEB (eng. *near Zero Energy Building*) on nimensä mukaisesti rakennus, joka pystyy tuottamaan lähes yhtä paljon energiaa, kuin mitä se kuluttaa. Lähes nollaenergiarakennuksen määritelmä vaihtelee jäsenvaltioittain, mikä johtuu osaltaan hyvin erilaisista ilmastoista jäsenvaltioiden kesken. Direktiivin 2010/31/EU 2 artiklan 2 kohdan mukaan lähes nollaenergiarakennus määritellään seuraavasti:

- rakennuksella on hyvin korkea energiatehokkuus
- rakennuksen energia tuotetaan pääosin uusiutuvilla energianlähteillä
- rakennuksen energiankulutus on hyvin pientä ja vähäinen energiantarve kateetaan paikan päällä tai rakennuksen läheisyydessä tuotetulla uusiutuvalla energialla. (European Commission 2010)

Koska direktiivin määritelmä on melko moniulotteinen ja laaja, tulee direktiivin alaisten valtioiden itse luoda kansalliset määritelmät sille, mitä kyseisessä valtiossa lähes nollaenergiarakennuksella tarkoitetaan. Suomessa tähän perustettiin FInZEB-hanke, joka

valmistui vuonna 2015 ja jonka tarkoituksena oli määrittää lähes nollaenergiarakennuksen vaatimukset eri rakennustyypeille Suomessa. Laskenta pohjautuu rakennuksen lämpöviivätkäytöksiin sekä sähkön huipputehon laskentaan, joiden pohjalta saadaan rakennuksen kokonaisenergiankulutus ja nZEB-E-luku (kWh_E/m^2). E-luku kuvastaa rakennuksen kokonaisenergian käyttöä. Mitä pienempi luku on, sitä energiatehokkaampi rakennus on kyseessä. (Rakennusteollisuus 2021; Talteka 2021) Kuvassa 1 on esitetty FInZEB-hankkeen pohjalta ehdotettuja E-luvun raja-arvoja eri rakennustyypeille.

	E-lukuraja D3/2012	Ehdotus nZEB-E- luvulle	Muutos nykyisestä
Pientalot *	160...204	120...204	
Asuinkerrostalo	130	116	-11 %
Toimisto	170	90	- 47 %
Koulu	170	104	- 39 %
Päiväkoti	170	107	- 37 %
Liikerakennus	240	143	- 40 %
Liikuntahalli	170	115	- 32 %
Majoitusliikerakennus	240	182	- 24 %
Sairaala	450	418	- 7 %

Kuva 1. Ehdotetut nZEB-E-lukutasot eri rakennustyypeille FInZEB-hankkeen pohjalta. (Talteka: FInZEB-hanke (2013-2015), 2021)

2.1.2 Direktiivin muutos 2018/844/EU

Toukokuussa 2018 astui voimaan rakennusten energiatehokkuusdirektiivin muutos, jonka olennaisia lisäyksiä direktiiviin olivat jäsenvaltioiden kansallinen pitkän aikavälin rakennusten peruskorjausstrategia, sähköautojen latauspisteiden ja -valmiuden lisääminen sekä älykkäiden teknisten ratkaisujen käytön lisääminen rakennuksissa. (European Commission 2018) Näistä rakennuksia ja erityisesti niiden lämmitysjärjestelmiä lähimmin koskevat kohdat kuuluvat älykkäiden järjestelmien käytön lisäämiseen rakennuksissa.

Rakennusten teknisten järjestelmien osalta direktiiviä 2010/31/EU muutettiin niin, että olemassa olevien rakennusten teknisten järjestelmien energiankäytölle asetettiin järjestelmävaatimukset. Nämä vaatimukset liittyvät erityisesti järjestelmien energian kulutukseen, mitoittamiseen, säätämiseen sekä ohjaamiseen. Uusissa rakennuksissa on vaadittava, että niihin asennetaan itsestään säätyvät tekniset järjestelmät, mikäli se pystytään teknisesti toteuttamaan kustannusten puitteissa. Direktiivi sisältää myös velvoitteita

säännöllisiin tarkastuksiin ja/tai toimivuuden seurantaan lämmitys- ja ilmastointijärjestelmien osalta, mikäli tietyt ehdot niiden nimellistehon osalta täyttyvät. (European Commission 2018)

2.1.3 Uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi (RES)

Direktiivi 2009/28/EY eli direktiivi uusiutuvan energian käytön edistämisestä velvoittaa jäsenvaltioita lisäämään uusiutuvan energian käytön osuutta energian loppukulutuksessa. Direktiivin 13 artiklan 4 kohdassa sanotaan, että jäsenvaltioiden on rakentamismääräyksissään veloitettava, että uusiutuvan energian käyttö kasvaa rakennuksissa ja rakennusosissa. Samoin 13 artiklan 6 kohdassa veloitetaan jäsenvaltioita lainsäädännössään edistämään sellaisten uusiutuvalla energialla toimivien lämmitys- ja jäähdytysratkaisujen käyttöä, jotka vähentävät rakennuksen energiankulutusta. (European Commission 2009)

EU:n tavoitteena on ollut vuoteen 2020 mennessä lisätä uusiutuvan energian osuus käytetystä energiasta 20 %:iin. Koska jäsenvaltioiden lähtökohdat tähän lisäykseen ovat erilaiset, direktiivissä on annettu jäsenvaltiokohtaiset tavoiteosuudet uusiutuvan energian osuuden lisäämisestä. Suomessa lähtökohta oli vuonna 2005 28,5 % ja tavoitetaso vuonna 2020 38 %, eli uusiutuvan energian loppukäytön osuudessa tavoiteltiin tällä aikavälillä 9,5 prosenttiyksikön lisäystä. (European Commission 2009) Suomi on ylittänyt oman tavoitetasonsa uusiutuvan energian loppukulutuksesta jo vuodesta 2014 lähtien, ja uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta oli esimerkiksi vuonna 2018 41,2 % (SVT 2021).

2.1.4 Energiatehokkuusdirektiivi (EED)

Direktiivi 2012/27/EU eli energiatehokkuusdirektiivi (EED) ohjaa jäsenvaltioita energiansäästöön ja sen tehokkaampaan käyttöön. Se velvoittaa jäsenvaltioita raportoimaan energiansäästötoimista ja luomaan toimintasuunnitelman energian säästämiseksi kolmen vuoden välein. (Motiva 2020)

Rakennusallalla EED velvoittaa erityisesti pitkän aikavälin toimintastrategioiden luomiseen rakennuskannan energiatehokkuuden lisäämiseksi. Tämä koskee varsinkin rakennusten peruskorjauksia, ja direktiivin johdannon 17 kohdassa mainitaankin, että vuoden 2050 ilmastotavoitteisiin pääsemisessä olemassa olevalla rakennuskannalla on merkittävä rooli energiansäästöpotentiaalinsa takia. Lisäksi direktiivi sisältää vaateita energian kulutuksen seurantaan erilaisissa rakennuksissa esimerkiksi energiankulutusta seuraavien mittarein. (European Commission 2012)

2.2 Suomen lainsäädäntö

Suomessa tärkeimpiä energiatehokkuutta ja ympäristöä koskevia lakeja ovat Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) lisäksi Ympäristönsuojelulaki (527/2014) sekä Vesilaki (587/2011). Ne ohjaavat myös maalämpöjärjestelmien suunnittelua ja käyttöönoton mahdollisuuksia, vaikka eivät suoraan anna määräyksiä sen käyttöön liittyen (Bayer et.al. 2010). Muita maalämpöjärjestelmän käyttöön vaikuttavia tekijöitä on mm. Kemikaalilaissa (744/1989), Kiinteistönmuodostamislaisissa (554/1995), Terveysturvallisuuslaissa (763/1994) sekä kuntien rakentamisjärjestyksissä ja RakMk:ssa (Rakentamismääräyskokoelma). (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Suomessa maalämpöjärjestelmien käyttöä ohjataan lainsäädännössä jonkin verran, mutta vähemmän verrattuna moniin muihin EU:n jäsenmaihin (Bayer et.al. 2010). Lainsäädännöllä pyritään varmistamaan mm. ympäristön turmeltumattomuus, olemassa olevien teknisten järjestelmien toimivuus, maalämpöjärjestelmien toimivuuden tehokkuus sekä ympäröivien tonttien yhtäläinen mahdollisuus järjestelmän käyttöönottoon.

2.2.1 Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999)

Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan rakennuslupa tarvitaan rakennuksen rakentamiseen, eräisiin korjaus- tai muutostöihin ja esimerkiksi sellaisiin toimiin, jotka vaikuttavat merkittävästi rakennuksen energiatehokkuuteen. Uuden rakennuksen lämmitysjärjestelmän rakentaminen käsitellään jo rakennusluvassa. Mikäli olemassa olevan rakennuksen lämmitysjärjestelmä halutaan muuttaa, tarvitaan tähän toimenpidelupa, ellei kunta ole tätä rakennusjärjestyksessään toisin määrännyt. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Maalämpöjärjestelmää varten tarvittava toimenpidelupahakemus jätetään kunnan rakennusvalvontaan tarvittavine asiakirjoinen, joiden osana on yleensä tontin asemapiirros, johon kaivon paikka on merkitty. Kaivon paikkaan vaikuttaa esimerkiksi etäisyydet tontin reunoista, olemassa olevasta kunnallistekniikasta sekä rakennusten reunoilta. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

2.2.2 Vesilaki (587/2011)

Vesilain mukainen aluehallintaviranomaisen lupa tarvitaan, jos hanke voi muuttaa pohjaveden laatua tai määrää, huonontaa pohjavesiesiintymän tilaa tai vaikuttaa heikentävästi sen antoisuuteen, käyttökelpoisuuteen tai hankaloittaa sen käyttöä esimerkiksi talousvetenä. Vesilain mukainen toimenpidelupa pitää hankkia maankäyttö- ja rakennuslain mukaista toimenpidelupaa aiemmin, mikäli sellainen tarvitaan. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Pohjavesialueelle sijoitettaessa maalämpökentän rakentamiseen suositellaan aina vesilain mukaista lupaa. Luvan myöntämiseen vaikuttavat merkittävästi maalämpökentän sijainti sekä esitetyt tekniset ratkaisut. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

2.2.3 Ympäristönsuojelulaki (86/2000)

Ympäristönsuojelulaissa määritellään pohjaveden pilaamiskiellosta niin, että energiaa tai ainetta ei saa päästää maahan tai käsitellä siten, että merkittävällä pohjavesialueella pohjavesi voi koitua terveydelle haitalliseksi tai sen laatu voi muuten merkittävästi huonontua. Tämä koskee myös esimerkiksi viereisiä kiinteistöjä ja niiden alueella pohjaveden muuttumista sellaiseksi, ettei se kelpaa enää sille määritellyyn käyttötarkoitukseen. Lisäksi toimenpide ei saa loukata yleistä tai toisen etua vaikuttamalla pohjaveden laatuun. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Maalämpöjärjestelmien osalta pohjaveden laatuun voivat vaikuttaa porareian tekemisen yhteydessä erilaisten aineiden tai kappaleiden sekoittuminen pohjaveteen tai käytön aikainen keruuputken rikkoontuminen, jonka seurauksena keruuaine pääsee imeytymään maakerrosten läpi pohjaveteen. Kemikaalien käsittelystä ja ympäristö- ja terveysvaikutuksista säädetään erikseen Kemikaalilaissa (744/1989) (Juvonen & Lapinlampi 2013).

2.2.4 Rakentamismääräyskokoelma

Suomen Rakentamismääräyskokoelma sisältää kohtia liittyen rakennuksen energiatehokkuuteen ja vesilaitteistoihin, jotka vaikuttavat osaltaan tai suoraan maalämpöjärjestelmiin. Näissä veloitetaan esim.

- Lämmityslaitteiston lämmitystehon on sellainen, että lämmintä vettä on saatavilla riittävästi ja sen lämpötila on vähintään 55 °C
- Lämmitysjärjestelmä tulee suunnitella ja mitoittaa niin, että se toimii riittävän hyvällä hyötysuhteella sekä huippu- että osateholla
- Lämmitysteho on riittävä lämmityskauden yli eri paikkakuntien mitoittavilla ulkoilman lämpötiloilla.

(Juvonen & Lapinlampi 2013)

2.2.5 Ohjeellisia etäisyyksiä maalämpökaivolle eri kohteista

Suomessa pystysuorien vierekkäisten porareikien suositteletäisyys toisistaan on 15 metriä. Suositusten tarkoituksena on vähentää porareikien aiheuttamia maan lämpötila-

muutoksia, vuorovaikutusta viereisiin porakaivoihin ja teknisiin järjestelmiin sekä mahdollistaa myös naapureiden yhtäläinen mahdollisuus maalämmön käyttöönottoon. (Bayer et.al 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Suosituksista on kuitenkin mahdollista joustaa perustelluista syistä. Porareikä voidaan esimerkiksi tehdä myös kallistettuna, jolloin energiakaivot voivat olla myös vieretysten, ja reiän kaltevuus suunnitellaan siten, että lämmönsaanti on riittävää. Myös naapurin suostumuksella porareikä voidaan porata lähemmäs tontin rajaa. (Bayer et.al. 2010; Juvonen & Lapinlampi 2013) Taulukossa 1 on kuvattu Suomessa energiakaivon suunnittelussa käytettäviä suositteluetäisyyksiä.

Taulukko 1. Energiakaivon poraamisen suositteluetäisyyksiä eri kohteisiin. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 25)

Kohde	Suosittelu minimietäisyys
Energiakaivo	15 m *
Lämpöputket ja kaukolämpöjohdot	3 m **
Kallioporakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	7,5 m *
Kiinteistökohtaisen jätevedenpuhdistamon purkupaikka	Kaikki jätevedet 30 m, harmaat vedet 20 m
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket) – 5 m (muiden putket) **
Tunnelit ja luolat	25 m (arvioidaan tapauskohtaisesti)
* porareikä ollessa pystysuora	
** etäisyys riippuu maaperästä, kaivussyvyydestä sekä kaivantoon asennettavista putkista	

3. GEOTERMISEN LÄMMÖN JA MAALÄMMÖN HYÖDYNTÄMISPERIAATE

Maalämmöllä tarkoitetaan pääasiassa uusiutuvaa energiaa, jossa hyödynnetään maaperään varastoitunutta Auringon lämpöenergiaa. Tämä lämpöenergia on varastoitunut maan pintakerrokseen. Yleensä maalämmöstä puhutaan, kun lämpöä kerätään alle 400 metristä, mutta tälle syvyydelle ei ole olemassa selkeää rajaa. Maalämpöä voidaan kerätä myös vesistöistä, jos sellainen mahdollisuus tontilla on. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

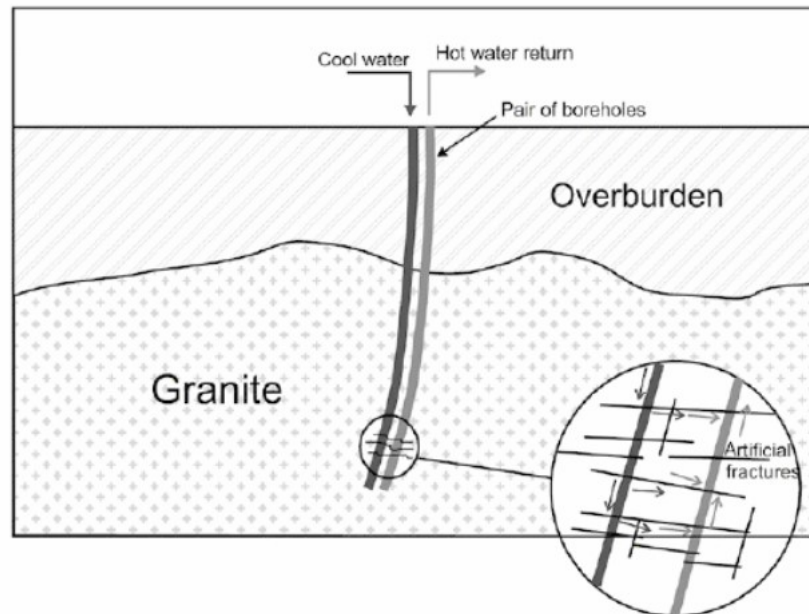
Syväällä maassa lämpöenergiaa vapautuu Maan pintaa kohti Maan sisemmistä osista erilaisten kemiallisten reaktioiden seurauksena. Geotermisenä energiana voidaan pitää joko energiaa, joka on johdettu käyttöön Maan sisuksen lämpimämmistä osista, tai energiaa, jota saadaan joko erittäin syvistä porareikiästä tai tietyistä kohdista Maan kuorta. Toisaalta EU:n direktiivissä 2009/28/EC geotermiseksi energiaksi määritellään energia, joka on varastoitunut lämmön muotoon maaperän pinnan alapuolelle, joten siihen voidaan teknisesti luokitella myös maalämpö. (Leppäharju 2008; Banks 2012)

3.1 Geoterminen energia

Lämpötilan muutosta maan syvyyden muutoksen suhteen sanotaan Maan lämpötilagradientiksi. Maan keskiarvoinen lämpötilagradientti on melko pieni, n. 0,02-0,035 °C/m. Toisin sanoen porattaessa kilometrin syvyyteen Maan lämpötila kasvaa keskimäärin 20-35 °C. Maan geoterminen lämpövuoto, joka kuvaa lämpövirran suhdetta pinta-alaan, vaihtelee tyypillisesti 60-100 mW/m² välillä. Maan keskiarvoinen geoterminen lämpövuoto on n. 87 mW/m². Mannerlaattojen reuna-alueiden lähellä sekä lämpötilagradientin että lämpövuonon arvot kasvavat huomattavasti suuremmiksi, esim. keskimääräinen lämpövuoto voi kasvaa jo yli 300 mW/m². Tällaisilla suuruuksilla geotermisen energian hyödyntäminen on jo erittäin kannattavaa. Tästä syystä esimerkiksi Islannissa, joka sijaitsee mannerlaatan reuna-alueella, geotermistä energiaa hyödynnetään energian tuotannossa runsaasti. (Banks 2012)

Yleinen käytössä oleva menetelmä geotermisen energian hyödyntämisessä on ns. EGS-järjestelmä (eng. *Enhanced Geothermal System*), josta on käytetty myös nimitystä HDR-menetelmä (eng. *Hot Dry Rock*). Järjestelmässä viileää vettä injektoidaan useita kilometrejä syvään porareikiin, jossa vesi kierrätetään keinotekoisesti tehtyjä halkeamia pitkin

toiseen reikään. Halkeamia pitkin korkeammissa lämpötiloissa lämmennyt vesi pumpataan takaisin maanpinnalle toisesta reiästä. Halkeamia voidaan tehdä räjähteillä tai kontrolloidummin vesisärötyksellä, jossa vettä, kemikaaleja ja hiekkaa pumpataan kovalla paineella porareikään, jolloin paine saa aikaan halkeamia kiviaineksessa. (Banks 2012) HDR-menetelmän periaate on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. HDR-menetelmän toimintaperiaate. Porareivät eivät usein ole täysin pystysuoria ja voivat sijaita useiden satojen metrien päässä toisistaan. (Banks 2012, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, s. 35)

Ongelmana HDR:ssä energiantuotannon kannalta on, että menetelmään tarvittava oikeanlainen geotermien alue voi olla kaukana tarvekeskuksista, ja investointikustannukset alueen tutkintaan, poraamiseen ja voimalaitoksen perustamiseen johdosta ovat hyvin korkeat. (Banks 2012)

Suomi ei sijaitse mannerlaatan reuna-alueella, jonka johdosta maan lämpötilagradietti ja geotermien lämpövuot ovat Suomessa matalia. Johtuen myös Suomen hyvin pak-susta litosfäärilaatasta (n. 150-200 km), on Suomen geotermien lämpövuot pienempi kuin maanosan keskiarvo (<math><65 \text{ mW/m}^2</math>), geotermien lämpötilagradientin vaihdellessa 8-15 °C/km välillä. Yli 40 °C lämpötila saavutetaan Suomessa arviolta yli 1,5 km syvyydessä, kun taas 100 °C lämpötiloja varten olisi porattava 6-8 km syvyyteen. (Kukkonen 2000; Banks 2012)

Syvän geotermien energian vaikeasta hyödyntämisestä huolimatta St1-energiayhtiö pilotoi ensimmäisenä EGS-voimalaitosta Suomessa Espoon Otaniemessä. Voimalan porareivät ulottuvat noin 6,5 kilometrin syvyyteen, ja voimala on määrä ottaa käyttöön vuoden 2021 aikana. Parhaimmillaan lämpötila porareikien pohjalla on yli 120 °C. Valmistuessaan se on maailman syvin täysin päästötön geotermien energian voimalaitos. On

arvioitu, että syvää geotermistä energiaa hyödyntävät järjestelmät eivät vielä ole yhtä kustannustehokkaita kuin maalämpöjärjestelmät, mutta niiden rakennuskustannukset tulevat hyvin todennäköisesti laskemaan, kun niiden osalta päästään joukkotuotantoon. (Vähäaho 2020; St1 2021)

3.2 Maalämpö

Kun tarkoitetaan lämpöenergian keräämistä maan matalista syvyyksistä, puhutaan maalämmöstä. Tällä syvyydellä tarkoitetaan yleensä alle 300 metrin syvyyksiä maanpinnasta, mutta yli 300 metrin syvyydet ovat myös mahdollisia. Maalämpöjärjestelmissä lämmön keräämiseen käytetään lämpöpumpputekniikkaa. Energiaa voidaan kerätä sekä maan pintakerroksista tai vesistöistä vaakakeruupiirillä, kuin myös pystysuuntaan porattavalla kaivolla maaperästä tai pohjavettä pumppaamalla. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Teknisesti maasta kerättävä lämpö on itse asiassa Auringon säteilyenergiaa, joka on varastoitunut maahan. Toisaalta mentäessä n. 15 metrin syvyyteen maa lämpötila alkaa määräytyä sen vuotuisen keskilämpötilan sekä geotermisen gradientin mukaan. Maan pintakerros toimii eräänlaisena energiavarastona, sillä se imee itseensä kesäaikaan Auringon lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää talvikautena lämmitykseen. Lisäksi maaperään pystytään varastoimaan muuta ylijäämäenergiaa, kuten aurinkopaneeleilla kerättyä energiaa, liikerakennusten jäteilman hukkalämpöä tai hukkalämpöä teollisuuden prosesseista. Järjestelmää voidaan hyödyntää myös jäähdyttämiseen kesäaikana. Jäähdytystarkoituksiin käyttämisestä on hyötyä myös siksi, että maahan injektoitava lämpö pidentää järjestelmän käyttöikää. (Leppäharju 2008; Banks 2012)

3.3 Lämmön siirtymismekanismit

Lämpö siirtyy kolmella tavalla: johtumalla, konvektiolla sekä säteilemällä. Näistä maalämpöjärjestelmät hyödyntävät pääasiassa johtumista sekä konvektiota. Lämpöä siirtyy maaperässä hieman myös säteilemällä, mutta sen osuus kokonaislämmönsiirtymästä on pieni. (Banks 2012)

Suuri osa kivilajeista omaa sellaiset ominaisuudet, että ne pystyvät varastoimaan lämpöä hyvin, mutta samanaikaisesti niiden lämmönjohtavuus ei ole niin suuri, että ne luovuttaisivat lämpöä nopeasti johtumalla. Tämä edesauttaa lämmön varastoitumista. Lämmönjohtavuus kuvaa aineen ominaisuutta luovuttaa lämpöä johtumalla. Siitä käytetään

symbolia λ ja sen yksikkönä on $[W/m \cdot K]$. Tietyn aineen kykyä pystyä varastoimaan lämpöä kutsutaan taas sen ominaislämpökapasiteetiksi. Ominaislämpökapasiteetista yleensä käytetty symboli on C_p , ja sen yksikkönä on $[J/kg \cdot K]$. (Banks 2012)

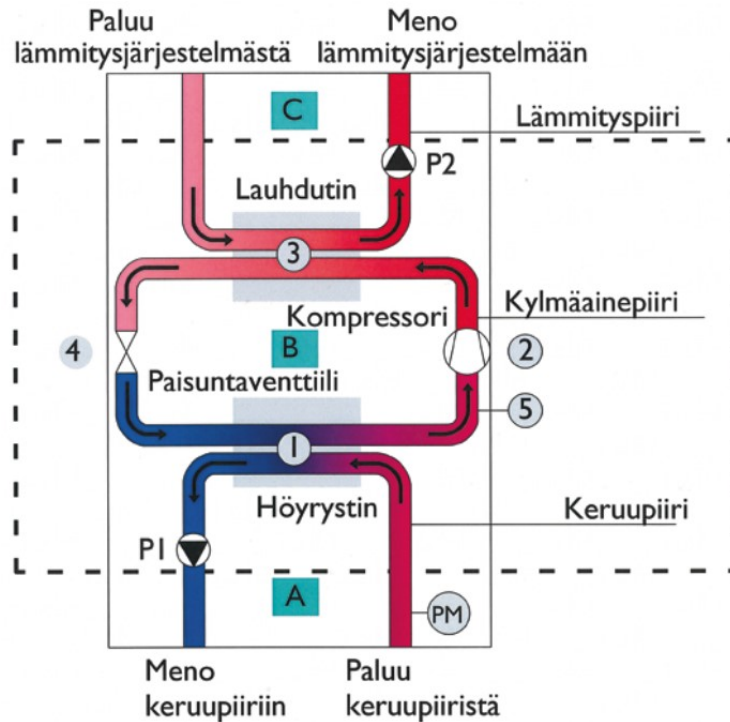
Maaperän ylemmissä kerroksissa lämpö liikkuu yleisimmin mineraaleja sekä maaperän huokosia pitkin johtumalla ja pohjaveden kautta konvektiolla. Johtumisen tehokkuuteen vaikuttaa maa-aineksen lämmönjohtavuus. Kivilajien lämmönjohtavuus vaihtelee yleensä melko kapealla välillä, n. 1-3 W/mK. Yleisistä mineraaleista kvartsi on parhaiten lämpöä johtava sen lämmönjohtavuuden ollessa jopa 7 W/mK. Myös maan lämpötila sekä kosteus vaikuttaa lämmönjohtavuuteen. Suomessa maa- ja kallioperä soveltuu maalämmön käyttöön siltä osin hyvin, että suurin osa kallioperästä koostuu hyvin lämpöä johtavista graniittisista kivilajeista, joiden lämmönjohtavuus on yleensä luokkaa 3,0-4,0 W/mK. Graniitin hyvä lämmönjohtavuus perustuu suurelta osin siihen, että se sisältää kvartssia. (Banks 2012)

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä, joka tapahtuu aineen liikkeen takia. Konvektio esiintyy useimmiten nestemäisessä olomuodossa, mutta konvektio on mahdollista myös kaasuilla. Konvektiota tapahtuu maaperän pintaosissa esimerkiksi pohjaveden liikkeiden mukana. Pohjavesi kuljettaa liikkeessaan mukanaan lämpökuormaa, jota voidaan hyödyntää lämmityksessä pumppaamalla sitä. Jos jollakin alueella pohjaveden liike on tavallista suurempaa, kuljettaa se tällöin mukanaan myös suurempaa lämpökuormaa, mikä lisää sen hyödyntämispotentiaalia lämmitystarkoituksiin. (Banks 2012)

3.4 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun avulla voidaan pakottaa lämpö virtaamaan matalammasta lämpötilasta korkeampaan ulkoisen työn avulla. Lämpöpumpun tehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi kylmemmän ja korkeamman lämpötilan välinen lämpötilaero sekä pumpun toimintaan tarvittavan ulkoisen työn määrä. Käytännössä mitä suurempi lämpötilaero on, sitä vähemmän pumppu tuottaa lämpöä, tai sitä suurempi määrä energiaa tarvitaan pumpun toimimiseksi kyseisillä lämpötiloilla. Toisin sanoen lämpöpumpun hyötysuhde huononee lämpötilaeron kasvaessa. (Banks 2012)

Lämpöpumpussa kiertää kylmäaine, joka on kierron kohdasta riippuen joko nestemäisessä tai kaasumaisessa muodossa. Pumppu voidaan käytännössä jakaa kahteen puoleen, niin sanottuihin matalapainepuoleen (höyrystimen puoli) ja korkeapainepuoleen (lauhduttimen puoli). Näiden välissä on kompressori, joka muodostaa matalapainepuolelle imun ja näin mahdollistaa alemman paineen. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013) Lämpöpumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Lämpöpumpun toimintaperiaate ns. epäsuorassa järjestelmässä. Kuvassa 1 ja 3 lämmönvaihtimet, 2 kompressori, 4 paisuntaventtiili ja 5 kylmäaine. Kylmäainepiirissä kiertää kylmäaine, keruepiirissä keruuaine ja lämmityspiirissä esimerkiksi vesi. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 12)

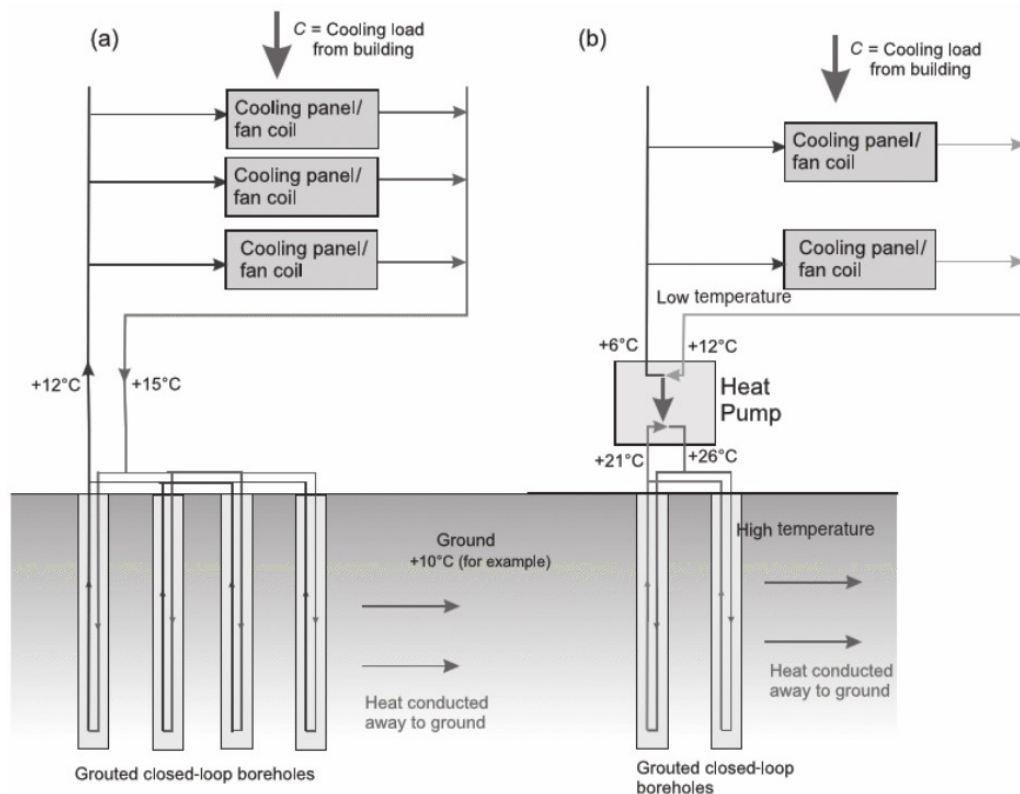
Kylmäaine kulkee aluksi lämmönvaihtimeen, jota tässä kohtaa kiertoa kutsutaan höyrystimeksi. Höyrystimessä kylmäaine sitoo lämpöenergiaa keruepiirissä kiertävästä keruuaineesta aiheuttaen keruuaineen jäähtymisen. Samanaikaisesti kylmäaineen olomuoto muuttuu matalassa paineessa höyryksi. Seuraavaksi höyrystynyt kylmäaine viedään kompressoriin, missä ulkoisen energian johdosta sen paine kasvaa korkeaksi, nostaen samalla kylmäaineen lämpötilaa. Kompressori syöttää tämän jälkeen kylmäainetta korkeapainepuolen lämmönvaihtimelle eli lauhduttimelle. Koska paine on korkeampi kuin höyrystimen matalapainepuolella, on kylmäaineen kiehumispiste nyt matalampi, vaikka lämpötila pysyy samana. Näin kylmäaine muuttuu korkeammassa paineessa tällöin taas nestemäiseen muotoon, jolloin tiivistyminen nesteeksi vapauttaa höyrystimessä sitoutunutta energiaa. Reaktiossa vapautuva lämpöenergia siirtyy tällöin lämmityspiirissä kiertävään aineeseen. Tämän jälkeen kylmäaine kulkeutuu lauhduttimesta vielä paisuntaventtiiliin (käytetään myös nimeä kuristin), jossa kylmäaineen paine laskee ja kierto alkaa uudelleen. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

