



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

LAURI KARES

Maalämpökohteen energiakentän regeneroinnin vaikutus maaperään

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN KOULUTUS-
OHJELMA
2020

Tekijä Kares, Lauri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä joulukuu 2020
	Sivumäärä 45	Julkaisun kieli suomi
Julkaisun nimi Maalämpökohteen energiakentän regeneroinnin vaikutus maaperään		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka		
Tiivistelmä <p>Maalämmön ja lämpöenergian varastoinnin merkitys on korostunut viime vuosina ja niiden käyttö on lisääntynyt. Tulevaisuudessa fossiilisista polttoaineista tullaan luopumaan lähes kokonaan. Ympäristöarvojen merkityksen kasvaessa rakennusten energiatehokkuusvaatimukset tulevat tiukentumaan. Siksi maalämmön ja lämpöenergian varastoinnin osuus energiatuotannossa kasvaa merkittävästi. Tämän takia aihe on erittäin ajankohtainen ja merkittävä tulevaisuuden kannalta.</p> <p>Tavoitteena oli tutkia, kuinka todenmukainen EED-simulointitulokseksi on verrattuna todellisiin energiakentän paluunesteen mittaustuloksiin ja selvittää kuinka kannattavaa energiakenttään on ladata lämpöenergiaa eli regeneroida. Tässä työssä tehtiin EED-simuloinnit kahteen olemassa olevaan maalämpökohteeseen. Kohteiden energiakentistä saatiin mittausdataa, joita vertailtiin simulointituloksiin.</p> <p>Vertailun tulosten perusteella simuloinnit eivät vastanneet mittausdataa, koska viime talvet ovat olleet leudompia kuin simulointiohjelman oletusvuodet. Jotta simulointitulokseksi olisi vertailukelpoinen tulisi ohjelmaan itse pystyä syöttämään mittausajanjakson ulkolämpötilat. Energiakentän latauksen kannattavuutta ei pystytty tässä työssä selvittämään, koska simulointitulokset eivät olleet vertailukelpoiset.</p>		
Asiasanat maalämpö, energiakaivo, lämmöntalteenotto, lämpöenergia, simulointi		

Author Kares Lauri	Type of Publication Bachelor's thesis	Date December 2020
	Number of pages 45	Language of publication: Finnish
Title of publication The Effect of the Energy Field's Regeneration on the Ground		
Degree program Construction and Civil Engineering		
Abstract <p>The relevance and usage of geothermal heat and storing thermal energy has increased within a few past years. Fossil fuels will be replaced in the future. As the significance of the environmental values increase, the requirements for energy efficiency of buildings will tighten. Therefore, the share of the ground heat and thermal energy in the energy production will be increased significantly. Field of this study is relevant and highly important in consideration of future.</p> <p>Aim of this thesis was to compare EED-simulation results to measured data and to study if these values are compatible with each other's. Measured data covers energy field's return fluids temperatures. Also, the profitability of the energy field's regeneration was studied. Two existing subjects were simulated with EED. Fluid temperature data was compared to simulation results.</p> <p>Comparison results show that simulations were not compatible with the measured data. The cause was that winters have been actually milder than the EEDs defaults and results were not comparable. If it would be possible to set the outdoor temperature values manually to the EDD-simulation, results would be comparable. Study of the profitability of the energy field's regeneration turned out unresolved because the simulation results were not comparable.</p>		
<u>Key words</u> ground heat, heat wells, heat recovery, heat energy, simulation		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 MAAPERÄN HYÖDYNTÄMINEN LÄMMITYKSESSÄ JA JÄÄHDYTYKSESSÄ	7
2.1 Maalämpö ja maakylmä	7
2.1.1 Maalämpöpumppu	9
2.1.2 Kylmäaine	10
2.2 Kausivarastointijärjestelmät	11
2.3 Energiakaivon ja -kentän regenerointi	13
2.4 Lämmöntalteenotto ja rakennuksen jäähdytys	15
2.5 TRT-mittaus	15
2.6 Maaperän simulointi	16
2.7 EED-simulointi	17
2.7.1 Maaperän ominaisuudet	17
2.7.2 Lämpökaivo ja lämmönvaihdin	18
2.7.3 Lämpökaivon lämpöresistanssi ja lämmönsiirtoneste	19
2.7.4 Lämpökuormat	20
2.7.5 Huippukuormat ja simulointijakso	21
2.7.6 Tuntikohtainen simulointiprofiili ja hintatiedot	22
2.7.7 Energiakentän simulointi ja energiakentän optimointi	24
2.7.8 Nesteen lämpötilarajat ja energiakaivon mitoitus	26
3 TUTKIMUSKOHTEET	27
3.1 Kohde yksi	27
3.1.1 Kohteen yksi LTO-patterin tuottama teho	28
3.1.2 Kohteen yksi energiakentän simulointi	30
3.2 Kohde kaksi	31
3.2.1 Kohteen kaksi LTO-laitteen tuottama teho	32
3.2.2 Kohteen kaksi energiakentän simulointi	33
4 ENERGIAKENTÄN SIMULOINTITULOSTEN VERTAILU RAKENNUSAUTOMAATIOSTA SAATUIHIN TULOKSIIN	34
4.1 Kohteen yksi simulointitulokset	34
4.2 Kohteen yksi mittaustulokset	35
4.3 Kohde yksi: simulointi- ja mittaustulosten keskinäinen vertailu	38
4.4 Kohteen kaksi simulointitulokset	39
4.5 Kohteen kaksi mittaustulokset	40
4.6 Kohde kaksi: simulointi- ja mittaustulosten keskinäinen vertailu	43

5 JOHTOPÄÄTÖKSET 44

LÄHTEET

LIITTEET

1 JOHDANTO

Maalämmön ja lämpöenergian varastoinnin merkitys on korostunut viime vuosina ja niiden käyttö on lisääntynyt. Sen vuoksi aihe on erittäin ajankohtainen ja merkittävä tulevaisuuden kannalta. Fossiilisista polttoaineista luovutaan miltei kokonaan lähivuosien aikana. Kiinteistöjen energiatehokkuusvaatimukset tiukentuvat ympäristöarvojen merkityksen kasvaessa. Siksi maalämmön ja lämpöenergian varastoinnin osuus energiatuotannossa kasvaa merkittävästi.

Opinnäytetyön aihe syntyi suunnittelutoimisto Sitowise Oy:llä. Tavoitteena on tutkia, kuinka todenmukainen energiakentän EED-simulointitulokas on todellisiin energiakentästä saatuihin mittaustuloksiin verrattuna. Opinnäytetyössä käytetyt datat ovat mitattuja paluunesteen lämpötiloja ja ne on kerätty kahden kohteen energiakentästä, joita tässä työssä käsitellään. Tutkimuskohteiden simuloinnit on tehty työtä varten opinnäytetyön laatijan toimesta. Saatujen mittaus- ja simulointitulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä simulointien todenmukaisuudesta verrattuna mittaustuloksiin. Tämän vertailun ja siitä saatavien lopputulosten perusteella voidaan tulevaisuudessa suunnitella samankaltaisia kohteita optimaalisemmin. Opinnäytetyö on tapaustutkimus. Tapaustutkimus eli case study on lähestymistapa, jossa yhtä kohdetta tarkastellaan perusteellisesti. Tämän perusteella voidaan tehdä laajempia johtopäätöksiä tutkittavaan kohteeseen liittyen.

Tutkimuksen lähdemateriaalina on käytetty RT-kortistoa, maalämpöön ja maakylmään liittyviä tutkimusraportteja, alan toimijoiden verkkosivustoja sekä laadittuja suunnitelmia tutkimuskohteista.

2 MAAPERÄN HYÖDYNTÄMINEN LÄMMITYKSESSÄ JA JÄÄHDYTYKSESSÄ

2.1 Maalämpö ja maakylmä

Maalämpö on maaperään ja vesistöihin sitoutunutta puhdasta ja uusiutuvaa aurinkoenergiaa, jota tuotetaan maalämpöpumpuilla. Kesäaikana aurinkolämpöä varastoituu maaperään ja vesistöihin. Varastoituneesta aurinkolämmöstä saadaan tuotettua keuhkaisin ja talvisin maalämpöpumpuilla lämmitysenergiaa. Maalämpöä tuotetaan yleensä energiakaivolla eli maahan poratulla 120-300 metriä syvällä kaivolla. Kaivojen määrä ja syvyys määräytyvät lämmöntarpeesta kohteessa. Maalämpöä voidaan myös kerätä maapiirillä, joka on asennettu maan alle vaakatasoon. Vesistöjäkin voidaan käyttää maalämmön tuottamiseen, jolloin keruuputkisto asennetaan vesistöön. Keruuputkiston pituus määräytyy kohteen lämmöntarpeesta. Lämmönsiirtoneste toimii välittävänä aineena lämmönsiirrossa. Lämmönsiirtoneste on yleensä 30-prosenttista etanoliliuosta, jonka jäätymispiste on -17 celsiusastetta. Pumpulla kierrätetään lämmönsiirtonestettä putkistossa, jossa neste lämpiää maaperässä tai vesistöissä olevalla lämmöllä. (Ympäristöopas 2013, 8; Motivan www-sivut 2020.)

Maaperää voidaan käyttää maalämpöjärjestelmän avulla lämmön tuottamisen lisäksi myös huoneilman jäähdyttämiseen maakylmän avulla. Maakylmää pystytään tuottamaan parhaiten energiakaivolla, mutta myös vesistöön- tai pintamaahan asennetulla keruuputkistolla. Maakylmällä tarkoitetaan, että maaperää käytetään lämmönsiirtonesteen jäähdytykseen. Nesteen tehtävänä on luovuttaa lämpöä maaperään ja palata viileämpänä takaisin jäähdytyslaitteistoon. Siten maakylmää voidaan käyttää rakennuksen huoneilman jäähdyttämiseen. Jäähdytys voidaan toteuttaa monella eri tavalla maakylmän avulla. Maakylmää voidaan jakaa kiinteistöön lattialämmityksen, säteilylämmittimen, puhallinkonvektorin tai ilmanvaihdon kautta. (Gebwellin www-sivut 2020.)

Energiakaivo on maaperään porattu 120-300 metriä syvä kaivo. Kaivon ulkohalkaisija on 115-165 millimetriä ja sen sisälle asennetaan liuosputkisto. Kaivoon asennetaan suojaputki, joka kiinnitetään tiiviisti kallionpintaan joko kiristämällä kallioon, manklaamalla, laajenevilla tiivistysaineilla tai betonoimalla. Suojaputken on oltava 2-6 metrin syvyydellä kiinteässä kalliossa. Lopullinen syvyys määräytyy kalliopinnan

Vesistöön sitoutunutta lämpöenergiaa voidaan käyttää lämmityksessä. Vesistöön voidaan asentaa keruuputkisto, kun rakennus sijaitsee vesistön lähetyvillä. Vesistön tulee olla rannan läheisyydessäkin ainakin kaksi metriä syvä. Rannan pohjaa voidaan tarvittaessa syventää niin, että putket ovat tarpeeksi syvälle asennettuna. Tällöin vesimassaa on tarpeeksi putkistojen yläpuolella ja vesistö ei jäädy pohjaan asti. Vesistön pohjaan asennetaan keruuputkisto painojen avulla. Keruuputkiston alue tulee merkitä, koska veneitä ei saa ankkuroida alueelle. Siten ankkurit eivät vahingoita putkistoa. Vesistöä kaivetaan tekniseen tilaan asti kaivanto maahan niin syvällä, ettei putkisto pääse jäätymään. (Tom Allen Seneran [www-sivut 2020](#).)

2.1.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppua käytetään rakennusten lämmitykseen ja viilennykseen. Sen avulla pystytään myös tuottamaan kiinteistön lämmin käyttövesi. Lämpöpumppujen toimintaperiaatteena on siirtää lämpöä kylmemmästä tilasta lämpimämpään. Yleisin lämpöpumppu on jääkaappi, joka siirtää lämpöä jääkaapista ympäröivään tilaan. Maalämpöpumpun toimintaperiaate on sama, mutta maaperässä tai vesistössä oleva lämpö puretaan rakennuksen lämmitykseen sekä käyttöveden lämmitykseen. (Motivan [www-sivut 2020](#)). Maalämpöpumppua voidaan myös käyttää samanaikaisesti lämmitykseen ja viilennykseen. Tällöin rakennuksessa olevalla lämmöllä voidaan lämmittää käyttövettä ja samalla ottaa maaperästä jäähdytykseen tarvittavaa jäähdytysenergiaa. (LVI 11-10332, 4.)

Maalämpöpumpulla kierrätetään lämmönsiirtonestettä keruuputkistossa. Kun tarvitaan lämmintä vettä lämmitykseen tai käyttöveden lämmitykseen, keruuputkistossa olevaan nesteeseen sitoutuu lämpöä maaperässä. Kun taas tarvitaan viilennystä, nesteen tehtävä on luovuttaa lämpöenergiaa maaperään. (Motivan [www-sivut 2020](#)). Maaperään varastoituneen hukkalämmön avulla maalämpöjärjestelmä saavuttaa hie- man paremman COP-arvon kesäaikana ja lämmityskauden alussa. Käsite COP muodostuu sanoista Coefficient of Performance ja sillä tarkoitetaan lämpöpumpun hyötysuhdetta, joka kertoo, kuinka tehokkaasti kulutettu sähköenergia pystytään muuttaman

lämpöenergiaksi. Kun maalämpöpumppua pystytään käyttämään paremmalla COP-arvolla, sillä saadaan säästöjä sähkön kulutuksessa. Tämä alentaa kiinteistön lämmityskustannuksia. (LVI-Neron www-sivut 2020.)