3.4.1 Maalämmön käyttäminen jäähdytystarkoituksiin

Maalämpöä voidaan käyttää myös jäähdyttämiseen, jolloin usein puhutaan maakylmästä tai maaviileästä. Jäähdytyksessä rakennuksen lämpöä siirretäänkin maahan. Saatavia

etuja tästä ovat yleensä järjestelmän toimiminen korkeammalla hyötysuhteella, kustannussäästöt käyttökustannuksissa sekä energiakentän palautuminen. (Banks 2012)

Jäähdyttämiseen voidaan käyttää kahta tekniikkaa: passiivista eli ns. vapaata jäähdytystä sekä aktiivista jäähdytystä. Vapaajäähdytyksessä lämpöpumppua ei käytetä lainkaan, vaan järjestelmän keruuainetta kierrätetään suoraan maassa järjestelmän kiertovesipumppujen avulla. Maassa viillennyt keruuaine syötetään rakennuksen puhallinkonvektoreille tai IV-koneille, joissa jäähtyneen keruuaineen energiaa siirretään rakennuksen sisäilmaan. Aktiivisessa jäähdytyksessä lämpöpumpun toiminta käännetään käytännössä päinvastaiseksi, jolloin keruuaine siirtää rakennuksen lämpöenergiaa maahan ja jäähtyy. Jäähtynyt keruuaine palaa lämpöpumppuun, josta se siirretään rakennuksen lämmönjakopiiriin. (Banks 2012) Periaatekuva vapaasta ja aktiivisesta jäähdytyksestä on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. a) Vapaa jäähdytys b) Aktiivinen jäähdytys. (Banks 2012, An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, s. 147)

Vapaan jäähdytyksen selkeät edut ovat korkea energiatehokkuus ja hyvin vähäiset käyttökustannukset, koska lämpöpumppua ei käytetä. Käyttökustannuksia muodostuu vain kiertovesipumppujen toiminnasta. Toisaalta järjestelmä vaatii rakennuksessa tehokkaita lämmönvaihtimia ja paljon kaivoja tai suuria määriä vettä riippuen järjestelmän tyypistä. Tämän johdosta investointikustannukset voivat nousta korkeiksi. Aktiivisessa jäähdytyksessä investointikustannukset ovat matalammat, mutta käyttökustannukset ovat korke-

ampia lämpöpumpun käytön takia. Etenkin suurissa energiakentissä kentän hyödyntäminen jäähdytyksessä on kuitenkin hyödyllistä, sillä se edistää kentän palautumista ja voi pidentää sen käyttöikä. (Banks 2012)

Suomessa asuinkerrostaloissa jäähdyttäminen maalämmöllä on lähinnä mukavuustekijä, sillä sen vaikutus energiataseessa on lopulta pieni. Suunnittelussa jäähdyttämisen vaikutus voidaan huomioida tapauskohtaisesti hieman parempana COP-lukuna. (Haastattelu 2, 23.3.2021; Haastattelu 5, 30.3.2021)

3.4.2 COP-luku

Lämpöpumpun tehokkuuden teoreettinen maksimi voidaan laskea lämpökertoimella, ns. COP-luvulla (eng. *Coefficient of Performance*), joka kuvaa tuotetun lämpötehon suuruutta suhteessa käytetyn ottotehon määrään sen hetkisissä olosuhteissa. Joskus luvun yhteydessä käytetään alaindeksiä H puhuttaessa lämmityksestä (eng. *heating*) ja kirjainta C puhuttaessa jäähdytyksestä (eng. *cooling*). Lämpökertoimen laskeminen pohjautuu ns. ideaaliseen Carnotin kiertoon

$$E_{max} = \frac{H}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

missä E_{max} on tuotetun energian teoreettinen maksimi, H tuotettu lämpömäärä, W tehdyn työn määrä, T_1 tuotettu lämpötila ja T_2 lähtölämpötila. Yhtälössä W voidaan korvata lämpöpumpun käyttämällä sähköteholla E, jolloin saadaan

$$COP_H = \frac{H}{E} . \quad (2)$$

Jos lähtölämpötila T_2 on esimerkiksi 5 °C (n. 278 K) ja tuotettu lämpötila T_1 35 °C (n. 308 K), saadaan COP_H -luvuksi n. 10,3. Lämpötilaeron kasvaminen (kasvattaminen) osoittaa, että eron kasvaessa pumpun tehokkuus laskee, ja näin myös COP-luku pienenee. COP-luku on siis huomattavan riippuvainen alku- ja loppulämpötiloista. Tämän takia olisi järjestelmälle edullista, että lähtölämpötila on riittävän korkea, ja että lämpö tuotetaan rakennukseen sellaisen lämmityspiirin kautta, jonka toimintalämpötilat ovat matalia. (Banks 2012)

Lämpöpumput toimivat tyypillisesti korkeammilla COP-luvuilla, kun maan lämpötila on korkeampi, tai kun rakennuksen lämmityspiirin lämpötila on matalampi. COP-luku on kuitenkin käytännössä aina paljon pienempi kuin sen teoreettinen maksimi johtuen erilaisista lämpöhäviöistä. (Banks 2012) Suomessa lämpöpumppujen COP-luku lasketaan Suomen Standardoimisliiton standardin SFS-EN 14511 mukaisesti (Gebwell 2019).

3.4.3 SCOP-luku ja SPF-luku

SCOP-luku (eng. *Seasonal Coefficient of Performance*) kuvaa lämpöpumpun vuosihyötysuhdetta. Siinä missä COP-luku kuvaa lämpöpumpun tehokkuutta hetkellisesti valitsevissa olosuhteissa, ottaa SCOP-luku huomioon vuodenaikojen vaihtelujen vaikutuksen pumpun tehokkuuteen. SCOP-luvussa otetaan huomioon kuitenkin vain rakennuksen lämmitys ja jäähdytys, eikä muita lämpöpumpun piiriin kytkettyjä osia, kuten esim. käyttöveden lämmitystä. (Thermia 2021)

SPF-luku (eng. *Seasonal Performance Factor*) eli keskimääräinen vuotuinen lämpökerroin kuvaa saadun käyttökelpoisen lämpöenergian määrää suhteessa käytetyn sähköenergian määrään vuodessa. SPF-luvussa huomioidaan myös lämpimän käyttöveden tuotantoon käytetty energia. (Banks 2012; Thermia 2021) Lämpöpumppujen teknisissä tiedoissa annetaan COP-luvun lisäksi käytännössä aina myös SPF-luku. Yleensä pumppujen COP-luvut vaihtelevat riippuen siitä, tuottaako se energiaa rakennukseen vai rakennuksen käyttöveteen (Haastattelu 1, 18.3.2021; Haastattelu 5, 21.4.2021). Tämän johdosta on tärkeää ymmärtää, mitä hyötysuhdelukua tarkoitetaan esimerkiksi mitoituksessa tai pumpun valinnassa.

3.4.4 Osatehomitoitus ja täystehomitoitus

Maalämpöpumppujärjestelmä voidaan mitoittaa joko osateholle tai täysteholle. Osatehomitoituksella tarkoitetaan järjestelmän mitoittamista niin, että se tuottaa rakennuksen vuotuisesta lämmitystarpeesta suurimman osan, usein n. 95 %. Vuoden kylmimpinä päivinä, jolloin pumppu toimii tehonsa ääri rajoilla, jäljelle jäävä lämpömäärä tuotetaan sekundäärisellä lämmitysjärjestelmällä, kuten maalämpöpumppuun asennetuilla sähkövastuksilla. Täystehomitoituksessa järjestelmä mitoitetään kattamaan lämmitystarve myös kylmimpinä ajanjaksoina kokonaan itse. (Banks 2012; Motiva 2012)

Osatehomitoitus on erityisesti silloin tavallista kannattavampaa, mikäli rakennuksessa on myös sellainen energiantuottojärjestelmä, jonka energiaa voidaan hyödyntää, kun osatehomitoitettu pumppu ei pysty kattamaan lämmöntarvetta yksin. Tällaisia voivat olla esimerkiksi ilmalämpöpumput, tulisija tai rakennuksen vanha öljykattila. Täystehomitoituksella toista energiantuottojärjestelmää ei tarvita, mikä tekee rakennuksen lämmitysjärjestelmäkokonaisuudesta yksinkertaisemmän, mutta yleisesti sekä sen investointi- että käyttökustannukset ovat osatehomitoitettua järjestelmää kalliimmat. (Banks 2012)

3.5 Pumpun tehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Pumpun nimellisteho

Yksittäinen tärkeä tekijä on maalämpöpumpun nimellisteho. Pumpun teho annetaan tavallisesti kilowatteina [kW], ja niiden koko vaihtelee muutaman kW:n pumpuista aina yli 100 kW:n yksiköihin. Mitä tehokkaampi pumppu on kyseessä, sitä suurempi sen nimellisteho on. Tehokkaampi pumppu toimii myös hieman korkeammalla hyötysuhteella matalissa ulkolämpötiloissa. Pumpun valitseminen rakennukseen perustuu rakennuksen lämmitystehontarpeen laskentaan ja siihen, mitoitetaanko järjestelmä osa- vai täystehoisena. Tyypillisesti täystehoisessa järjestelmässä pumppuyksikön nimellisteho on osateholle mitoitettua järjestelmää suurempi. Suuremmissa rakennuksissa on myös tavallisesti useampi pumppuyksikkö, joista toinen pumppu lämmittää rakennusta sekä käyttövettä ja toinen pelkäästään rakennusta (Haastattelu 1, 18.3.2021; Haastattelu 5, 21.4.2021).

Järjestelmän toimintalämpötilat

Maalämpöpumppu toimii sitä tehokkaammin, mitä pienempi on lämmönlähteen ja halutun lämpötilan välinen lämpötilaero. Keruuaineen toimintalämpötilat ovat tyypillisesti hyvin lähellä 0 °C. Siksi maalämpö toimii erittäin hyvin yhdessä esimerkiksi lattialämmityksen kanssa, sillä tyypillinen lattialämmityspiirin menoveden lämpötila on n. +25-35 °C. Lisäksi lattialämmityksessä luovutettavan lämmön luovutuspinna-ala on suuri verrattuna esimerkiksi lämmityspattereihin. Näin matalammalla lämpötilalla saadaan suuri lämpövaikutus aikaiseksi suuremman pinta-alan ansiosta. (Motiva 2012)

Maan lämpötila vaihtelee ilmastoluokituksen mukaan runsaasti. Suomessa maan vuotuinen keskilämpötila vaihtelee +2-6 °C välillä, ja maan pohjoisosassa maa on keskimäärin kylmempää kuin etelässä. (Banks 2012) Korkeampi maan lämpötila johtaa korkeampaan keruuaineen lämpötilaan, mikä mahdollistaa korkeamman pumpun COP-luvun. Näin ollen Etelä-Suomessa maalämpöpumput voivat toimia hieman paremmalla hyötysuhteella kuin Pohjois-Suomessa.

Geologiset ominaisuudet

Suomessa kallioperä tulee porattaessa jo hyvin matalilla syvyyksillä vastaan, joten kallioperän kiviaineksen lämmönjohtavuusominaisuuksien vaikutukset korostuvat maalämpöjärjestelmän tehokkuudessa. Alueilla, joissa pohjaveden virtaus on suurempaa, on mahdollista myös saada maasta hieman enemmän lämpöenergiaa konvektion vaikutuksesta. (Banks 2012)

Myös kivilajien välillä on eroja, esim. graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,4 W/mK ja kiilleliuskeen 2,0 W/mK. Vaikka graniitti on Suomen yleisin kivilaji, on etenkin suuria maalämpökenttiä suunniteltaessa syytä tutkia tarkasti alueen geologiset ominaisuudet, sillä väärin arvioitu kiviaineksen lämmönjohtavuus voi johtaa arvioitua tehotomampaan järjestelmään. (Motiva 2012)

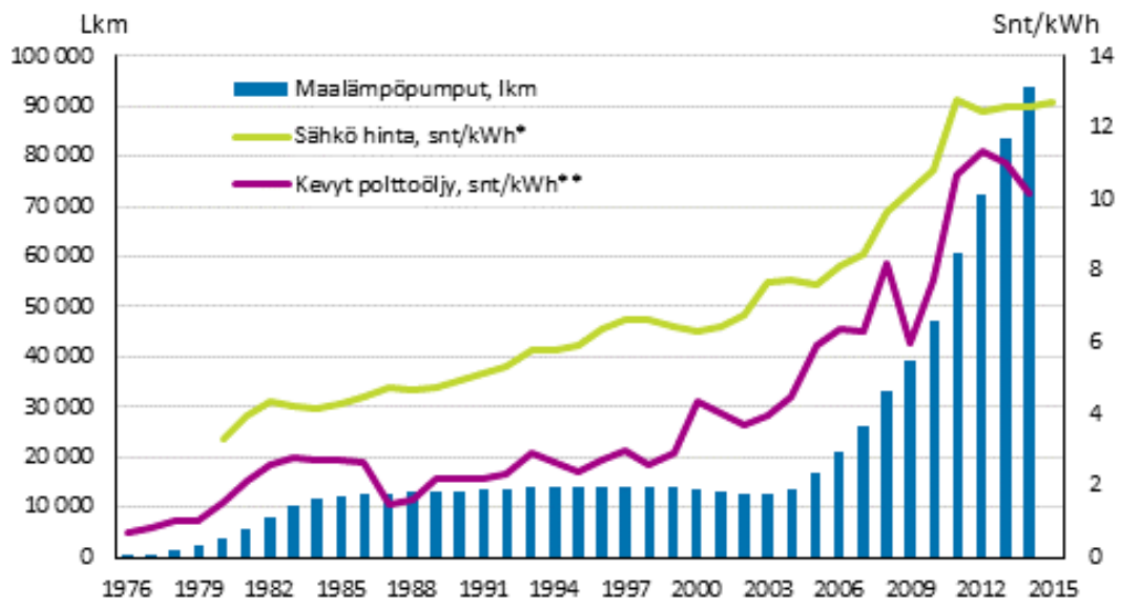
Lämmityskauden pituus

Maasta tarvitaan lämpöä sitä enemmän ja pidempään, mitä pidempi on lämmityskauden pituus. Myös vuoden kylmimmän ajanjakson pituudella on merkitystä, sillä tänä aikana maalämpöpumppu toimii huipputeholla. Huipputeholla maalämpöpumpun tulee mahdollistaa rakennuksen riittävä lämmönsaanti myös kovimmilla pakkasilla, minkä johdosta pumppu joutuu yleensä käyttämään enemmän energiaa riittävän lämmön tuottamiseen. Tämä johtaa pumpun COP-luvun laskuun. Pitkät lämmityskaudet johtavat taas vuosien saatossa maan jäähtymiseen, mikä myös laskee järjestelmän hyötysuhdetta. Huipputehon vaikutuksia voidaan vähentää mitoittamalla järjestelmä täystehon mukaisesti. (Banks 2012)

4. MAALÄMPÖ SUOMESSA

Maalämpöjärjestelmät ovat yleistyneet maailmalla viime vuosina kovaa vauhtia. Tähän on syinä mm. järjestelmän edulliset käyttökustannukset, energian korkea hintataso, halukkuus vihreän energian käyttöön ja ilmastonmuutoksen torjuntaan sekä lainsäädännön vaatimukset energiatehokkuuteen siirtymiseen. Jotkin valtiot ovat myös tarjonneet erilaisia kannustimia energiatehokkaisiin lämmitysjärjestelmiin vaihtamiseen. Suomessakin on voinut hakea tukea öljylämmitteisen pientalon lämmitysjärjestelmän muuttamiseksi ei-fossiilisia polttoaineita käyttävään lämmitysjärjestelmään, joihin myös maalämpö kuuluu (Juvonen & Lapinlampi 2013; ELY-keskus 2021).

Maalämpöpumppujen asennukset ovat yleistyneet maailmanlaajuisesti 1990-luvun lopusta vuoteen 2012 asti noin 10 % vuosivauhtia (Juvonen & Lapinlampi 2013). Kuvassa 5 on esitetty maalämpöpumppuasennusten, sähkön hinnan sekä polttoöljyn hinnan kehitys Suomessa 1970-luvun lopulta vuoteen 2015 asti. Kuvaajasta voidaan nähdä maalämpöpumppujen selkeä kysynnän kasvu 2000-luvun puolivälistä alkaen.



Kuva 5. Maalämpöpumppujen määrän sekä sähkön ja kevyen polttoöljyn hinnankehitys 1976-2015. (SVT 2016, Maalämmön osuus lämmönlähteenä kasvussa, viitattu 21.4.2021)

4.1 Maalämmön käytön kehitys Suomessa

Suomessa ensimmäiset maalämpöpumput tulivat käyttöön 1970-luvun puolivälissä. Vasta kuitenkin 1990-luvulla niiden käyttö alkoi Suomessa kasvaa merkittävästi. Vuoteen 2012 mennessä maalämpöpumppujärjestelmien myynti on kasvanut noin 20-30 % vuodessa, ja samana vuonna koko maassa oli asennettu noin 80 000 maalämpöpumpua. (Juvonen & Lapinlampi 2013) Vuonna 2019 maalämpöpumppujen arvioitu kokonaismäärä Suomessa oli hieman yli 150 000 (Sulpu ry 2019).

Vaikka maalämpöpumppujen suosio on hyvässä kasvussa Suomessa, se on kuitenkin kaukana perässä pumppujen määrässä esimerkiksi Ruotsia. Vuoteen 2012 mennessä 15 % Ruotsin vuosittaisesta lämmitystarpeesta tuli maalämpöpumpuista, ja jo vuonna 2008 Ruotsissa oli melkein 350 000 toiminnassa olevaa maalämpöpumppua. (Banks 2012)

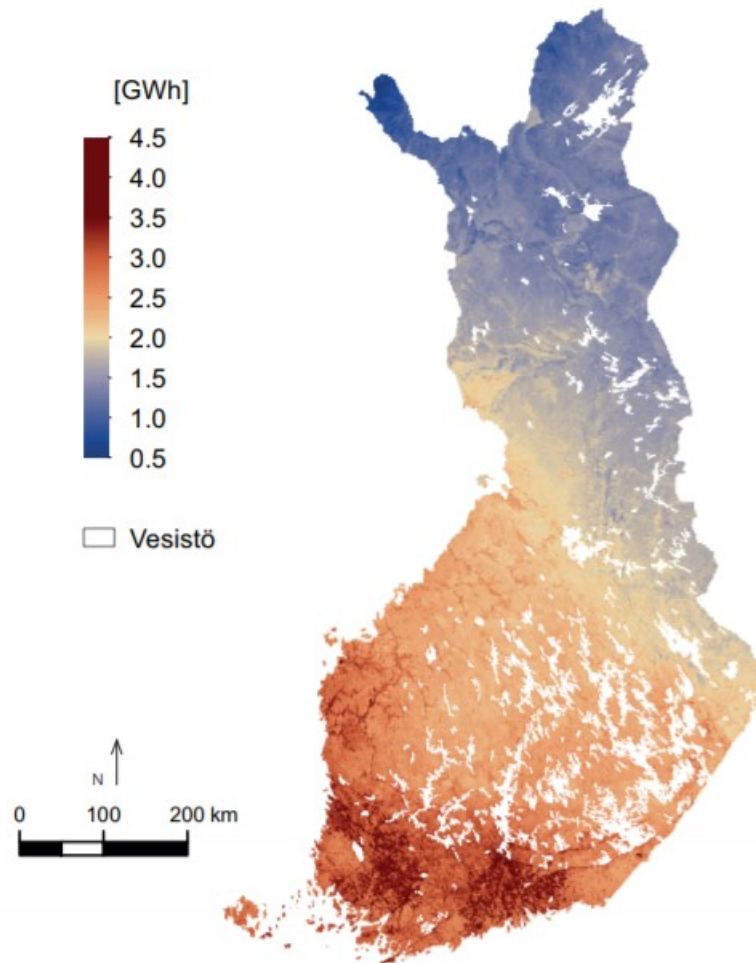
Vuoteen 2012 mennessä Suomeen asennetuista maalämpöpumpuista noin 80-90 % on ollut maahan porattuja lämpökaivoja (Juvonen & Lapinlampi 2013). Porakaivojen suosio on Suomessa kasvanut huomattavasti vuosituhannen alusta, sillä vielä vuonna 2000 arviolta 10 % maalämpöjärjestelmistä oli porakaivoja, 20 % vesistöpiirejä ja jopa 70 % vaakakeruupiirejä, pumppujen kokonaismäärän ollessa noin 10 000 (Kukkonen 2000). Syitä porakaivojen suosion kasvuun ovat olleet kehittyneet poraustekniikat, poraamisen hinnan aleneminen sekä siitä saatava suurempi lämpöteho.

4.2 Suomen maa- ja kallioperän ominaisuudet

Suomen kallioperästä suurin osa on graniittia, joka omaa hyvät lämmönjohto-ominaisuudet, ja jonka takia se soveltuu hyvin maalämmön keräämiseen. Lisäksi graniitti on lujaa kiviainesta, joka mahdollistaa porareian tekemisen kallioon ns. avoimena (eng. *open hole*), minkä johdosta reikää ei tarvitse tukea erillisellä suojaputkella niin pitkältä matkalta kuin löyhään maahan poratessa. (Leppäharju 2008; Banks 2012)

Suomessa on alueellisia eroja maalämmön hyödyntämispotentiaalissa, ja parhaimmat hyödyntämispotentiaalit sijoittuvat Etelä- ja Lounais-Suomeen. Parhaimmilla alueilla yksittäisen maalämpökaivon energiavaraston suuruus on noin 4,5 GWh. (GTK 2019) Tämä johtuu lämpimämmästä ilmastosta eteläisemmällä alueella, jolloin myös Auringon lämpöenergiaa on enemmän saatavilla ja sitä imeytyy enemmän maaperään. Vaikutusta on myös merialueiden läheisemmällä sijainnilla, sillä syvemälle sisämaahan mentäessä hyödyntämispotentiaali laskee. Suurimmat kaupungit ovat myös keskittyneet etelä- ja lounaisrannikoille, joissa teollinen toiminta näkyy lämmön johtumisena maahan ja sitä

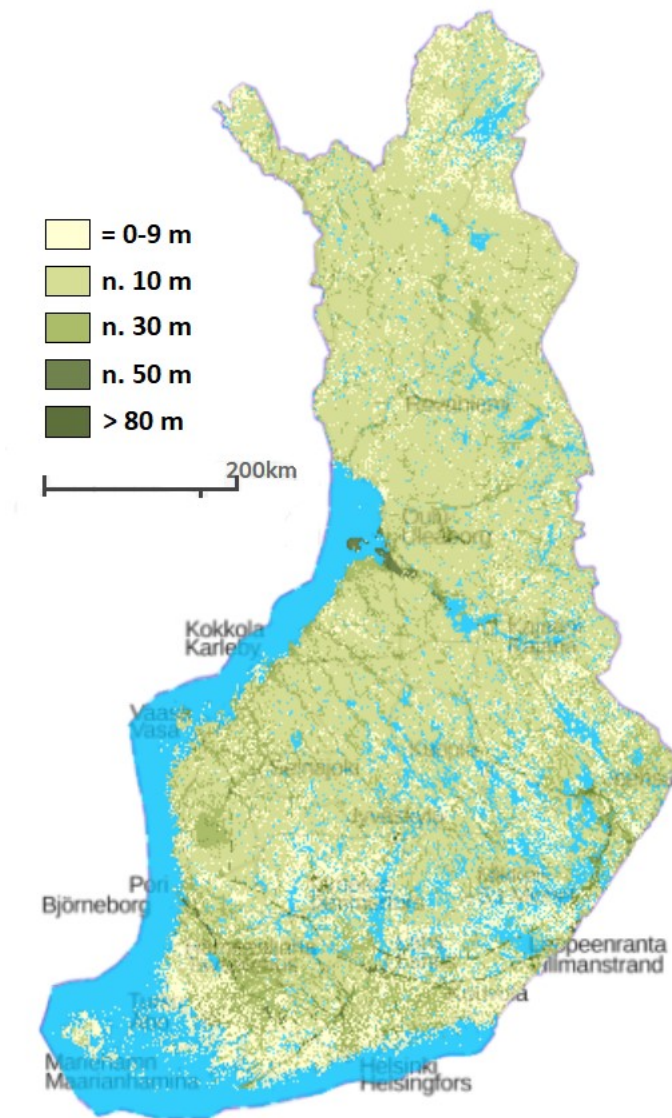
kautta maan lämpötilassa. Maalämmön hyödyntämispotentiaali eri puolilla Suomea on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Yksittäisen maalämpökaivon energiapotentiaalien erot alueittain 300 m syvyyteen saakka. (Geologinen Tutkimuskeskus 2019)

Käytännössä maalämmön hyödyntämispotentiaalilla tarkoitetaan sitä, että yksittäinen kaivo tai vaakaputkisto pystyy suuremman potentiaalilla omaavilla alueilla tuottamaan saman lämpömäärän, mihin heikommilla alueilla tarvitaan useampi kaivo tai pidempi keuruuputkisto.

Kalliopinta tulee Suomessa vastaan suuressa osassa maata jo alle 10 metrin syvyydessä, mutta yksittäisissä paikoissa maaperän peitepaksuus voi olla jopa yli 100 metriä (GTK 2016). Kuvassa 7 on esitetty maaperän peitepaksuuden erot eri puolilla Suomea.



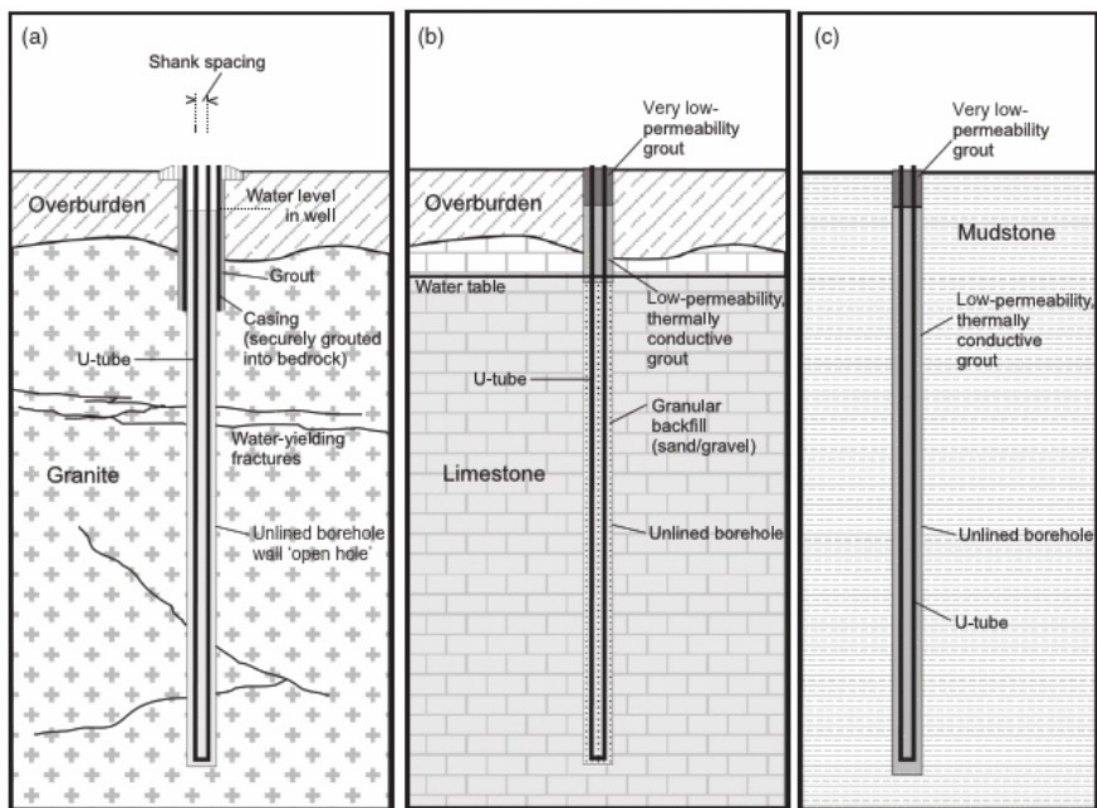
Kuva 7. Maan peitepaksuus eri osissa Suomea. Syvyydet perustuvat kartan tekijän arvioihin ja ovat suuntaa antavia. (Geologinen tutkimuskeskus 2016)

Kuvasta 7 huomataan, että erityisesti Oulun seudulla, sekä yksittäisillä alueilla Salpausselällä ja esimerkiksi Porin seudulla maan peitepaksuus on yli 80 metriä. Tällaisilla alueilla porareian pituus ennen pääsyä kallioon kasvaa siis jo melko suureksi. Tällöin porareikä tulee tukea ja suojata erillisellä suojaputkella, jotta maaperän partikkelit ja valumavedet eivät pääse sekoittumaan porareikään. Suojaputken asentaminen nostaa järjestelmän kokonaiskustannuksia. Siksi näillä alueilla pientaloissa vaakaan asennettavan keruuputkiston käyttö on kilpailukykyisempi vaihtoehto porakaivoille, kuin suuressa osassa maata muuten, jossa kallio tulee vastaan jo huomattavan matalilla syvyyksillä.

Pohjoismaiden ulkopuolella kallioperä on tyypillisesti huomattavasti syvemmällä. Näillä alueilla joudutaan asentamaan suojaputkia syvälle maahan ja kaivon ja keruuputkien

välinen tila täytetään hyvin lämpöä johtavalla juotosaineella, kuten bentoniitilla. Pohjoismaissa kallioon poratessa kaivo täyttyy usein itsestään vedellä kallion huokosia pitkin, eikä juotosainetta tarvita. Juotosaineen tarkoitus on täyttää porareian seinämän ja keruuputkien välinen tila lämmönjohtavuuden parantamiseksi. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Kun kaivo täyttyy itsestään vedellä, sen vedenpinta asettuu yleensä muutaman metrin syvyyteen kaivon yläreunasta. Syvyyttä kaivon pohjalta vedenpinnan ylätasoon kutsutaan kaivon teholliseksi syvyydeksi, jota käytetään mitoituksessa kaivon syvyytenä. (Banks 2012) Kuvassa 8 on esitetty erilaisia porareian seinän ja keruuputkien välisen tilan täyttömahdollisuuksia.

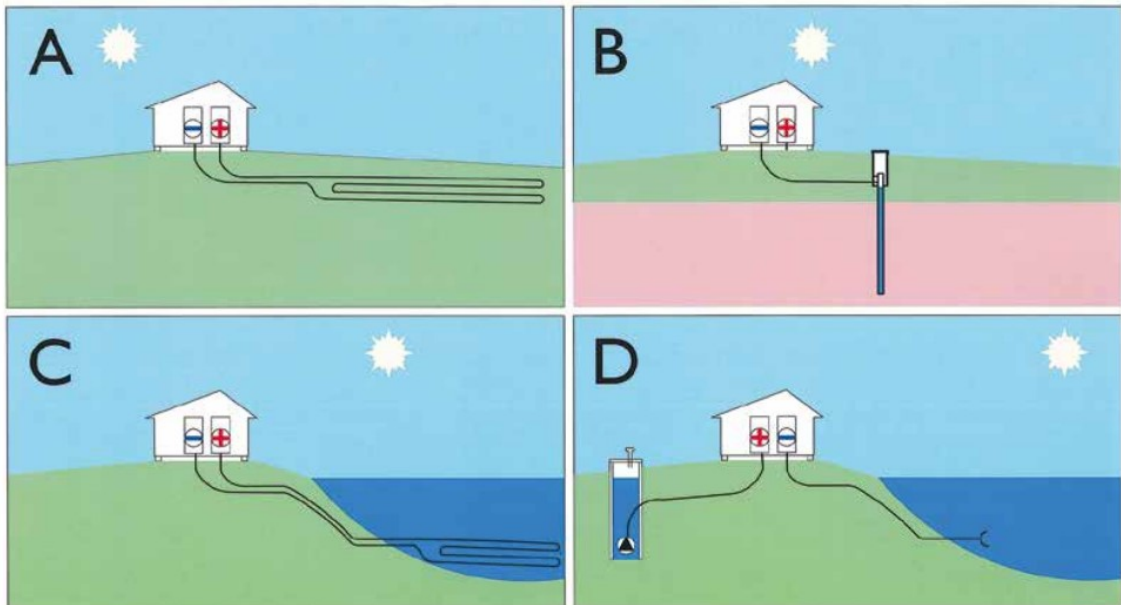


Kuva 8. Porareian seinän ja keruuputken välin erilaisia täyttötapoja. a) Väli täyttyy vedellä b) Väli täytetään soralla/hiekalla c) Väli täytetään hyvin lämpöä johtavalla juotosaineella. (Banks 2012, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, s. 187)

5. ERILAISET MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄT

Maalämpöä voidaan kerätä talteen erilaisilla menetelmillä niin kalliosta, maasta kuin vesistöistäkin. Järjestelmät voivat erota toisistaan myös toimintaperiaatteen mukaan: esimerkiksi joskus kierrätetään sekä keruupiirissä että lämpöpumpussa samaa ainetta.

Nykyään yleisin maalämpöjärjestelmä Suomessa on ns. suljettu järjestelmä, jossa lämmönkeruu tapahtuu kallioon poratulla energiakaivolla. Parhaan järjestelmän valinta on kuitenkin joskus tapauskohtaista, ja soveltuvuus erilaisiin kohteisiin vaihtelee aina olosuhteiden mukaan. Hyvin toimiva maalämpöjärjestelmä vaatii tarkan mitoituksen ja huolellista suunnittelua, jotta se toimii kustannustehokkaasti. Erilaisia maalämpöjärjestelmiä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Erilaisia maalämpöjärjestelmiä. A) maan pintaan asennettava vaakakeruupiiri, B) kallioon porattava energiakaivo, C) vesistöön asennettu keruupiiri ja D) veden pumppaaminen kaivosta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 9)

5.1 Avoimet keruupiirit

Avoimen keruupiirin järjestelmissä (eng. *open-loop system*) käytetään lämmönlähteenä vettä, joka otetaan käyttöön vesilähteestä, esim. joesta tai järvestä. Yleensä avoimilla keruupiireillä tarkoitetaan kuitenkin pohjavettä, joka otetaan käyttöön pumppaamalla

esim. kaivosta tai porareistä. (Banks 2012) Avoin keruupiiri tarvitsee alueen, jossa vettä on helposti saatavilla, mikä vaikuttaa sen perustamismahdollisuuksiin.

Maaperän litologialla on suuri vaikutus kaivon poraamiseen. Kallioon poratessa kaivon yläosa suojataan ja vesieristetään, jolla estetään pintamaan ja pintavesien sekoittuminen kaivoon. Loput kaivon pituudesta porataan kallioon normaalisti. Kaivon alapää jätetään reunoilta avoimeksi, sillä kallio on pääasiassa vakaata, eikä pääse sortumaan, ja vesi päätyy kaivoon kallion luonnollisten halkeaminen kautta. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013) Heikkolujisessa maassa kaivon sisäpuoli reunustetaan suojaputkella, jolla estetään viereisen maan vajoaminen kaivon pohjalle (Banks 2012).

Avoimien keruupiirien hyöty on, että niistä lämpö saadaan suoraan pohjavedestä ilman keruuaineita, jotka voivat joskus aiheuttaa ympäristöhaittoja. Veden korkea ominaislämpökapasiteetti myös pitää pumppauksen lämpöhäviöt pienempinä. Osin tämän ansiosta myös veden lämpötila pysyy lähes samana vuoden ympäri, joten järjestelmän voidaan olettaa sekä kuluttavan että tuottavan saman määrän energiaa läpi vuoden vuodenaikasta riippumatta. (Banks 2012)

Yleinen ongelma avoimissa keruupiireissä on, että ne vaativat pohjavesialueen lähellä kohdetta. Siksi niitä ei ole kannattavaa perustaa kauas pohjavesialueista, sillä pitkien putkistojen rakentaminen nostaa kustannuksia ja kasvattaa lämpöhäviöiden riskiä. Lisäksi pohjavesialueilla työskentelyä ja sen käyttöä ohjataan paljon myös Suomessa mm. Vesilaissa (587/2011), mikä lisää käyttöönoton ja suunnittelun haasteita. Lämmöntuottoon käytetty vesi on myös aina loppusijoitettava. Loppusijoittamisen suunnittelussa tulee huomioida käytetyn veden vaikutukset ympäristöön, sillä käytetyn veden laatu ja lämpötila saattavat vaikuttaa toisen vesistön ominaisuuksiin. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Vaikka avoimissa keruupiireissä pohjavettä voidaan kierrättää suoraan lämpöpumpussa, altistaa tämä järjestelmän useille riskeille. Veden mukana kulkevat partikkelit voivat vahingoittaa tai tukkia putkistoa, mineraalit voivat saostua höyrystimessä, veden mukana kulkevat yhdisteet voivat aiheuttaa putkiston korroosiota ja lämminvesinen putkisto voi toimia kasvualustana bakteereille. (Banks 2012) Tästä syystä myös avoimissa keruupiireissä järjestelmän kuntoa on syytä tarkastella suljettuja keruupiirejä säännöllisemmin.

5.2 Suljetut keruupiirit

Suljetulla keruupiirillä (eng. *closed-loop system*) tarkoitetaan järjestelmää, jossa keruupiirissä kiertää erillinen keruuaine. Näin ollen veden pumppaamisesta lämmöntuotan-

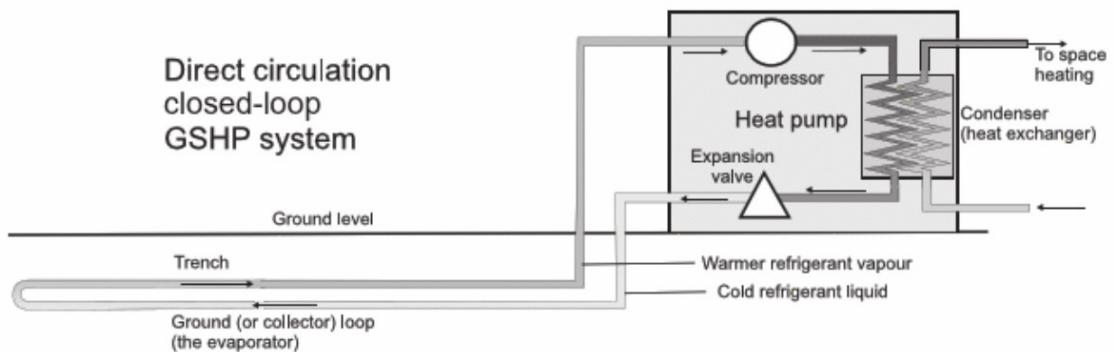
toon tai sen takaisininjektoinnista ei tarvitse huolehtia. Suljetun keruupiirin selvä etu avoimeen keruupiiriin siis on, että koska järjestelmä ei ole riippuvainen vesistöalueista, voidaan suljettu keruupiiri perustaa käytännössä mihin vain.

Suljettuja keruupiirejä on useampia erilaisia, sillä keruupiirit voidaan asentaa joko maahan tai vesistöön. Lisäksi asennus voidaan tehdä vaakatasoon tai pystysuoraan poraamalla. Myös kylmä- ja keruuaineen kierroissa on eroja. (Banks 2012)

5.2.1 Suoran ja epäsuoran kierron järjestelmät

Suljetut keruupiirit voidaan jakaa myös ns. suoran ja epäsuoran kierron järjestelmiin. Niiden erona on kylmäaineen kiertoprosessi järjestelmässä. Suoran kierron maalämpöjärjestelmässä keruupiirissä sekä lämpöpumpussa kiertää sama kylmäaine. Järjestelmän toiminta perustuu siihen, että keruuputki toimii järjestelmässä samanaikaisesti lämpöpumpun höyrystimenä. Keruupiirissä kiertäessään kylmäaine höyrystyy absorboidesaan itseensä ympäröivän maan lämpöä. Epäsuoran kierron järjestelmässä kylmäainetta ei kierrätetä suoraan maassa. Sen sijaan keruupiiriin syötetään erillistä keruuainetta, joka kerää ympäristöstään lämpöä pääasiassa johtumalla. Palatessaan lämpöpumppuun keruuaineeseen kerääntynyt lämpö siirretään lämmönsiirtimin pelkästään lämpöpumpussa kiertävään kylmäaineeseen. (Banks 2012)

Epäsuoran kierron järjestelmät ovat huomattavasti käytetympiä kuin suoran kierron järjestelmät. Pääasiallinen syy tälle on suoran kierron järjestelmissä keruupiiriin syötettävän kylmäaineen ympäristöriskit, sillä niiden sisältävien haitallisten aineiden katsotaan kasvattavan ympäristöhaittojen riskin liian suureksi. Erityisesti lähelle maanpintaa asennettavien putkien kohdalla on olemassa riski putkien alttiudesta vaurioille, jolloin vuoto keruupiirissä aiheuttaa kylmäaineen pääsemisen ympäristöön. (Banks 2012) Kuva suoran kierron järjestelmästä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Suoran kierron järjestelmä, kun keruupiiri on asennettu vaakatasoon lähelle maan pintaa. (Banks 2012, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, s. 175)

5.2.2 Vaakakerupiirit

Vaakakerupiirit (eng. *horizontal closed-loops*) ovat kerupiireistä yleensä halvimpia toteuttaa. Ne asennetaan mataliin syvyyksiin maanpinnan alle kaivantoon, n. 1-2 metriin. Lämmönkeruu perustuu Auringon kesäaikaan lämmittämän pintamaan lämpöenergian talteenottoon. Kaivannon syvyys tulee suunnitella siten, että se on riittävän lähellä maanpintaa, jotta Auringon lämpösäteily ja lämmin ilma pääsevät imeytymään asennussyvyyteen kesäaikaan, mutta kuitenkin niin syvällä, että asennussyvyyden lämpötila ei laske talvella liikaa ja jäätyminen voidaan välttää. (Banks 2012)

Tutkimusten mukaan vaakakerupiirien lämmöntuoton tehokkuuteen vaikuttavat eniten maaperän kosteus, tyyppi sekä lämmityskauden pituus. Käytännössä mitä kuivempaa maa on, sitä pidempi kerupiiri tarvitaan riittävän lämpömäärän tuottamiseen. Ongelmaksi tällöin muodostuu yleensä tontin koon riittämättömyys. Tämä voidaan ratkaista asentamalla kaivantoihin useampia keruuputkia päällekkäin tai jopa vierekkäin, mutta tällöin kaivannon on oltava riittävän suuri, jotta putkien välit pysyvät tarpeeksi suurina eivätkä ne vaikuta toistensa lämpösaantoon. Isompi kaivanto taas kasvattaa asennuskustannuksia. (Banks 2012)

Vesistöpiirit

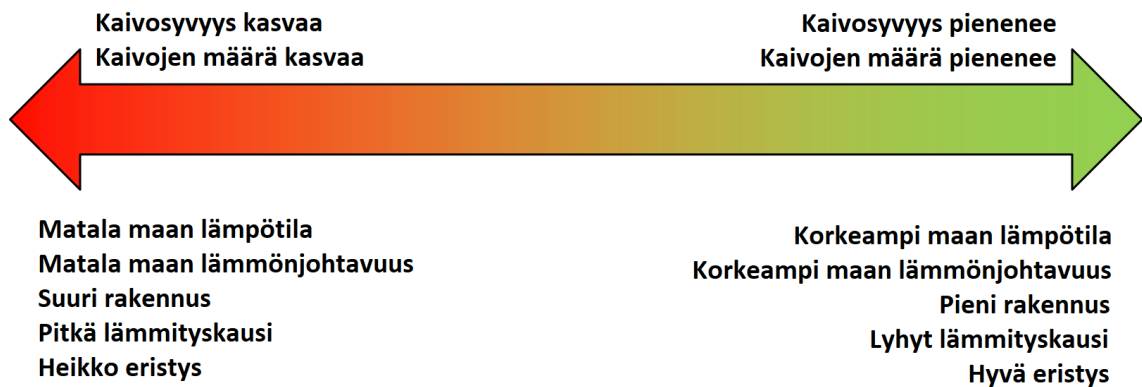
Vaakakerupiiri voidaan asentaa myös esimerkiksi järven pohjaan, mikäli sellainen on tontin lähellä. Yleensä vesistöasennusten vaatimuksena on rannan nopea syveneminen ja vesistön riittävä koko lämmönkeruuseen. Kerupiirin ympäristövaikutukset on myös pyrittävä minimoimaan, mm. sen vaikutukset veden lämpötilaan ja vesistömaisemaan. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Lämmönkerupiiri asennetaan vesistöön ankkuroimalla tai painoilla vesistön pohjaan. Rakennuksen ja vesistön välissä siirtoputket asennetaan maahan kaivantoon. Myös vesistön pohjasedimenttiä voidaan käyttää lämmönlähteenä, jonka vuotuinen keskilämpötila on maan vuotuista keskilämpötilaa korkeampi (Aittomäki 1983).

5.2.3 Energiakaivot

Nykyään ylivoimaisesti yleisin maalämpötyyppi myös Suomessa on energiakaivo. Se toteutetaan pystysuunnassa maahan poraamalla. Pystysuuntaisesta lämmitystarkoitukseen poratusta kaivosta käytetään myös nimitystä lämpökaivo. Kun kaivoa käytetään myös rakennuksen jäähdytykseen, kutsutaan sitä lämpökaivon sijaan energiakaivoksi. Useammasta energiakaivosta koostuvaa järjestelmää taas kutsutaan energiakentäksi. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Lämpökaivojen määrä ja poraussyvyys vaikuttavat lämmönsaantoon. Mitä syvempiä kaivoja ja/tai mitä enemmän kaivoja on, sitä enemmän lämpöä voidaan saada. Pientaloissa yksi kaivo voi riittää kattamaan sen lämmitystarpeen, kun taas isommissa rakennuksissa tarvitaan energiakenttä lämmöntarpeen tyydyttämiseksi. (Juvonen & Lapinlampi 2013) Lämpökaivojen määrään ja syvyyteen vaikuttavia tekijöitä on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Lämpökaivon syvyyteen ja kaivojen määrään vaikuttavia tekijöitä.

Pohjoisessa lämmityskauden pituus on tyypillisesti pidempi kuin etelämmässä, minkä takia rakennuksen lämmitystarve kasvaa. Arkkitehtuuriltaan monimutkaisesti massoiteltu rakennus voi taas omata erilaisia lämmitystarpeita sen eri osissa, mikä vaikuttaa rakennuksen lämmitys-/jäähdytystarpeen tasapainoon. Myös kaivojen sijoittelulla on merkitystä: kaivoja ei saa sijoitella liian lähelle toisiaan, sillä tällöin niillä on taipumus ajan saatossa pyrkiä keräämään lämpöä toisiltaan ja siten kaivokentän tehokkuus heikkenee. Suomessa kaivojen minimietäisyys toisistaan on 15 metriä. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Kaivojen lämmönsaannissa ei ole huomattu merkittäviä eroja, kun vertaillaan yhtä 100 m syvää kaivoa sekä kahta 50 m syvää kaivoa. Syvemmän kaivon etu on, että tällöin se vie tontilta vain yhden kaivon vaatiman tilan. Toisaalta syvemmälle poratessa porausnopeus hidastuu ja siten porauskustannukset alkavat kallistua. Kaksi kaivoa vaativat enemmän tilaa, jotta vältetään niiden keskinäinen lämpövuorovaikutus, mutta porauskustannukset pysyvät alhaisempina, kun porausta ei tarvitse viedä niin syvälle. Toisaalta porauslaitteiston siirto ja muut kaivoille toteutettavat oheistoimet maksavat enemmän. (Banks 2012)

Lämpökaivon poraamisen valmistuttua kaivoon asennetaan lämmönkeruuputket, joista tyypillisimmät ovat U-putki ja koaksiaaliputki. U-putki sisältää alaspäin ja ylöspäin keruu-

ainetta kuljettavat putket vierekkäin. Koaksiaaliputkella alas- ja ylöspäin keruuainetta kuljettavat putket ovat sisäkkäin. Koaksiaaliputkella putken lämmönvastus on pienempi kuin U-putkella, ja siinä keruuaineen kierrättämisen virtausnopeus voidaan pitää U-putkea alhaisempana, mikä pienentää käyttökustannuksia. Koaksiaaliputken riskinä on lämmön lyhytsiirtymä kylmän ja lämmenneen keruuaineen putkien välillä. U-putkella riski on pienempi, sillä putkien välissä käytetään muutaman sentin pituisia välipaloja (eng. *shank spacers*), jotka pitävät meno- ja paluuputket erillään toisistaan. (Banks 2012; Lahti 2013)

5.3 Maalämpöjärjestelmien sovelluksia

Maalämmön kustannuksia on pyritty alentamaan kehittämällä erilaisia järjestelmiä lämmön keräämiseksi mm. integroimalla keruuputkia muihin rakennuksen osiin. Nykyään maalämmöllä on tärkeä rooli rakennuksen lämmittämisen ohella myös käyttöveden lämmityksessä.

Energiapaalut

Erityisesti sellaisilla alueilla, kun perustusalueelta vaaditaan suurta kantavuutta, rakennus joudutaan perustamaan paalujen varaan. Koska paalut ovat syvällä maassa, usein yli 10 metrin syvyydessä, on tätä pyritty hyödyntämään lämmönkeruussa asentamalla paaluihin maalämmön keruuputket. Näitä paaluja kutsutaan nimellä energiapaalu.

Energiapaalun suunnittelussa tulee huomioida useita erilaisia tekijöitä. Suurin osa näistä liittyy siihen, että keruuputkisto ei saa vaikuttaa heikentävästi paalun primääriseen tehtävään, eli rakennuksen kannattamiseen. Keruuputket eivät saa aiheuttaa paalun ympärille jäätymisriskiä maan jäähtymisen seurauksena, eivätkä aiheuttaa maan lämpölaajenemista. Liialliset muutokset maan lämpötilassa ja myös kosteuspitoisuudessa voivat vaikuttaa kantavuuteen. (Banks 2012)

Energiapaalujen hyödyt perustuvat yhtäaikaiseen perustusten ja lämmitysjärjestelmän toimintaan. Paalut sijoitetaan usein myös jo valmiiksi riittävän etäälle toisistaan, jolloin keruuputket eivät kerää toisiltaan lämpöä. Myös paalujen poikkileikkaus on tavallisesti riittävä täyttämään lämmön keräämisen vaatimukset. (Banks 2012)

Maalämpöpumppu lämpimän käyttöveden tuottamiseen

Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa määrätään lämpimän käyttöveden minimilämpötilaksi 55 °C (Juvonen & Lapinlampi 2013). Kotitalouksien käytössä lämmin käyttövesi kuitenkin vain harvoin ylittää tällaisia lämpötiloja, ja siksi maalämpöpumppua voidaan käyttää hyödyksi myös lämpimän käyttöveden esilämmittämiseen. Ongelma matalissa veden lämpötiloissa on, että veden lämpötilan pysyessä pitkiä aikoja 20-45 °C

välillä, kohoaa riski legionellabakteerien muodostumiseen. Bakteerit kuitenkin kuolevat veden lämpötilan ylittäessä 60 °C. Maalämmön hyödyntäminen käyttöveden lämmittämisessä on melko tehokasta, mutta veden saattaminen korkeampiin lämpötiloihin kuin rakennuksen lämmittämisessä pitää sen hyötysuhteen tavallisesti rakennuksen lämmittämistä pienempänä. Veden lämpötilan ei tarvitse olla kuitenkaan jatkuvasti yli 60 °C, vaan riittää, että tämä lämpötila ylittyy hetkellisesti säännöllisin väliajoin. (Banks 2012)

Lämpimän käyttöveden tuottamiseen on erilaisia järjestelmiä, joiden toimintaperiaate vaihtelee usein laitevalmistajan mukaan. Usein käytettyjä järjestelmiä ovat erillinen tulistinpiiri ja vaihtuvan lauhdutuksen järjestelmä. Jos lämpimän käyttöveden lämpötilaa halutaan nostaa, voidaan se toteuttaa myös esim. erillisillä sähkövastuksilla. Nykyään käyttöveden lämmityksen piiriin voidaan kytkeä myös aurinkopaneeleita, mikä mahdollistaa ympäristöystävällisen energian keräämisen. (Banks 2012; Motiva 2012)

5.4 Järjestelmistä saatavan energian määrä

Maalämpöjärjestelmän valinnalla on merkittävä vaikutus saatavan lämpöenergian määrään. Suurimmat erot lämmönsaannossa johtuvat maa- ja kallioperän erilaisista lämmönjohtavuuksista sekä lämpötiloista. Isommissa rakennuksissa myös lämmitystarve on suurempi, jolloin lämmöntarpeen tyydyttämiseen tarvitaan enemmän kaivoja tai vaihtoehtoisesti pidempi keruupiiri. (Aittomäki 1983; Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

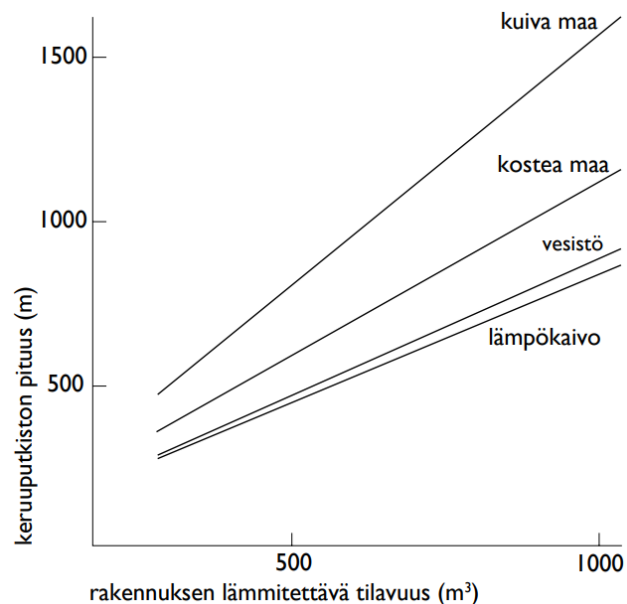
Maalämmön matalat käyttökustannukset tekevät siitä sitä kannattavamman vaihtoehdon, mitä suurempi rakennus on kyseessä. Toisaalta energian korkea hinta on tehnyt siitä yhä kannattavamman pienemmissä rakennuksissa. Pienemmissä rakennuksissa myös lämmöntarve on pääsääntöisesti pienempi, mikä tekee vaakaan asennettavista maapiireistä niissä kilpailukykyisempiä kuin suurissa rakennuksissa. (Motiva 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Maapiirin lämmönottokykyyn vaikuttaa paljon ympäröivä maa-aines. Lämpöä saadaan parhaiten hienorakeisesta ja kosteasta maasta, kuten savesta tai siltistä. Karkearakeisemmista maalajeista, kuten hiekasta, lämpöä saadaan heikommin. Suomen yleisin maalaji moreeni osuu saatavan lämpöenergian määrässä näiden välimaastoon. (Aittomäki 1983) Taulukkoon 2 on koottu eri lähteiden mukaan arvioita erilaisista maalämpöjärjestelmistä saatavista maksimitehoista sekä energiamääristä.

Taulukko 2. Erilaisten maalämpöjärjestelmien energiantuottoja ja maksimitehoja. (Aittomäki 1983, Maaperä ja vesistöt lämmönlähteinä; Kukkonen 2000, Geothermal Energy in Finland; Leppäharju 2008, Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät)

Järjestelmätyyppi	Energia (kWh/m)	Maksimiteho (W/m)
Vaakakeruupiiri		
- Hiekka ¹⁾	Etelä-Suomi	30-40
- Savi ¹⁾	Etelä-Suomi	50-60
- Hiekka ²⁾	Pohjois-Suomi	0-10
- Savi ²⁾	Pohjois-Suomi	30-35
Vesistöpiiri	70-80	40-50
Energiakaivo	100	40-60
¹⁾ Linjan Kokkola-Savonlinna eteläpuoli ²⁾ Lappia lukuunottamatta		

Erilaisten maalämpöjärjestelmien keruuputkistojen pituutta suhteessa rakennuksen tilavuuteen on havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Tarvittavan keruuputkiston pituus suhteessa rakennuksen tilavuuteen. Kaavio on suuntaa antava, eikä sitä tule käyttää mitoituksen perusteena. (Juvonen & Lapinlampi 2013, Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, s. 8)

Kuvasta 12 nähdään, että vesistöpiirien tarvitsema keruupiirin pituus on huomattavasti maapiirejä pienempi. Pääasiallisena syynä tähän on, että vesistöpiireissä keruupiiri asennetaan vesialueen pohjaan, jossa lämpötila on talvella alimmillaankin +4 °C, joka on maaperän talvilämpötilaa korkeampi. Lisäksi talvella jääpeite hidastaa veden viilenemistä. (Aittomäki 1983) Vesistöpiirien ja avointen keruupiirien lämmönsaanti ei kuvan mukaan ole kovin kaukana lämpökaivojen vastaavasta, mutta niiden käyttöä rajoittaa erityisesti Suomessa lainsäädännölliset tekijät ja pohjavesialueiden käytön varaaminen pääasiassa käyttöveden ottoa varten (Haastattelu 4, 6.4.2021).

Energiakaivojen tehokkuus perustuu kaivon poraamiseen kallioon saakka. Kalliossa kiivaineksen lämmönjohtavuus on maaperää korkeampi, joten lämpöenergiaa on mahdollista saada enemmän. Kallion lämmönjohtavuus on myös parempaa kuin vedessä. Arvion mukaan lämpökaivosta voidaan saada energiaa n. 100 kWh/m, maksimitehon vaihdellessa 40-60 W/m välillä. (Aittomäki 1983; Kukkonen 2000)

Taulukon 2 ja kuvan 12 pohjalta voidaan huomata, että energiakaivoista saatava maksimiteho on vaakakeruupiirejä sekä vesistöpiirejä korkeampi. Kuvasta 12 näkee, että energiakaivot ovat eri järjestelmiä vertailtaessa myös sitä kilpailukykyisempiä, mitä suurempi rakennus on. Siksi useamman energiakaivon muodostamat energiakentät ovat tehokkain ratkaisu maalämpöjärjestelmäksi suurissa rakennuksissa, kuten asuinkerrostoissa.

6. PYSTYSUUNTAISEN MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Maalämpöjärjestelmän suunnittelussa tulee painottaa erilaisia tekijöitä riippuen siitä, onko kyseessä vaakakeruupiiri vai pystysuoraan porattava energiakaivojärjestelmä. Myös alueellisia ja tonttikohtaisia eroja esiintyy aina hankkeesta riippuen, ja varsinkin suuremmissa kohteissa TRT-mittauksen eli termisen vastetestin (eng. *thermal response test*) tekeminen on käytännössä välttämätöntä (Juvonen & Lapinlampi 2013).

Kuten aiemmin todettiin, useammasta energiakaivosta koostuvat energiakentät ovat tehokkain lämmöntuottovaihtoehto suurille rakennuksille. Tästä johtuen tässä luvussa (ja työssä) keskitytään pelkästään pystysuuntaisten maalämpöjärjestelmien suunnitteluun vaikuttaviin tekijöihin.

Useammasta kaivosta koostuvan maalämpöjärjestelmän suunnittelussa haasteeksi tulee, että käsin laskenta muuttuu huomattavasti vaikeammaksi. Tämä johtuu pääasiassa vierekkäisten kaivojen välisestä vuorovaikutuksesta, pohjaveden virtauksen vaikutuksesta sekä kentän lataamisen vaikutuksista lämmönsaantiin. Useampien kaivojen kenttien suunnittelussa käytetään siksi nykyään älykkäitä tietokonesimulaatioita ja laskentaohjelmia. (Banks 2012) Luvun lopussa esitetään mitoitusesimerkki yhdelle energiakaivolle.