Kompressori, höyrystin, lauhdutin ja paisuntaventtiili ovat maalämpöpumpussa olevat neljä keskeistä osaa, jolla tuotetaan lämpöä. Höyrystimessä kylmäaine höyrystyy, jolloin siihen sitoutuu enemmän lämpöä. Höyrystyneen kylmäaineen imee kompressori. Kompressori puristaa höyryä pienempään tilaan, tällöin kylmäaineen paine nousee ja lämpötila nousee lähes sataan asteeseen. Lähes sata asteinen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa kiertää lämmitysverkoston vesi. Höyry luovuttaa lauhduttimessa lämmön lämmitysverkoston veteen ja tiivistyy takaisin nesteeksi. Jäähdytynyt kylmäaine johdetaan paisuntaventtiilin kautta, jossa lasketaan painetta ja lämpöä ennen kuin se palaa höyrystimeen. Tulistinmaalämpöpumpussa lauhduttimen ja kompressorin välissä on erillinen lämmönvaihdin. Välissä olevalla vaihtimella siirretään kuumimmasta höyrystä lämpöä käyttöveden lämmitykseen. (Motivan www-sivut 2020). Kun rakennuksessa on samanaikaisesti tarvetta lämmitykselle ja viilennykselle, voidaan ilmastointikoneen jäähdytyspatterilta tuleva lämmennyt liuos ohjata maalämpöpumpun höyrystimelle. Höyrystin siirtää lämmenneestä liuksesta lämmön lauhduttimen kautta esimerkiksi käyttövedeen. (LVI 11-10332, 4.)

2.1.2 Kylmäaine

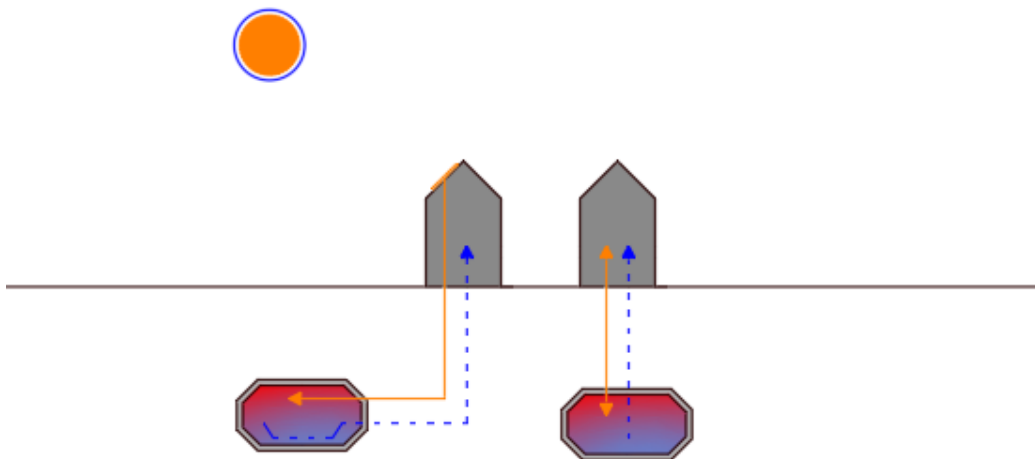
Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, joita käytetään kylmäkoneistoissa väliaineina lämmön siirtämiseen. Kylmäkoneistoissa kylmäaineiden käyttö perustuu kylmäaineen kykyyn muuttaa olomuotoa kaasumaisesta nestemäiseksi luovuttaessaan aineen lämpöä ympäristöön. Vastaavasti aine ottaa vastaan lämpöä ympäristöstä muuttuessaan nestemäisestä kaasumaiseksi. Tällä periaatteella saadaan siirrettyä suhteellisen pienelläkin massavirralla suuriakin lämpökuormia kylmäkoneiden avulla. Lainsäädännön muutokset viime vuosikymmeninä ovat vaikuttaneet kylmäaineiden vaihtumiseen. Käytöstä on poistettu otsonikerrokselle haitalliset kylmäaineet. Tulevaisuudessa vähennetään korkean ilmastolämmitysvaikutuksen omaavan kylmäaineiden käyttöä. (Kylmäainetilanne 2017, 2.) Vuoteen 2030 mennessä Euroopalla on tavoite vähentää 80 % kylmäaineiden kasvihuonepäästöjä. Tulevaisuudessa käytetään enemmän

luonnollisia kylmäaineita. Myös uusia synteettisiä kylmäaineita kehitetään ja otetaan käyttöön. Näiden kylmäaineiden kasvihuonepäästöt ovat erinomaisen vähäiset. (Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut 2016, 48.) Tämä tuo tullessaan uusia haasteita turvallisuusominaisuuksien muutosten myötä. Uudet kylmäaineet eivät ole enää palamattomia aineita. Siksi kiinteistöjen ja järjestelmien paloturvallisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. (Kylmäainetilanne 2017, 2.)

2.2 Kausivarastointijärjestelmät

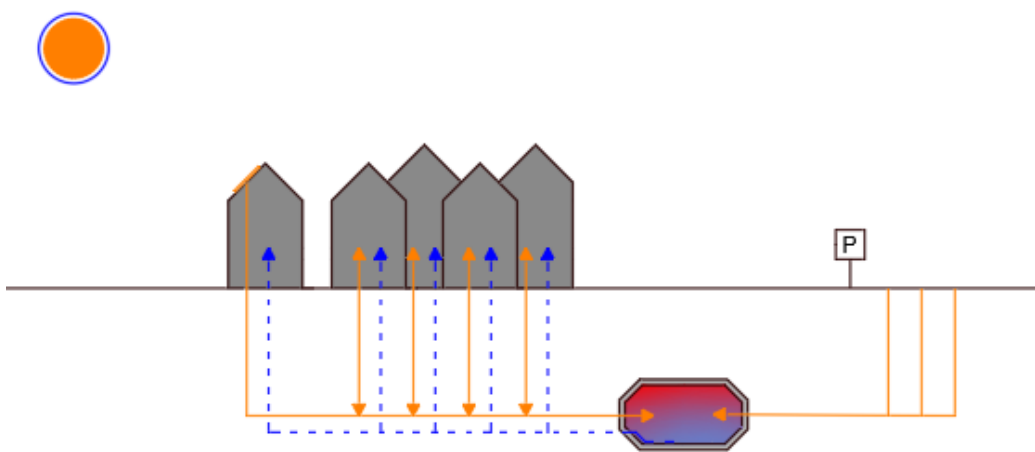
Kausivarastoinnissa käytetään energiavarastoja joko energian purkamiseen tai energian varastointiin energiavarastoon. Yleensä varastoinnin ajanjakso on vuosi, mutta erilaisia ajanjaksoja voidaan myös käyttää. Kaikkia maanpinnan alapuolisia lämpöenergian kausivarastoja kutsutaan yleisnimellä Underground Thermal Energy Storage (UTES). Yleisesti nimeä lämpöenergian kausivarastoinnista käytetään Seasonal Thermal Energy Storage (STES). UTES-järjestelmiä ovat Aquifer Thermal Energy Storage (ATES, pohjavesilämpövarasto), Borehole Thermal Energy Storage (BTES, porareikälämpövarasto sekä energiapaaluvarasto), Cavern Thermal Energy Storage (CTES, luolalämpövarasto) ja Duct Thermal Energy Storage (DTES, putkitettu maalämpökaivo). Maanpinnan yläpuoleisia energiavarastoja ovat suuret vesialtaat ja säiliöt. Suurta vesiallasvarastoa kutsutaan nimellä Pit Energy Storage (Pit ES). Jos varastointiaineena on käytössä faasimuunnosmateriaalia, sitä kutsutaan nimellä Phase Changing Material Energy Storage (PCMES). Olomuodonmuutosmateriaali eli faasimuutosmateriaali. Se on materiaali, joka pystyy sitomaan huomattavan määrän energiaa tilavuutta kohden verrattuna. (RT 103137 2020, 4.)

Maaperävarastojen koon ja käyttötarkoituksen mukaan ne voidaan jaotella kolmeen eri kategoriaan: kiinteistö-, kortteli- ja aluekohtaisiin varastoihin. Eri käyttötarkoituksiin käytettävät ratkaisut lämmön varastointiin, keräämiseen ja hyödyntämiseen on esitetty alla kuvissa 2-4. Kuvassa kaksi on kiinteistökohtainen lämpövarasto, joka voi olla rakennuksen alla tai sen vieressä. Varastoa ja sen ympäröivää maaperää voidaan käyttää hyödyksi lämmitykseen sekä viilennykseen käyttäjien tarpeesta ja varaston lämpötiloista riippuen. (RT 103137 2020, 4.)



Kuva 2. Periaatekuva kiinteistökohtaisesta varastosta

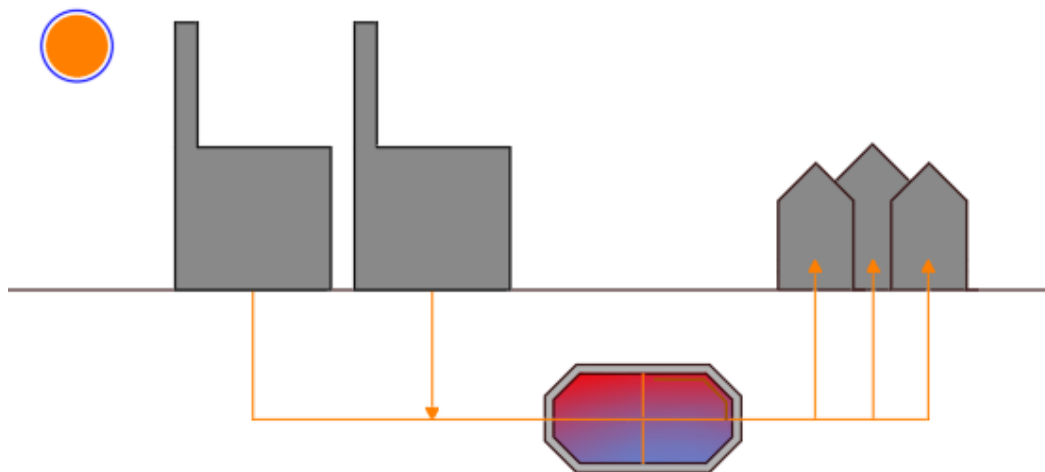
Kuvassa kolme on korttelikohtainen lämpövarasto. Rakennuksen sisäilmasta, rakennusten pinnoista ja aurinkokeräimillä voidaan kerätä lämpöä kesäaikana lämpövarastoon. Keruuputkistoa voidaan asentaa kivetyksien ja asfalttipintojen alapuolelle, josta kerätty lämpö on mahdollista siirtää varastoon. Lämmityskaudella varastosta puretaan lämpöä käyttöveden esilämmitykseen, sisäilman lämmitykseen ja piha-alueiden sulanapitoon. (RT 103137 2020, 4.)



Kuva 3. Periaatekuva korttelikohtaisesta varastosta

Kuvassa neljä on aluelämpövarasto. Aluelämpövarastoja lämmitetään teollisten prosessien ylijäämälämmöllä. Lämmityskaudella varastosta siirretään lämpöä kaukolämpöverkoston avulla rakennusten lämmitykseen. Teollisuuden eri toimijat tuottavat eri lämpöisiä ylijäämälämpötiloja. Tällöin matalalämpöinen tai ultramatalalämpöinen kaukolämpöverkosto mahdollistaa useampien toimijoiden liittymisen

kaukolämpöverkkoon. Aluelämpövarastoja ovat muun muassa allaslämpövarasto (Pit ES), pohjavesivarasto (ATES) ja monireikäinen porareikäkalliovarasto (BTES). (RT 103137 2020,4.)

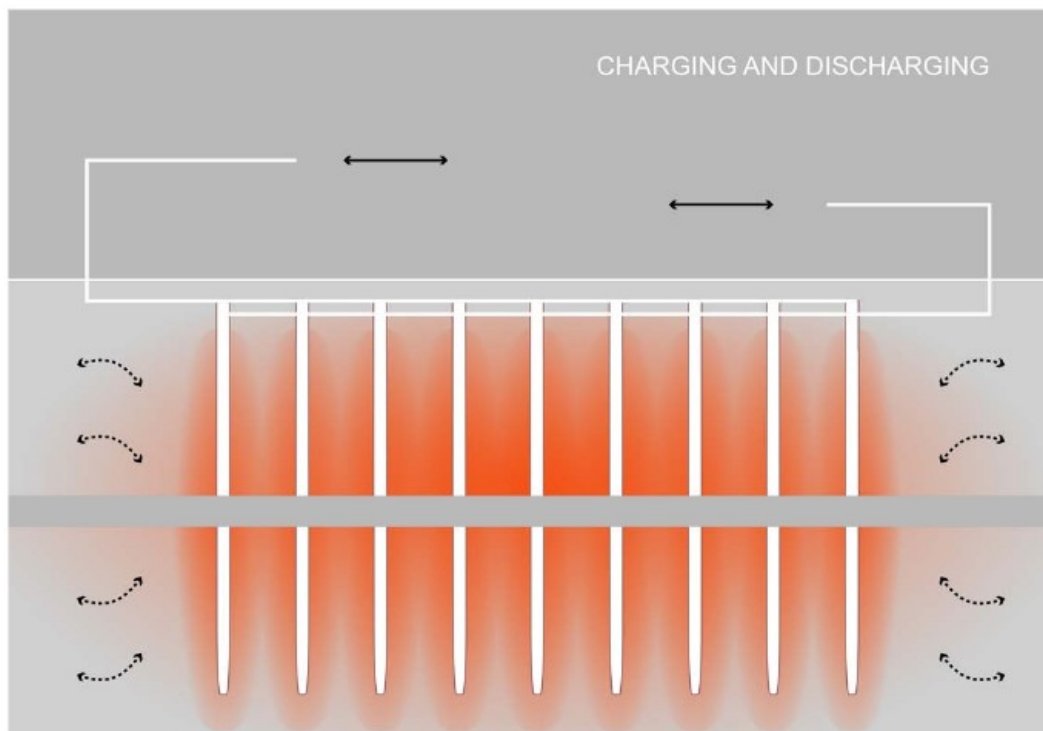


Kuva 4. Periaatekuva aluekohtaisesta lämpövarastosta

2.3 Energiakaivon ja -kentän regenerointi

Perinteiset energiakaivot toimivat ainoastaan lämpöenergian keräyskaivoina, joihin ei ladata lämpöä. Perinteisistä energiakaivoista koostuvat energiakentät suunnitellaan niin, että kaivojen etäisyys toisesta kaivosta on vähintään 15 metriä. Tällöin kaivot eivät luo toisiinsa synergiaa, eivätkä kaivot tue toisiaan energiasaannin kannalta. Tällöin energiakaivot ja niitä ympäröivä maaperä jäätyy. Kun puhutaan energiakaivojen regeneroinnista, niihin ladataan lämpöenergiaa. Kun energiakaivot sijaitsevat toisistaan liian erillään, (yli 10 metriä kaivosta kaivoon) ja kaivojen määrä on vähäinen (alle 10 kappaletta), ne eivät tällöin muodosta yhteistä varastomassaa. Tällöin kaivoilla ei ole synergiaa eikä keskinäistä vaikutusta. Regenerointi kohentaa kuitenkin energiakentän tai -kaivon ja maaperän lämpötasapainoa ja siitä syystä myös lämmitysjärjestelmän hyötysuhdetta. (RT 103137 2020, 4.)