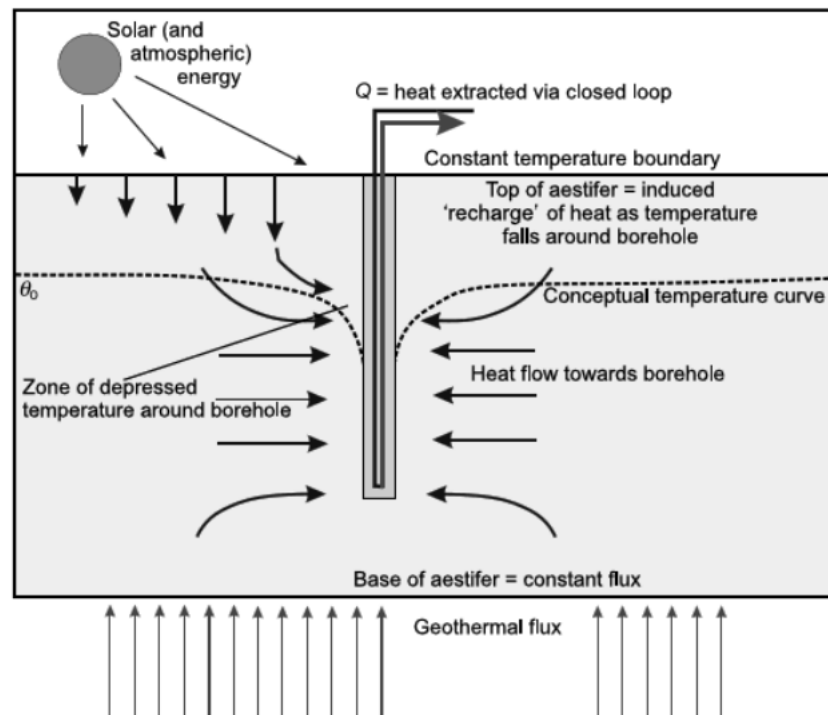
6.1 Maan jäähtyminen pitkällä aikavälillä

Energiakaivo jäähtyy ajan kuluessa, kun siitä otetaan lämpöenergiaa. Lämpöpumpun toiminnan alussa kaivo kerää lämpöä aivan sen seinän vierestä käytännössä vain vaakasuunnassa johtumalla, mutta toiminnan jatkuessa lämmönsiirto tapahtuu yhä voimakkaammin myös maan pinnalta sekä kauempaa kaivosta. Myös keruuaineen sekä maan lämpötilan aleneminen on voimakkainta lämpöpumpun toiminnan alussa. (Banks 2012)

Kuvitellaan maaperässä olevan määrittelemättömän syvyinen lieriön muotoinen alue, josta käytetään nimeä aestiferi (eng. *aestifer*). Tällä alueella voidaan olettaa, että sen alapäässä oleva jatkuva maan lämpövirtaus aiheuttaa lieriön alapäähän aina pienen lämpövirtauksen, mutta yläpäässä pinnalla on tasainen lämpötila, sillä pitkällä aikavälillä voimme ajatella tämän olevan maanpinnan vuotuinen keskilämpötila. Jos siis syvällä maassa, aestiferin pohjalla, lämpötila on korkeampi, kuin aestiferin pinnalla, lämpötila

pyrkii ajan saatossa tasaantumaan ja lämpö liikkuu alhaalta ylös lämpimämmästä kylmempään. (Banks 2012)

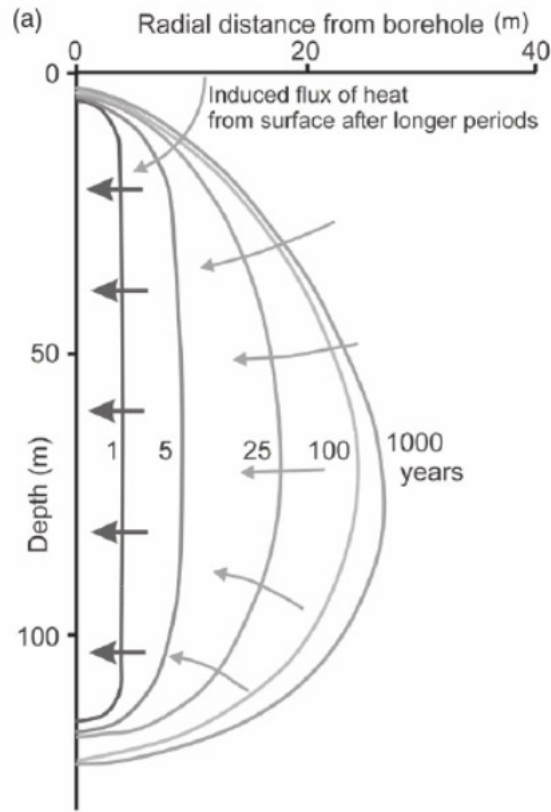
Kuvitellaan aestiferin paikalle nyt energiakaivo. Energiakaivo luo aestiferin kaltaisen lämmönsiirtymän kalliioon, mutta vaakasuunnassa. Porareikään asennettavat putket ja niissä kulkeva keruuaine imevät itseensä maan lämpöä ympäröivästä maasta. Tämä aiheuttaa maan kylmenemisen aivan kaivon reunoilla. Lopulta myös lämpövirta maan pinnalta suuntautuu ajan kuluessa kohti porareikää pyrkien tasaamaan lämpötilaeroja. Myös kauempana kaivon reunasta oleva maaperä alkaa pyrkiä tasapainottamaan lämpötilaa ja aiheuttaa lämmön siirtymisen kohti kaivoa. Pitkällä aikavälillä maan lämpötila laskee, ja lämpökaivon absorboima lämpö tasoittuu samalle tasolle pinnalta siirtyvän lämpövirran kanssa, ja ns. stationääritila syntyy maaperään. (Banks 2012) Tätä lämmön siirtymistä on havainnollistettu kuvassa 13.



Kuva 13. Lämmön keräämisen periaate aestiferista. Maan lämpötila porareikän reunoilla viilenee ajan saatossa ja saavuttaa lopulta ajan kuluessa vakaan tilan. (Banks 2012; *An Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling*, s. 289)

Lämpökaivon jäähtymisestä kohti stationääritilaa n. 1/3 tapahtuu ensimmäisenä vuorokautena kaivon ollessa toiminnassa ja 2/3 kahden ensimmäisen kuukauden aikana. Ensimmäisen viiden vuoden jälkeen kaivon lämpötila ei laske enää lähes lainkaan. Arvioiden mukaan 25-500 vuoden aikana kaivon lämpötila laskee enää vain 5 % verran. Kaivon sanotaan usein saavuttaneen tästä johtuen stationääritilan noin 25 vuoden jälkeen. (Leppäharju 2008) Kuvasta 14 nähdään, miten lämmön virtaus kohti lämpökaivoa on

ensimmäisinä vuosina vain vaakasuuntaista, mutta vuosien päästä yhä voimakkaammin maan pinnalta ja syvemmältä maasta suuntautuvaa.



Kuva 14. Porareikään siirtyvän lämmön muutos radiaalisesta virtauksesta kohti stationääritilaa. Eri vuosien lämpötiläkäyrät ovat järjestyksessä 4 m, 9 m, 18 m, 23 m ja 27m etäisyydellä porareikästä. (Claesson & Eskilson 1987, *Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal analyses and dimensioning rules*, s. 11)

6.2 Energiakaivon suunnittelu ja mitoittaminen

Yksittäisen energiakaivon suunnittelussa tärkein tekijä on kaivon sijoittaminen kiinteistöllä. Se sijoitetaan usein paikkaan, josta siirtoputkien vieminen rakennukseen on helppoa. (Juvonen & Lapinlampi 2013) Useammasta kaivosta koostuvassa järjestelmässä yhä tärkeämpää on kaivojen mitoittamisen tarkkuus (Banks 2012).

Euroopan keskiarvo yhden porakaivon lämpöenergian saannolle on n. 62 W/m (Banks 2012). Nyrkkisääntönä pidetään, että lämpöä saadaan 50 W/m. Koska Suomi sijaitsee Euroopan pohjoisosassa, maan keskimääräinen lämpötila on matalampi ja siten lämpöenergian saanti on hieman heikompaa. Tämän takia kaivo porataan usein muutaman metrin syvemmälle mitä on tarpeellista, sillä sen ajatellaan olevan kustannustehokkaampaa ja varmempaa, kuin suurten maaperätutkimusten tekeminen. (Aittomäki 1983;

Banks 2012) Nyrkkisääntöjen käyttäminen maalämpöjärjestelmän suunnittelussa ei kuitenkaan ole yleensä riittävää tai kustannustehokasta, varsinkin mitä suuremmasta projektista on kyse. Esimerkiksi suuria energiakenttiä poratessa pieni ero kallion lämmönjohtavuudessa voi johtaa erittäin suureen vaikutukseen kokonaiskustannuksissa. Tämän takia suunnitellessa suuria energiakenttiä on tärkeää ymmärtää lämmönjohtavuuden vaikutukset, tutkia alueen ominaisuudet tarkasti ja käyttää tietokonesimulaatioita lämmön tarpeen arvioimiseen. (Banks 2012)

Suomessa maan lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti pysyvät melko samantlaisina sijainnista riippumatta. Merkittävän eron tekee maan luonnollinen lämpötila, joka on Suomessa sitä kylmempi, mitä pohjoisemmaksi mennään. Myös lämmityskauden pituus on hieman pidempi Pohjois-Suomessa. Lämmityskaudella keruuaineen lämpötila laskee hyvin lähellä 0 °C ja jopa sen alapuolelle. Mitä alhaisemmaksi keruuaineen lämpötila laskee, sitä huonommaksi tavallisesti laskee pumpun tehokkuus. (Leppäharju 2008; Banks 2012)

6.2.1 Keruuaineen lämpötilan laskeminen

Energiakaivon lämpötila laskee sen toiminta-aikana kohti stationääritilaa. Ideaalitilanteessa kaivon seinän ja keruuaineen välillä ei ole resistanssia, jolloin voidaan olettaa lämmönsiirto tehokkaaksi sekä seinän ja keruuaineen lämpötilat samoiksi. Joissakin maissa on lainsäädännöllisiä linjauksia keruuaineen minimilämpötiloista, joiden mukaan ne eivät saa saavuttaa tiettyjä lämpötiloja koko toiminta-aikanaan. Yleensä pidetään sopivana, että keruuaineen keskilämpötila ei saa laskea alle 0 °C pitkiksi ajoiksi. (Bayer et.al. 2010; Banks 2012; Lahti 2013)

Keruuaineen lämpötilan laskenta pohjautuu Horatio Carslawin (1921, Banks 2012 mukaan) laskelmiin lineaarisesta lämpösaiteilylähteestä. Myöhemmin Claesson ja Eskilson (1987) kehittivät laskelmaa olettaen, että

- ennen kuin maalämpöpumppu on päällä, vallitsee porareiässä tasainen lämpötila T , joka on reiän pinnassa ja pohjalla vallitsevan lämpötilan keskiarvo. Lämpötila-ero ympäröivän maan ja porareiän välillä pyrkii tasoittumaan, ja aluksi myös ympäröivä maa on samassa lämpötilassa T_0 .
- pumpun toiminnan alkuvaiheessa voidaan jättää huomioimatta kaikki pystysuuntainen lämpöliike porareiässä ja keskittyä vain laskemaan vaakasuuntaan tapahtuvaa lämmönsiirtymistä, kun toiminnan alussa energiakaivo absorboi lämpöä käytännössä vain kaivon seinän välittömästä läheisyydestä itseensä ja näin jäädyttää maata kaivon seinän vieressä.

Näillä oletuksilla Claessonin ja Eskilsonin mukaan pätee

$$T_0 - T_b = \frac{q}{4\pi\lambda} E(u) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{nn!} \right] \quad (3)$$

missä

T_0 on lämpötila kaukana lämmönlähteestä (ts. maan luonnollinen lämpötila)

T_b on porareian seinän lämpötila ajanhetkellä t

q on siirtyvän lämmön määrä W/m

λ on maan lämmönjohtavuus

r_b on porareian säde

$\gamma=0,5772$ (Eulerin vakio)

$u = \frac{r_b^2 S_{vc}}{4\pi t}$, missä S_{vc} aineen tilavuuslämpökapasiteetti

$E(u)$ on eksponentiaalinen integraalifunktio, josta käytetään myös nimeä Theisin yhtälö. (Banks 2012)

Claessonin ja Eskilsonin yhtälö voidaan yksinkertaistaa muotoon (kun u :n arvo on pieni, eli kun t :n arvo on iso)

$$T_0 - T_b \approx \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\lambda t}{r_b^2 S_{vc}} \right) - \gamma \right] \quad (4)$$

Tämä yhtälö kuvaa keruuaineen lämpötilan laskua ajan myötä pumpun toiminnan varhaisessa vaiheessa. Yhtälö kuvaa lämpötilan laskua melko tarkasti, kun t on määrittelyvälillä

$$\frac{5r_b^2 S_{vc}}{\lambda} < t < \frac{t_s}{10} \quad (5)$$

missä t_s on

$$t_s = \frac{e^{\gamma} D^2 S_{vc}}{18\lambda} \approx \frac{D^2 S_{vc}}{9\lambda} \quad (6)$$

ja missä D on porareian syvyys (m). t_s kuvaa ajankohtaa, jossa keruuaineen lämpötilan voidaan katsoa vastaavan stationääritilaa.

Kun energiakaivon lämpötila alkaa lähestyä stationääritilaa, voidaan keruuaineen lämpötila pitkän ajan kuluttua arvioida yhtälöstä

$$T_0 - T_{s,b} = \frac{q}{2\pi\lambda} \left(\ln \frac{D}{r_b \sqrt{4.5}} \right), \text{ jos } D \gg r_b \quad (7)$$

missä $T_{s,b}$ on keruuaineen vakaan tilan lämpötila ideaalissa porareiaässä, eli toisin sanoen porareian seinän lämpötila olettaen, että lämpöresistanssia ei ole.

6.2.2 Lämmön siirtymisen resistanssin huomioiminen

Edelliset yhtälöt perustuvat ideaalitalanteeseen, jossa resistanssia ei esiinny. Todellisessa tilanteessa resistanssia esiintyy kaivon täyteaineesta (Suomessa usein pohjavesi) sekä lämmönsiirtymästä kylmää ja lämmennyttä keruuainetta kuljettavien keruuputkien välillä (eng. *thermal short-circuiting*). Tämän suuruuteen vaikuttaa putkien välinen lämpötilaero sekä keskinäinen etäisyys toisistaan. (Banks 2012)

Todellisessa tilanteessa porareiässä lämmön siirtymistä vastustavat monet pienet tekijät, mutta näiden yhteisvaikutus voidaan pitkällä aikavälillä yksinkertaistaa kaivon seinän resistanssiksi. Tällöin voidaan ajatella, että lämmön siirtymistä vastustavat maan resistanssi sekä porareiän resistanssi. Näistä kahdesta tekijästä maan resistanssi ei pysy vakiona, vaan se muuttuu ajan myötä. Maan resistanssi voidaan laskea aiempia yhtälöitä hyväksi käyttäen seuraavalla kaavalla:

$$R_E = \frac{E(u)}{4\pi\lambda} \approx \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\lambda t}{r_b^2 S_{vc}} \right) - \gamma \right] \quad (8)$$

Porareiän seinän resistanssi sen sijaan pysyy vakiona. Näin resistanssi voidaan huomioida aiemmissa yhtälöissä hyväksikäyttäen Ohmin lakia. Kaava (4) saa tällöin muodon

$$T_0 - T_b = q(R_b + R_E) = qR_b + \frac{q}{4\pi\lambda} E(u), \quad (9)$$

missä R_b on porareiän resistanssi ja R_E on maan resistanssi. Näin kaavat (4) ja (7) voidaan nyt kirjoittaa muodossa

$$T_0 - T_b \approx qR_b + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\lambda t}{r_b^2 S_{vc}} \right) - \gamma \right] \quad (10)$$

$$T_0 - T_{s,b} = qR_b + \frac{q}{2\pi\lambda} \left(\ln \frac{D}{r_b \sqrt{4.5}} \right), \text{ jos } D \gg r_b \quad (11)$$

on huomattava, että t on oltava määrittelyvälillä kaavan (5) mukaisesti, ja sen arvo annetaan laskennassa sekunteina.

Porareiän seinän lämmönvastuksen laskentaan käytetään nykyään usein tietokonesimulaatioita tarkemman resistanssin määrittämiseksi. (Banks 2012)

6.2.3 Keruuaineen pumppaamisen ja virtauksen vaikutukset

Suljetuissa järjestelmissä keruuputkistossa kiertää erillinen pakkasenkestävä keruuaaine. Keruuainetta pumpataan kiertovesipumpuilla. Pumppaamiseen kuluva energia pyritään minimoimaan käyttökustannusten alentamiseksi ja lämpöpumpun tehokkuuden parantamiseksi. (Banks 2012)

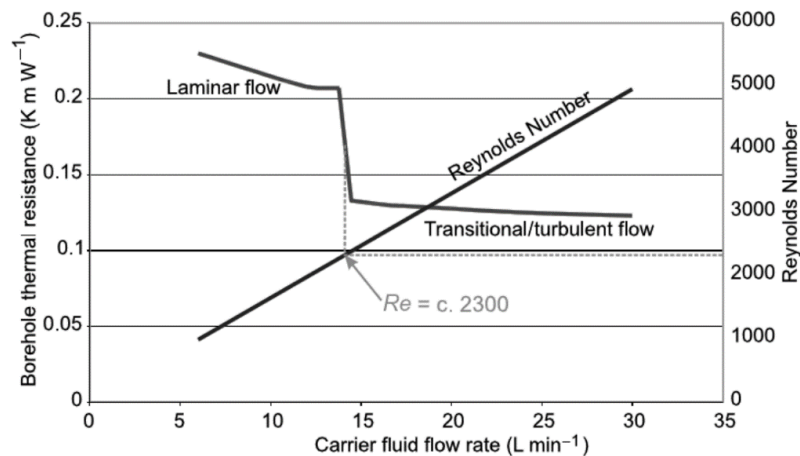
Keruuaineelle keskeisiä ominaisuuksia ovat viskositeetti, tiheys ja virtauksen tyyppi. Aineen viskositeetti kuvaa sen ominaisuutta vastustaa virtausta tai sen "paksuutta". Mitä

suurempi aineen viskositeetti on, sitä paremmin se vastustaa virtausta. Aineen virtaus voidaan luokitella kahteen luokkaan: laminaariseen tai turbulentiin. Kun virtaus on laminaarinen, keruuaineen virtaus pysyy paremmin kasassa ja aiheuttaa näin paksuuden kalvon putken seinustaa vasten. Virtauksen ollessa turbulentiin kalvon paksuus pienenee. Liian suuri turbulentiin virtaus ei kuitenkaan ole järjestelmässä toivottua, sillä tällöin hydraulisen paineen häviöt kasvavat ja niin myös pumppaamisen kuluttama energia. Haluttu virtaustyyppi vaihtelee erityisesti sen mukaan, minkä tyyppistä keruuputkea käytetään. (Banks 2012; Lahti 2013)

Virtauksen voimakkuutta kuvaa ns. Reynoldsin luku Re . Kun Reynoldsin luku on noin

- < 2300 , virtaus on laminaarinen
- $2300-4000$, virtaus on siirtymäalueella (transientti-turbulentiin)
- > 4000 , virtaus on turbulentiin.

Tutkimuksissa on huomattu, että siirtymäalueella keruuaineen resistanssi pienenee merkittävästi. Samalla virtaus ei ole täysin turbulentiin, jolloin pumppaamiseen kuluva energia ja painehäviöt eivät kasva liian suuriksi. Tämän takia virtauksessa tavoitellaan yleensä transientti-turbulentiin virtausta. (Banks 2012) Kuvasta 15 näkee, miten virtaustyyppin muuttuminen laminaarisesta turbulentiin laskee merkittävästi resistanssia.



Kuva 15. Virtaustyyppin muuttuminen laminaarisesta turbulentiin ja sen vaikutus energiakaivon resistanssiin. (Banks 2012, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, s. 300)

6.2.4 Energiakaivon lämmönvastuksen minimointi

Energiakaivon lämmönvastusta voidaan minimoida pienentämällä kaivon halkaisijaa, valitsemalla keruuputken materiaali, halkaisija ja määrä sopivaksi sekä varmistamalla, että

keruuaineen virtaus on halutunlainen. Lisäksi on pyrittävä siihen, että keruuputket olisivat mahdollisimman kaukana toisistaan, mutta eivät kuitenkaan kosketa kaivon seiniä. (Banks 2012)

Banks et.al. (2009, Banks 2012 mukaan) tutki erilaisten porareikien lämmönvastoja vaihdellen putkityyppejä, putkien halkaisijoita ja putkien määriä samassa porareiässä. Tuloksena oli, että halkaisijaltaan suuremmat keruuputket sekä useampi keruuputki samassa reiässä pienentävät lämmönvastusta. Siis kasvava suhteellinen pinta-ala heikentää putken lämmönvastusta, joka taas pienentää porareiän lämmönvastusta. (Banks 2012)

Hyvän lämmönjohtavuuden omaava kaivoseinän ja keruuputkien välinen juotosaine (eng. *grout*) pienentää energiakaivon resistanssia. Toisaalta aineen halutaan olevan sellaista, ettei se jäädy helposti, tai vaurioita keruuputkia kemiallisten reaktioiden seurauksena. Yleensä tällaisina aineina pidetään ns. lämpöparannettuja laasteja, joiden lämmönjohtavuus vaihtelee 1,5-2,2 W/mK välillä. Juotosaineita käytetään, ellei kaivo täyty itsestään vedellä. (Banks 2012)

6.2.5 Keruuaineen lämpötilan ja COP-luvun luomat rajoitukset

Maalämpöjärjestelmän suunnittelua rajoittavat erityisesti minimivaatimus maalämpöjärjestelmän tehokkuudesta (COP-luku, SCOP-luku tai SPF-luku) sekä minimivaatimus keruuaineen lämpötilalle. Erilaisia kannustimia korkeampaan keruuaineen toimintalämpötilaan ovat kustannustehokkuus, geotekniset syyt ja keruuaineen ominaisuudet. (Banks 2012)

Kustannustehokkuudella tarkoitetaan tässä pumpun COP-luvun pitämistä suositeltavalla tasolla. Esim. COP-luvulla 3,0 pumpun tuottamasta tehosta 2/3 on peräisin maasta ja kolmasosa on pumpun kuluttamaa sähkötehoa. COP-luvun laskiessa tämän alle matalan keruuaineen lämpötilan takia yhä suurempi osa pumpun tuottamasta energiasta tuotetaan sähköenergialla, mikä nostaa käyttökustannuksia ja laskee pumpun tehokkuutta. (Banks 2012)

Yleisesti ottaen ei ole hyväksyttävää, että maa pääsee jäätymään energiakaivon ympärillä aiheuttaen lämpöliikkeitä. Tämä voi vahingoittaa rakennuksia, jos ne sijaitsevat energiakaivojen yläpuolella tai välittömässä läheisyydessä. Korkeammat keruuaineen käyttölämpötilat tuottavat pienemmän riskin maan jäätymiselle. Jäätymisen voi vahingoittaa myös muuta maassa olevaa tekniikkaa, kuten kunnallistekniikkaa. Mikäli kaivo on täytetty vedellä, voi veden jäätymisen rikkoa keruuputkia jään painaessa niitä kasaan. Myös keruuaineen jäätymisen on mahdollista, mutta yleensä käyttölämpötilat eivät koskaan

laske näin alhaisiksi, sillä keruuaineiden jäätymispisteet ovat usein alle -10 °C . Tällöin pumpun hyötysuhde laskisi myös erittäin alhaiseksi. (Banks 2012; Lahti 2013)

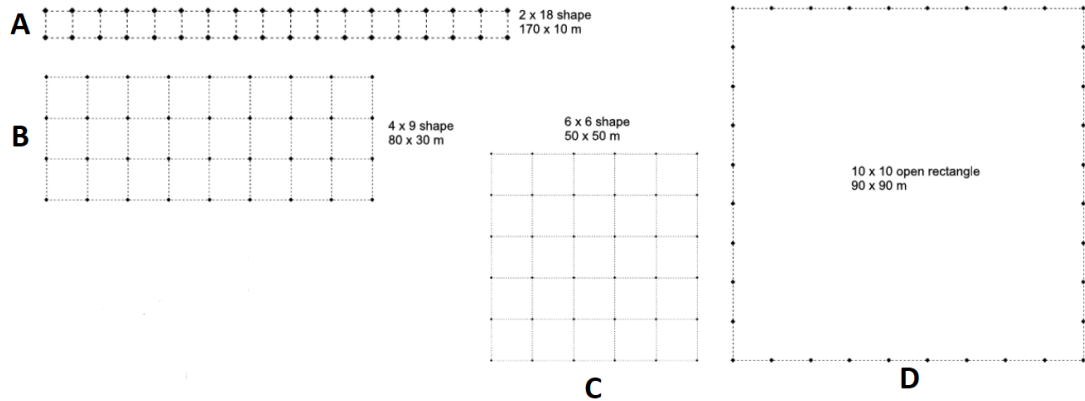
Keruuaineen lämpötiloissa on huomioitava erityisesti vallitsevat lämpötilaolosuhteet. Keruuaineen minimilämpötila voidaan asettaa kylmemmäksi silloin, jos huippukuormituksen määrä vuoden aikana on hyvin pieni, vain muutaman tunnin mittainen. Hyväksyttävä minimilämpötila pitää asettaa sitä korkeammalle, mitä enemmän järjestelmä joutuu toimimaan huippukuormituksen aikaisissa olosuhteissa vuoden mittaan, sillä tällöin riski maan jäätymiselle pienenee. Pohjoismaissa, joissa maan vuotuinen keskilämpötila on hyvin matala, on järkevämpää suunnitella lämpöpumppujärjestelmät toimimaan peruskuormituksella pienemmillä COP_H -luvulla ja matalammilla keruuaineen keskilämpötiloilla. (Banks 2012)

6.2.6 Energiakentät

Suurissa rakennuksissa tarvittava energiamäärä tilojen lämmittämiseen on suurempi kuin pienissä rakennuksissa. Täten myös suurissa rakennuksissa yksittäinen energia-kaivo ei riitä tyydyttämään tilojen lämmitystarvetta, ja tarvitaan useampia kaivoja tuottamaan tarpeeksi lämmitysenergiaa rakennukselle. Tällöin rakennuksen lämmitysenergian tuottoon tarvitaan useammasta energiakaivosta koostuva energiakenttä. Tyypillisiä ominaisuuksia suurille rakennuksille ovat monimutkaiset lämmitys- ja jäähdytystarpeet, useamman kaivon keskinäinen vuorovaikutus sekä runsaat keruuaineen lämpötilanvaihtelut vuoden aikana. (Banks 2012)

Suurissa rakennuksissa lämmitys- ja jäähdytystarve voi vaihdella rakennuksen eri osissa paljon jo saman vuorokauden aikana. Laskentaa vaikeuttavat huomattavasti kaivojen keskinäinen lämpövuorovaikutus sekä keruuaineen lämpötilavaihtelut vuoden mittaan. Laskennan helpottamiseksi on luotu erilaisia simulaatio-ohjelmia, joista yksi käytetyimmistä on ruotsalainen EED (Earth Energy Designer). Ohjelmien avulla voidaan arvioida energiakentän keruuaineen huippulämpötiloja, tarvittavien maalämpökaivojen määrä, syvyys ja yksittäisen kaivon ottama maksimiteho maasta. Simulaatioiden seurauksena pystytään arvioimaan erilaisten energiakenttien toimivuuden kannattavuutta riittävän tarkasti. (Banks 2012)

Energiakentän muodolla ja kaivojen sijoittelulla on huomattu olevan merkittävä vaikutus kentän toimivuuteen. Kuvassa 16 on esitetty erilaisia tapoja sijoitella kaivot energiakenttään.



Kuva 16. Erilaisia energiakenttien muotoja. Muodot A-C ovat ruudukkomaisia malleja koostuen 36 kaivosta, malli D on 30 kaivosta koostuva "avoin" muoto. (Banks 2012, *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, s. 320)

Monissa tapauksissa ruudukkomaiset muodot, kuten erityisesti kuvan 16 muodot B ja C, ovat vähiten tehokkaita, sillä tällöin ruudukossa kaikkein sisimmät kaivot absorboivat lämpöä viereisistä kaivoista. Avoimessa ruudukossa kaivot asennetaan suorakulmion reunoille, kuten kuvan 16 muodossa D, jolloin niillä on pääsy suuremmalle maa-alalle, eivätkä kaivot ole sijoitettuna niin lähelle toisiaan. Tällöin ongelmana on suurempi tilantarve. Ratkaisuna ruudukkomalleissa voidaan käyttää poraamista maahan vinoon, jolloin vierekkäisten kaivojen yläpäätt voivat olla useita metrejä lähempänä toisiaan, kuin maassa kymmenien metrien syvyydellä. Kaivojen keskinäisen vuorovaikutuksen minimoimiseksi onkin niiden välinen etäisyys pyrittävä maksimoimaan. (Banks 2012) Suomessa ohjeellisena arvona kaivojen keskinäiselle etäisyydelle on 15 metriä ja tontin koko voikin rajoittaa merkittävästi kaivojen sijoitteluun tai poraamisen kulmaan.

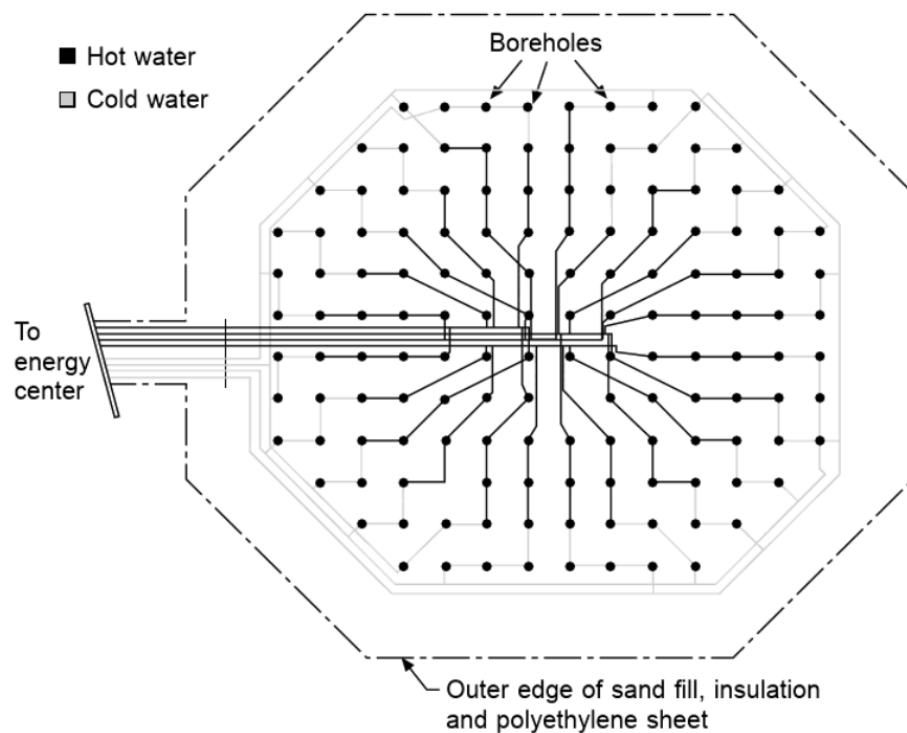
Energiakentät suunnitellaan tavallisesti niin, että useammalta energiakaivolta menevät sekä tulo- että paluuputket erilliseen kokoojakaivoon. Kokoojakaivo yhdistää useamman energiakaivon keruupiirin samoihin siirtoputkiin, jotka vievät kokoojakaivolta lämpöpumpulle. Yhdessä järjestelmässä voi olla useampia kokoojakaivoja, ja suurimmissa kohteissa on mahdollista yhdistää useammalta kokoojakaivolta tulevat putket vielä suurempaan kokoojakaivoon. Järjestelmän kannalta olennaista kokoojakaivoille tulevien keruupiirien kohdalla on, että keruupiirien virtaus sekä painehäviöt ovat keskenään yhtä suuret ja keruupiirit ovat näin keskenään tasapainossa. (Banks 2012; Pöhö 2013)

6.2.7 Maan lataaminen ja käyttäminen energiavarastona

Suuremmissa rakennuksissa, joissa lämmöntarve on suuri, maan lämpötila laskee tasaisesti koko ajan, mikäli lämpöä kerätään koko ajan. Tämä johtaa järjestelmän elinkaaren aikana maan nopeaan jäähtymiseen ja keruuvaiheen alhaisiin lämpötiloihin, mitä ei voida

hyväksyä. Tämän takia useamman lämpökaivon järjestelmissä yhdestä kaivosta otettavan energian määrä pidetään alhaisempana, mitä teoriassa olisi mahdollista. Sopiva lämpöenergian ottoteho yhdelle energiakentän kaivolle on tyypillisesti 10-20 W/m (Lepäharju 2008; Lahti 2013). Toinen vaihtoehto on ottaa järjestelmä pois käytöstä aina silloin, kun lämmitysenergiaa ei tarvita, kuten kesäkautena, jolloin maan lämpötila palautuu hieman kohti luonnollista lämpötilaa. Maan lämpötilan tasaantumista luonnollisesti kutsutaan palautumiseksi. (Banks 2012)

Kun energiaa halutaan varastoida esimerkiksi maahan tai pohjavesivarantoon myöhemmä käyttöä varten, puhutaan energiavarastosta. Energiavaraston (eng. *TES, Thermal Energy Storage*) pääasiallinen tarkoitus on poistaa ongelma saatavilla oleva energian sekä tarvittavan energian välillä. Energiakenttiä voidaan hyödyntää myös energiavarastoina ja ylijäämäenergiaa voidaan hyödyntää tarpeesta riippuen joko lämmitys- tai jäähdytyskautena. (Banks 2012; Cabeza 2015) Esimerkki lämpövarastosta on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. BTES-tyylinen energiavarasto. Energiakaivot kytketään sarjaan, ja lämpö joko otetaan tai syötetään kenttään aina sen keskustan kautta. (Cabeza 2015, *Advances in thermal energy storage systems: methods and applications*, s. 142)

Suljetuissa järjestelmissä energiavarastosta käytetään nimitystä BTES (*Borehole Thermal Energy Storage*) ja avoimissa järjestelmissä ATES (*Aquifer Thermal Energy Storage*). Lämpöenergiaa voidaan ladata myös muilla tavoin kuin johtamalla rakennuksen

ylijäämälämpöä maahan: esimerkiksi aurinkopaneelien keräämää lämpöä voidaan ladata kesäaikana maahan talvella käytettäväksi. Tyypillistä energiakentän käytössä energiavarastona on, että maan lämpötila saavuttaa stationääritilan hyvin suunnitellussa järjestelmässä jo muutamassa vuodessa. Kun järjestelmää käytetään sekä lämmittämiseen että jäädyttämiseen, ja lämmitys-jäädytyskuormat ovat likipitään tasapainossa, voidaan myös energiakaivojen keskinäisiä etäisyyksiä vähentää. Tämä mahdollistaa myös energiakenttien pienemmän pinta-alan ja sitä kautta kompaktimpien kenttien muotojen käyttämisen. (Banks 2012; Cabeza 2015)

TES-järjestelmien on huomattu voivan vähentää epäsuorasti maalämpöjärjestelmien kustannuksia, sillä niiden vähäinen energiantarve johtaa pienempiin käyttökustannuksiin (Dinçer & Rosen 2011). Hyvin suunniteltuna ne voivat myös pienentää investointikustannuksia. Ne myös parantavat järjestelmän COP-lukua ja pitävät maan sekä järjestelmän toimintalämpötilat hyväksyttävällä tasolla koko järjestelmän elinkaaren ajan. Ongelmana on, että lämmön tehokas varastoiminen vaatii useita porakaivoja, sillä lämmön varastoitumiskyky on hyvin riippuvainen kaivojen pinta-ala-tilavuussuhteesta. Yksittäinen kaivo omaa suuren suhdeluvun, jolloin sillä on suuri kosketuspinta-ala ympäröivään maahan ja injektoitu energia johtuu kaivosta näin tehokkaasti ympäristöön. Suurissa kaivokennissä suhdeluku on pieni ja injektoitu energia säilyy kentässä tehokkaammin. Järjestelmä vaatii myös, että lämmitys- ja jäädytyskuormien tulisi olla keskenään tasapainoisia. (Banks 2012; Cabeza 2015)

Suomessa lämpövarastojen käyttäminen on toistaiseksi ollut hyvin pienimuotoista, pääasiassa tuotantolaitosten hukkalämmön johtamista maahan myöhempää käyttöä varten. Ongelmana on, että varastoitavaksi johdettavan energian määrä on niin pieni, että siitä saatava hyöty on myös melko vähäistä. Esimerkiksi asuinkerrostalokohteissa maahan varastoitavan energian määrä on niin pieni, että siitä saatava hyöty lämmityskauden alussa on käytetty jo muutamassa viikossa. Toiminta ei olisi siis taloudellisesti kovin kannattavaa ja vaatisi myös erittäin tarkkaa suunnittelutyötä. (Haastattelu 1, 18.3.2021; Haastattelu 3, 30.3.2021)

6.2.8 TRT-mittaus

Arvioitaessa maan lämmönjohtavuutta se voidaan arvioida suoraan taulukkoarvoilla tai ottamalla maanäyte ja testaamalla se laboratorio-olosuhteissa. Nämä menetelmät eivät kuitenkaan anna tietoa siitä, millaisia ominaisuuksia maassa on laajemmalla alueella. Esimerkiksi pohjaveden virtaus ja halkeamat kalliossa voivat aiheuttaa poikkeavia arvoja

lämmönjohtavuuteen energiakaivon sijainnilla, vaikka laboratorioarvot antaisivat näytepalasta erilaisen tuloksen. Ratkaisuna tähän voidaan käyttää paikan päällä tehtävää TRT-mittausta eli termisen vasteen testiä. (Banks 2012)

TRT:tä voidaan käyttää myös energiakaivon lämmönvastuksen mittaamiseen. Mittauksessa keruuputkistoon injektoidaan lämpöenergiaa tasaisesti syöttämällä. Meno- ja paluuputkiin asennetaan lämpötilamittarit, joiden lisäksi piiriin kytketään mittari virtausnopeuden seurantaan varten. Myös syötetyn lämpötehon tasaisuutta sekä suuruutta seurataan. Testin pituus riippuu kaivon halkaisijan suuruudesta, ja suuremmat kaivot vaativat pidemmän testiajan. Yleensä testiajan vähimmäispituutena pidetään 50 tuntia, mutta erityisesti useamman kaivon kentissä ja suuremmissa kaivoissa testi on pidempi. TRT-mittaus tehdään energiakentissä usein ensimmäisen kaivon poraamisen jälkeen, jotta saadaan tarkempaa tietoa muiden kentän kaivojen mitoittamista varten. TRT-mittauksen ongelmana on, että se vaatii raskaan mittauskaluston datan keräämiseksi ja on pienille projekteille suhteessa melko kallista. (Banks 2012; Lahti 2013)

6.3 Laskuesimerkki

Laskuesimerkki pohjautuu Banksin (2012) esittämään esimerkkiin, joka puolestaan pohjautuu EED:n ohjeeseen, jonka mukaan keruuaineen lämpötila ei saa suunnitellun käyttöajan aikana tippua alle -5 °C :een, eikä putoamista alle -3 °C :een myöskään suositella pitkiksi ajoiksi. Laskenta tehdään yhdelle energiakaivolle niin, että sitä ei käytetä viilennystarkoitukseen lämmityskauden ulkopuolella. Tässä laskennassa rakennuksen tarvittavan lämmitysenergian määrä perustetaan sen huippuenergiatarpeeseen kylmimpänä lämmityskauden aikana. Taulukossa 3 on esitetty laskelman lähtötiedot.

Taulukko 3. Laskuesimerkin lähtötiedot.

Lähtötieto	Merkki	Arvo	Yksikkö
Maan lähtölämpötila	T_0	6	$^{\circ}\text{C}$
Kallioperän lämmönjohtavuus	λ	3,3	W/mK
Maan tilavuuslämpökapasiteetti	S_{vc}	2400000	$\text{J/m}^3\text{K}$
Pumpun COP-luku	COP	4,0	
Lämpökaivon syvyys	D	220	m
Kaivon säde	r_b	0,063	m
Kylmimmän kk:n huippulämmitystarve	P_{huippu}	7000	W
Pumppu päällä vuoden aikana	t_{pumppu}	3000	h
Vuoden tunnit	t_a	8766	h
Kaivon lämmönvastus	R_b	0,12	mK/W

Oletetaan rakennuksen lämmitysenergian huipputehontarpeeksi taulukon 3 mukaisesti lämmityskaudella 7 kW. Tällöin COP-luvulla 4,0 maasta saatavan energian määrä saadaan kaavalla

$$P_{maa,huippu} = P_{huippu} - \frac{P_{huippu}}{COP} \quad (12)$$

josta saadaan maasta otettavan energian määräksi huipputeholla 5,25 kW. Koska pumppu on päällä 3000 tuntia vuodessa, tällöin vuodessa maasta kerättävän energian määrä saadaan kaavalla

$$E_{maa,a} = t_{pumppu} * P_{maa} \quad (13)$$

josta saadaan 15 750 kWh. Tällöin vuotuinen maasta otettavan energian peruskuorma saadaan kaavalla

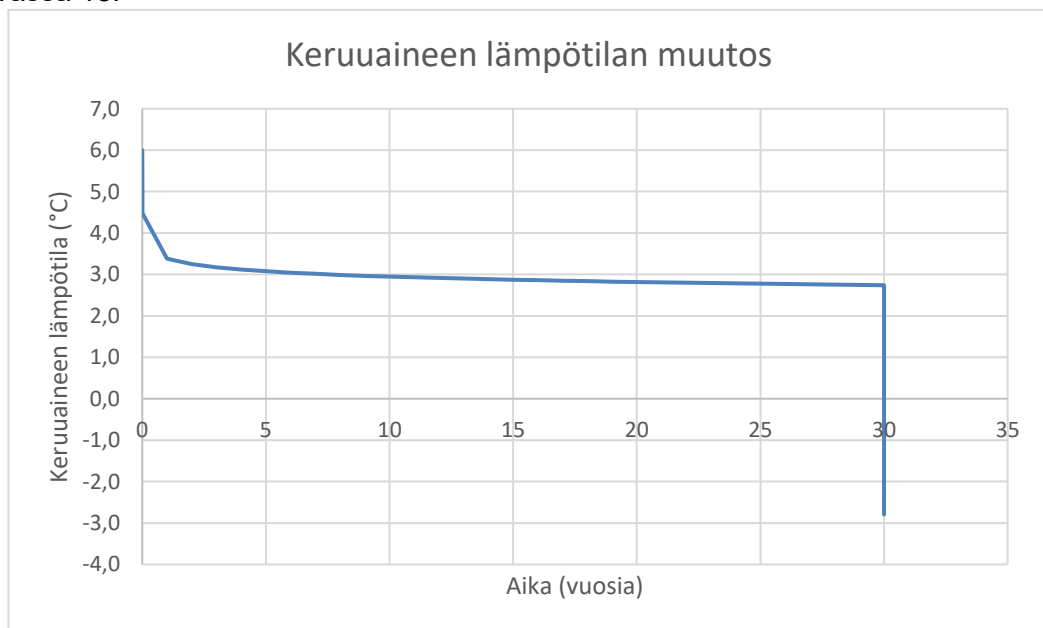
$$P_{maa,perus} = \frac{E_{maa,a}}{t_a} \quad (14)$$

mistä saadaan 1,797 kW. Tämä muokataan kaivon ottotehoksi kaavalla

$$q = \frac{P_{maa,perus}}{D} \quad (15)$$

josta saadaan 8,17 W/m.

Valitaan tarkasteluajanjaksoksi 30 vuotta ja arvioidaan keruuaineen lämpötilaa tarkasteluajanjakson päässä. Sijoittamalla taulukon 3 arvot sekä q kaavaan (10) ja muokkaamalla aikaa t saadaan arvio keruuaineen lämpötiloista ajan funktiona. Tämä on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Laskuesimerkin keruuaineen lämpötilan muutos ajan funktiona. 30 vuoden tarkasteluajanjakson päätteeksi esitetty myös lämpötila huippukuormituksen aikana.

Kuvasta 18 nähdään keruuaineen nopea lämpötilan lasku jo ensimmäisenä tunteina pumpun toiminnan alusta sekä lämpötilan tasoittuminen likimain 20 vuoden jälkeen. Peruskuormalla 1,797 kW 30 vuoden jälkeen keruuaineen lämpötila on kaavan (10) mukaisesti n. 2,36 °C, mikä on siedettävä lämpötila. Kaavan (11) mukaan keruuaine lähestyy likimain kohti lämpötilaa 2,1 °C, joten 30 vuoden jälkeen se alkaa olla jo melko lähellä stationaarilämpötilaa.

Mitoittava tekijä on kuitenkin huippukuormitus tarkasteluajanjakson päässä. Tällöin peruskuorman sijaan käytetään rakennuksen kylmimmän kuukauden huipputehontarvetta. Oletetaan huippukuormituksen pituudeksi 24 tuntia kuukauden kylmimmän päivän mukaan. Sijoittamalla kaavaan (15) $P_{\text{maa,perus}}$ tilalle $P_{\text{maa,huippu}}$ saadaan q :n arvoksi 23,86 W/m. Sijoittamalla tämä sekä huipputehon ajanjakson pituus sekunteina kaavaan (10) saadaan lämpötilan alenemiseksi huipputehon seurauksena n. 5,29 °C. Siis keruuaineen lämpötila laskee huippukuormituksen aikaan 30 vuoden jälkeen lämpötilaan

$$2,36 \text{ °C} - 5,29 \text{ °C} = -2,93 \text{ °C}$$

Tämä riittää juuri ja juuri täyttämään mitoitusperusteen, jonka mukaan lämpötila ei saa tarkasteluajanjaksolla laskea pitkiksi ajoiksi alle -3 °C:n. Toisaalta laskuesimerkin voidaan ajatella olevan melko konservatiivinen, sillä tässä mitoituksessa vältetään hyvin paljon maan jäätymistä ja keruuaineen lämpötiloja alle 0 °C:een. Mitoittaminen riippuu hyvin paljon sallittavista lämpötiloista eri olosuhteissa, ja Pohjoismaissa tavallisesti matalammat keruuaineen lämpötilat ovat perusteltuja, sillä maan lämpötila on jo valmiiksi hyvin matala. Näin lämpöpumpit voivat toimia paremmalla COP-luvulla. Lisäksi kesäkuukausina lämpöpumpun ei tarvitse tuottaa rakennukseen lämpöenergiaa juuri lainkaan, jolloin maa ehtii palautumaan hieman.

On huomioitava, että laskuesimerkki on vain suuntaa antava. Esimerkiksi käytetty λ -arvo 3,3 W/mK voi olla liian optimistisesti arvioitu ja tarkan arvon saaminen vaatisi TRT-mittauksen. Usein suunnittelu tehdään matalammalla λ -arvolla riittävän varmuuden takaamiseksi. Erityisen haastavaa mitoittamisessa on arvioida myös tarvittavan lämmitysenergian tarve, sillä tämä riippuu hyvin paljon paitsi rakennuksen lämpöhäviöistä, myös sen käyttöasteesta ja asukkaiden toiminnasta. Esimerkiksi rakennuksen pinta-ala ja sähkölaitteet vaikuttavat lämpöhäviöihin sekä lämpökuormiin. Mitoitus-esimerkissä ei myöskään huomioitu käyttöveden lämmityksen osuutta, joka vaikuttaa osaltaan vielä mitoitukseseen. Laskuesimerkin pääasiallinen tarkoitus onkin antaa käsitys luvussa esitettyjen kaavojen toiminnasta käytännössä.

7. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN ELINKAARIKUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN

Rakennuksilla voidaan käydä kauppaa, kuten kaikilla muillakin sijoitusinstrumenteilla. Sijoittajan intressi on maksimoida rakennuksesta saatava voitto. (Myyryläinen 2008) Tämän perusteella on luonnollista päätellä, että kun päätetään rakennuksen lämmitysjärjestelmän tyyppi, on sijoittajan pääasiallisena tavoitteena hankkia lämmitysjärjestelmä mahdollisimman edullisesti ilman, että siitä saatava teho laskee merkittävästi.

Aina investointikustannuksiltaan halvin vaihtoehto ei kuitenkaan pitkässä juoksussa ole kaikkein edullisin vaihtoehto. Kun tarkastellaan johonkin tuotteeseen investoinnista ja sen käytöstä ja ylläpidosta muodostuvia kustannuksia koko sen elinkaaren aikana, puhutaan elinkaarikustannuksista (Myyryläinen 2008).

Rakennuksesta muodostuu kustannuksia koko sen elinkaaren aikana. Nämä kustannukset pyritään kattamaan erilaisilla käyttö- ja vuokramaksuilla, erilaisilla vastikkeilla sekä rakennuksen tai sen osan myymisellä tai jäännösarvolla. (Saari 2004) Elinkaarikustannukset voidaan laskea niin koko rakennukselle, kuin myös jollekin sen osalle.

Aiemmin suuriin investointeihin liittyvät päätökset tehtiin yleensä lyhyen aikavälin vaikutusten mukaan. Bull (2003) sekä Kubba (2010) väittivät, että "alin hinta"-metodi oli 2000-luvun alussa edelleen rakentamisessa suosituin päätöksentekomalli, sillä oletus on, että alin hinta on aina paras taloudellinen ratkaisu. Nykyään investointipäätöksissä huomioidaan yhä enemmän pitkän ajan kustannuksia mm. energian hinnan nousun takia (Finnegan 2018).

7.1 Elinkaariajattelun taustaa

Elinkaariajattelulla tarkoitetaan tarvelähtöistä rakentamista asiakkaalle siten, että rakennus vastaa koko elinkaarensa ajan asiakkaan tarpeita kustannustehokkaasti ja laadukkaasti. Rakennukselta ja sen osilta vaaditaan kestävyyttä ja pitkää käyttöikää, mutta myös energiatehokkuutta sekä edullisia käyttö- ja huoltokustannuksia sekä soveltuvuutta erilaisiin tarpeisiin. (Myyryläinen 2008 & 2019)

Elinkaarikustannuksilla taas tarkoitetaan rakennuksen, sen osan tai järjestelmän elinkaaren hankinta-, käyttö-, huolto- ja uusimiskustannusten nykyarvojen summaa. Tarkalla elinkaarikustannusten laskennalla voidaan vähentää budjetin ylittymisestä aiheutuvaa

riskiä. Laskentaan vaikuttavia parametrejä ovat mm. pääomakustannus, kunnossapito-kustannus (johon vaikuttaa asetettu laatutaso), pääoman korko, inflaatio, energian hinta ja rakennuksen käyttöaste. Elinkaarikustannusten osalta erittäin olennainen osa suunnittelua tapahtuu jo tarve- ja hankesuunnittelussa, sillä näissä suunnitteluvaiheissa päätetään myös rakennuksen sisäilmastosta ja energiataloudesta. Energiakustannukset kattavat noin 80 % koko rakennuksen elinkaarikustannuksista. (Myyryläinen 2008 & 2019)

Erilaisissa tutkimuksissa on todettu, että suurin syy ympäristöllisesti kestävä rakennuksen rakentamatta jättämiseen on liian suuret investointikustannukset. (Kubba 2010) Kubban (2010) mukaan suurista investoinneista jättäytyminen tällaisissa tilanteissa johtuu yritysmaailman tavasta erottaa toisistaan välittömät kustannukset sekä toimintakustannukset, painottaen päätöksenteossa välittömiä kustannuksia. Tutkimukset kuitenkin osoittavat, että vihreä rakentaminen ei merkittävästi maksa ”tavallista” rakentamista enemmän. Erityisesti silloin, kun maksusuunnitelmat, suunnittelun ohjaus ja ympäristöstrategiat ovat integroituina hankkeeseen heti alusta alkaen, näitä kustannuksia pystytään alentamaan merkittävästi. Myös käyttökustannukset pienenevät vihreän rakentamisen kautta, sillä ympäristöystävällisten ratkaisujen käyttäminen aiheuttaa yleensä käytön aikana hyvin vähän kustannuksia, ja investointien takaisinmaksuajat pysyvät verrattain pieninä. Myös Pitt et. al. (2009) tutki erilaisia ajureita ympäristöllisesti kestävässä rakentamisessa ja sai selville, että alhaisemmat käytön aikaiset kustannukset olivat yksittäinen suurin ajuri. Kestävä kehityksen huomioimatta jättäminen suunnittelussa, tai huomioiminen liian myöhään taas voi johtaa kokonaiskustannusten nousuun. (Kubba 2010; Finnegan 2018)

Edwards ja Naboni (2013) tutkivat, että kiinteistöön, jonka rakentamisessa pääpiirteet ovat olleet ympäristöystävällisyydessä, johtaa usein investoijalle sekä sosiaalisiin että taloudellisiin hyötyihin. Näitä ovat

- pienemmät elinkaarikustannukset
- parantunut tuottavuus tai tehokkuus
- paremmat sosiaaliset vuorovaikutussuhteet rakennuksen ja yhteisön tasolla
- rakennuksen ja sen käyttäjän organisaation imago. (Finnegan 2018)

Tyypillistä energiatehokkaalle tai kestävä kehityksen mukaiselle rakennukselle siis on, että sen investointikustannukset voivat olla korkeammat kuin tavallisella rakennuksella, mutta käyttökustannukset ovat energiatehokkuudesta johtuen huomattavasti alhaisempia. Lisäksi tällaisella rakennuksella on epäsuoria hyötyjä rakennuksen käyttäjälle tai omistajalle esimerkiksi sosiaalisten tekijöiden tai imagon kautta. Kun vihreät arvot otetaan hankesuunnittelussa huomioon jo varhaisessa vaiheessa ja rakennus suunnitellaan

huolellisesti, pysyvät rakennuksen elinkaarikustannukset alhaisina ja takaisinmaksuaika lyhyenä.

7.2 Elinkaarikustannusten laskenta

Investointilaskelmissa voidaan käyttää erilaisia menetelmiä arvioimaan investoinnin kannattavuutta. Yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat takaisinmaksuajan menetelmä, annuiteettimenetelmä, sisäinen korkokanta, oman pääoman tuottoaste sekä nettonykyarvomenetelmä.

Takaisinmaksuajan menetelmän ongelma on, että se ei huomioi koron vaikutusta vuotuisiin tuottoihin. Lisäksi nettotuotot voivat vaihdella keskenään runsaasti, joten se voi herkästi antaa väärän kuvan investoinnin kannattavuudesta. Annuiteettimenetelmässä hankintameno jaetaan vuotuisiin yhtä suuriin pääomakustannuksiin investoinnin pitoaikana. Menetelmässä kuitenkin paljon toisistaan poikkeavat nettotuotot voivat hankaloittaa laskelman toteuttamista. Oman pääoman tuottoaste ja sisäisen korkokannan menetelmä ovat samankaltaisia, mutta oman pääoman tuottoaste on hieman yksinkertaistumpi versio sisäisen korkokannan menetelmästä. Sisäisen korkokannan menetelmässä laskenta perustuu sen korkotason etsimiseen, jolla investoinnin nykyarvo on 0. Edellä mainituista menetelmistä sisäinen korkokanta huomioi kuitenkin koron vaikutuksen vuotuisiin kustannuksiin, mikä tekee siitä nettonykyarvon ohella luotettavan laskentamenetelmän. (Bull 2003) Tässä työssä investoinnin kannattavuuden laskentaan käytetään nettonykyarvomenetelmää.

Yleisesti investoinnin elinkaarikustannukset voidaan kuvata investoinnin toiminta-ajan kokonaiskustannuksina, sisältäen alkuinvestointikustannuksen sekä myöhemmät toimintakustannukset. Elinkaarikustannusten pääosat muodostuvat

- pääomakustannuksesta I_0 , eli alkuinvestoinnista (sisältäen rakennuskustannukset, suunnittelupalkkiot, tontin hinnat jne.)
- käyttökustannuksista O , (operating costs), vuosittaiset kustannukset sisältäen mm. siivous- ja energiankäyttökustannukset
- ylläpitokustannuksista M , (maintenance costs), joka pitää sisällään vuosittaiset kustannukset ja järjestelmän tai sen osan korjaus- ja uusimiskustannukset
- jäännösarvosta S (salvage value). (Atkin et.al. 2003)

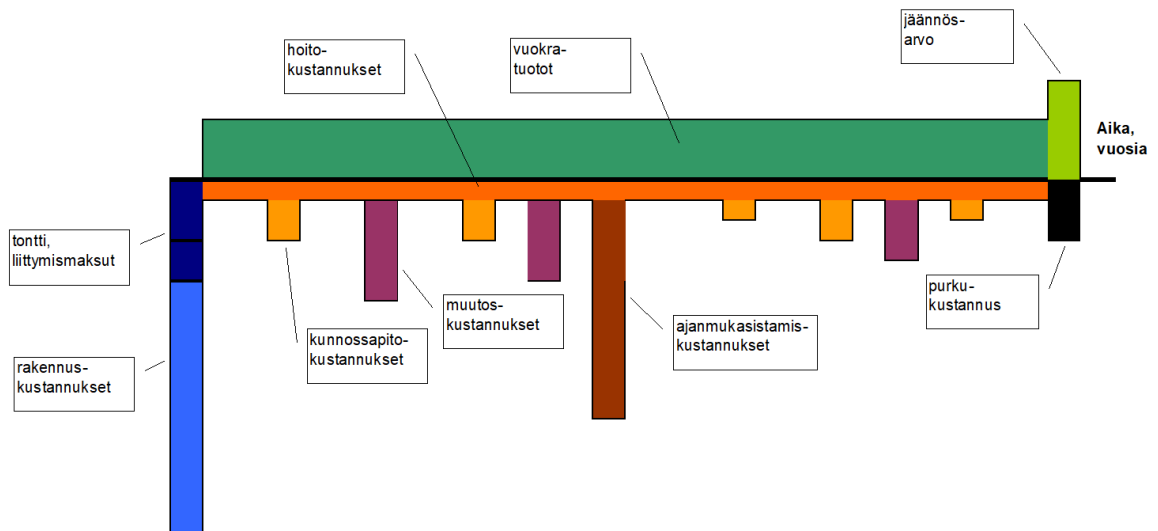
Nettonykyarvomenetelmässä eri kustannustekijöistä vain investointikustannus huomioidaan laskentahetken mukaisessa arvossaan. Käyttö- ja ylläpitokustannuksissa huomioidaan

daan ajan vaikutus rahan arvoon, ja näiden vuosittaiset kustannukset diskontataan nykyhetkeen. Elinkaarikustannukset lasketaan valitulle ajanjaksolle investointikustannuksen sekä käyttö- ja ylläpitokustannusten summana nettonykyarvomenetelmällä

$$LCC = I_0 - S_N + \sum_{n=t}^N (O_t + M_t) * \frac{1}{(1+r)^t} \quad (16)$$

missä N kuvaa järjestelmän käyttöikä ja r on diskonttauskorko. Jäännösarvo S_N edustaa myynnistä realisoitavaa nettosummaa sen taloudellisen vaikutusajan lopussa. Diskonttauskorko on investoinnin merkittävä epävarmuustekijä ja mm. sen vaikutuksia investoinnin kannattavuuteen voidaan arvioida erilaisilla herkkyyksianalyysillä. (Atkin et.al. 2003; Bull 2003)

Rakennuksen elinkaarikustannuksissa puhutaan yleensä ylläpitokustannuksista yhtenä kokonaisuutena, joka sisältää rakennuksen hoito- ja kunnossapitokustannukset. Rakennuksen elinkaaren aikana tapahtuu usein useampia muutos- ja korjaustöitä sekä ns. ajanmukaistamistöitä, joiden tarkoituksena on pitää kiinteistön laatu- ja palvelutaso riittävällä tasolla. Nämä aiheuttavat erilaisia kustannuseriä ja ne voidaan katsoa erillisinä elinkaarikustannuksina. (Saari 2004) Tätä on havainnollistettu kuvassa 19.



Kuva 19. Kiinteistön elinkaarikustannukset eriteltynä. (Saari 2004, Elinkaarikustannusten laskenta, s. 5)

Elinkaarikustannuksia laskettaessa päädytään usein pohtimaan, mikä olisi sopiva laskennassa käytettävä pitoaika rakennukselle. Yleensä käytetään ns. taloudellista pitoaikaa, eli rakentamisessa aikaa rakennuksen valmistumisesta sen ensimmäiseen peruskorjaukseen. Tämä vastaa asuinrakennuksille noin 30-40 vuotta ja esimerkiksi toimistorakennuksille noin 20 vuotta. (Saari 2004)

7.3 Herkkyysanalyysi

Yleensä laskettaessa elinkaarikustannuksia eri vaihtoehtoista jollekin kokonaisuudelle voivat eri vaihtoehdot olla kokonaiskustannuksiltaan hyvin lähellä toisiaan. Tällöin yhden skenaarion valitseminen toteutettavaksi voi olla haastavaa. Ratkaisuna voidaan käyttää herkkyysanalyysiä, jonka tarkoituksena on tutkia, kuinka paljon valitun vaihtoehdon lopputulos muuttuu, kun siihen vaikuttavia tunnuslukuja ja -arvoja muutetaan hieman. (Bull 2003)

Herkkyysanalyysi on olennainen osa arvioitaessa investointeihin liittyvien eri tekijöiden vaikutusta sen kannattavuuteen. Analyysissä muutetaan kaikkien laskelman osatekijöiden arvoa yksi kerrallaan tai samanaikaisesti ja arvioidaan muutosten vaikutus lopputulokseen. Lopulta kun kaikkien investointiin vaikuttavien tekijöiden suuruus on analysoitu, saadaan selville, mitkä tekijät vaikuttivat olennaisimmin lopputulokseen. Vastaavasti ne tekijät, jotka muuttivat lopputulosta vain vähän, voidaan katsoa omaavan vain hyvin vähän epävarmuutta, jolloin näiden parametrien muokkaamiseen ei todennäköisimmin tarvitse puuttua. (Neilimo & Uusi-Rauva 2005)

Erityisesti herkkyysanalyysissä tarkastelun kohteena ovat diskonttokorko ja kohteen pittoaika, sillä näitä arvoja ei yleensä voida arvioida täsmällisellä tarkkuudella. Myös esimerkiksi energian hinnan muutokset ovat tyyppillisesti tarkastelun kohteena.

7.4 Maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannustekijät

Moni maalämpöjärjestelmän kustannuksiin vaikuttava tekijä syntyy jo järjestelmän suunnitteluvaiheessa. Aivan suunnittelun alussa tutkitaan alueen maaperän ominaisuudet ja soveltuvuus maalämmön käyttöönottoon. Tutkimusten perusteella määritetään poraus-syvyys, tarvittavien reikien määrä tai vaakaputkistoon päädyttäessä keruupiirin pituus.

Suunniteltavan rakennuksen koko vaikuttaa sen lämmitystarpeeseen, jonka pohjalta valitaan tehokkuudeltaan siihen sopiva maalämpöpumppu. Suuremmissa kohteissa pumppeja tarvitaan useampia. Järjestelmän investointikustannuksiin kuuluvat pumpun lisäksi ainakin siirtoputkien, keruuputkien ja keruuaineen hankinta. Kaivuu- ja porauskustannukset sekä muut rakennustyöt sisältyvät järjestelmän toteuttajan urakointikustannuksiin, joista urakoitsijalle maksetaan urakointipalkkio. Sekä urakointipalkkio että suunnittelu-palkkio voidaan katsoa täten sisältyvän alkuinvestointikustannuksiin.

7.4.1 Yleisiä havaittuja maalämmön kustannustekijöitä

Useissa tutkimuksissa on havaittu, että maalämpöjärjestelmä tulee sitä halvemmaksi, mitä isommassa mittakaavassa se toteutetaan. Toisin sanoen maalämmön kilpailukyky kasvaa rakennuksen koon kasvaessa. Tämä johtuu osittain siitä, että järjestelmän koon kasvaessa tarvitaan järjestelmään useampi kompressori, jolloin järjestelmän hyöty kasvaa suhteessa sen aiheuttamiin kustannuksiin. Toisaalta myös porauskustannukset muuttuvat suhteessa edullisemmiksi, kun kaivoja tehdään kerralla useampia. (Banks 2012)

Vaakakeruupiirien on huomattu olevan kustannuksiltaan pienempiä kuin energiakaivojärjestelmät. Tämä johtuu kalliista porauskustannuksista verrattuna kaivutöiden kustannuksiin. Kuitenkin vaakakeruupiirejä voidaan käytännössä toteuttaa vain pientalokohdeissa, sillä niistä saatava lämpöteho ei ole kilpailukykyinen energiakaivojen kanssa. Lisäksi rakennuksen koon kasvaessa tarvitaan lämmönkeruuseen yhä suurempia tontteja, eikä tällaisia ole saatavissa miltei koskaan. Viime aikoina porauskaluston ja -tekniikoiden kehittyessä on myös huomattu, että porausten hinnat ovat muuttuneet edullisemmiksi. (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013)

Tutkimukset ovat osoittaneet myös, että vertailtaessa avointen ja suljettujen järjestelmien aiheuttamia kustannuksia ne eivät eroa toisistaan juuri lainkaan. Merkittävä tekijä avoimissa järjestelmissä on pohjavesialueen litologialla, ja alueen ominaisuudet määrittävät pitkälti tällaisen järjestelmän kustannukset. (Banks 2012)

7.4.2 Kustannustekijöiden suuruus

Banks (2012) esitteli erään brittiläisen tutkimuksen tuloksia, joiden mukaan karkeasti 150 000 punnan hankkeen kustannuksista 60 % on porauskustannuksia, 20 % lämpöpumppulaitteistosta, 10 % työkustannuksia, 7,5 % putkistoista, jakelulaitteistosta ja keruuaineesta sekä 2,5 % suunnittelukustannuksia. Työtä varten tehdyn haastattelun perusteella (Haastattelu 5, 21.4.2021) tämä pitää melko hyvin paikkansa myös Suomen olosuhteissa ainakin porauskustannusten osalta, sillä arvion mukaan selvästi suurin osa, tyypillisesti noin 50-55 % maalämpöjärjestelmän kustannuksista aiheutuu poraamisesta. Merkittävimmän eron tekee Suomessa kallioperän sijainti lähempänä maanpintaa, jonka johdosta suojaputkitusta ei tarvita yhtä syvälle.