Alla olevassa kuvassa 5 on havainnollistettu energiakaivoista koostuva lämpöenergian varastointijärjestelmä. Energiakaivot ovat yhteydessä toisiinsa, jolloin maaperää voidaan regeneroida. Tässä tapauksessa kaivot muodostavat yhtenäisen energiakentän. (Guideline 2016, 19.)



Kuva 5. Periaatekuva maaperän regeneroinnista energiakaivoilla (Guideline 2016, 19)

Lämpöenergiaa pystytään varastoimaan maaperään ja purkamaan hyvällä hyötysuhteella. Tämä edellyttää sitä, että porareikiä tai energiapaaluja on riittävän paljon ja riittävän tiiviisti niin, että ne ovat toisiinsa synergiassa. Kun puhutaan lämpöenergian varastoinnista energiakenttään, energiakentässä tulee olla yli 10 latauspisteitä ja niiden etäisyys 3-5 metriä toisistaan. Jotta eriaisteiset lämmöt voidaan ohjata optimaalisesti energiakenttään, kannattaa energiakenttää hallita älyohjauksella. Puskurilämmöksi johdetaan haaleimmat lämmöt ja keskialueelle kuumimmat lämmöt. Lämpöhukan vähentämiseksi voidaan energiakenttä eristää yläpuolelta, mikäli kenttä sijaitsee taivassalla. Perinteisten eristeiden ohella voidaan käyttää uusio- tai kierrätysmateriaaleja energiakentän yläpuoliseen lämpöeristämiseen. Jos energiakenttä on rakennuksen alapuolelle, tulee tehdä rakennusfysikaalinen tarkastelu rakennuksen alapohjarakenteen toimivuuteen. Ylöspäin karkaavaa hukkalämpöä voidaan käyttää rakennuksen lämpöhukan vähentämiseen tai kerrosten lämmittämiseen. Rakennuksen alapohjaa voidaan myös käyttää energiakentän eristeenä. Tilanteissa, joissa halutaan pitää maanpinta sulana energiakentän kohdalta, on energiakenttä jätettävä eristämättä yläpuolelta. (RT 103137 2020, 4.)

2.4 Lämmöntalteenotto ja rakennuksen jäähdytys

Rakennuksen sisäilmasta voidaan ottaa lämpöenergia talteen. Ilmanvaihdon poistoilmasta otetaan lämmöntalteenotolla (LTO- laitteella) lämpöenergia talteen, jota pystytään hyödyntämään rakennuksen ja käyttöveden lämmityksessä. Maaperää pystytään hyödyntämään kesäaikana myös viilennykseen. Viilennettäessä rakennuksen huoneilmaa, voidaan siitä syntyvää lämpöenergiaa ottaa talteen ja hyödyntää käyttövedenlämmityksessä. Tällöin ilmastointikoneella viilennyksestä talteen otettu lämpöenergia johdetaan lämpöpumpulle, joka lämmittää käyttövettä. Ylimääräinen lämpöenergia voidaan myös regeneroida energiakenttään. Tämä tarkoittaa sitä, että maaperän lämpöta- sapaino kohentuu lämpöenergian vuoksi. (RT 103137 2020, 4.)

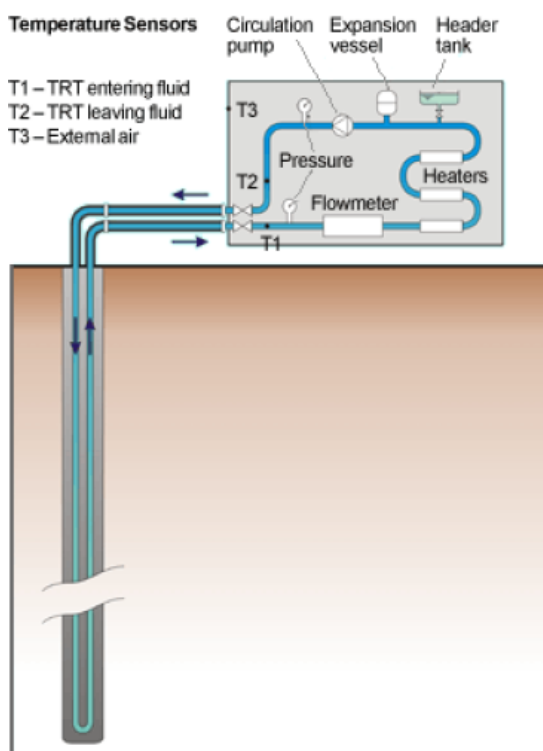
2.5 TRT-mittaus

TRT-mittaus on terminen vastatesti, joka tulee englanninkielisestä nimityksestä Thermal Response Test. TRT-mittauksella pystytään tutkimaan kohteen energiakaivojen todellinen lämmönjohtavuus ja lämpövastus. Tämä on erittäin tärkeää tietää energiakenttää mitoitettaessa, jolloin järjestelmää ja energiakenttää pystytään optimoimaan. TRT-mittauksella myös vältetään energiakentän yli- ja alimitoitus. Lämmönjohtavuudella tarkoitetaan sitä, kuinka paljon mikäkin materiaali tai aine pystyy johtamaan lämpöä. Lämpövastuksella taas tarkoitetaan energiakaivon seinän ja lämmönsiirtonesteen välistä vastusta.

TRT- mittauksessa kallioon porattuun energiakaivoon asennetaan putkisto, jossa kierretään mittauslaitteessa lämmennyttä lämmönsiirtonestettä. Lämmönsiirtonesteen kierrosta voidaan määritellä, kuinka paljon neste jäähtyy sen palattua mittauslaitteeseen. Jäähtymisen perusteella arvioidaan energiakaivon lämpövastusta ja lämmönjohtavuutta. Maaperän häiriintymätön lämpötila on mitattava ennen TRT-mittauksen tekemistä. (RT 103137 2020, 3.)

TRT-mittauslaite on yksinkertaistettuna kiertovesipumppu, lämpövastus ja lämpötilaa mittaava dataloggeri. Kuvassa 6 on osoitettu TRT-mittauslaitteen toimintaperiaate. Koekaivon keruuputkeen kytketään mittauslaite. Tavallisesti keruuputki on täytetty vesi-etanoli-liuoksella, jota kierrätetään energiakaivossa kiertopumpulla. Meno- ja

paluunesteen lämpötiloja mitataan viiden minuutin välein. Aluksi liuosta kierrätetään muutaman tunnin ajan ilman lämmitystä, jotta saadaan mitattua kallion häiriintymätön lämpötila. Kun häiriintymätön lämpötila on mitattu, ryhdytään lämmittämään liuosta. Lämpöä tuottavan vastuksen syöttötehoa mitataan energialoggereilla. Mittaustuloksista saadaan selville energiakaivon lämmönjohtavuus ja lämpövastus. (TRT-mittausraportti.)



Kuva 6. Periaatekuva TRT -mittausmenetelmästä (TRT-mittausraportti)

2.6 Maaperän simulointi

Maalämpöjärjestelmää mitoitettaessa apuna käytetään maaperän simulointia. Näin pystytään suunnittelemaan energiakenttä optimaaliseksi tarkasteltavalle kohteelle. Simuloinnilla analysoidaan, miten maaperä reagoi, kun sieltä puretaan tai ladataan energiaa. Simuloinnissa tarkastellaan arviota siitä, miten energiakenttä käyttäytyy eri olosuhteissa pidemmällä aikavälillä. Simuloidessa on käytettävä mahdollisimman todellisia rakennukseen kohdistuvia lämpö- ja jäähdytyskuormia. Simuloinnissa on käytettävä kohteesta saatuja TRT-mittaustuloksia, jotta simulointi on mahdollisimman todellinen. (Gebwellin [www-sivut](http://www.gebwell.com) 2020.) Markkinoilla on käytössä useita tietokoneohjelmia maaperän simuloinnin toteuttamiseksi. Tässä opinnäytetyössä energiakentän

simulointi on tehty Earth Energy Designer -ohjelmistolla (EED-ohjelmisto), jonka tuloksia käytetään tämän opinnäytetyön vertailuaineistona tutkimuskohteen mittaustulosten kanssa.

EED-ohjelmisto on energiakaivojen ja energiakenttien simulointeihin tehty tietokoneohjelma. Simulointiohjelmalla pystytään määrittämään kohteeseen tarvittavien kaivojen määrä ja niiden syvyydet. Ohjelmistolla pystytään simuloimaan miten maaperän reagoi pitkällä aikavälillä, kun sitä kuormitetaan rakennuksen tarpeiden mukaan. Tällöin pystytään huomioimaan suunnittelussa energiakaivojen jäähtyminen. Ohjelmalla voidaan myös tehdä simulointeja siitä, kuinka maaperää voidaan hyödyntää lämpöenergian varastoinnissa. Simulointeja EED:llä voi tehdä 1-1200 energiakaivoon ja vuotuiset lämpö- ja jäähdytyskuormat voivat olla muutamasta megawattitunnista (MWh) useampaan terawattituntiin (TWh). (Buildingphysicsin www-sivut 2020.)

2.7 EED-simulointi

Simulointiohjelmaan luodaan ensin uusi projekti ”Tiedosto Uusi”, jonka jälkeen aloitetaan syöttämään lähtötietoja simulointia varten. ”Syöttötiedot” valintaikkunasta saadaan syötettyä simulointia varten tarvittavat rakennuksen ja maaperän ominaisuudet. Nämä kohteen tiedot on syötettävä ohjelmaan. Simulointiohjelmalla voidaan myös laskea porauksen kustannukset ”Hintatiedot”, joka on kuvattu kuvassa 18. ”Laske” valintaikkunan alta pystyy tekemään energiakentän simuloinnin, laskemaan energiakaivon pituuden ja optimoimaan energiakentän sekä asettamaan lämmönkeruunesteen lämpötilarajat. ”Tulos” ikkunan alta pystyy tarkastelemaan simulointituloksia. Tietojen syöttämisen jälkeen ne tallennetaan ”Sulje” -painikkeella. Tässä kappaleessa on esitelty EED-ohjelman käyttö ja syötetyt arvot on annettu esimerkinomaisesti.

2.7.1 Maaperän ominaisuudet

Ensin syötetään maaperän ominaisuudet kuvan 7 mukaisesti, jotka on saatu TRT-mittauksesta tai selvitetty paikkatieto.fi -sivustolta. Paikkatieto.fi -sivustolta saatu tieto on suuntaa antava, koska sivuston maaperätieto on pintamaan mukaan.

Kysymysmerkkipainikkeiden alta löytyy vaihtoehtoja, joista voidaan valita tietoja syöttökenttiin silloin, kun niitä ei ole saatu TRT-mittauksesta. Esimerkissä lämmönjohtokyvyn ja volumetrisen lämpökapasiteetin kohdalle on valittu graniitti, joka on yleisin maalaji Suomessa. Kohtiin ”Maanpinnan lämpötila” ja ”Maaperän lämpövuoto” on valittu Turun paikkatiedot kohteen sijaintipaikan mukaan.

Maaperän ominaisuudet	Arvo	Yksikkö
Lämmönjohtokyky	2,600	W/(m·K)
Volumetrinen lämpökapasiteetti	2,100	MJ/(m³·K)
Maanpinnan lämpötila	4,800	°C
Maaperän lämpövuoto	0,04000	W/m²

Kuva 7. Mitoitustiedot, maaperän ominaisuudet

2.7.2 Lämpökaivo ja lämmönvaihdin

Energiakaivon tiedot täytetään kuten kuvassa 8. Ensin valitaan mitä putkitusta kohteen energiakaivoissa käytetään. Vaihtoehdot ovat coaxial, U-putki, tupla-U tai tripla-U. Yleisimmin energiakaivoissa käytetty on U-putkitus. ”Ominaisuudet” kohdassa kysymysmerkki painikkeen alta valitaan energiakentän muoto mahdollisimman lähelle tulevaa energiakenttää. Seuraaviin aukkoihin täytetään energiakaivojen syvyys ja niiden etäisyys. ”Halkaisija”-kohtaan valitaan poratun energiakaivon halkaisija, johon putket asennetaan. Seuraavaan aukkoon syötetään energiakaivon lämpövastus, joka kuvastaa kaivon seinämän ja lämmönkeruunesteen välistä lämpövastusta. Mitä pienempi arvo on, sitä paremmin lämpö siirtyy kaivosta keruunesteeseen. Täytteen lämmönjohtavuudella tarkoitetaan energiakaivon putkituksien ympärillä olevaa nestettä tai materiaalia ja tämä voidaan valita kysymysmerkkipainikkeen alta. Seuraavaan kohtaan syötetään energiakaivolle tai -kaivoille menevä tilavuusvirta. Seuraavien kolmen aukon tiedot voidaan valita kysymysmerkkipainikkeen alta, josta valitaan energiakaivoon menevän putken koko ja lämmönjohtokyky. Tämän jälkeen arvioidaan, kuinka erillään putket ovat toisistaan ja ovatko ne kiinni kaivonseinämissä koko kaivon syvyydeltä. Ihanne-tilanne olisi, että putket olisivat kiinni kaivon seinämissä. Tätä ei pystytä kuitenkaan millään tavalla varmistamaan. Simuloidessa putkien väli kannattaa asettaa

liukusäätimestä alle puolenväli, koska putkien sijaintia ei tiedetä kaivossa tarkasti ja saatavaa tuottoa ei kannata yliarvioida.

Kuva 8. Energiakentän mitoitus tiedot

2.7.3 Lämpökaivon lämpöresistanssi ja lämmönsiirtoneste

Energiakaivon termiset vastukset syötetään kuvan 9 mukaisesti. Jos kohteeseen on tehty TRT-mittaus, voidaan mittaustuloksesta saatuja tuloksia käyttää valitsemalla ”käytä vakioarvoja” ja syöttää aukkoihin saadut tulokset. Muussa tapauksessa on perusteltua antaa ohjelman antaa laskea ne. Valitsemalla ”huomioi sisäinen lämmönsiirto” ohjelma ottaa huomioon energiakaivossa tapahtuvan meno- ja paluuputkessa

kulkevan nesteen välisen lämmönsiirron. Kuvassa 10 valitaan järjestelmässä käytettävä lämmönsiirtoneste kysymysmerkkipainikkeen alta.

Kuva 9. Energiakaivon lämpöresistanssi

Kuva 10. Lämmönsiirtoneste

2.7.4 Lämpökuormat

Kuvassa 11 syötetään rakennuksen vuosittaiset lämmitys- ja jäähdytyskuormat megawattitunteina (MWh) ja arvioidaan järjestelmän vuosihyötysuhde (SPF). SPF (Seasonal Performance Factor) on ”Lämpöpumpun vuoden keskimääräinen lämpötilakerroin, joka on lämpöpumpulla tuotetun vuotuisen energian suhde lämpöpumpun sekä apulaitteiden vuosuisen sähkönkulutukseen” (Lämpöpumppujen energialaskenta-ohjelma, 2012, 4). Ohjelma arvioi kullekin kuukaudelle lämmitys- ja jäähdytyskuormat. Näitä on perusteltua käyttää, jos rakennukselle ei ole tehty simulointia, josta saisi tarkat kuukausittaiset kuormat. Tarvittavan lämpimän käyttöveden osuus on syötettävä myös megawattitunteina (MWh) ja arvioida järjestelmän vuosihyötysuhde (SPF).

Peruskuorma

Peruskuorma (Ilman LKV):

Vuosittainen energia ja kuukausittainen profiili
 Kuukausittaiset energia-arvot

[MWh]	Lämpö	Vileä	Maa
Vuotuinen	296,000	178,000	Päivitys
SPF	3,50	99999,00	
	<input type="checkbox"/> Suora	<input type="checkbox"/> Suora	
Tammikuu	0,155	0,110	15,810
Helmikuu	0,148	0,075	20,560
Maaliskuu	0,125	0,098	11,603
Huhtikuu	0,099	0,083	8,776
Saattaa	0,064	0,077	2,444
Kesäkuu	0,000	0,057	-7,527
Heinäkuu	0,000	0,057	-7,527
Elokuu	0,000	0,054	-6,993
Syyskuu	0,061	0,084	0,564
Lokakuu	0,087	0,095	4,103
Marraskuu	0,117	0,100	9,556
Joulukuu	0,144	0,110	13,485
Summa:	1	1	64,855

Lämminkäyttövesi (LKV):

Vuotuinen SPF

[MWh]	Lämpöpumppu	Maa	Rakennus
Lämpö	296x1/3,5 (84,571)	+ 296x2,5/3,5 (211,43)	= 296
LKV	44x1/3,5 (12,571)	+ 44x2,5/3,5 (31,429)	= 44
Vileä	178x0 (0)	+ -178x1 (-178)	= -178
Lämpö	Lämpöpumppu 97,143 ==> ^	Rakennus Maa 242,86	==> 340
Vileä	Lämpöpumppu 0 ==> v	Rakennus Maa 178	<== 178

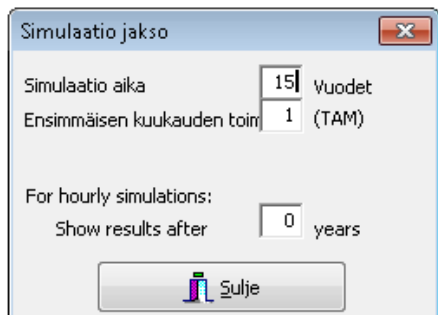
Maaperästä saatu lämpöenergia 211,43+31,429-178=64,8

Kuva 11. Kohteen lämmitys- ja jäähdytyskuormat

2.7.5 Huippukuormat ja simulointijakso

Kuvassa 12 asetetaan simulointijakson pituus ja mistä kuukaudesta simulointi alkaa. Alimpaan aukkoon syötetään vuosi, jonka maaperän kuormituksesta halutaan tehdä tuntikohtainen simulointi (Kuva 14). Kuvassa 13 on arvioitava maalämpöpumpun huipputehot kullekin kuukaudelle lämmityksen- ja jäähdytyksen osalta sekä

arvioitava tunteina, kuinka pitkän ajanjakson pumppua käytetään kuukaudessa huipputeholla. ”Graafi” painikkeen alta on mahdollista saada grafiikkanäkymä, jossa on kuvattu kuukausittaiset kuormat.



Kuva 12. Simulointijakson pituus

	Huippu lämpö		Huippu viilennys	
	Teho [kW]	Kesto [h]	Teho [kW]	Kesto [h]
Tammikuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Helmikuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Maaliskuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Huhtikuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Saattaa	0,000	0,000	0,000	0,000
Kesäkuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Heinäkuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Elokuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Syyskuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Lokakuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Marraskuu	0,000	0,000	0,000	0,000
Joulukuu	0,000	0,000	0,000	0,000

Kuva 13. Kohteen huippukuormat kuukausittain

2.7.6 Tuntikohtainen simulointiprofiili ja hintatiedot

Alla olevassa kuvassa 14 on maaperän kuormituksen tuntikohtaisen simuloinnin aloituksen valintaruutu, jonka jälkeen simulointi voidaan tehdä aiemmin annetuilla arvoilla. Maaperän kuormitussimuloinnin voi tehdä painikkeesta ”show chart with resulted load profile”. Kuvassa 15 on kuvattu maaperän kuormitusprofiili vuoden ajanjaksona aiemmin syötetyillä tiedoilla. Kuvassa 16 on ”hintatieto” ikkuna, johon on mahdollista määritellä eri töiden hintoja. Ohjelma laskee loppuraporttiin kaikki yhteiskustannukset.

Hourly calculation (load profile)

Solve for hours

Make hourly loads from monthly base loads

Make hourly loads from monthly peak loads

Read file(s) with hourly values (exchanging any value given by monthly base and peak loads)

Use same annual variation (values for the first year will be used for all years)

Show chart with resulted load profile

File load options:

Directory path: C:\Users\aeau\Documents\BLOCON\EED 4\

Path: C:\Users\aeau\Documents\BLOCON\EED 4\

File types possible: (Click for help)

A. Read file with net heat injection:

qtest.txt Open OK 1 2

B. Read files with loads:

Heat: qtest.txt Open OK 1 2

Cool: qtest.txt Open OK 1 2

DHW: qtest.txt Open OK 1 2

C. Read file with loads in xls-style:

qxls.txt Open File not found 3

You can enable/disable separate loads for options B and C:

Heat:

Cool:

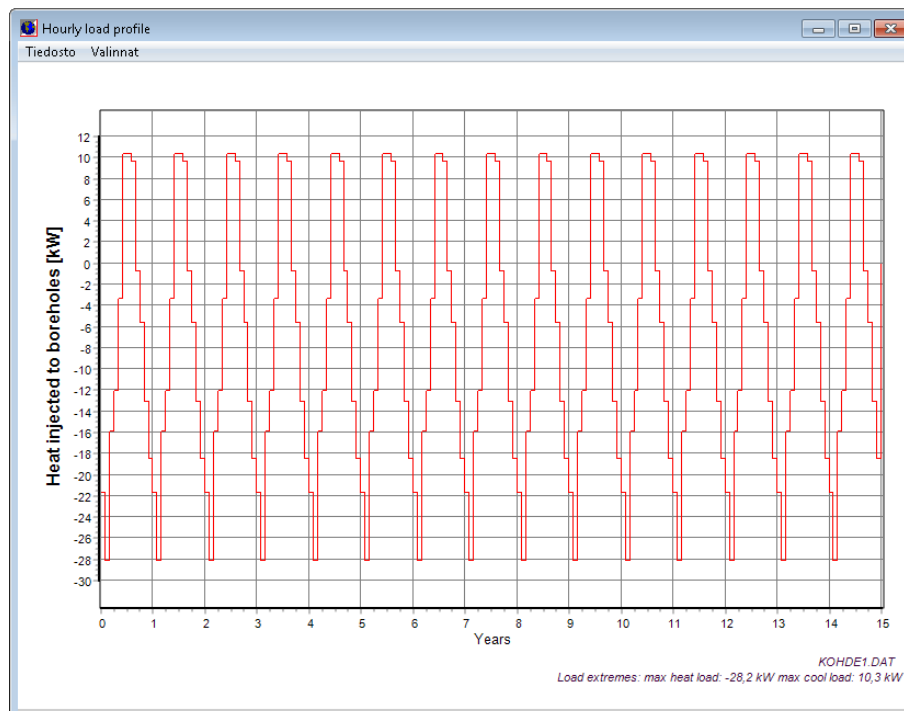
DHW:

Default date format: d.M.yyyy

Help on date formats

Debug. Check this box if you get error in load file.

Kuva 14. Tuntikohtainen mitoitus



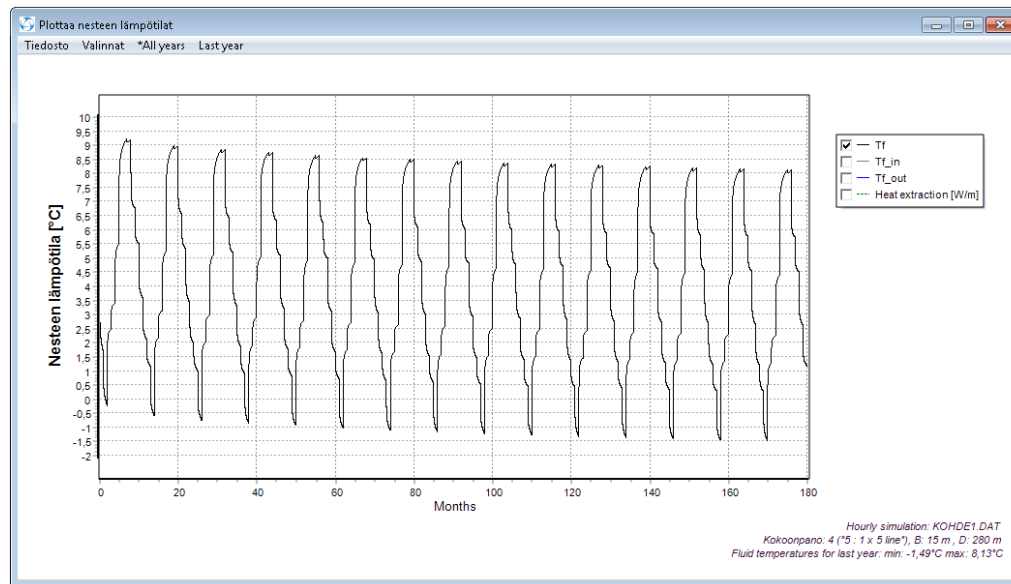
Kuva 15. Maaperän kuormitusprofiili

Valuutta	EUR
Aloituskustannukset	0,00 EUR
Poraus	
Kiinteäkustannus per lämpökai	0,00 EUR
Poraushinta metrille	0,00 EUR/m
Poraushinta pehmeään maahan	
Kiinteäkustannus per lämpökai	0,00 EUR
Poraushinta metrille	0,00 EUR/m
Syvyys	0,00 m
Dia	
Poraushinta metrille	0,00 EUR/m

Kuva 16. Energiakaivon porauksen hintatiedot

2.7.7 Energiakentän simulointi ja energiakentän optimointi

Kuvassa 17 on viidentoista vuoden simulointitulokset, jotka on saatu aiempien kuvien 7-12 arvoilla. Kuvaaja osoittaa energiakaivojen paluunesteen lämpötilan. Kuvaajaan saa näkyviin lämmönsiirtonesteen keskimääräisen lämpötilan ”Tf”, menoveden lämpötilan ”Tf_in”, paluuv veden lämpötilan ”Tf_out” ja energiakaivosta otettavan tehon metriä kohden ”Heat extraction”. Energiakenttää suunniteltaessa voidaan ohjelman avulla optimoida energiakenttä. Optimointia tehtäessä ohjelmaan syötetään kuviin 7-13 mitoitustiedot sekä kuvaan 19 lämmönsiirtonesteen raja-arvot. Kuvaan 18 määritellään energiakentän koko, energiakaivojen välien etäisyys, energiakaivojen syvyydet ja kuinka monella kaivolla järjestelmä olisi mahdollista toteuttaa. Ohjelma laskee parhaan mahdollisen energiakentän syötetyillä arvoilla. Optimoinnin jälkeen voidaan tuloksista valita kohteeseen sopiva energiakenttä, jolloin ohjelma päivittää kuvaan 8 energiakaivon ”Ominaisuudet”, ”Väli”, ”Syvyys” ja ”Halkaisija” -kentät.