Maalämpöjärjestelmän hankintakustannukset ovat yleensä pienemmissä kerrostaloissa 100 000 euron luokkaa. Kaivojen porauskustannukset vaihtelevat tavallisesti 30-35 €/m välillä. Jos peruskallio on hyvin syvällä, kasvaa porauksen kokonaiskustannus, sillä täl-

löin suojausputkista tarvitaan enemmän. Poraaminen myös hidastuu suuremmilla syvyyksillä, mikä vaikuttaa porauskustannusten kasvuun. (Banks 2012; Haastattelu 5, 21.4.2021; Tom Allen Senera 2021)

Yleisin maalämpöjärjestelmissä uusittava osa on kompressorit, jolle usein annetaan elinikäksi 10-20 vuotta sen käytöstä riippuen. Kompressorin uusimiskustannus riippuu järjestelmän koosta, ja vaihtelee tyypillisesti yksittäisellä kompressorilla 2000-4500 € välissä. (Tom Allen Senera 2021; Haastattelu 5, 21.4.2021) Itse lämpöpumppuyksikölle elinikäksi arvioidaan yleensä lähemmäs 30 vuotta (Tom Allen Senera 2021). Muut lämpöpumppujärjestelmissä tyypillisesti uusittavat osat vaihtelevat yleensä laitevalmistajien ja olosuhteiden mukaan, ja yksittäisen osan uusimiselle on siksi haastavaa antaa elinikää. Kompressorin uusimisen yhteydessä uusitaan usein mm. suodattimet, suodatinkuivaimet ja paisuntaventtiilit, joiden hinta on tavallisesti muutamien satojen eurojen luokkaa (Haastattelu 5, 21.4.2021). Muita tavallisesti rikkoontuvia ja uusittavia osia ovat erilaiset anturit ja kiertovesipumput, joiden hinnat liikkuvat niin ikään muutamissa sadoissa euroissa. (Haastattelu 5, 21.4.2021; Tom Allen Senera 2021) Uusimiskustannusten osalta ainoa merkittävästi järjestelmän koosta riippuvainen osa on kompressorit, jonka uusimiskustannus on sitä korkeampi, mitä suurempi maalämpöjärjestelmä on kyseessä. Muiden osien uusimiskustannuksiin järjestelmän koon vaikutus on pieni (Haastattelu 5, 21.4.2021).

Oikein asennettuna maalämpöjärjestelmän ylläpitokustannukset ovat siis joitakin satoja euroja vuodessa. Järjestelmän toiminta on kuitenkin syytä tarkastaa säännöllisesti, ja erityisesti suuremmissä kokonaisuuksissa järjestelmän sähkönkulutusta ja tuotetun lämpöenergian määrää kannattaa seurata esim. etävalvonnalla, koska järjestelmiin kuuluu useampia pumppuja ja varaajia. (Tom Allen Senera 2021)

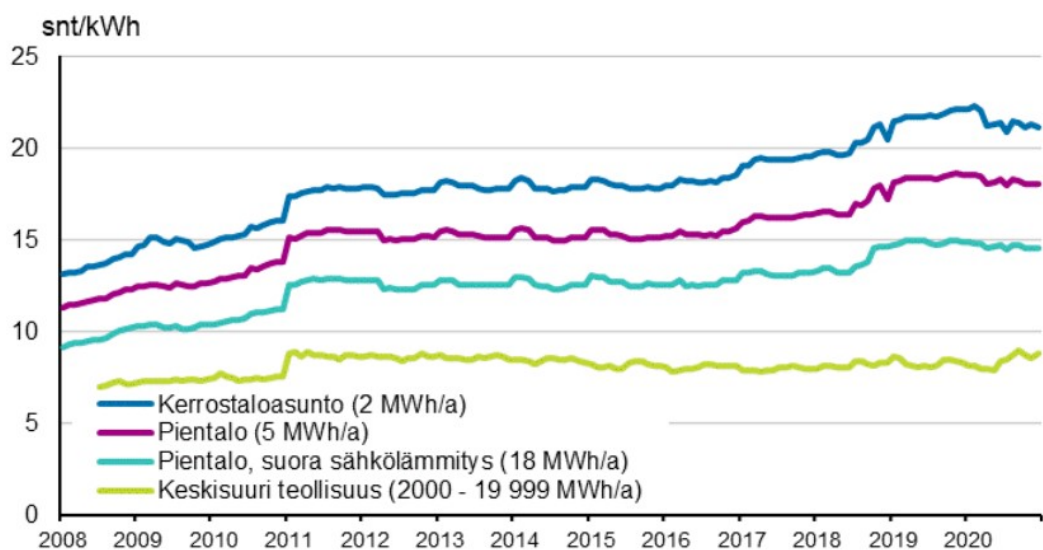
8. REFERENSSIKOHTEIDEN TARKASTELU

Tätä diplomityötä varten tehtiin 5 haastattelua, joissa haastateltavina oli niin referenssi-kohteiden kanssa työskennelleitä henkilöitä kuin eri maalämpöjärjestelmiä suunnittelevien sekä asentavien yritysten edustajia. Referenssikohteista saatujen tietojen tueksi haastateltavilta kysyttiin näissä kohteissa olleita erityisiä tekijöitä, jotka osaltaan ovat vaikuttaneet maalämpöjärjestelmien suunnitteluun, mitoittamiseen, asentamiseen ja toimintaan.

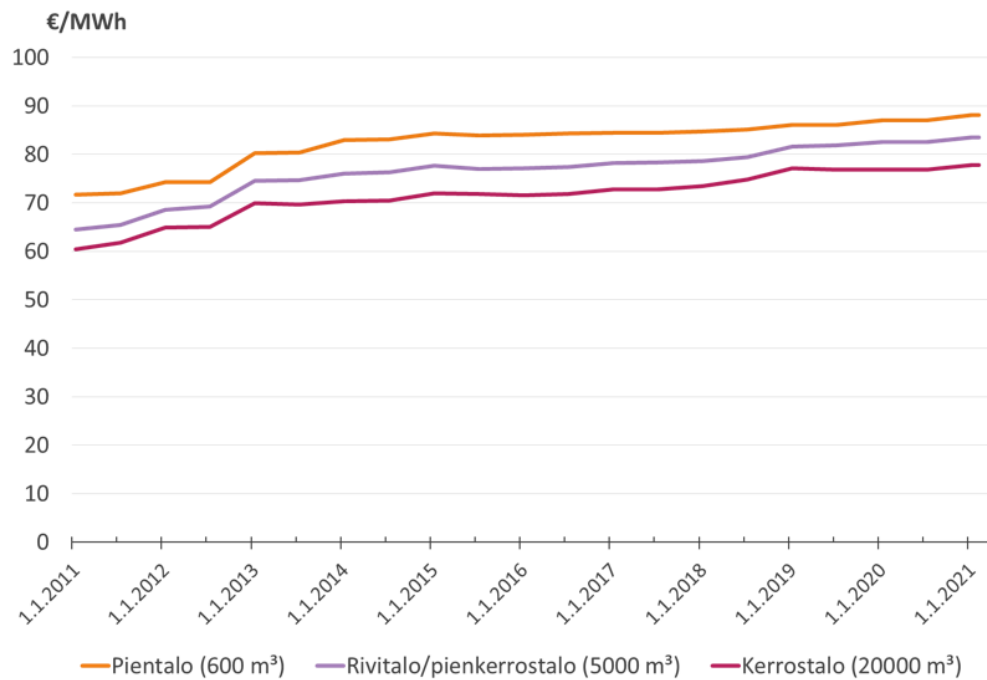
Tässä luvussa esitellään neljä työtä varten saatua referenssikohdetta, jotka perustuvat kahteen korttelinrakennushankkeeseen. Koska referenssikohteiden tiedot ovat salassa pidettäviä, ei kohteiden nimiä julkaista. Saadut tiedot perustuvat työmaalta tai järjestelmiä suunnitelleilta tahoilta saatuihin tietoihin. Käyttöön saadut lähtötiedot vaihtelivat keskenään jonkin verran. Laskenta toteutetaan kahdella tavalla huomioiden käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä energian hinnan nousu ja myös jättäen nämä huomioimatta.

8.1 Energian hinnat, hintojen kehitys ja laskentakorkokanta

Useimmissa tapauksissa vaihtoehtoinen lämmöntuottotapa maalämmön sijaan on rakennuksen liittäminen kaukolämpöön, sillä sen investointikustannukset ovat melko pienet, vuosittaiset käyttökustannukset ovat kohtuulliset ja kaukolämmöllä tuotettu sähkö on yleisesti melko ympäristöystävällistä. Tätä varten laskentaan tarvitaan kustannustietoa sähkön sekä kaukolämmön hinnasta. Hintatietoja on esitetty kuvissa 20 ja 21.



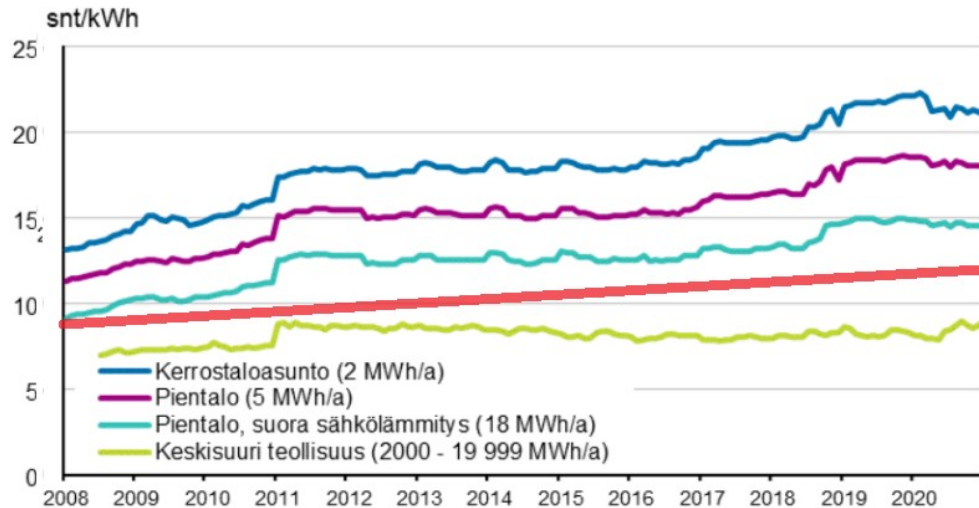
Kuva 20. Sähkön hinnan kehitys kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät sähköenergian, siirtomaksut ja verot. (Tilastokeskus 2021, Energian hinnat [viitattu 20.4.2021])



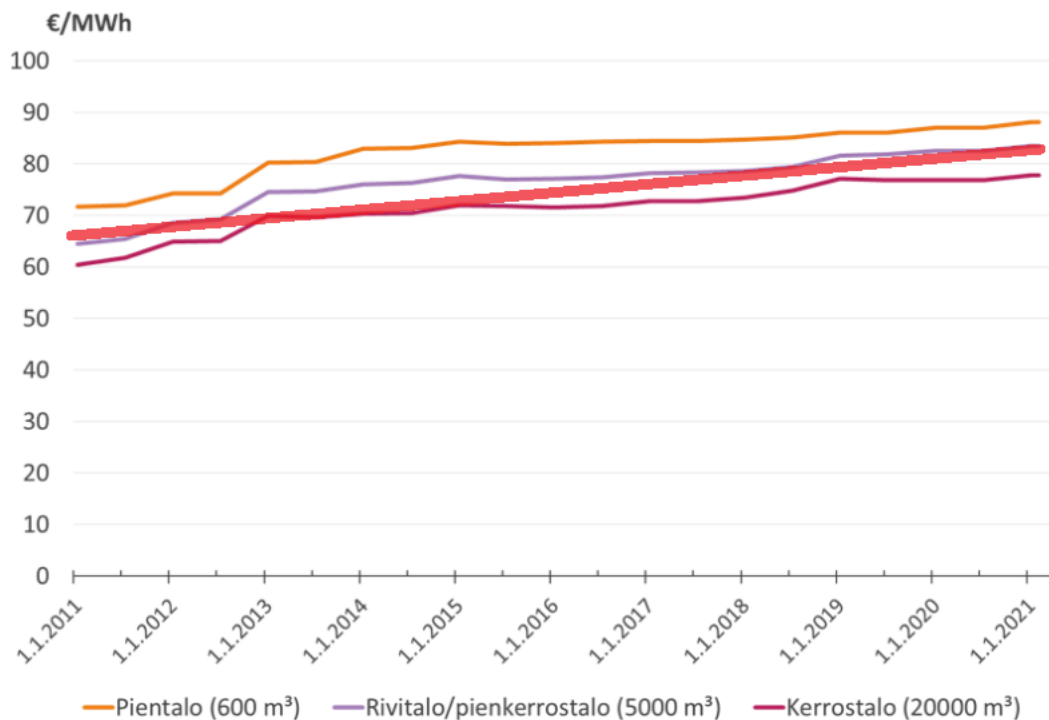
Kuva 21. Kaukolämmön hinnan kehitys kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät kaikki teho- ja energiamaksut, verot sekä muut kaukolämpöön liittyvät vuotuiset maksut. Hinnat eivät sisällä liittymismaksuja. (Energiateollisuus 2021, Kaukolämmön hinta 1.1.2021 [viitattu 20.4.2021])

Kuvien hinnat ovat nimellisiä ja sisältävät siis inflaation vaikutuksen. Kuvassa 20 on esitetty sähkön hinta neljällä erilaisella käyrällä riippuen energian loppukäyttäjistä. Koska työn referenssikerrostalokohteissa vuosittainen energiantarve liikkuu tyyppillisesti 200-500 MWh välillä kohteen koosta riippuen, sovitetaan sähkön hinta vastaamaan jotakin tätä energiamäärää vastaavaa arvoa. Sama koskee kuvaa 21, jossa pientalon käyrä voidaan jättää käytännössä huomiotta ja arvioida kaukolämmön hinta käyrien "Rivitalo/pienkerrostalo" ja "Kerrostalo" mukaan. Olettaen asuinkerrostalokohteen keskimääräisen huonekorkeuden olevan n. 2,4 metriä ja huoneistoalan olevan n. 6500 m², saadaan rakennustilavuudeksi 15 600 m³. Tämä vastaa käyrien "Rivitalo/pienkerrostalo" ja "Kerrostalo" välimaastoa. Laskennassa käytettäväksi arvoiksi arvioidaan kuvasta 20 sähkön hinnaksi 12 snt/kWh ja kuvasta 21 kaukolämmön hinnaksi 80 €/MWh.

Kuvista 20 ja 21 nähdään kuitenkin myös energian hinnan kehitys noin viimeisen 10 vuoden aikana. Kuvista huomataan, että hinta on noussut tarkasteluajanjaksolla. On myös oletettavaa, että hinta tulee kohoamaan tulevaisuudessa. Tämän vuoksi huomioidaan energian hinnan nousu piirtämällä kuviin 20 ja 21 sovitteet, jotka osoittavat hinnan kasvun trendin. Sovitteissa huomioidaan ne käyrät, jotka ovat lähimpänä kohteiden todellista kokoluokkaa. Tämä on esitetty kuvissa 22 ja 23.



Kuva 22. Sähkön hinnan kehityksen trendi, kun huomioidaan suorrasähkölämmitteisen pientalon ja keski-suuren teollisuuden käyrät. (Tilastokeskus 2021, Energian hinnat [viitattu 20.4.2021])



Kuva 23. Kaukolämmön hinnan kehityksen trendi, kun huomioidaan rivitalon/pienkerrostalon ja kerrostalon käyrät. (Energiateollisuus 2021, Kaukolämmön hinta 1.1.2021 [viitattu 20.4.2021])

Kuvasta 22 nähdään, että trendiviiva alkaa n. 8,5 snt/kWh kohdalta vuonna 2008 ja päättyy n. 12 snt/kWh kohdalle vuonna 2021. Tämä tarkoittaa 3,5 snt/kWh hinnan nousua 13 vuoden aikana. Jos oletetaan hinnan kasvun jatkuvan trendin mukaista, on vuosittainen sähkön hinnan nimellinen nousu n. 2,7 % luokkaa.

Kaukolämmön hinnan osalta trendiviiva alkaa vuoden 2011 alussa n. 68 €/MWh kohdalta ja päättyy vuoden 2021 alussa n. 82 €/MWh:iin. Hinnan nousua tapahtuu siis kymmenessä vuodessa n. 14 €/MWh. Jos hinnan kasvun oletetaan jatkuvan trendin mukaisena, vuosittainen kaukolämmön hinnan nimellinen nousu on n. 1,9 %.

Valittu laskentakorkokanta perustuu KTI:n asuntomarkkinakatsaukseen, jonka mukaan vuonna 2020 Suomen asuntomarkkinoiden kesimääräinen kassavirran tuotto on ollut n. 4 % (KTI 2021). Laskentakorkokantaan sisällytetään tavallisesti pieni riskin osuus, mutta kiinteistömarkkinoiden riskiä on tavallisesti pidetty melko pienenä, erityisesti jos rakennuksessa on käytetty energiatehokkaita ratkaisuja ja rakennus sijaitsee kasvukeskusalueella, kuten myös työn referenssikohteet (Saari 2004; Kaleva et.al. 2017). Käytetty laskentakorkokanta 4 % on nimellinen.

Kun arvioidaan erilaisten energiansäästötoimenpiteiden kannattavuutta, on perusteltua valita reaalin laskentakorkokanta väliltä 2-5 % (Heljo et.al. 2012). Inflaation suuruus oli maaliskuussa 2021 1,3 % (SVT 2021). Tämä on melko matala arvo, jonka johdosta reaalin laskentakorko saataisiin yksinkertaistetusti vähentämällä nimellisen laskentakoron arvosta inflaation suuruus, jolloin reaalin laskentakorkokanta olisi 2-5 % välillä. Laskennassa käytetään kuitenkin nimellisiä arvoja, sillä käytetyt energian hinnat ovat myös nimellisiä. Herkkyystarkasteluissa tutkitaan laskentakoron vaikutusta tuloksiin 2 %, 3 % ja 5 % laskentakorkokannoilla.

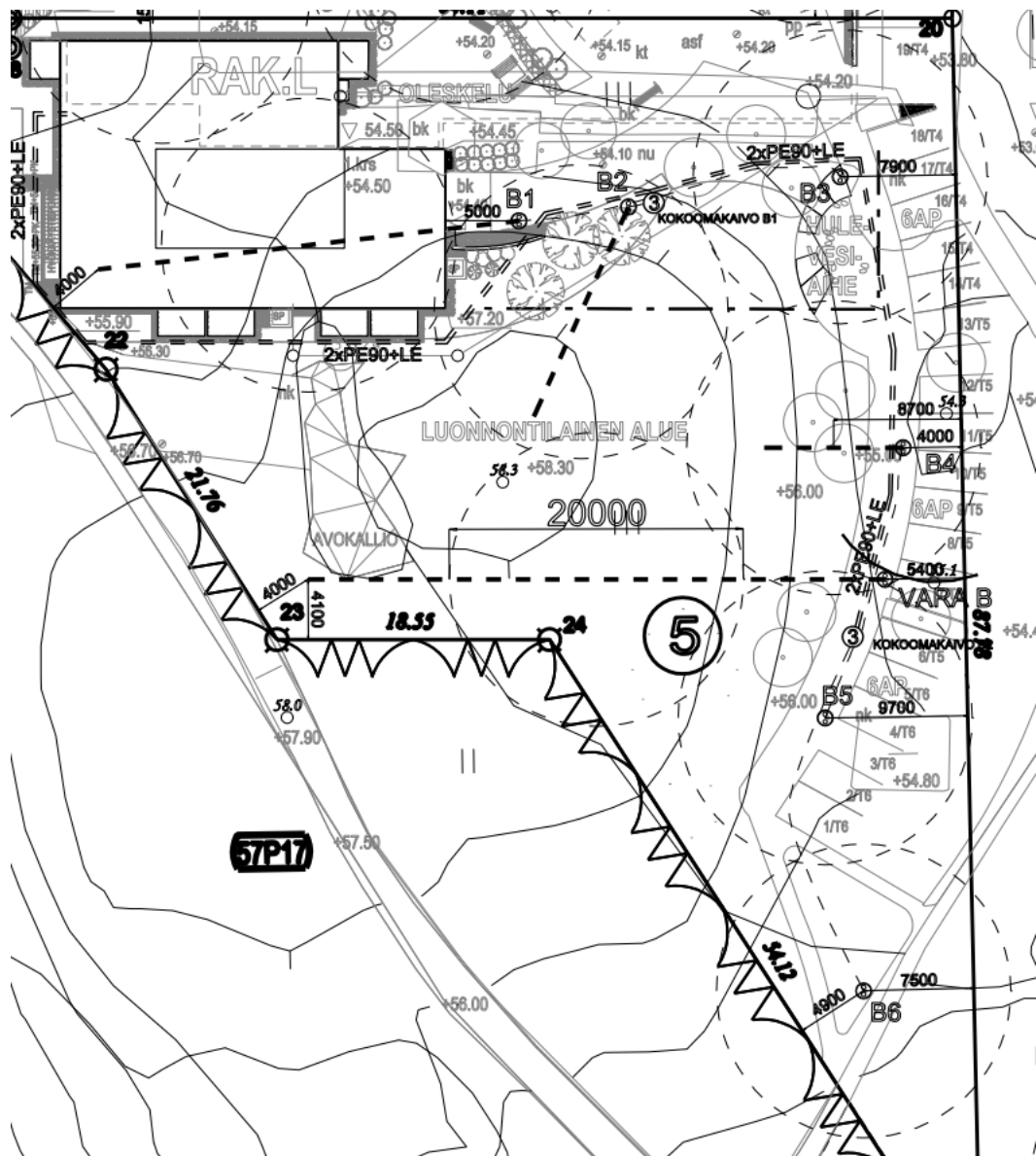
8.2 Referenssikohte 1

Referenssikohte 1 sijaitsee pääkaupunkiseudulla, jossa kohteena on kolmen 7-kerroksisen asuinkerrostalon hanke. Hankkeessa panostetaan erityisesti energiatehokkuuteen, sillä rakennuksille tavoitellaan Joutsenmerkkiä ja A-energialuokkaa. Joutsenmerkin ja A-energialuokan tavoittelu ovat olleet pääasiallinen syy sille, miksi kohteen lämmönlähteenä päädyttiin energiatehokkaaseen maalämpöön. Maalämpö tukee erityisesti myös kohteessa tavoiteltavaa matalaa hiilijalanjälkeä.

Kolmesta asuinkerrostalosta käytetään nimiä L, K ja J. Taloon L tuleva lämpöenergia on peräisin kuudesta energiakaivosta, kun taas taloihin K ja J energia saadaan molempiin yhteisistä 11 energiakaivosta. Kortteliin tulee kaikkiaan siis 17 energiakaivoa, joiden syvyys lähentelee pisimmillään 400 metriä. Rakennuksessa L on yksi pumppuyksikkö, ja rakennukseen K ja J pumppuyksiköitä on 2. Kohde on osatehmitoitettu, ja ylimääräinen lämpöenergia tuotetaan kohteeseen sähköllä. SPF-luvuksi on arvioitu n. 3,25.

EED-simulaatioissa kaivojen energian saantona käytettiin aluksi 100 kWh/m, mutta TRT-mittausten perusteella todellinen energian saanto olikin lähempänä 80 kWh/m, minkä

johdosta kaivoja jouduttiin poraamaan arvioitua syvemmälle. Erityisiä haasteita suunnittelussa on aiheuttanut ahdas tontti ja pääkaupunkiseudun asemakaava, missä maanalaista tekniikkaa on paljon. Tämän johdosta tontilla kaivojen määrä sekä sijoittelu on ollut rajoitetumpaa, mikä osaltaan on johtanut myös siihen, että kaivoja on jouduttu poraamaan vinoon sekä suunniteltua syvemmälle riittävän lämmönsaannin varmistamiseksi. (Haastattelu 2, 23.3.2021) Kuvassa 24 on esitetty referenssikohteen rakennuksen L energiakaivojen sijoittelu. Kuvasta nähdään, miten kaivot B1, B2 ja B4 on jouduttu poraamaan ahtaalle tontille kallistetusti, jotta näiden lämmönkeruualueet leikkaisivat toisiaan mahdollisimman vähän.



Kuva 24. Referenssikohteen 1 rakennuksen L energiakaivojen sijoittelu. B1-B6 kuvaavat kaivojen yläpäitä. Kaivon yläpäältä lähtevät paksu katkoviiva kuvaa kaivon poraussuuntaa, mikäli se on porattu kallistetusti.

8.2.1 Referenssikohteen 1 lähtötiedot

Diplomityötä varten kohteesta saadut kustannustiedot perustuvat arvioihin ennen kaivojen syventämistä. Tämän johdosta arvioitua järjestelmän hintaan on jouduttu jälkikäteen lisäämään energiakaivojen syventämisestä arvioitu lisäkustannus. Taulukoihin 4 ja 5 on koottu kohteesta saadut laskennan lähtötiedot.

Taulukko 4. Rakennuksen L lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Lämmitetty nettoala	3252	m ²
Lämpöpumpun lämmöntuotto	234995	kWh
Tarvittava lisälämmitys	5	kWh
Ilmaisenergia	173147	kWh
Lämpöpumpun sähkönkulutus	61849	kWh
Arvioitu hinta	125000	€
Porausmetrit alun perin	1680	m
Porausmetrit lopulliset	2160	m
Pumput yhteensä	96	kW
Rakennuksen energiankulutus	235	MWh
Kaivojen määrä yht.	6	kpl

Taulukko 5. Rakennusten K ja J lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Lämmitetty nettoala	6628	m ²
Lämpöpumppujen lämmöntuotto	469990	kWh
Tarvittava lisälämmitys	10	kWh
Ilmaisenergia	345983	kWh
Lämpöpumppujen sähkönkulutus	124008	kWh
Arvioitu hinta	220000	€
Porausmetrit alun perin	3333	m
Porausmetrit lopulliset	4090	m
Pumput yhteensä	192	kW
Rakennusten energiankulutus	470	MWh
Kaivojen määrä yht.	11	kpl

Kaivojen syventämisestä aiheutuva porauskustannus voidaan arvioida käyttämällä hyödyksi aiemmin luvussa 7.4.2 esitettyä arviota 30-35 €/m. Koska porauskustannukset tyyppillisesti kasvavat syvyyden kasvaessa, käytetään suoraan arvoa 35 €/m kaivojen ulottuessa jo valmiiksi syvälle. Lisätyt porausmetrit saadaan taukukoista 4 ja 5, joten rakennukselle L porataan lisää 480 metriä ja rakennuksissa K ja J 757 metriä. Tämä aiheuttaa rakennukseen L lisäkustannuksen 16 800 € ja rakennuksiin K ja J 26 495 €. Nämä lisätään järjestelmien alkuperäisiin hinta-arvioihin.

8.2.2 Referenssikohteen 1 kannattavuuden laskeminen

Kertomalla sähkön hinta 0,12 €/kWh taulukoiden 4 ja 5 mukaisilla pumpun vuodessa kuluttaman sähköenergian arvoilla saadaan rakennusten lämmittämiseen maalämpöpumpulla kuluvan energian arvo vuodessa. Samoin kertomalla kaukolämmön hinta taulukoiden 4 ja 5 mukaisilla rakennusten energiankulutuksen vuotuisilla arvoilla saadaan rakennusten lämmittämiseen kaukolämmöllä kuluvan energian arvo vuodessa. Loput laskennassa tarvittavat lähtötiedot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Referenssikohteen 1 laskennan loput lähtötiedot.

Lähtötieto	Rakennus L		Rakennukset K ja J	
	Arvo	Yksikkö	Arvo	Yksikkö
Alkuinvestointi	141800	€	246495	€
Sähkön hinta	0,12	€/kWh	0,12	€/kWh
Kaukolämmön hinta	80	€/MWh	80	€/MWh
Käytetty laskentakorkokanta	4	%	4	%
Lämmityskulut maalämmöllä	7421,88	€/a	14880,96	€/a
Lämmityskulut kaukolämmöllä	18800	€/a	37600	€/a
Vuotuiset säästöt maalämmöllä	11378,10	€/a	22719,04	€/a

Maalämmön vuotuisia säästöjä voidaan pitää investoinnin vuotuisina nettotuottoina. Valitaan tarkasteluajanjaksoksi 20 vuotta. Sijoittamalla taulukon 6 arvot nettonykyarvon kaavaan (16) saadaan taulukon 7 mukaiset tulokset.

Taulukko 7. Referenssikohteen 1 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.

Rakennus L				Rakennukset K ja J			
a	€	a	€	a	€	a	€
0	-141800	11	-42122,24	0	-246495	11	-47465,38
1	-130859,50	12	-35015,50	1	-224649,77	12	-33275,13
2	-120339,79	13	-28182,10	2	-203644,74	13	-19630,67
3	-110224,68	14	-21611,52	3	-183447,60	14	-6510,99
4	-100498,62	15	-15293,65	4	-164027,27	15	6104,09
5	-91146,63	16	-9218,78	5	-145353,87	16	18233,97
6	-82154,34	17	-3377,56	6	-127398,68	17	29897,32
7	-73507,90	18	2239,00	7	-110134,08	18	41112,07
8	-65194,02	19	7639,54	8	-93533,50	19	51895,49
9	-57199,90	20	12832,36	9	-77571,40	20	62264,17
10	-49513,25			10	-62223,23		

Taulukon 7 mukaan rakennuksen L investoinnin nettonykyarvo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on lähes 13 000 € ja takaisinmaksuaika vuosien 17 ja 18 välissä. Rakenn-

nuksille K ja J nettonykyarvo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on jo yli 60 000 €. Takaisinmaksuaika rakennuksille K ja J nykyisellä laskentakorkokannalla on 14 ja 15 vuoden välissä.

Taulukon 7 tuloksissa ei kuitenkaan ole huomioitu energian hintojen nousua. Hintojen kasvu huomioidaan tarkasteluajanjaksolla kertomalla aina edellisen vuoden energian hinta kuvien 22 ja 23 mukaan arvioiduilla hinnan prosentuaalisella nousulla, mikä on sähkön hinnalle 2,7 % ja kaukolämmölle 1,9 %.

Myös järjestelmän ylläpitokustannukset tulee huomioida. Kompressorin uusiminen maksaa joitakin tuhansia euroja ja se tulee uusia ainakin kerran järjestelmän elinkaaren aikana. Myös joitakin muita osia joudutaan uusimaan. Arvioidaan kompressorin elinkaareksi 15 vuotta ja muille uusittaville osille 10 vuotta. Lisäksi arvioidaan muiden osien uusimiskustannuksiksi yhteensä 5 % pumpun käyttämän energian arvosta ja kompressorin uusimiseen 1/3 pumpun käyttämän energian arvosta. On huomioitava, että rakennuksissa K ja J pumppuja on kaksi, jonka johdosta kompressorien uusimiskustannus tuplataan. Lisäksi arvioidaan järjestelmän vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi 800 € vuodessa.