Kuva 17. Simulointitulokset

Optimointi KOHDE1.DAT EED v4.20

Tiedosto

Ominaisuudet: 0 - 797 (Optimoi)

Maksimi maanpinta-ala: 50 x 100 m²

Porakaivojen väli: 15 - 20 m

Porakaivon syvyys: 50 - 300 m

Porakaivojen maksimi lukumäärä: 1 - 2000

Automaattinen askellus: Askel: 2 m

Lajittelu: Kokonaispituus, Hinta

31/31 "3 x 4, L-configuration"

20 m

Pyöristä arvot

Näytä myös tulokset joista varoituksia

922 konfiguraatiota kokeiltu

Ratkaisu: 193

Analyyssi alkoi 12:32:12, pysähtyi 12:32:23 aika: 11s

Parhaat konfiguraatiot: 3 22 233 4 23 30 102 5 24 31

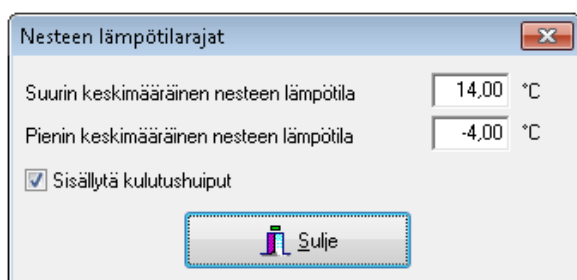
Kaksoisnapsauta riviä -> lisätietoja

Asetukset	kaivojen lkm.	Tyyppi	Väli [m]	Syvyys [m]	Kokonaispituus [m]	Maa-ala [m ²]	Pituus [m]	Leveys [m]	Kommentit	Hinta [EUR]
3	4	1 x 4 line	20	265,82	1063,3	60	60	1	Tarkan analyysin valinta	0
3	4	1 x 4 line	20	265,82	1063,3	60	60	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
3	4	1 x 4 line	19	266,59	1066,4	67	57	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
22	4	2 x 3 L-configur...	20	267,01	1068,1	800	40	20	Tarkan analyysin valinta	0
22	4	2 x 3 L-configur...	20	267,01	1068,1	800	40	20	Yksityiskohtainen analyysi	0
3	4	1 x 4 line	18	267,4	1069,6	54	54	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
22	4	2 x 3 L-configur...	19	267,85	1071,4	722	38	19	Yksityiskohtainen analyysi	0
3	4	1 x 4 line	17	268,26	1073	51	51	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
22	4	2 x 3 L-configur...	18	268,73	1074,9	648	36	18	Yksityiskohtainen analyysi	0
3	4	1 x 4 line	16	269,17	1076,7	48	48	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
22	4	2 x 3 L-configur...	17	269,65	1078,6	578	34	17	Yksityiskohtainen analyysi	0
233	4	2 x 2 rectangle	20	269,74	1079	400	20	20	Tarkan analyysin valinta	0
233	4	2 x 2 rectangle	20	269,74	1079	400	20	20	Yksityiskohtainen analyysi	0
3	4	1 x 4 line	15	270,12	1080,5	45	45	1	Tarkan analyysin valinta	0
22	4	2 x 3 L-configur...	16	270,62	1082,5	512	32	16	Yksityiskohtainen analyysi	0
233	4	2 x 2 rectangle	19	270,63	1082,5	361	19	19	Yksityiskohtainen analyysi	0
22	4	2 x 3 L-configur...	15	271,65	1086,6	450	30	15	Tarkan analyysin valinta	0
233	4	2 x 2 rectangle	18	271,67	1086,3	324	18	18	Yksityiskohtainen analyysi	0
233	4	2 x 2 rectangle	17	272,66	1090,3	289	17	17	Yksityiskohtainen analyysi	0
233	4	2 x 2 rectangle	16	273,64	1094,5	256	16	16	Yksityiskohtainen analyysi	0
4	5	1 x 5 line	20	219,51	1097,5	80	80	1	Tarkan analyysin valinta	0
4	5	1 x 5 line	20	219,51	1097,5	80	80	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
233	4	2 x 2 rectangle	15	274,82	1099,3	225	15	15	Tarkan analyysin valinta	0
4	5	1 x 5 line	19	220,38	1101,9	76	76	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
23	5	2 x 4 L-configur...	20	220,43	1102,2	1200	60	20	Tarkan analyysin valinta	0
23	5	2 x 4 L-configur...	20	220,43	1102,2	1200	60	20	Yksityiskohtainen analyysi	0
30	5	3 x 3 L-configur...	20	220,7	1103,5	1600	40	40	Tarkan analyysin valinta	0
30	5	3 x 3 L-configur...	20	220,7	1103,5	1600	40	40	Yksityiskohtainen analyysi	0
4	5	1 x 5 line	18	221,32	1106,6	72	72	1	Yksityiskohtainen analyysi	0
23	5	2 x 4 L-configur...	19	221,38	1106,9	1083	57	19	Yksityiskohtainen analyysi	0
102	5	3 x 2 U-configur...	20	221,71	1108,6	800	40	20	Tarkan analyysin valinta	0
30	5	3 x 3 L-configur...	19	221,69	1108,4	1444	38	38	Yksityiskohtainen analyysi	0

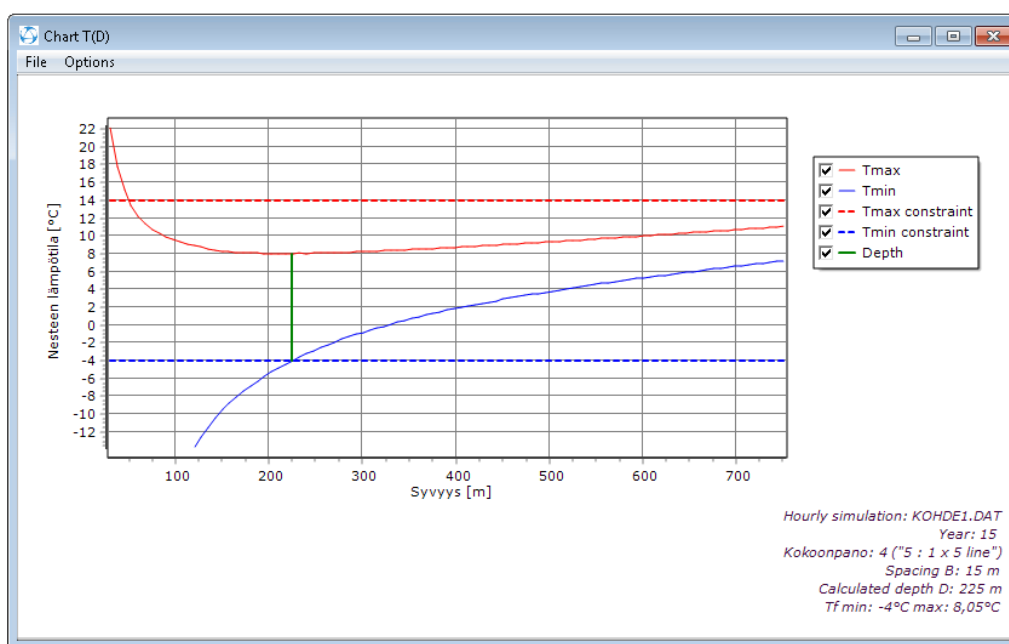
Kuva 18. Energiakaivon optimointi

2.7.8 Nesteen lämpötilarajat ja energiakaivon mitoitus

Kuvassa 19 asetetaan nesteen lämpötilarajat, jotka ohjelma ottaa huomioon mitoittamassa energiakaivoa kuvassa 20 sekä energiakenttää optimoidessa kuvassa 18. Kuvassa 20 ohjelma on laskenut energiakaivon syvyyden aiemmin annetuilla arvoilla. Tästä ilmenee optimaalisin energiakaivon syvyys ”Depth” ja lämmönsiirtonesteen lämpötilat ”Tmin” ja ”Tmax” sekä lämpötilarajat ”Tmin constraint” ja Tmax constraint”.



Kuva 19. Lämmönsiirtonesteen lämpötilarajat



Kuva 20. Energiakaivon mitoitus

On erittäin tärkeää, että energiakenttä on mitoitettu oikein. Liian pieni energiakenttä jäätyy, jolloin energian saanti loppuu. Energiakenttää voidaan yrittää elvyttää regeneroimalla sinne lämpöenergiaa. Tämä tulee todella kalliiksi, koska kaivon elpyminen ei tapahdu nopeasti. Joka tapauksessa lämpökaivojen määrää on lisättävä, ettei energiakenttä pääse jäätymään uudelleen regeneroinnin jälkeenkään. On myös mahdollista, että elvyttäminen ei onnistu. Siinä tapauksessa energiakenttä on rakennettava

uudelleen. Liian suureksi rakennettu energiakenttä aiheuttaa vastaavasti ylimääräisiä porauskustannuksia, jotka olisi voitu välttää tarkemmalla mitoituksella ja simuloinnilla. (Gebwellin www-sivut 2020.)

Maalämpökohteiden energiatarve vaihtelee kohteesta riippuen yhdestä energiakaivosta useampaan. Ei ole selkeää kokoluokkaa, milloin energiakentän simulointi olisi kannattavaa tehdä. Suurempien energiatarpeiden kohteissa simulointi on kannattavaa tehdä, koska sillä pystytään varmistamaan kohteen energiakentän toiminta pitkällä aikavälillä. Simuloinnilla pystytään myös välttämään rakennettavan energiakentän alija ylimitoitus.

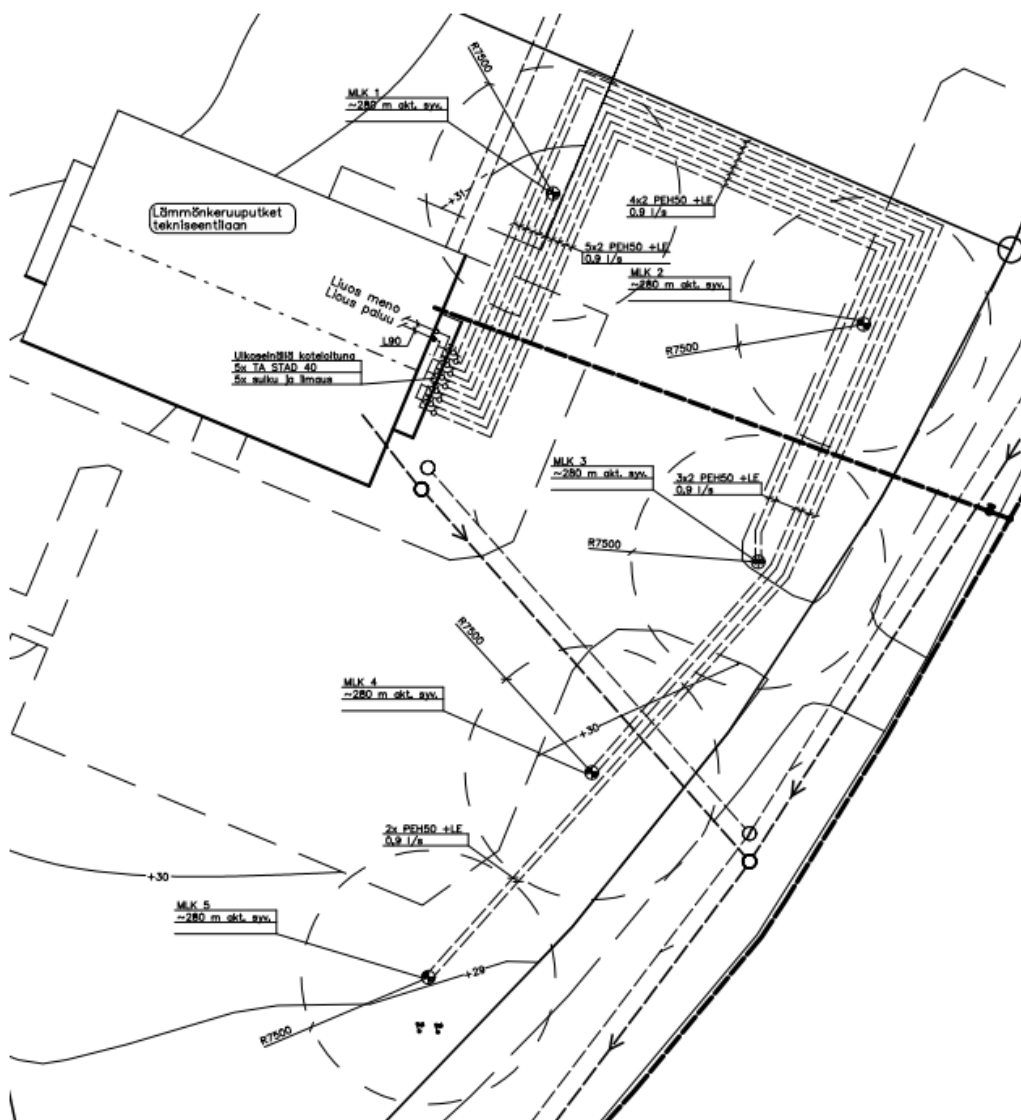
3 TUTKIMUSKOHTEET

Tutkimuskohteena on kaksi maalämpökohdetta, joiden energiakenttään ladataan lämpöenergiaa. Maalämpöjärjestelmistä on kerätty mittausdataa ja kohteille on laadittu energiakentän simuloinnit tämän tutkimustyön pohjaksi. Lämmöntalteenottolaitteella tuotettu lämmitysenergian teho on laskettu kaavalla 1 ja lämpötilaero kaavalla 2.

3.1 Kohde yksi

Ensimmäinen kohde on seitsemänkerroksinen asuinkerrostalo, joka on valmistunut vuonna 1965. Tässä kerrostalossa on lämmitettävää pinta-alaa 1932 m². Kohteesta saadut kulutustiedot sekä maalämpöpumppujen SPF-luvut ovat vuodelta 2017, joilla järjestelmä on mitoitettu suunnitteluvaiheessa. Rakennuksen lämmitysenergian tarve on noin 340 MWh/vuosi, josta 44 MWh on lämpimänkäyttöveden osuus. Lämmitysjärjestelmänä on maalämpö. Energiakenttä koostuu viidestä 280 metriä syvästä energiakaivosta, joita käytetään kahdella maalämpöpumpulla rakennuksen lämmitykseen. Kuvassa 21 on kuvattu kohteen asemakuva, jossa näkyy energiakaivojen sijoittelu tonilla. Rakennuksen ilmanvaihto on toteutettu koneellisella poistoilmalla, jolla poistetaan koko ajan 1,6 m³/s ilmaa. Poistoilmasta otetaan LTO-laitteella lämmitysenergiaa

talteen, jonka tuottamalla lämpöenergialla regeneroidaan maaperää. Lämmöntalteenoton tuottama lämmitysenergia on vuodessa laskennallisesti 178 MWh (Taulukko 1).



Kuva 21. Kohteen yksi asemakuva

3.1.1 Kohteen yksi LTO-patterin tuottama teho

Olen arvioinut, että kohteessa olevan LTO-laitteen vuosihyötysuhde on 70 %, jota olen käyttänyt LTO:n tuottaman tehon laskennassa kaavassa 1. LTO:n laskenta on esitetty taulukossa 1. Lämpötilaero on laskettu kaavalla 2 ja laskenta on esitetty taulukossa 2.

Kaava 1. Lämmöntalteenotolla talteen otetun tehon laskenta kaava (Suomen RakMK Energiatohokkuus 2018, 23- 24).

$$Q_{LTO} = \eta_{a,LTO} * td * tv * \rho_i * C_{pi} * q_v * \Delta T * h * d \quad (1)$$

Q_{LTO}	Tuotettu lämmitysenergia vuodessa (MWh)
$\eta_{a,LTO}$	LTO-patterin vuosihyötysuhde (%/100)
td	Poistoilmakoneen vuorokautinen käyntiaika (h/24h)
tv	Poistoilmakoneen viikoittainen käyntiaika (vrk/7vrk)
ρ_i	Ilman tiheys (kg/m ³)
C_{pi}	Ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg °C)
q_v	Poistoilmavirta (m ³ /s)
ΔT	lämpötilaero (°C)
h	Laitteen toiminta-aika vuorokaudessa (h)
d	Laitteen toiminta-aika kuukaudessa tai mitoitusjaksossa (pv)

Taulukko 1. LTO:n vuodessa tuottaman lämpöenergian tehon laskenta

Kuukausi	$\eta_{a,LTO}$	td	tv	ρ_i	C_{pi}	q_v	ΔT	h	d	Q_{LTO}
Tammikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	19,7	24	31	19 674
Helmikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	14,6	24	28	13 170
Maaliskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	18,0	24	31	18 015
Huhtikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	15,2	24	30	14 743
Toukokuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	13,6	24	31	13 629
Kesäkuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	10,4	24	30	10 055
Heinäkuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	10,1	24	31	10 109
Elokuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	9,6	24	31	9 624
Syyskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	15,9	24	30	15 342
Lokakuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	16,9	24	31	16 870
Marraskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	18,3	24	30	17 698
Joulukuu	0,7	1	1	1,2	1	1,6	18,6	24	31	18 638
YHTEENSÄ										178 MWh

$$\Delta T = T_{Poistoilma} - T_{Lämmönsiirtoneste} \quad (2)$$

ΔT	Lämpötilaero (°C)
$T_{Poistoilma}$	Poistoilman lämpötila (°C)
$T_{Lämmönsiirtoneste}$	Lämmönsiirtonesteen lämpötila (°C)

Taulukko 2. Lämpötilaeron laskenta kuukausittain

Kuukausi	$T_{\text{Poistoilma}}$	$T_{\text{Lämmönsiirtoneste}}$	ΔT
Tammikuu	21 °C	1,3 °C	19,7 °C
Helmikuu	21 °C	6,4 °C	14,6 °C
Maaliskuu	21 °C	3,0 °C	18,0 °C
Huhtikuu	21 °C	5,8 °C	15,2 °C
Toukokuu	21 °C	7,4 °C	13,6 °C
Kesäkuu	21 °C	10,6 °C	10,4 °C
Heinäkuu	21 °C	10,9 °C	10,1 °C
Elokuu	21 °C	11,4 °C	9,6 °C
Syyskuu	21 °C	5,1 °C	15,9 °C
Lokakuu	21 °C	4,1 °C	16,9 °C
Marraskuu	21 °C	2,7 °C	18,3 °C
Joulukuu	21 °C	2,4 °C	18,6 °C

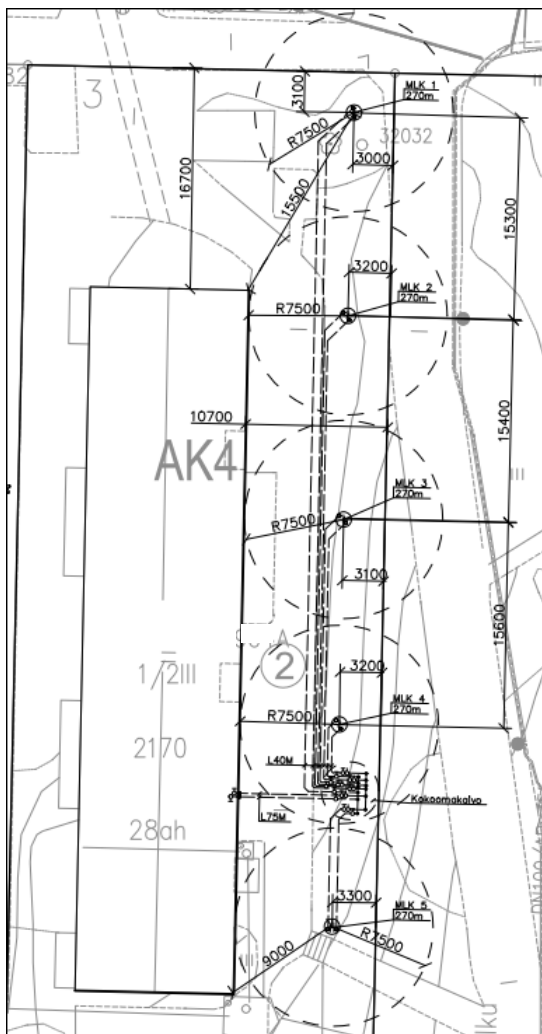
3.1.2 Kohteen yksi energiakentän simulointi

Maaperäperän ominaisuudet sain kohteen lähistöllä aiemmin tehdystä TRT-mittauksesta. Maaperän lämmönjohtokyky on 2,6 W/(mK) ja lämpökapasiteetti 2,1 MJ/m³K. Maanpinnan lämpötila 4,8 °C ja lämpövuoto 0,04 W/m² saatiin ohjelmasta Turun paikatiedon mukaan. Kohteessa on U-putkijärjestelmä ja energiakenttä koostuu viidestä energiakaivosta. Kaivot ovat 280 metriä syviä ja niiden etäisyys toisistaan on noin 15 metriä, yhtä kaivoa lukuun ottamatta. Simulointiohjelmasta valitsin lähimmäksi sopivan muodon, joka kuvaa kohteen energiakenttää ”4(”5 : 1 x 5, line”)”. Kaivojen halkaisija kohteessa on 114,3 mm. Kaivojen lämpövastuksiksi asetettiin 0,11 W/(mK) ja kaivoissa olevan nesteen lämmönjohtavuudeksi 0,6 W/(mK). Jokaisen kaivon tilavuusvirtaukseksi asetin 0,9 l/s. U-putken ulkohalkaisija on 50 mm, seinämän paksuus 2,9 mm ja lämmönjohtokyky on 0,420 W/(mK). Arvioin putkien välisen etäisyyden kaivossa olevan 55 mm keskeltä keskelle mitattuna. Lämmönsiirtonesteen etanolipitoisuus kohteessa on 28 %. Lämpökaivon lämpöresistanssi -ikkunasta valitsin, että ohjelma huomioi sisäisen lämmönsiirron sekä käyttää kaivon termisen vastuksen vakioarvoja neste/maa 0,1 W/(mK) ja sisäinen 0,5 W/(mK). Rakennuksen lämmityskuorma on 296 MWh vuodessa, jonka SPF on 3,5. Lämpimän käyttöveden lämmityskuorma on 44 MWh vuodessa, jonka SPF on 3,5. LTO:n tuottama lämmitysenergia vuodessa on 178 MWh, joka syötetään viilennyksen kohtaan kuvassa 11. LTO:n SPF-luku on

ohjelman käyttämä termi. Tässä tilanteessa luku syötetään mahdollisimman isoksi koska oletan, että kaikki lämpöenergia saadaan ladattua maaperään.

3.2 Kohde kaksi

Kohde kaksi on kolmekerroksinen asuinkerrostalo, joka on valmistunut vuonna 1976. Tässä asuinkerrostalossa on lämmitettävää pinta-alaa 2120 m². Kohteesta saadut kulu-
tustiedot sekä maalämpöpumppujen SPF-luvut ovat vuodelta 2017, joilla järjestelmä on mitoitettu suunnitteluvaiheessa. Rakennuksen lämmitysenergian tarve on noin 300 MWh/vuosi, josta 60 MWh on lämpimän käyttöveden osuus. Lämmitysjärjestelmänä on maalämpö. Energiakenttä koostuu viidestä 270 metriä syvästä energiakaivosta, joita käytetään yhdellä maalämpöpumpulla rakennuksen lämmitykseen. Kuvassa 22 on kuvattu kohteen asemakuva, jossa näkyy energiakaivojen sijoittelu tontilla. Rakennuksen ilmanvaihto on toteutettu koneellisella poistoilmalla, jolla poistetaan koko ajan 1,0 m³/s ilmaa. Poistoilmasta otetaan LTO-laitteella lämmitysenergiaa talteen, jonka tuottamalla lämpöenergialla regeneroidaan maaperää. Lämmöntalteenoton tuottama lämmitysenergia on vuodessa laskennallisesti 95 MWh (Taulukko 3).



Kuva 22. Kohteen kaksi asemakuva

3.2.1 Kohteen kaksi LTO-laitteen tuottama teho

Olen arvioinut, että kohteessa olevan LTO-laitteen vuosihyötysuhde on 70 %, jota olen käyttänyt LTO:n tuottaman tehon laskennassa kaavassa 1. LTO:n laskenta on esitetty taulukossa 3. Lämpötilaero on laskettu kaavalla 2 ja laskenta on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 3. LTO:n vuodessa tuottaman lämpöenergian tehon laskenta

Kuukausi	$\eta_{a,LTO}$	td	tv	ρ_i	C_{pi}	q_v	ΔT	h	d	Q_{LTO}
Tammikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	16,5	24	31	10 312
Helmikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	15,4	24	28	8 682
Maaliskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	15,1	24	31	9 462
Huhtikuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	13,3	24	30	8 019
Toukokuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	12,0	24	31	7 515
Kesäkuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	10,2	24	30	6 179
Heinäkuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	10,0	24	31	6 262
Elokuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	9,7	24	31	6 078
Syyskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	11,1	24	30	6 724
Lokakuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	13,1	24	31	8 210
Marraskuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	14,2	24	30	8 611
Joulukuu	0,7	1	1	1,2	1	1,0	14,5	24	31	9 067
YHTEENSÄ										95 MWh

Taulukko 4. Lämpötilaeron laskenta kuukausittain

Kuukausi	$T_{Poistoilma}$	$T_{Lämmönsiirtoneste}$	ΔT
Tammikuu	21 °C	4,5 °C	16,5 °C
Helmikuu	21 °C	5,6 °C	15,4 °C
Maaliskuu	21 °C	5,9 °C	15,1 °C
Huhtikuu	21 °C	7,7 °C	13,3 °C
Toukokuu	21 °C	9,0 °C	12,0 °C
Kesäkuu	21 °C	10,8 °C	10,2 °C
Heinäkuu	21 °C	11,0 °C	10,0 °C
Elokuu	21 °C	11,3 °C	9,7 °C
Syyskuu	21 °C	9,9 °C	11,1 °C
Lokakuu	21 °C	7,9 °C	13,1 °C
Marraskuu	21 °C	6,8 °C	14,2 °C
Joulukuu	21 °C	6,5 °C	14,5 °C

3.2.2 Kohteen kaksi energiakentän simulointi

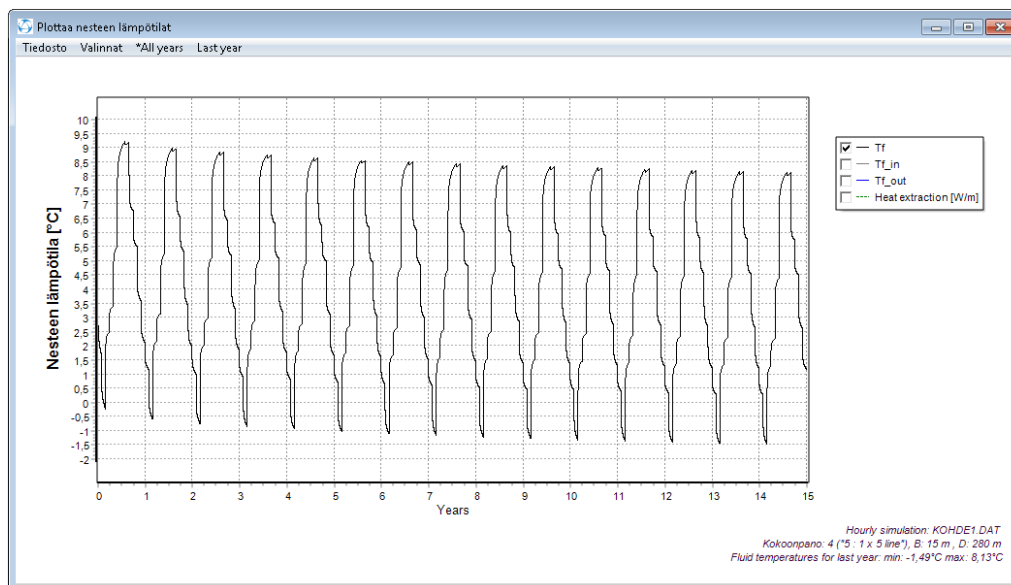
Maaperäperän ominaisuuksina käytin paikkatieto.fi -sivuston maaperätietoja. Maaperän lämmönjohtokyky on 3,4 W/(mK) ja lämpökapasiteetti 2,4 MJ/m³K. Maanpinnan lämpötila 4,8 °C ja lämpövuoto 0,04 W/m² saatiin ohjelmasta Turun paikkatiedon mukaan. Kohteessa on U-putkijärjestelmä ja energiakenttä koostuu viidestä energiakäivosta. Kaivot ovat 270 metriä syviä ja niiden etäisyys toisistaan on noin 15 metriä. Simulointiohjelmasta valitsin lähimmäksi sopivan muodon, joka kuvaa kohteen energiakenttää ”4(”5 : 1 x 5, line”)”. Kaivojen halkaisija kohteessa on 114,3 mm. Asetin

kaivojen lämpövastuksiksi 0,11 W/(mK) ja kaivoissa olevan nesteen lämmönjohtavuudeksi 0,6 W/(mK). Jokaisen kaivon tilavuusvirtaukseksi asetin 0,9 l/s. U-putken ulkohalkaisija on 40 mm, seinämän paksuus on 2,4 mm ja lämmönjohtokyky on 0,420 W/(mK). Arvioin putkien välisen etäisyyden kaivossa olevan 50 mm keskeltä keskelle mitattuna. Lämmönsiirtonesteen etanolipitoisuus kohteessa on 28 %. Lämpökaivon lämpöresistanssi -ikkunasta valitsin, että ohjelma huomioi sisäisen lämmönsiirron sekä käyttää kaivon termisen vastuksen vakioarvoja neste/maa 0,1 W/(mK) ja sisäinen 0,5 W/(mK). Rakennuksen lämmityskuorma on 300 MWh vuodessa, jonka SPF on 3,9. Lämpimän käyttöveden lämmityskuorma on 60 MWh vuodessa, jonka SPF on 3,9. LTO:n tuottama lämmitysenergia vuodessa on 95 MWh, joka syötetään viilennyksen kohtaan kuvassa 11. LTO:n SPF-luku on ohjelman käyttämä termi. Tässä tilanteessa luku syötetään mahdollisimman isoksi koska oletan, että kaikki lämpöenergia saadaan ladattua maaperään