Koska kustannuserät tapahtuvat tulevaisuudessa, tulee näiden arvo diskontata nykyhetkeen. Tämän johdosta laskennassa niin vuosittaisen perushuollon hintaan kuin myös 10 sekä 15 vuoden välein tapahtuviin uusimiskustannuksiin lisätään inflaation 1,3 % aiheuttama kustannuslisä (SVT 2021). Tämän hetken hintatason mukaiset järjestelmän ylläpitokustannukset on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Rakennuksen L ja rakennusten K ja J kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.

Rakennus L	H	U	Arvo (€/a)	Aika (a)
- perushuolto	X		800	joka vuosi
- kompressori		X	2473,71	joka 15. vuosi
- muut uusittavat osat		X	371,09	joka 10. vuosi
Rakennukset K ja J	H	U	Arvo (€/a)	Aika (a)
- perushuolto	X		800	joka vuosi
- kompressori (2 kpl)		X	9920,63	joka 15. vuosi
- muut uusittavat osat		X	744,05	joka 10. vuosi

Taulukossa 8 H tarkoittaa huoltokustannusta ja U uusimiskustannusta. Huoltokustannukset vähennetään vuosittaisista nettotuotoista ja uusimiskustannukset vähennetään nettotuotoista arvioituina uusimisväleinä. Kun lisäksi huomioidaan energian hinnan nousu, saadaan taulukon 9 mukaiset tulokset.

Taulukko 9. Referenssikohteen 1 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.

Rakennus L				Rakennukset K ja J			
a	€	a	€	a	€	a	€
0	-141800,00	11	-41431,97	0	-246495,00	11	-39197,91
1	-130708,72	12	-33695,04	1	-224349,18	12	-22558,02
2	-120677,01	13	-26159,96	2	-203542,80	13	-6352,56
3	-110899,04	14	-18822,15	3	-183263,68	14	9428,47
4	-101369,11	15	-13862,10	4	-163499,90	15	15350,96
5	-92081,63	16	-6891,41	5	-144239,77	16	29787,10
6	-83031,15	17	-105,12	6	-125471,89	17	43841,18
7	-74212,31	18	6500,98	7	-107185,08	18	57521,98
8	-65619,88	19	12931,04	8	-89368,40	19	70838,14
9	-57248,74	20	18972,64	9	-72011,16	20	83364,06
10	-49344,57			10	-55605,52		

Vertaamalla taulukon 9 arvoja taulukon 7 arvoihin nähdään, että huomioimalla hintatason nousu sekä ylläpitokustannukset investointien nettonykyarvot tarkasteluajanjaksolla kasvavat. Myös rakennusten K ja J takaisinmaksuaika lyhenee. Rakennuksen L nettonykyarvo on 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla lähes 19 000 € ja rakennusten K ja J yli 80 000 €. Takaisinmaksuaika rakennuksen L järjestelmälle on vuosien 17 ja 18 välissä ja rakennuksille K ja J vuosien 13 ja 14 välissä.

Referenssikohte 1 on osaltaan erinomainen esimerkki siitä, kuinka tärkeää TRT-mittausten tekeminen on. Ensimmäisen poratun kaivon jälkeen tehty mittausta osoitti, että alueella lämpösaanto maasta ei ollutkaan niin suuri, mitä oli aluksi arvioitu. Tämän johdosta kaivoja porattiin syvemmälle riittävän lämmönsaannin takaamiseksi. Vaikka tämän takia porauskustannukset ja sitä kautta järjestelmän alkuinvestointikustannukset kasvoivat, on sen merkitys elinkaarikustannusten kannalta lopulta suuri. Liian matalaksi mitoitettujen kaivosten olisivat kentän toiminnan jatkuessa johtaneet moniin erilaisiin ongelmiin, kuten pumppujen käymiseen tehonsa ääriarjoilla jo ensimmäisinä toimintavuosina ja tätä kautta korkeisiin käyttökustannuksiin, energiakentän nopeaan viilenemiseen ja pahimmillaan jäätymiseen sekä mataliin COP-lukuihin.

8.3 Referenssikohteet 2 ja 3

Referenssikohteet 2 ja 3 sijaitsevat Varsinais-Suomessa ja kuuluvat laajaan 12 kerrostalon korttelihankkeeseen. Hankkeen kohteista osa on jo valmistunut. Referenssikohteet 2 kuuluu hankkeen vielä keskeneräisiin rakennuksiin, mutta kohde 3 on jo valmistunut.

Alun perin kortteli piti liittää kaukolämpöön, mutta muita vaihtoehtoja tarkastellessa huomattiin, että korttelin voi toteuttaa myös maalämmöllä. Kohde on täystehomitoitettu, eli kaikki korttelin lämpöenergia tuotetaan vuoden kylmimpinäkin päivinä maalämmöllä ilman lisälämmönlähteitä. Kaiken kaikkiaan kaivoja on alueella 78 ja niiden keskimääräinen syvyys on n. 350 metriä. Kentän suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta ja kaivojen välinen etäisyys 20 metriä. Järjestelmän COP-luku lämmitykselle on korkea, COP_H-luvun ollessa 5,0 ja käyttöveden lämmitykselle n. 3,0. Kohteessa käytetään vapaata jäähdytystä viilentämiseen kesäaikana. (Haastattelu 1, 18.3.2021)

Energiakaivojen ottotehoksi on saatu EED-simuloinneissa erinomaisia lukemia, simuloinneissa ottotehon ollessa jopa 110 kWh/m. Ilman simulointeja suunnittelun lähtötietona käytettiin arvoa 80 kWh/m. Maan jäähtyminen käyttöikänsä aikana on havaittu simuloinneissa oletettua pienemmäksi, mikä on mahdollistanut runsaan lämpösaannon maasta. Pääasiallisena syynä tähän on pidetty merialueen läheistä sijaintia, joka lämmittelee energiakenttää. Kesäaikana energiakenttä pääsee myös hieman palautumaan, kun kenttää käytetään tilojen jäähdyttämiseen ja lämmitysenergiaa menee tällöin vain kosteiden tilojen kuivattamiseen. (Haastattelu 1, 18.3.2021)

Kohteessa on useita erilaisia rakennuksia, joiden huoltokustannukset vaihtelevat 550-1500 € välillä kohteesta riippuen. Eniten vuosihuoltojen kustannuksiin vaikuttaa rakennuksen koko, huoltosopimuksen sisältö sekä rakennuksen käyttö. (Haastattelu 1, 18.3.2021)

Koska kortteli on kokonaisuutena hyvin laaja useamman kerrostalon kokonaisuus ja taloissa on monia kohdekohtaisia eroja, on koko korttelin elinkaarikustannusten arvioiminen vaikeaa. Tästä johtuen käytetään hankkeen kannattavuuden arvioimiseen referenssikohteiksi saatuja kahta korttelin erillistä asuinkerrostaloa.

8.3.1 Referenssikohteen 2 lähtötiedot

Kohteesta 2 saatu hintatieto ei pitänyt sisällään energiakaivojen porauskustannuksia. Tämän suuruus on arvioitu kertomalla kohteen kaivojen kokonaismäärä 78 kaivojen keskimääräisellä syvyydellä 350 m, jonka jälkeen porausmetrit on oletettu jaettavaksi tasan korttelin rakennusten kokonaismäärän kesken. Hinta-arviona on käytetty luvun 7.3.2 porauskustannusarvion 30-35 €/m keskiarvoa. Näin saadut porauskustannukset lisätään

arvioituun kokonaiskustannukseen. Referenssikohteesta 2 saadut lähtötiedot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Referenssikohteen 2 lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Lämmitetty nettoala	6250	m ²
Lämpöpumpun lämmöntuotto (lämmitys)	232800	kWh
Lämpöpumpun COP-luku (lämmitys)	5,0	
Ilmaisenergia (lämmitys)	186240	kWh
Lämpöpumpun sähkönkulutus (lämmitys)	46560	kWh
Lämpöpumpun lämmöntuotto (lkv)	162000	kWh
Lämpöpumpun COP-luku (lkv)	3,0	
Ilmaisenergia (lkv)	108000	kWh
Lämpöpumpun sähkönkulutus (lkv)	54000	kWh
Arvioitu hinta	158400	€
Arvioitu hinta porauskustannuksista	73937,5	€
Kokonaisenergiankulutus (lämmitys+lkv)	394,8	MWh
Pumppujen teho yhteensä	220	kW

Toisin kuin referenssikohteeseen 1 saaduissa tiedoissa, kohteen 2 tiedoissa lämmityksen ja käyttöveden kustannukset on annettu erikseen. Tämä johtuu pitkälti siitä, että kohteen täystehomitoitetussa järjestelmässä COP-luvut eroavat lämmityksen ja lämpimän käyttöveden teon välillä huomattavasti. Kohteeseen 1 verrattuna kohteen 2 järjestelmä pystyy siis tuottamaan lämpöä rakennukseen hyvällä hyötysuhteella myös vuoden kylmimpinä päivinä, kun taas kohteessa 1 COP-luku on heikompi kovimpien talvipakkasten aikaan pumpun toimiessa tehonsa ääriarjoilla.

8.3.2 Referenssikohteen 2 kannattavuuden laskeminen

Pumpun kuluttama energia lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tekemiseen kerrotaan jälleen sähkön hinnalla, jotta saadaan pumpun kuluttaman energian arvo. Lämmityskulut kaukolämmöllä saadaan kertomalla rakennuksen energiankulutus kaukolämmön hinnalla. Taulukkoon 11 on koottu referenssikohteen 2 kannattavuuden laskentaa varten tarvittavat loput lähtötiedot.

Taulukko 11. Referenssikohteen 2 laskennan loput lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Alkuinvestointi	232337,50	€
Sähkön hinta	0,12	€/kWh
Kaukolämmön hinta	80	€/MWh
Käytetty laskentakorkokanta	4	%
Lämmityskulut maalämmöllä	12067,20	€/a
Lämmityskulut kaukolämmöllä	31584	€/a
Vuotuiset säästöt maalämmöllä	19516,80	€/a

Sijoittamalla vuotuiset säästöt jälleen nettotuotoiksi, saadaan 4 % laskentakorkokannalla referenssikohteen 2 nettonykyarvoksi 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla taulukon 12 mukainen arvo, kun energian hinnan nousua ja ylläpitokustannuksia ei huomioida.

Taulukko 12. Referenssikohteen 2 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.

Referenssikohte 2			
a	€	a	€
0	-232337,50	11	-61361,03
1	-213571,35	12	-49170,89
2	-195526,97	13	-37449,61
3	-178176,60	14	-26179,14
4	-161493,56	15	-15342,16
5	-145452,17	16	-4921,98
6	-130027,76	17	5097,43
7	-115196,60	18	14731,47
8	-100935,86	19	23994,97
9	-87223,62	20	32902,18
10	-74038,77		

Referenssikohteen 2 maalämpöjärjestelmän nettonykyarvo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on 4 % laskentakorkokannalla lähes 33 000 €. Takaisinmaksuaika on vuosien 16 ja 17 välissä.

Otetaan jälleen huomioon ylläpitokustannukset ja hintatason nousu. Sähkön ja kaukolämmön hinnan nousut saadaan aiemmin laskettuna kuvista 22 ja 23. Arvioidaan ylläpitokustannukset aiempien laskelmien mukaisesti: pumpun kuluttaman energian arvosta kompressorin uusimiskustannuksiksi arvioidaan 1/3 ja muiden osien uusimiskustannuksiksi 5 %. Huomioidaan, että pumppuyksikköjä on kaksi, jonka johdosta oletetaan molemmat kompressorit vaihdettavan tarkasteluajanjaksolla kerran. Vuosittaisina huolto-

kustannuksina käytetään lähtötietona saadun huoltokustannusten vaihteluvälin keskiarvoa. Laskennassa tulee huomioida myös inflaation 1,3 % vaikutus ylläpitokustannuksiin. Nämä tiedot on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Referenssikohteen 2 kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.

Referenssikohtede 2	H	U	Arvo (€/a)	Aika (a)
- perushuolto	X		1025,00	joka vuosi
- kompressori (2 kpl)		X	8044,00	joka 15. vuosi
- muut uusittavat osat		X	603,36	joka 10. vuosi

Taulukossa 13 H tarkoittaa huoltokustannusta ja U uusimiskustannusta. Huomioiden ylläpitokustannukset ja hintatason nousu, referenssikohteen 2 maalämpöjärjestelmän nettonykyarvo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Referenssikohteen 2 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.

Referenssikohtede 2			
a	€	a	€
0	-232337,50	11	-57603,97
1	-214306,00	12	-44001,84
2	-196724,51	13	-30749,88
3	-179582,93	14	-17840,12
4	-162871,41	15	-10616,64
5	-146580,27	16	1631,88
6	-130700,08	17	13561,07
7	-115221,56	18	25178,20
8	-100135,68	19	36490,42
9	-85433,56	20	47152,76
10	-71564,39		

Ylläpitokustannukset ja hintatason nousu huomioituna investoinnin takaisinmaksuaika on vuosien 15 ja 16 välissä, nettonykyarvon ollessa 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla yli 47 000 €. Taulukon 14 arvoja verrattuna taulukkoon 12 nähdään, että 4 % laskentakorkokannalla takaisinmaksuaika lyhenee ja nettonykyarvo kasvaa, kun huomioidaan energian hinnan nousu ja ylläpitokustannukset, vaikka inflaatio nostaakin ylläpitokustannuserien suuruutta.

8.3.3 Referenssikohteen 3 lähtötiedot

Referenssikohteen 3 lähtötiedot saatiin eri taholta kuin samassa korttelissa olevan referenssikohteen 2. Lisäksi kohde on jo valmistunut, jonka johdosta osa saaduista tiedoista perustuu energiatodistukseen. Saaduissa lähtötiedoissa oli siis paljon eroja verrattuna referenssikohteeseen 2.

Kohteen energiatodistuksen mukaan lämpöpumppujen lämmönlähteestä ottaman energian määrä on 231 549 kWh. Koska tarkempia tietoja tästä kuluvista osuuksista tilojen ja käyttöveden lämmitykseen ei ollut, jaetaan ilmaisenergian määrä samassa korttelissa olevan referenssikohteen 2 ilmaisenergian tilojen ja käyttöveden lämmitykseen kuluvien osuuksien keskinäisen suhteen mukaan.

Kohteen maalämpöjärjestelmän kokonaiskustannusarvio pohjautuu porauskustannusarvioihin ja siitä lämmönjakohuoneeseen asti tehtävien järjestelmän osakokonaisuuksien asennus- ja hankintakustannuksiin. Pumppuyksiköt eivät sisällyneet saatuun kustannusarvioon. Pumppujen koot olivat kuitenkin samat kuin referenssikohteessa 2, jonka johdosta pumppuyksiköiden kustannusarviona voidaan käyttää kohteen 2 pumppujen arvioitua kustannusta. Referenssikohteen 3 lähtötiedot on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Referenssikohteen 3 lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Lämmitetty nettoala	6321	m ²
Ilmaisenergia	231549	kWh
Lämpöpumpun COP-luku (lämmitys)	5,0	
Lämpöpumpun COP-luku (lkv)	3,0	
Lämpöpumpun lämmöntuotto (lämmitys)	183200	kWh
Ilmaisenergia (lämmitys)	146560	kWh
Lämpöpumpun sähkönkulutus (lämmitys)	36640	kWh
Lämpöpumpun lämmöntuotto (lkv)	127484	kWh
Ilmaisenergia (lkv)	84989	kWh
Lämpöpumpun sähkönkulutus (lkv)	42495	kWh
Arvioitu hinta	144768,80	€
Arvioitu hinta pumppuyksiköistä	60000	€
Kokonaisenergiankulutus (lämmitys+lkv)	310,7	MWh
Pumppujen teho yhteensä	220	kW

8.3.4 Referenssikohteen 3 kannattavuuden laskeminen

Aiempien referenssikohteiden tavoin lasketaan aluksi sijoituksen netto nykyarvo ilman energian hinnan nousua ja ylläpitokustannusten vaikutusta. Taulukkoon 16 on koottu loput lähtötiedot ja taulukossa 17 on näin saatu netto nykyarvo.

Taulukko 16. Referenssikohteen 3 laskennan loput lähtötiedot.

Lähtötieto	Arvo	Yksikkö
Alkuinvestointi	204768,80	€
Sähkön hinta	0,12	€/kWh
Kaukolämmön hinta	80	€/MWh
Käytetty laskentakorkokanta	4	%
Lämmityskulut maalämmöllä	9496,16	€/a
Lämmityskulut kaukolämmöllä	24854,72	€/a
Vuotuiset säästöt maalämmöllä	15358,56	€/a

Taulukko 17. Referenssikohteen 3 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajaksolla, kun energian hinnan nousu sekä ylläpitokustannukset jätetään huomiotta.

Referenssikohte 3			
a	€	a	€
0	-204768,80	11	-70220,49
1	-190000,95	12	-60627,58
2	-175801,10	13	-51403,63
3	-162147,40	14	-42534,44
4	-149018,84	15	-34006,38
5	-136395,22	16	-25806,32
6	-124257,13	17	-17921,64
7	-112585,88	18	-10340,23
8	-101363,53	19	-3050,40
9	-90572,81	20	3959,04
10	-80197,12		

Taulukon 17 mukaan investoinnin takaisinmaksuaika on vuosien 19 ja 20 välissä ja on vuoden 20 lopussa lähes 4000 €, kun ylläpitokustannukset ja energian hinnan nousu jätetään huomiotta.

Huomioimalla energian hinnan nousu ja ylläpitokustannukset laskennassa saadaan realistisempi kuva investoinnin kannattavuudesta. Arvioidaan ylläpitokustannusten suuruus samalla tavalla, kuin referenssikohteiden 1 ja 2 kohdalla. Yhden kompressorin uusimisen osuus on 1/3 pumpun kuluttaman energian arvosta ja muiden uusittavien osien uusimiskustannus 5 % samasta pumpun kuluttaman energian määrästä. Perushuollon kustannus saadaan kohteen energiasuunnittelijan arvioiman huoltokustannusten vaihteluvälin keskiarvosta. Ylläpitokustannuksissa huomioidaan inflaation 1,3 % vaikutus, ja uusimiskustannukset toteutetaan arvioituina ajankohtina. Taulukossa 18 on esitetty laskentaan tarvittavat ylläpitokustannukset.

Taulukko 18. Referenssikohteen 3 kootut ylläpitokustannukset nykyhetken arvoissa.

Referenssikohte 3	H	U	Arvo (€/a)	Aika (a)
- perushuolto	X		1025,00	joka vuosi
- kompressori (2 kpl)		X	6330,77	joka 15. vuosi
- muut uusittavat osat		X	474,81	joka 10. vuosi

Huomioiden ylläpitokustannukset ja hintatason nousu, referenssikohteen 3 maalämpöjärjestelmän nettonykyarvo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Referenssikohteen 3 nettonykyarvot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla, kun energian hintojen nousu sekä ylläpitokustannukset huomioidaan.

Referenssikohte 3			
a	€	a	€
0	-204768,80	11	-69322,52
1	-190791,80	12	-58777,73
2	-177163,41	13	-48504,36
3	-163875,82	14	-38496,26
4	-150921,42	15	-32959,41
5	-138292,74	16	-23463,91
6	-125982,47	17	-14215,99
7	-113983,46	18	-5210,02
8	-102288,71	19	3559,54
9	-90891,37	20	11821,12
10	-80145,03		

Ylläpitokustannukset ja hintatason nousu huomioituna investoinnin takaisinmaksuaika on vuosien 18 ja 19 välissä, nettonykyarvon ollessa 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla lähes 12 000 €. Verrattuna taulukkoon 17 ylläpitokustannukset ja hintatason nousu huomioituna takaisinmaksuaika lyhenee ja nettonykyarvo kasvaa tarkasteluajana.

8.4 Nettonykyarvot pidemmällä tarkasteluajanjaksolla

Tähän mennessä referenssikohteiden kannattavuuden tarkasteluajanjaksona on pidetty 20 vuotta. Saaren (2004) mukaan elinkaarikustannuksia laskettaessa voidaan kuitenkin käyttää tarkasteluajanjaksona asuinrakennuksen taloudellista pitoaikaa, mikä vastaa asuinrakennuksille 30-40 vuotta.

Tarkastellaan referenssikohteiden maalämpöinvestointien kannattavuutta vielä pidemmällä ajanjaksolla käyttäen samaa 4 % nimellistä laskentakorkokantaa huomioiden sekä ylläpitokustannukset, inflaation vaikutus ja energian hinnan nousu. Tulokset on koottu taulukkoon 20.

Taulukko 20. Investointien nettonykyarvot vuosina 20, 25, 30, 35 ja 40 alkuinvestoinnista.

Nettonykyarvo (€)				
Vuosi	Rak. L	Rak. K ja J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
20	18972,64	83364,06	33222,68	11821,12
25	47818,83	143102,94	81976,94	51229,99
30	71649,00	190318,03	120741,58	82559,04
35	93431,02	235439,50	157924,39	112468,17
40	112134,73	274204,10	190029,69	138240,97

Taulukosta 20 nähdään, että 25 vuoden tarkasteluajanjaksolla referenssikohteen 3 kannattavuus on jo suurempi kuin referenssikohteen 1 rakennuksen L. Referenssikohteen 1 rakennusten K ja J nettonykyarvo 40 vuoden jälkeen on jo yli 270 000 €.

8.5 Herkkyysanalyysit

Seuraavissa taulukoissa 21-23 on tutkittu investointien nettonykyarvoja laskentakorkokannalla 4 %, kun energian hinnan kehitystä on muokattu. Kun vuosia on jätetty välistä, on tämä erotettu taulukossa kaksoisviivalla. Ensimmäisessä taulukossa 21 tutkitaan hintojen muutoksen vaikutusta takaisinmaksuaikoihin, kun sekä sähkön että kaukolämmön hinnan prosentuaalisen nousun oletetaan olevan vuosittain 3 %.

Taulukko 21. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön ja energian hinnan vuotuinen nousu on 3 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
12	-21908,65	991,48	-23137,19	-42344,11
13	-12441,87	20460,54	-6652,23	-29525,44
14	-3056,83	39751,68	9686,13	-16818,12
15	4601,21	52265,96	20527,12	-8433,39
16	13824,42	71205,68	36575,56	4053,51
20	49705,25	144809,67	98995,16	52641,08
30	133296,00	313571,66	242468,79	164436,16

Taulukko 21 osoittaa, että energian hinnan nousun muuttamisella on merkittävä vaikutus investointien takaisinmaksuaikoihin, jotka pienenevät kohteesta riippuen 2-3 vuodella.

Referenssikohde 3 on jo 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla nettonykyarvoltaan referenssikohteen 1 rakennusta L korkeampi. Vertaamalla taulukkoa 20 taulukkoon 21 huomataan, että nettonykyarvot ovat huomattavasti suurempia 30 vuoden tarkasteluajanjaksolla. Referenssikohteen 1 rakennusten K ja J sekä referenssikohteen 2 nettonykyarvot 30 vuoden tarkasteluajanjaksolla ovat jo suuremmat kuin niiden alkuinvestoinnit.

Seuraavaksi tutkitaan vaikutusta takaisinmaksuaikoihin sekä nettonykyarvoihin, kun energian hinnan nousuna käytetään 4 %. Tulokset on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön ja energian hinnan vuotuinen nousu on 4 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
12	-13668,82	17444,21	-9003,47	-31220,79
13	-2859,00	39594,95	9785,19	-16589,09
14	7965,57	61760,44	28592,76	-1938,49
15	17158,70	77339,88	42066,88	8518,53
20	71339,79	188008,01	136104,71	81846,52
30	179743,13	406314,06	322139,18	227137,22

Taulukkoa 22 verratessa taulukkoon 21 huomataan, että energian hinnan noustessa voimakkaammin myös takaisinmaksuajat lyhenevät. Referenssikohteen 1 rakennus L sekä referenssikohde 3 ovat nyt myös 30 vuoden tarkastelujaksolla nettonykyarvoltaan alkuinvestointejaan selkeästi suurempia.

Viimeisenä tarkastellaan vaikutusta nettonykyarvoihin hieman eri tavalla. Normaalityypisessä oletettiin suorasähkön hinnan kasvavan kaukolämmön hintaa nopeammin, mutta taulukossa 23 oletetaan kaukolämmön hinnan kasvavan suorasähkön hintaa nopeammin. Taulukossa 23 sähkön hinnan oletetaan nousevan 2 % ja kaukolämmön hinnan 5 % vuodessa.

Taulukko 23. Investointien nykyarvot 4 % laskentakorkokannalla, kun sähkön hinnan vuotuinen nousu on 2 % ja kaukolämmön 5 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
11	-17593,78	8523,40	-17273,16	-37407,62
12	-3300,35	37679,21	7302,97	-18229,76
13	11324,74	67483,37	32423,86	1381,04
20	138335,16	322132,19	247216,75	169287,80
30	327701,02	702508,17	567703,85	420388,22

Kuten olettaa saattaa, taulukon 23 mukaan takaisinmaksuajat ovat kaikkein pienimpiä, kun kaukolämmön hinta kasvaa suorasähkön hintaa nopeammin. Tässä tapauksessa rakennusten K ja J netto nykyarvo on alkuinvestointiaan suurempi jo 20 vuodessa. Investointien takaisinmaksuajat vaihtelevat kaikissa kohteissa 11-13 vuoden välillä.

Seuraavissa taulukoissa 24-26 on tutkittu investointien nykyarvoja laskentakorkokannoilla 2 %, 3 % ja 5 %, kun sähkön hinnan nousuna on pidetty 2,7 % ja kaukolämmön hinnan nousuna 1,9 %. Kun vuosia on jätetty välistä, on tämä erotettu taulukossa kaksoisviivalla. Ensimmäisenä taulukossa 24 tutkitaan vaikutusta netto nykyarvoihin, kun laskentakorkokantana on käytetty 5 %.

Taulukko 24. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 5 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
16	-16544,36	10218,42	-14970,75	-36325,65
17	-10776,95	22162,45	-4832,59	-28466,19
18	-5216,14	33678,53	4946,35	-20885,25
19	144,94	44780,90	14377,94	-13573,61
20	5134,16	55124,94	23183,02	-6751,11
21	10115,48	65440,85	31954,03	48,35
30	46555,27	139303,00	95040,99	48917,12

Taulukon 24 arvoista nähdään, että käytettäessä 5 % laskentakorkokantaa referenssi-kohteen 3 takaisinmaksuaika onkin 21 vuotta. Netto nykyarvo 21 vuoden tarkasteluajanjaksolla on niukasti positiivinen. Referenssi-kohteen 1 rakennukset K ja J näyttävät erittäin kannattavana myös 5 % laskentakorkokannalla, sillä netto nykyarvo on yli 55 000 € 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla takaisinmaksuajan ollessa 16 vuotta. Alla olevassa taulukossa 25 laskentakorkokantana on käytetty vastaavasti 3 %.

Taulukko 25. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 3 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
13	-19037,10	7829,68	-17265,87	-38051,94
14	-10619,57	25262,75	-2486,23	-26594,25
15	-4246,08	34772,57	5863,79	-20193,89
16	3889,97	51622,14	20160,03	-9110,93
17	11887,68	68185,03	34218,72	1787,85
30	101998,66	251962,67	190956,10	123222,63

Verrattaessa taulukkoa 25 taulukkoon 24 nähdään, miten investointien nettonykyarvot kasvavat huomattavasti 30 vuoden tarkasteluajanjaksolla. Myös takaisinmaksuajat lyhenevät kohdekohtaisesti 3-4 vuodella. Taulukossa 26 laskentakorkokantaa on vielä pienennetty 2 %:iin.

Taulukko 26. Investointien nykyarvot, kun laskentakorkokanta on 2 %.

Investointien nykyarvot				
Vuosi	Rak. L	Rak. K j J	Ref. kohde 2	Ref. kohde 3
0	-141800	-246495	-232338	-204769
12	-20293,96	5230,90	-19488,23	-39775,72
13	-10575,65	25358,36	-2430,89	-26552,29
14	-926,18	45342,82	14511,80	-13417,71
15	6451,72	56351,32	24177,73	-6008,70
16	15962,29	76047,49	40889,20	6946,63
30	138963,40	326971,93	254847,30	172716,85

Taulukon 26 arvoista nähdään, miten nettonykyarvot kasvavat ja takaisinmaksuajat lyhenevät entisestään, kun laskentakorkokantaa pienennetään. Verrattaessa taulukoita 24-26 taulukoihin 21-23 voidaan kuitenkin nähdä, että laskentakorkokantaa muuttamalla ei kuitenkaan saada yhtä suuria muutoksia nettonykyarvoihin tai takaisinmaksuaikoihin, kuin energian hintoja muuttamalla. Vaikka energian hinnan muutoksena käytettiin pienintä vaihtoehtoa 3 % vuodessa sekä sähkön että kaukolämmön osalta, saatu vaikutus takaisinmaksuaikoihin sekä nettonykyarvoihin vastaa lähes pienintä käytettyä laskentakorkokantaa 2 %. Näin ollen voidaan siis olettaa maalämmön kannattavuuden olevan herkempi energian hinnan muutoksille, kuin valitulle laskentakorkokannalle.

9. TULOSTEN ARVIOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa 8 tarkasteltiin työtä varten saatujen neljän referenssikohteen maalämpöinvestointien nettonykyarvoja 4 % laskentakorkokannalla. Energian hinnaksi arvioitiin suorasähkön osalta 0,12 €/kWh ja kaukolämmön osalta 80 €/MWh ja näiden vuosittaiseksi nousunopeudeksi sähkölle 2,7 % ja kaukolämmölle 1,9 %.

Edellisen luvun lopussa tehtiin lisäksi herkkyyssanalyysyjä tutkien energian hinnan nousun sekä laskentakorkokannan muuttamisen vaikutuksia. Alla olevissa alaluvuissa on arvioitu tuloksia kriittisesti, pohdittu tuloksiin vaikuttavia tekijöitä sekä esitetty näiden pohjalta johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset.

9.1 Referenssikohteiden tulosten arviointi

Tulosten mukaan kohteiden maalämpöinvestointien takaisinmaksuajat ovat 18 vuotta, 14 vuotta, 16 vuotta ja 19 vuotta. Nettonykyarvoltaan suurin 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla on referenssikohteen 1 rakennukset K ja J, joiden nettonykyarvo on tarkasteluajanjaksolla yli 83 000 €.

Referenssikohteeseen 1 oli pääkaupunkiseudulla sijaitseva korttelihanke, joka jaettiin kahteen pienempään kohteeseen rakennukseen L ja rakennuksiin K ja J. Rakennukseen L lämmitysenergia saatiin kuudesta kaivosta ja rakennuksiin K ja J yhteisistä 11 kaivosta. Kohteista saadut lähtötiedot olivat suunnitteluarvoja ennen tarvittua kaivojen syventämistä, jonka johdosta arvioituihin kokonaiskustannuksiin lisättiin vielä kaivojen syventämisestä aiheutuneet porauskustannukset. Lisäkustannuksista huolimatta rakennuksen L takaisinmaksuajaksi saatiin 18 vuotta ja nettonykyarvoksi 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla lähes 19 000 €. Rakennuksille K ja J tulokset olivat vielä paremmat, kun takaisinmaksuaikana oli 14 vuotta ja nettonykyarvo 20 vuodessa yli 83 000 €. Syynä tälle voidaan pitää kaukolämmön hinnan aiheuttamia suhteessa suurempia kustannuksia, kun energian hinnan nousu on sama molemmille kohteille. Näin myös vuotuiset säästöt kasvavat vuosittain suuremmiksi suhteessa rakennukseen L, mikä puolestaan johtaa nopeampaan takaisinmaksuaikaan, vaikka alkuinvestointikustannus onkin suurempi. Kohteet osaltaan osoittavat todeksi siis sen, että maalämpö on sitä kustannustehokkaampi, mitä suuremmasta kohteesta on kyse (Banks 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013).