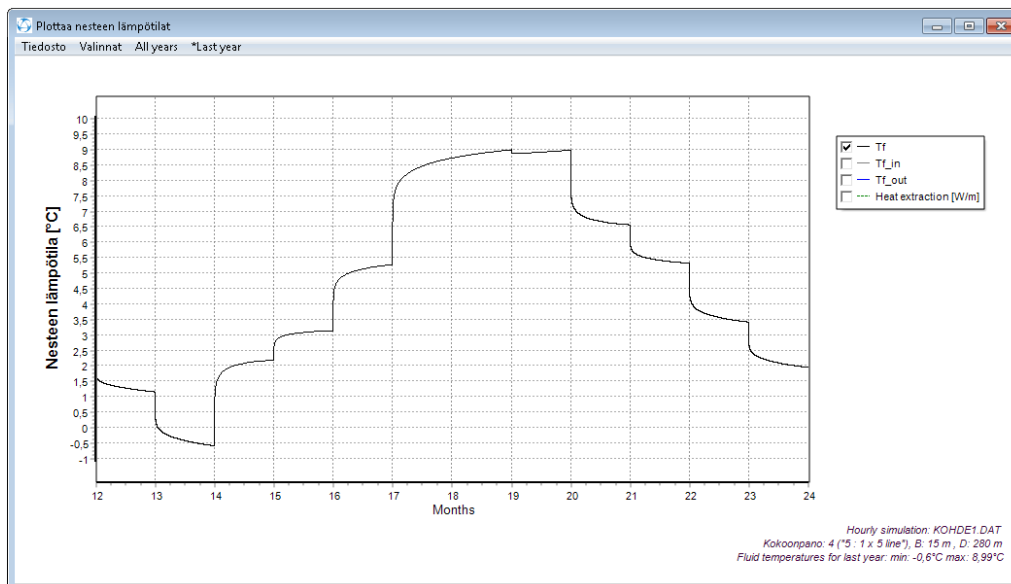
4 ENERGIAKENTÄN SIMULOINTITULOSTEN VERTAILU RAKENNUSAUTOMAATIOSTA SAATUIHIN TULOSSIIN

4.1 Kohteen yksi simulointitulokset

Tavoitteena on ollut simuloida mahdollisimman todellinen tilanne, jotta vertailua rakennusautomaatiosta saatuihin tuloksiin on mahdollista tehdä. Rakennusautomaatiosta saadut tulokset on saatu energiakentän paluunesteestä. Y-akselilla on nesteen paluulämpötilat ja X-akselilla on ajanjakso. Kohteen mittausdata on saatu rakennusautomaatiosta toukokuu 2018 – marraskuu 2020 väliseltä ajalta. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vuotta 2019, jossa ei ole ollut mittaushäiriöitä vuoden aikana. Kuvissa 23-24 on EED-simulointiohjelmalla saadut simulointitulokset. Kuvassa 23 on viidentoista vuoden simulointitulokset. Kuvassa 24 on toisen vuoden simulointijakso 1.1.-31.12.2019, jota verrataan rakennusautomaatiosta saatuun kuvan 25 mittausdataan.



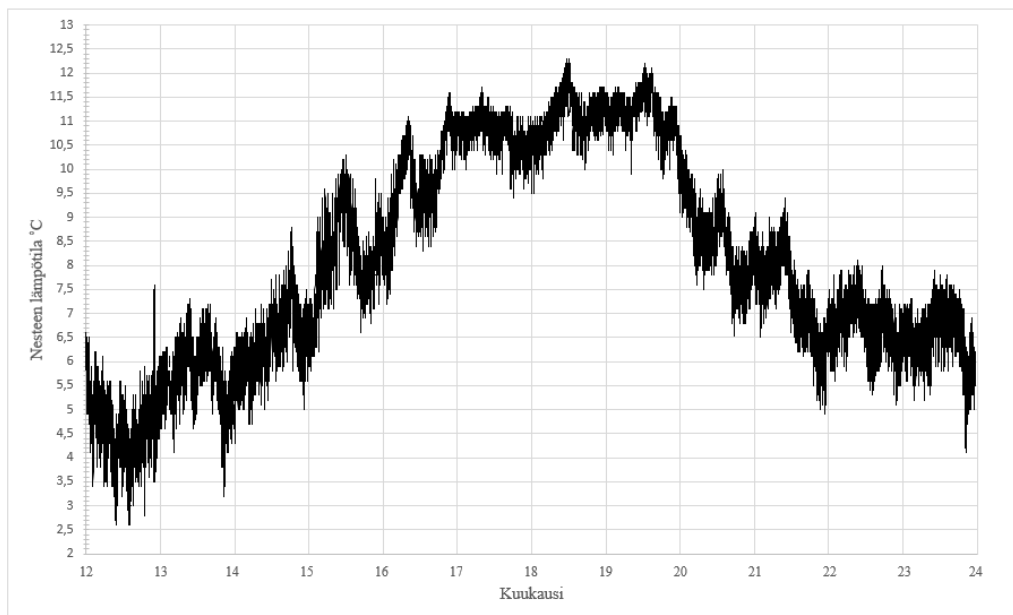
Kuva 23. Viidentoista vuoden simulointijakso



Kuva 24. Toisen vuoden simulointijakso

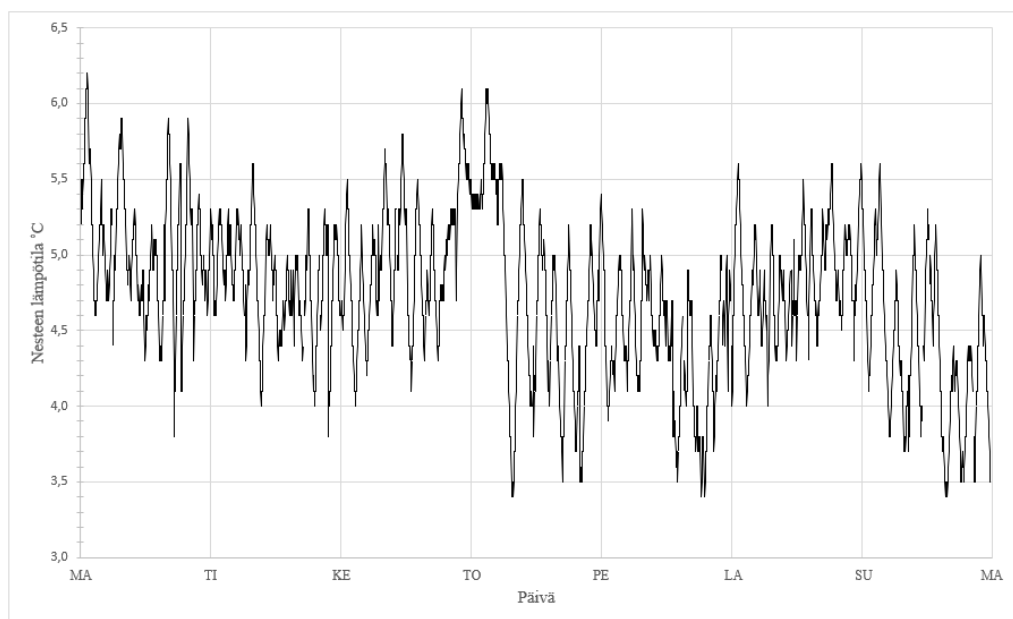
4.2 Kohteen yksi mittauslukokset

Kuvassa 25 on esitetty energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan mittausdata ajalta 1.1-31.12.2019. Kuvissa 26-29 on esitetty energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötilojen mittausdataa eri ajanjaksoilta.



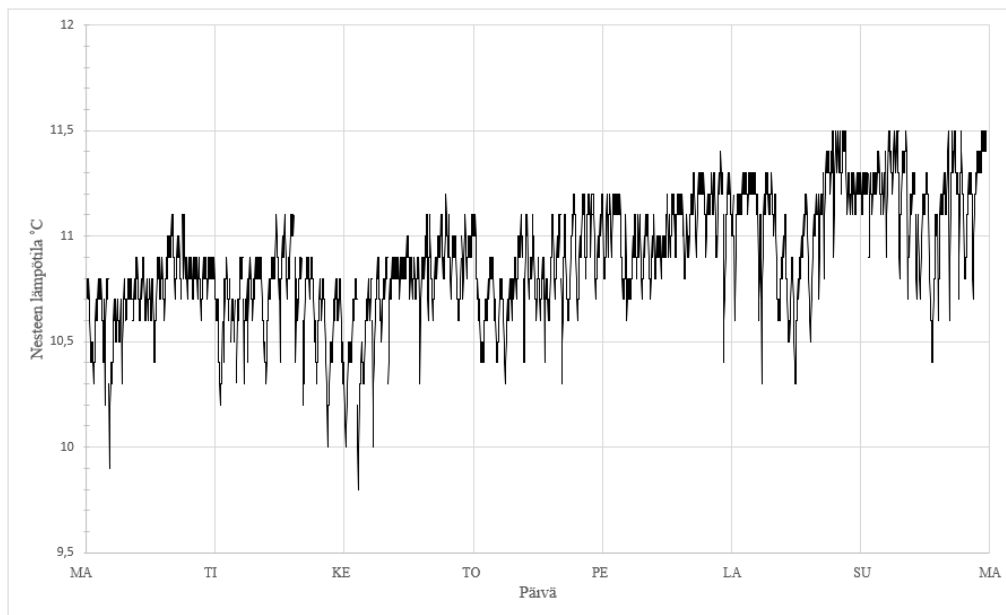
Kuva 25. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 1.1.-31.12.2019

Kuvassa 26 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja ajanjaksolta 14.-20.1.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat viikon aikana kuormituksesta riippuen 6,2 °C:n ja 3,4 °C:n välillä. Nesteen keskilämpötila on 4,8 °C.



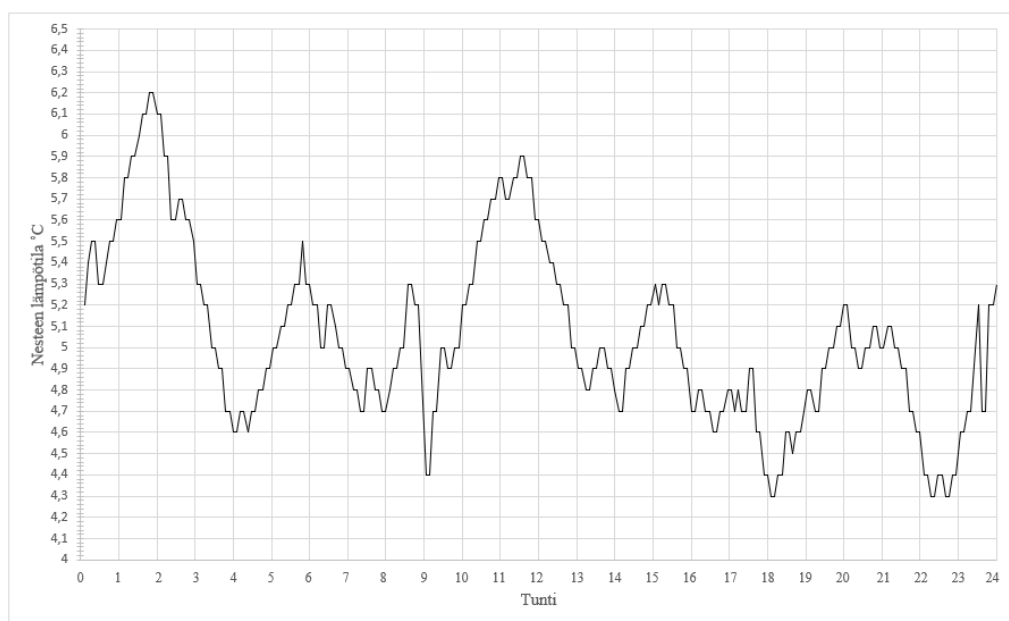
Kuva 26. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 14.-20.1.2019

Kuvassa 27 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja ajanjaksolta 15.-21.7.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat viikon aikana kuormituksesta riippuen 9,8 °C:n ja 11,5 °C:n välillä. Nesteen keskilämpötila on 11 °C.