Laskennassa on toisaalta jätetty huomioimatta kohteiden osatehomitoituksesta johtuen lisälämmön tuottamisen osuus vuoden kylmimpinä päivinä. Lähtötiedoissa tämän suuruudeksi on oletettu rakennuksessa L vain 5 kWh ja rakennuksissa K ja J 10 kWh, mikä

osoittaa, että osatehomitoitetun järjestelmän tehopeitto on lähes maksimaalinen. Vuosittaisia lisäkustannuksia aiheutuu tarvittavan lisälämmön tuottamisesta maalämpöpumpujen sähkövastuksilla, mutta mitoituksessa tämän osuus on arvioitu niin pieneksi, että sen vaikutus vuosittaisiin kustannuksiin on lähes olematon. Lähtötiedot perustuvat referenssikohteen suunnitteluarvoihin, ja todellisia kustannukset lisälämmön tuottamisesta riippuvat hyvin paljon siitä, kuinka tarkasti osatehoisen järjestelmän mitoittamisessa on onnistuttu. Mikäli kaivot ovat syventämisestä huolimatta mitoitettu liian lyhyiksi, nousee tarvittavan lisälämpöenergian määrä ja tätä kautta vuosittaiset elinkaarikustannukset. Koska kuitenkin TRT-mittausten perusteella kaivoja syvennettiin jo useita metrejä riittävän lämmönsaannin varmistamiseksi, voidaan tuloksia pitää melko luotettavana.

Referenssikohteet 2 ja 3 taas sijaitsivat Varsinais-Suomessa. Merkittävimpänä erona referenssikohteeseen 1 oli, että kohteet 2 ja 3 olivat täystehomitoitettuja. Referenssikohteiden 2 ja 3 huoneistoalat ovat isommat kuin referenssikohteen 1 rakennuksessa L, mikä johtaa myös suurempaan lämmitysenergian tarpeeseen ja toisaalta myös alkuinvestointikustannukseen, koska järjestelmän täytyy olla tällöin tehokkaampi. Referenssikohteen 2 takaisinmaksuajaksi saatiin 16 vuotta ja nettonykyarvoksi 20 vuoden ajanjaksolla yli 47 000 €. Referenssikohteen 3 takaisinmaksuaika on 19 vuotta ja nettonykyarvo 20 vuodessa lähes 12 000 €.

Vaikka osin täystehomitoituksesta johtuen pumpun kuluttaman energian määrä onkin hieman suurempi, huomataan taulukon 20 arvoista, miten referenssikohteen 3 nettonykyarvo on kuitenkin rakennusta L suurempi, kun tarkasteluajanjaksoksi valitaan tarpeeksi pitkä jakso. Pääasiallinen syy on sama kuin vertailtaessa referenssikohteen 1 rakennuksia K ja J rakennukseen L, jolloin kaukolämmön hinta nousee suhteessa enemmän energiantarpeen ollessa suurempi. Näin referenssikohteen 3 kohdalla tämä johtaa niin ikään suurempiin vuosittaisiin säästöihin maalämpöjärjestelmällä.

Virhettä referenssikohteiden 2 ja 3 kohdalla aiheuttavat osittain puutteelliset lähtötiedot. Referenssikohteen 2 kohdalla ei saatu tietoa rakennukseen lämpöä tuottavien kaivojen määrästä eikä arviota porauskustannuksista. Tämä arvioitiin korttelin kaikkien kaivojen määrän sekä lähteiden ja haastattelujen pohjalta saadun metriporaushinnan mukaisesti. Referenssikohteen 3 kohdalla taas saatiin tietoa kaivojen arvioidusta porauskustannuksesta sekä asennustöiden hinnasta, mutta pumppujen lämmitysenergian tuotosta ei saatu tietoa. Tähän sovellettiin referenssikohteen 3 energiatodistusta, josta saatiin maasta kerätyn ilmaisenergian määrä. Ilmaisenergian määrä jaettiin samassa suhteessa referenssikohteen 2 ilmaisenergian tilojen lämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen jakautuvassa suhteessa. Ratkaisua voidaan pitää tässä hyvin suuntaa antavana, sillä

referenssikohteet sijaitsevat samalla alueella, niiden huoneistoalat ovat lähellä toisiaan ja molempien järjestelmien pumppuyksiköt ovat nimellisteholtaan yhtä suuria.

9.2 Herkkyysanalyysien tulosten arviointi

Aluksi jokaisesta kohteesta laskettiin takaisinmaksuajat sekä nettonykyarvot ilman ylläpitokustannusten sekä energian hinnan nousun vaikutusta. Takaisinmaksuajat olivat tällöin pidemmät. Herkkyysanalyysien perusteella energian hinnan nousun ollessa molemmille sama 3-4 % investointien takaisinmaksuajat lyhenevät kohdekohtaisesti jopa viidellä vuodella. Olettaessa kaukolämmön hinnan nousun olevan nopeampaa investointien takaisinmaksuajat lyhenivät entisestään. Energian hinnan noustessa ja erityisesti kaukolämmön hinnan noustessa siis maalämpöjärjestelmät tulevat edelleen kannattavammiksi.

Haastattelujen pohjalta kävi ilmi, että maalämpöjärjestelmien ylläpitokustannukset ovat hyvin pieniä ja tulostenkaan valossa niillä ei ole siksi merkittävää vaikutusta takaisinmaksuaikoihin. Esimerkiksi uusimiskustannuksia aiheutuu noin 10-15 vuoden välein. Vaikka käytetty inflaatio 1,3 % nostikin esimerkiksi kompressorin kohdalla uusimiskustannusta 15 vuoden päässä tapauskohtaisesti jopa 2000 €:lla, on ylläpitokustannusten kokonaisvaikutus vuosittaisiin tuottoihin lopulta melko vähäinen. Näin merkittävämpi tekijä vuosittaisten kustannusten kannalta on energian hinnan nousu.

Käytetyllä laskentakorkokannalla oli niin ikään vaikutusta. Pienennettäessä käytettyä laskentakorkokantaa takaisinmaksuajat lyhenivät. Esimerkiksi taulukon 26 mukaan laskentakorkokannalla 2 % oli lähes samanlainen vaikutus kuin energian hinnan nousulla 3 % taulukossa 21. Alkuperäisissä laskelmissa käytettiin 4 % nimellistä laskentakorkokantaa KTI:n asuntomarkkinakatsauksen (2021) mukaisesti. Katsauksen mukaan laskentakorkokantaa voidaan pitää uudisrakennuksille sopivana, sillä se vastaa markkinakatsauksen mukaan keskimääräistä kassavirralle asetettua tuottovaatimusta.

9.3 Muita huomioita

Tuloksissa on huomattava, että laskennassa ei ole huomioitu rakennusten kaukolämpöön liittämistä aiheutuvia kustannuksia. Tästä aiheutuvat kustannukset voitaisiin vähentää maalämpöjärjestelmien alkuinvestointikustannuksista, jolloin kaikkien kohteiden takaisinmaksuajat ja nettonykyarvot tulisivat nousemaan. Laskelmat pohjautuvat myös oletukseen, että kaukolämmöstä ei aiheudu lainkaan huolto- ja ylläpitokustannuksia. Myös tämä vaikuttaa tuloksiin jonkin verran, ja tekee maalämmöstä kannattavamman vaihtoehdon.

Tuloksissa keskitytään myös vain alkuinvestoinnista ja elinkaarikustannuksista aiheutuviin näkyviin kustannuksiin. Vaikeampaa on sen sijaan arvioida ns. aineettomien tekijöiden kannattavuutta. Energiatehokkaiden ja kestävästä kehitystä tukevien ratkaisujen valitseminen rakennukseen on huomattu voivan tuoda hankkeen eri osapuolille imagollisia hyötyjä (Finnegan 2018). Maalämpö on erittäin ympäristöystävällinen ja vähähiilinen lämmöntuottovaihtoehto, mikä on ollut myös yksi tekijä sen suosion kasvuun viime vuosina (Banks 2012; Motiva 2012; Juvonen & Lapinlampi 2013; Haastattelu 5, 21.4.2021). Pelkästään, että tulosten mukaan investointien takaisinmaksuajat ovat rakennuksen elinkaareen nähden lyhyitä, luo maalämmön valitseminen lisäksi kestävästä kehityksen mukaisia ja sosiaalisia etuja käyttäjilleen sekä omistajilleen.

Laskennassa käytetty tarkasteluajanjakso investointien kannattavuudelle oli 20 vuotta, mutta Saaren (2004) mukaan on myös perusteltua käyttää tarkasteluajanjaksona asuinrakennusten elinkaaren ajalle tyypillisempää 30-40 vuotta. Tähän verrattuna tarkasteluajanjaksona olisi voitu käyttää myös pidempiä aikoja ja investoinnit näkyvät siksi asuinrakennuksen elinkaareen nähden kannattavammilta. Huomioitavaa pidemmissä tarkasteluajanjaksoissa on, että epävarmuus esimerkiksi hintatason, hintojen nousun ja inflaation suhteen lisääntyy, jonka johdosta herkkyys energian hinnan ja laskentakorkokantojen muutoksille voi lisääntyä, minkä takia investointien kannattavuuden tarkasteleminen ei ole täysin suoraviivaista.

9.4 Johtopäätökset, tutkimuskritiikki ja jatkotutkimusehdotukset

Tulosten pohjalta voidaan sanoa, että maalämpöjärjestelmiin investoiminen on kannattava sijoitus myös uudisrakenteisissa asuinrakennuksissa, kun vertailukohtana on rakennuksen kaukolämpöön liittäminen. Kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi energian hintojen nousunopeus ja valittu laskentakorkokanta. Mitä jyrkempää energian hinnan nousu ja mitä pienempää laskentakorkokantaa käytetään, sitä kannattavampi sijoitus on. Investoinnit ovat kannattavia ainakin 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla.

Kun tarkastellaan referenssikohteiden vuosittaisia säästöjä maalämpöjärjestelmillä, huomataan jokaisessa vähintään 10 000 €:n vuosittaisia säästöjä lämmityskustannuksissa. Rakennuksen kokonaiskustannuksissa myös sen lämmitysjärjestelmällä on merkittävä osuus sen elinkaaren aikaisiin kustannuksiin, joten valitsemalla maalämpö rakennuksen lämmitysmuodoksi voidaan tehdä huomattavia kustannussäästöjä rakennuksen elinkaarikustannuksissa. Maalämmön ylläpitokustannukset ovat myös hyvin pienet sen elinkaaren aikana, sillä säännöllisesti vaihdettavia tai usein huoltoa vaativia osia on vähän. Maalämpöjärjestelmissä kustannussäästöt perustuvat siis sen huomattaviin käytön aikaisiin

elinkaarikustannussäästöihin, ja tulosten nojalla kustannussäästöjä voidaan tehdä myös valitsemalla tämä lämmitysmuoto uusiin asuinkerrostaloihin.

Tuloksissa ei huomattu eroja riippuen siitä, onko järjestelmä osateho- vai täystehomitoitettu. Merkittävä tekijä kustannussäästöjen näkökulmasta on osatehoisessa järjestelmässä sen mitoittamisen tarkkuudella. Mikäli osatehoinen järjestelmä onnistutaan mitoittamaan niin, että vuoden aikana tarvittavan lisälämmityksen määrä on hyvin pieni, on sen aiheuttamien elinkaarikustannusten suuruus myös hyvin pieni. Haastavaksi erityisesti osatehomitoitetun järjestelmän suunnittelun tekee rakennuksen käyttäjien toiminta, joiden osuutta lämmitysenergian tarpeeseen on vaikea ennakoida suunnitteluvaiheessa (Haastattelu 2, 23.3.2021).

Referenssikohteiden mukaan maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ovat suhteessa korkeammat täystehomitoitetussa järjestelmässä, mutta ne voivat olla kannattavampi vaihtoehto pitkällä aikavälillä, jos osatehomitoitetussa järjestelmässä tarvittavan lisälämmön määrä on oletettua suurempi. Mikäli järjestelmän investointikustannukset halutaan pitää mahdollisimman pieninä, voi olla järkevämpää valita osatehomitoitettu järjestelmä, mutta tällöin korostuu järjestelmän tehopeiton optimointi oikeanlaiseksi, jotta lisälämmönlähteistä saatavan lämmitysenergian osuus pysyy mahdollisimman pienenä. Nykyään lämpöpumpputeknologian kehittyessä markkinoille on tullut ns. invertteriohjatutuja lämpöpumppuja, joiden toiminta perustuu pumpun optimaalisen tehoalueen etsintään itseohjautuvasti. Tällöin pumppu toimii aina sellaisella tehoalueella ulkolämpötilasta riippumatta, että se pystyy tuottamaan riittävästi lämpöenergiaa rakennukseen. Haastatellut asiantuntijat suosittelivat invertteriohjatutuja pumppuja erityisesti täystehomitoitettuihin järjestelmiin (Haastattelu 2, 18.3.2021; Haastattelu 5, 21.4.2021).

Kaikissa referenssikohteissa tavoiteltiin korkeaa energiatehokkuutta sekä korkeaa energialuokkaa tai vaihtoehtoisesti jotakin ympäristösertifikaattia. Koska kaikkiin kohteisiin valittiin maalämpö, voidaan olettaa, että maalämpö on hyvä valinta energiatehokkaan rakennuksen lämmitysjärjestelmäksi. Tulosten perusteella ei voida sanoa, mahdollistaako järjestelmän käyttäminen Suomessa nollaenergiarakentamisen, mutta referenssikohteen 3 energiatodistuksen mukaan rakennus on saanut parhaan energialuokan A, mikä vastaa FInZEB-hankkeen lähes nollaenergiarakennuksen määritelmää Suomessa. Tulosten valossa näyttäisi ainakin siltä, että maalämmön valitseminen luo nollaenergiarakentamiselle hyvän perustan, sillä lämmitysmuodoista se on tullut esille hyvin kannattavana vaihtoehtona.

Referenssikohteista saadut tiedot perustuivat useimmissa tapauksissa suunnittelu- ja mitoitusarvoihin ennen rakennuksen valmistumista. Tämän takia tuloksissa voi esiintyä

virhettä erityisesti rakennuksen energiankulutuksen suuruudessa, koska toteutunutta kulutusta on vaikea arvioida ennalta. Myös tämän johdosta suunnitellut ja toteutuneet energiankulutukset ovat yksi tämän työn jatkotutkimusehdotuksista. Tällaisessa tutkimuksessa voisi olla mielenkiintoista tutkia kuinka lähellä suunnitellut ja toteutuneet energiankulutukset ovat toisiaan ja löytyykö tiedoista joitakin tekijöitä, joissa nähdään selkeästi ali- tai ylikulutusta suunnitellusta. Myös laajempi tutkimus osa- ja täystehomitoitettujen maalämpöjärjestelmien elinkaarikustannuksista kuuluu jatkotutkimusehdotuksiin, sillä joitakin eroja esimerkiksi rakennuksen koon, iän, käyttötarkoituksen tai sijainnin mukaan voisi esiintyä näiden vaihtoehtojen kannattavuudessa. Kolmas jatkotutkimusehdotus liittyy Suomen pohjavesi- ja vesistöalueiden hyödyntämispotentiaalin kartoittamiseen maalämpöjärjestelmissä. Tällä hetkellä suurin osa pohjavesialueista on käyttöveden ottotarkoituksessa, mutta esimerkiksi pilaantuneita vesialueita voisi hyödyntää rakennusten lämmittämistarkoitukseen (Haastattelu 4, 6.4.2021 mukaan).

10. YHTEENVETO

Tiukentuneet vaatimukset lainsäädännössä rakennusten energiatehokkuudelle ja kestävä kehityksen huomioimiselle rakentamisessa ovat pakottaneet käyttämään yhä ekotehokkaampia ja hiilijalanjälkeä vähentäviä ratkaisuja rakentamisessa. Maalämpö on energiatehokas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto lämmitysenergian tuottamiseen asuinrakennuksissa, sillä yleensä vähintään 2/3 järjestelmän tuottamasta energiasta on peräisin maasta. Tämän johdosta järjestelmän toimintaan tarvittavan ostoenergian määrä on pieni, mikä on herättänyt kiinnostuksen sen käyttöönottoon myös suuremmissa rakennuksissa.

Maalämmön hyödyntäminen perustuu pitkälti Auringosta maahan varastoituneen lämpöenergian hyödyntämiseen. Syvemmällä maassa yhä suurempi osa lämmöstä on peräisin Maan sisuksesta peräisin olevasta lämpöenergiasta. Suomessa nykyään yleisin tapa maalämmön hyödyntämiseen on porata maahan yleensä 200-350 metrin syvyinen energiakaivo. Poraamisen jälkeen kaivoon asennetaan keruuputket, joissa kiertävä keruuaine kerää ympäröivästä aineksesta maan lämpöä johtamalla. Keruuaine lämpiää maan lämmöstä ja kulkee tämän jälkeen maalämpöpumppuun, jossa keruuaineesta saatu lämpö johdetaan rakennuksen lämmönjakopiiriin. Järjestelmän tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi valittu maalämpöjärjestelmätyyppi, joista energiakaivo on kaikkein tehokkain. Toinen merkittävä tekijä on maan lämmönjohtavuus, joka Suomessa on melko hyvällä tasolla, sillä Suomessa kallioperä on suurimmaksi osaksi hyvin lämpöä johtavaa graniittia.

Suuremmissa rakennuksissa lämmitysenergian tarve on suurempi, jolloin tarvitaan useampi energiakaivo tyydyttämään rakennuksen lämmöntarve, jolloin puhutaan energiakentästä. Energiakentän suunnittelussa käytetään erilaisia tietokoneohjelmia arvioimaan kaivojen määrä ja tarvittava syvyys, joista yksi käytetyimpiä on ruotsalainen Earth Energy Designer. Tyypillisesti energiakenttiä poratessa ensimmäisen kaivon poraamisen jälkeen tehdään terminen vastetesti eli TRT-mittaus, josta saadaan tarkka tieto maan lämmönjohtavuudesta porausalueella. TRT-mittauksen tekeminen on käytännössä välttämätöntä suurissa energiakentissä, jotta voidaan välttyä kaivojen alimitoitamiselta, mikä voi johtaa pahimmillaan kasvaviin pumpun käyttökustannuksiin, energiakentän nopeaan jäähtymiseen ja kaivojen jäätymiseen. Mikäli TRT-mittauksen pohjalta lämmönjohtavuus onkin oletettua pienempi, porataan kaivoja tyypillisesti suunniteltua syvemmälle.

Toiminta-aikanaan energiakaivon lämpötila laskee muutamalla asteella. Lämpötilan lasku on kaikkein voimakkainta aivan toiminnan alussa. Yleensä n. 20 vuoden toiminnan jälkeen lämpötila alkaa olla jo hyvin lähellä ns. stationääritilaa eli tasapainotilaa, jonka jälkeen kaivon lämpötila lakkaa laskemasta. Toiminta-aikana energiakaivo kerää lämpöä yhä suuremmalta säteeltä kaivon keskipisteestä, minkä johdosta energiakentissä kaivoja ei voida sijoittaa liian lähelle toisiaan, sillä tällöin niillä on taipumus pyrkiä keräämään lämpöä toisiltaan ajan saatossa. Energiakenttien suunnittelussa yhä tärkeämpää on kaivojen syvyyden oikea mitoittaminen ja riittävät etäisyydet. Tärkeää on myös pyrkiä välttämään maan lämpötilan laskeminen liian alhaiseksi, jotta voidaan välttää maan jäätyminen toiminta-aikana.

Rakennukset aiheuttavat kustannuksia koko elinkaarensa ajan. Nykypäivänä on alettu puhua yhä enemmän elinkaariajattelusta ja toiminta-aikaisista elinkaarikustannuksista. Elinkaarikustannuksilla tarkoitetaan rakennuksen, sen osan tai järjestelmän elinkaaren hankinta-, käyttö-, huolto- ja uusimiskustannusten nykyarvojen summaa. Nykyarvon laskentaan yksi käytetyimpiä kustannuslaskentamenetelmiä on ns. nettonykyarvomenetelmä, jossa tulevien vuosien kassavirrat diskontataan eli siirretään vastaamaan nykyhetkeä.

Yksi tärkeä kustannustekijä rakennukselle on lämmitysenergian osuus sen vuotuisista kustannuksista. Maalämpöjärjestelmien kustannustehokkuutta voidaan tarkastella vertaamalla sen elinkaarikustannuksia vaihtoehtoiseen lämmitysjärjestelmään, kuten esimerkiksi kaukolämpöön. Tämä toteutettiin tässä työssä neljän eri referenssikohteena olleen asuinkerrostalon avulla, joista saatujen lähtötietojen perusteella voitiin laskea maalämpöinvestoinnin nettonykyarvo verrattuna kaukolämpöinvestointiin. Tuloksena oli, että energian hinnan nousu ja järjestelmien ylläpitokustannukset huomioiden kaikkien kohteiden takaisinmaksuaika oli 19 vuotta tai vähemmän 4 % nimellisellä laskentakorkokannalla. Laskennassa ei huomioitu vaihtoehtoisia kaukolämpöön liittämistä aiheuttavia kustannuksia eikä kaukolämpöjärjestelmien käytön aikaisten huoltotöiden kustannuksia, mikä olisi pienentänyt maalämpöinvestointien takaisinmaksuaikoja. Jokaisessa referenssikohteessa vuotuisia kustannussäästöjä lämmitysenergian osalta tehtiin monia tuhansia euroja. Huomioiden tyypillinen asuinrakennuksen aikaväli valmistumisesta ensimmäiseen peruskorjaukseen investointien takaisinmaksuajat olivat kaikissa tapauksissa verrattain lyhyitä. Lisäksi maalämpöön investoimalla rakennuksen omistaja ja käyttäjät voivat saada energiatehokkaan ja ympäristöystävällisen järjestelmän käytöstä aiheetonta imagollista hyötyä, jonka arvoa on vaikea mitata.

Työn johtopäätöksenä voidaan sanoa, että maalämpöinvestoinnit ovat kannattavia myös uusissa asuinkerrostaloissa. Maalämpöjärjestelmällä tehtävät säästöt kokonaiskustannuksissa tehdään pääasiassa sen huomattavasti pienemmillä käytön aikaisilla kustannuksilla. Käytön aikaiset kustannussäästöt kasvavat herkkyyksianalyyysien perusteella sitä suuremmiksi, mitä enemmän energian ja erityisesti kaukolämmön hinta tulee nousemaan. Vaikka maalämpöjärjestelmien investointikustannukset ovat korkeat, aiheuttavat maalämpöjärjestelmien matalat käytön aikaiset kustannukset sen, että investointien takaisinmaksuajat pysyvät lyhyinä. Yksi työn referenssikohteista täyttää energiatodistuksensa mukaan myös FInZEB-hankkeen mukaisen vaatimuksen lähes nollaenergiarakennuksen määritelmästä, mikä osoittaa sen, että maalämmöllä voidaan saavuttaa lähes nollaenergiarakennuksen taso ainakin asuinkerrostaloissa.

LÄHTEET

Aittomäki, A. 1983. Maaperä ja vesistöt lämmönlähteinä. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere.

Atkin, B. & Borgbrant, J. & Josephson, P-E. 2003. Construction Process Improvement. Blackwell Science Ltd. 304 s. ISBN 0-632-06462-5.

Banks, D. 2012. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 2. painos. John Wiley & Sons, Incorporated. 546 s. ISBN 9781118447499.

Bayer, P. & Blum, P. & Haehnlein, S. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. Teoksessa: Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.14(9). Elsevier BV. s. 2611-2625. ISSN 1364-0321.

Bull, J. W. 2003. Life Cycle Costing for Construction. Routledge. 176 s. ISBN 9780367579937.

Cabeza, L. F. 2015. Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. Cambridge, England: Woodhead Publishing. 594 s. ISBN 1-78242-096-7.

Claesson, J. & Eskilson, P. 1987. Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal analyses and dimensioning rules. Department of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. 29 s.

Dinçer, I. & Rosén, M. 2011. Thermal energy storage: systems and applications. 2. painos. Chichester, England: John Wiley & Sons Incorporated. 599 s. ISBN 1-119-95662-5.

Edwards, B. W. & Naboni E. 2013. Green Buildings Pay: Design, Productivity and Ecology. Taylor & Francis Group. 297 s. ISBN 0415685346.

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Avustus pientalon öljylämmityksestä luopumiseksi [verkkojulkaisu]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.ely-keskus.fi/oljylammituksen-vaihtajalle>

European Commission. 2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Annettu 23.4.2009.

European Commission. 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleenlaadittu). Annettu 19.5.2010.

European Commission. 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Annettu 25.10.2012.

European Commission. 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/844 rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2010/31/EU ja energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Annettu 30.5.2018.

Finnegan, S. 2018. New financial strategies for sustainable buildings: practical guidance for built environment professionals. London, England: Routledge, Taylor & Francis Group. 114 s. ISBN 978-1-138-06852-0.

Gebwell – SCOP vai COP? Ota tehon vertailun keskeiset termit haltuun! [verkkójulkaisu]. [viitattu 13.4.2021]. Saatavissa: <https://gebwell.fi/ajankohtaista/scop-vai-cop-ota-tehoyen-vertailun-keskeiset-termit-haltuun/>

Geologinen Tutkimuskeskus. 2016. GTKData – Maankamara – Maapeitepaksuus [verkkójulkaisu]. [viitattu 19.3.2021]

Geologinen Tutkimuskeskus. 2019. Geoenergian ja geotermisen energian potentiaalikartoitukset: Suomessa on valtava puhtaan energian varasto [verkkójulkaisu]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/geoenergian-ja-geotermisen-energian-potentiaalikartoitukset-suomessa-on-valtava-puhtaan-energian-varasto/>

Geologinen Tutkimuskeskus. 2019. GTKData – Maankamara – Geoterminen energiapotentiaali – 300 m geoenergiapotentiaali [verkkójulkaisu]. [viitattu 19.3.2021]

Haastattelu 1, asiantuntija, uusiutuvien energianlähteiden energiasuunnitteluun erikoistunut yritys, referenssikohteiden 2&3 energiasuunnittelusta vastannut yritys. Vantaa. Haastattelu 18.3.2021.

Haastattelu 2, talotekniikkainsinööri, suuri rakennusliike, referenssikohteen 1 energiasuunnittelussa mukana ollut yritys. Helsinki. Haastattelu 23.3.2021.

Haastattelu 3, geoenergian asiantuntija, suuri geoenergiapalveluja tarjoava yritys. Tampere. Haastattelu 30.3.2021.

Haastattelu 4, geologi & diplomi-insinööri, kokenut asiantuntija, ympäristöasiantuntijapalveluiden konsulttitoimisto. Tampere. Haastattelu 6.4.2021.

Haastattelu 5, maalämpöpalvelujen aluejohtaja, keskisuuri LVI-palveluja tarjoava yritys. Tampere. Haastattelu 21.4.2021.

Heljo, J. & Kurvinen, A. & Vihola, J. 2012. Energiataloudellisten valintojen taloudellisuustarkastelut. Teoksessa: Rakentajain kalenteri 2012. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy ja Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. s. 158-164.

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki: Ympäristöministeriö. 64 s. Ympäristöopas 2013. ISBN 978-952-11-4211-6.

Kaleva, H. & Oikarinen, E. & Soutamo, M. 2017. Kiinteistösijoittaminen. Kiinteistöalan Instituutti. 236 s. ISBN 9789529833511.

Kubba, S. A. A. 2010. Green construction project management and cost oversight. Amsterdam, Netherlands: Architectural Press. 560 s. ISBN 1-85617-676-2.

Kukkonen, I. T. 2000. Geothermal Energy in Finland. Teoksessa: Iglesias, E. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan. 28.5.-10.6.2000. International Geothermal Association. s. 277-282. ISBN 9780473068110.

KTI Index. 2021. Total return on residential property investments 2000-2020. KTI Property Information Ltd.

Lahti, T. 2013. Lämpökaivokenttä lämmönlähteenä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Tampere. 91 s.

Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos, Geofysiikka. Oulu. 91 s.

Motiva. 2012. Lämpöä omasta maasta – Maalämpöpumput. Helsinki: Motiva & SuLPu ry & Ympäristöministeriö. 16 s.

Motiva. 2020. Energiatehokkuusdirektiivi [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/energiatehokkuusdirektiivi>

Myyryläinen, L. 2008. Elinkaariajattelu kiinteistönpidossa. 2.painos. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy. 205 s. ISBN 978-951-685-200-6.

Myyryläinen, L. 2019. Rakennuksen elinkaari, energia ja kunto. Helsinki: Rakennustieto Oy. 190 s. ISBN 978-952-267-282-7.

Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2005. Johdon laskentatoimi. 6. painos. Helsinki: Business Edita, Edita. 366 s. ISBN 951-37-4109-5.

Pitt, M. & Riley, M. & Tucker, M. & Longden, J. 2009. Towards sustainable construction: promotion and best practices. Construction Innovation, Vol.9(2). s. 201-224.

Pöhö, E. 2013. Maalämpöön siirtymisen kannattavuus keskisuurissa kiinteistöissä. Insi-
nööri. Metropolia ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma. 65 s.

Rakennusteollisuus – Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Materiaalitehokkuus/>

Rakennusteollisuus – Rakennusten energiatehokkuutta ohjaavat direktiivit [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Ilmasto-ja-energiapolitiikka/Energiatehokkuus-suunnitteluvaiheessa/>

Saari, A. 2004. Elinkaarikustannusten laskenta. Rakennusteollisuus RT ry. 26 s.

St1 – Ajankohtaista Geolämmöstä [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.2.2021]. Saatavissa: <https://www.st1.fi/geolampo>

Suomen lämpöpumppuyhdistys Sulpu ry. Suomen lämpöpumpputilastot – Myydyt lämpöpumput kappaleina, euroina, kumulatiivisesti ja tyypeittäin 2019 [verkkojulkaisu]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/tilastot>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennus- ja asuntotuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN=1796-3257. syyskuu 2016, Maalämmön osuus lämmönlähteenä kasvussa . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 20.4.2021].
Saantitapa: http://www.stat.fi/til/ras/2016/09/ras_2016_09_2016-11-25_kat_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=2323-3273. 2019. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 20.4.2021].
Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2019/asen_2019_2020-11-19_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. 2019. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 20.4.2021].
Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk_2019_2020-12-21_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kuluttajahintaindeksi [verkkojulkaisu]. ISSN=1796-3524. maaliskuu 2021. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 11.5.2021].
Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khi/2021/03/khi_2021_03_2021-04-14_tie_001_fi.html

Talteka – FinZEB-hanke (2013-2015) [verkkoaineisto]. [viitattu 20.4.2021]. Saatavissa: <https://www.talteka.fi/finzeb-hanke-2013-2015>

Thermia – Kolme tärkeää tekijää, jotka vaikuttavat lämpöpumpun valintaan [verkköjulkaisu]. [viitattu 26.3.2021]. Saatavissa: <https://www.thermia.fi/hyodyllista-tietoa/ostalampopumppu/lampopumppu-kolme-tekijaa/>

Vähäaho, I. 2020. Maalämpö ja geoterminen energia: vastaus ilmastonmuutoksen torjuntaan ja energiantarpeeseen? GEOfoor. Vol.50. s. 4-6. ISSN 2670-2762.

Ympäristöministeriö – Rakennusten energiatehokkuutta koskeva lainsäädäntö [verkköaineisto]. [viitattu 12.4.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuus>