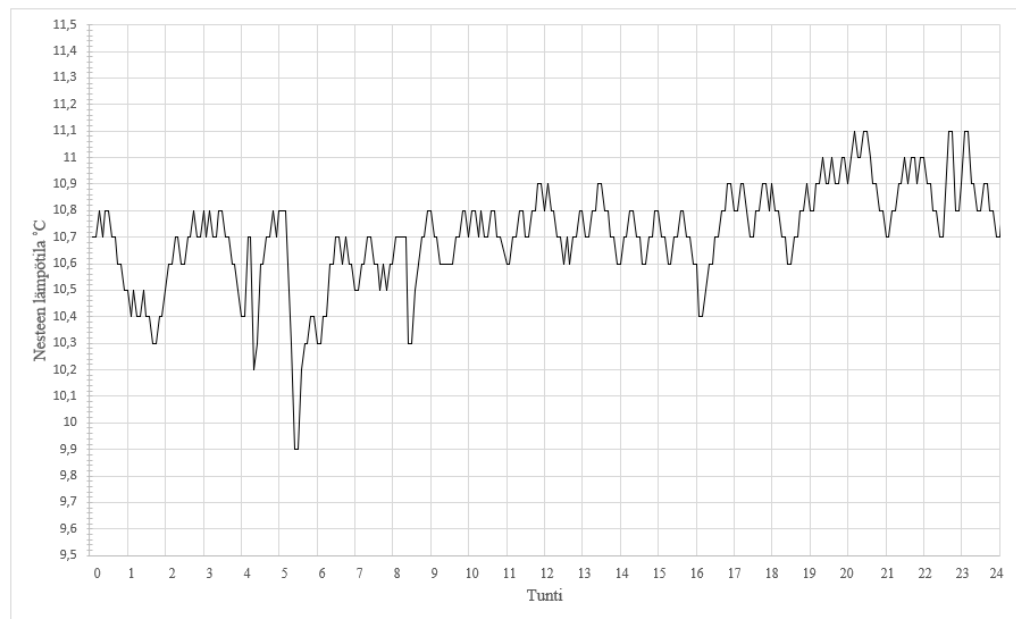
Kuva 27. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 15.-21.7.2019

Kuvassa 28 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja päivältä 14.1.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat päivän aikana 6,2 °C:sta 4,3 °C:n ja nesteen keskilämpötila on 5,1 °C.



Kuva 28. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat päivältä 14.1.2019

Kuvassa 29 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja päivältä 15.7.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat päivän aikana 9,9 °C:sta 11,1 °C:n ja nesteen keskilämpötila on 10,7 °C.



Kuva 29. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat päivältä 15.7.2019

4.3 Kohde yksi: simulointi- ja mittaustulosten keskinäinen vertailu

Alla olevassa taulukko 5 on esitetty simulointi- ja mittaustulosten kuukausittaiset lämmönsiirtonesteen keskilämpötilat sekä tulosten välinen lämpötilaero. Lämpötilaerot tulosten välillä ovat melko tasaiset koko vuoden ajan. Tämä johtuu siitä, että kohdetta simuloitaessa käytettiin suunnittelutiedoista saatuja kulutustietoja, jotka eivät olleet tarkastelu ajanjaksolta. Tarkasteltavan ajanjakson kulutus on ollut todellisuudessa alhaisempi, koska viime talvet ovat olleet leudompia kuin aiemmin. Simulointiohjelma on simuloimassa kuormittanut maaperää enemmän, jonka takia simulointituloksen nesteenlämpötilat ovat alhaisemmat kuin mittaustulokset.

Jos oletettaisiin, että tarkasteluvuonna rakennuksen kulutustiedot olisi olleet todelliset. Tulos osoittaisi, että energiakenttä lämpiäisi todellisuudessa enemmän kuin simulointitulokset. Silloin tästä voitaisiin päätellä, että maalämpöpumppu toimisi arvioitua paremalla hyötysuhteella koko vuoden ajan, koska maaperästä saataisiin lämpimämpää lämmönsiirtonestettä.

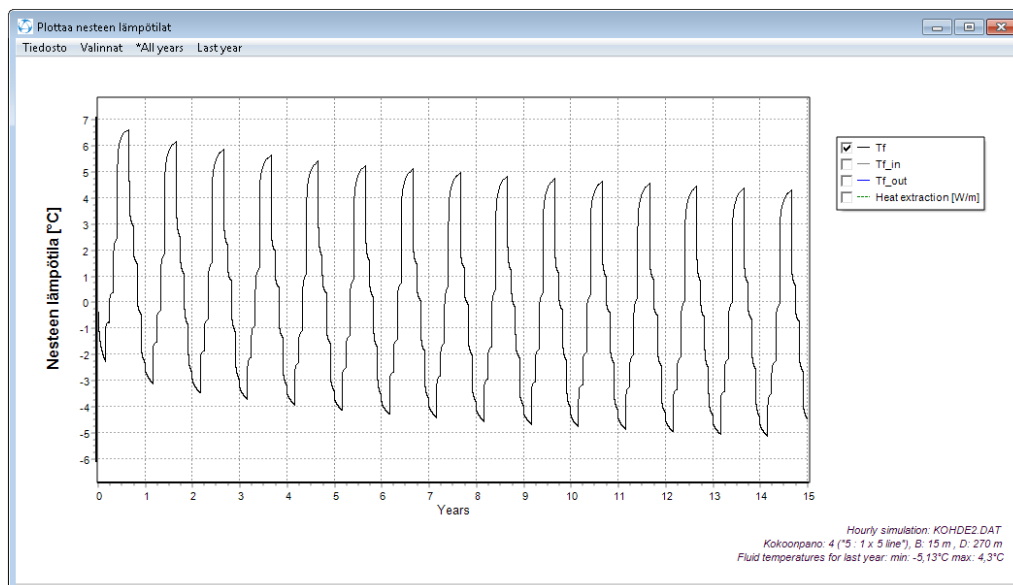
Taulukko 5. Simulointi- ja mittaustulosten vertailu

	Simulointitulokset	Mittausdata	
Kuukausi	Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila	Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila	Tulosten välinen lämpötilaero
Tammikuu	1,3 °C	4,5 °C	3,2 °C
Helmikuu	-0,3 °C	5,6 °C	5,9 °C
Maaliskuu	2,0 °C	5,9 °C	3,9 °C
Huhtikuu	3,0 °C	7,7 °C	4,7 °C
Toukokuu	5,0 °C	9,0 °C	4,0 °C
Kesäkuu	8,2 °C	10,8 °C	2,6 °C
Heinäkuu	8,7 °C	11,0 °C	2,3 °C
Elokuu	8,9 °C	11,3 °C	2,4 °C
Syyskuu	6,7 °C	9,9 °C	3,2 °C
Lokakuu	6,3 °C	7,9 °C	1,6 °C
Marraskuu	3,7 °C	6,8 °C	3,1 °C
Joulukuu	2,2 °C	6,5 °C	4,3 °C

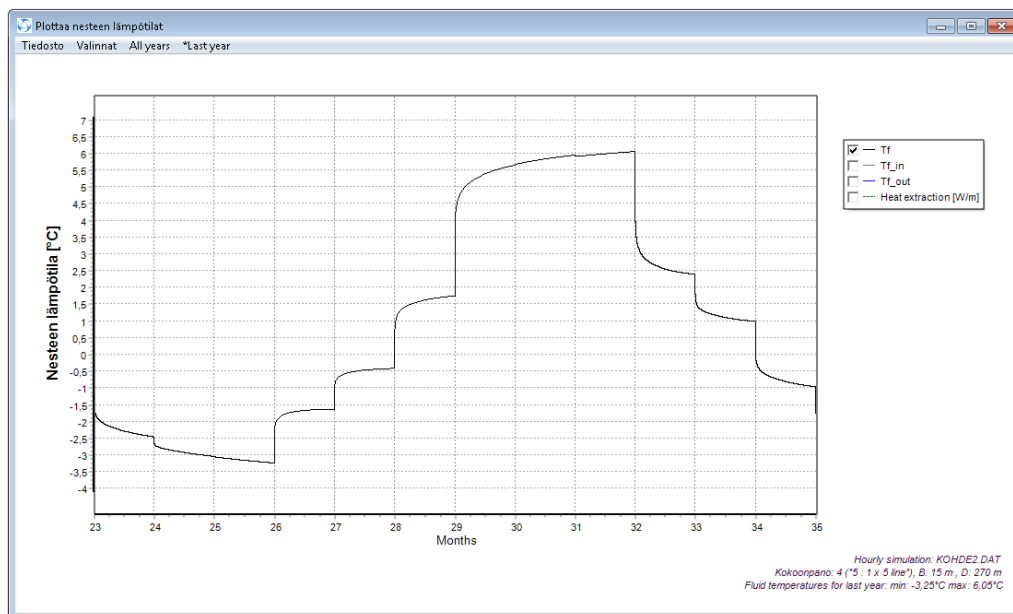
Mittausdatojen vertailun perusteella voidaan tulkita, että asukkaiden ollessa kotona hereillä, maaperää kuormitetaan. Kun taas asukkaat ovat töissä tai nukkuvat, maaperään latautuu lämpöenergiaa. Lämmityskaudella maaperästä puretaan huomattavasti enemmän energiaa, jolloin lämpötilavaihtelut ovat suuremmat kuin lämmityskauden ulkopuolella.

4.4 Kohteen kaksi simulointitulokset

Tavoitteena on ollut simuloida mahdollisimman todellinen tilanne, jotta vertailua rakennusautomaatiosta saatuihin tuloksiin on mahdollista tehdä. Rakennusautomaatiosta saadut tulokset on saatu energiakentän paluunesteestä. Kohteen mittausdata on saatu rakennusautomaatiosta toukokuu 2018 - marraskuu 2020 väliseltä ajalta. Tässä opinäytetyössä tarkastellaan joulukuu 2019 – marraskuu 2020 välistä ajanjaksoa, jossa ei ole ollut mittaushäiriöitä. Kuvissa 30 ja 31 on EED-simulointiohjelmalla saadut simulointitulokset. Kuvassa 30 on viidentoista vuoden simulointijakso kuvitteellisesti vuodesta 2018 lähtien. Kuvassa 31 on toisen vuoden simulointijakso 1.12.2019-30.11.2020, jota verrataan rakennusautomaatiosta saatuihin kuvan 32 mittausdataan.



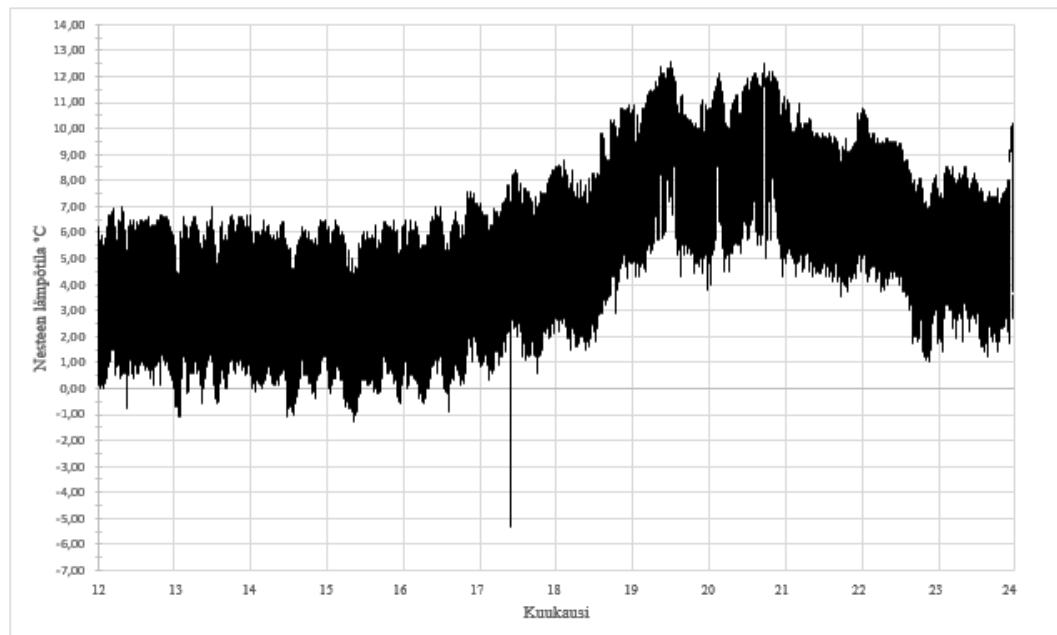
Kuva 30. Viidentoista vuoden simulointijakso



Kuva 31. Kolmannen vuoden simulointijakso

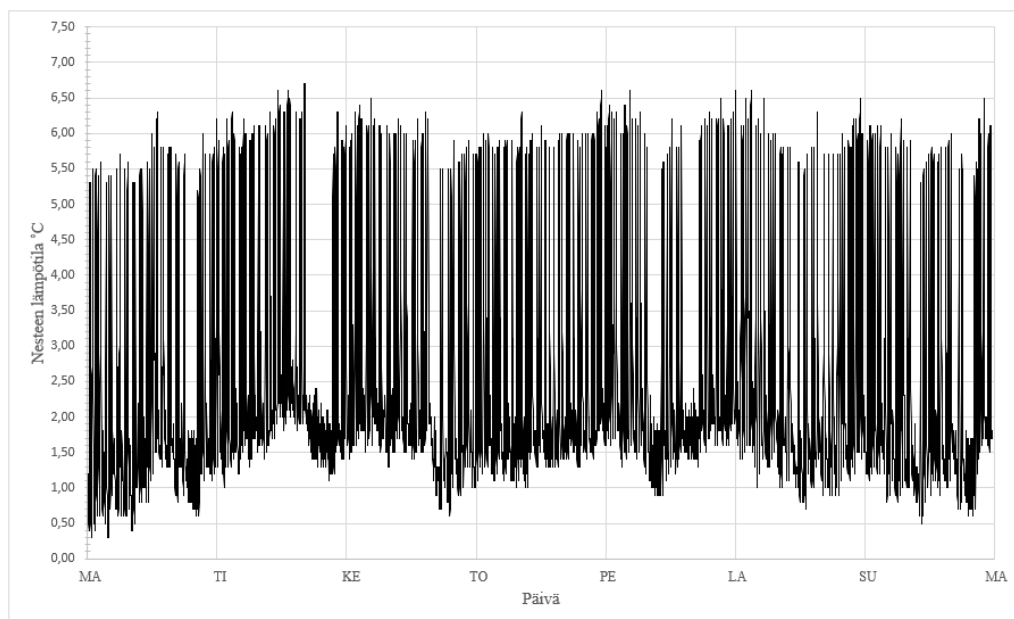
4.5 Kohteen kaksi mittaustulokset

Kuvassa 32 on kuvattu kohteen rakennusautomaatiosta saatua mittaustulosta ajanjaksolta 1.12.1019-30.11.2020. Esitetty mittaustulosta on energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötila. Kuvissa 33-36 on esitetty energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötilojen mittaustulosta eri ajanjaksoilta.



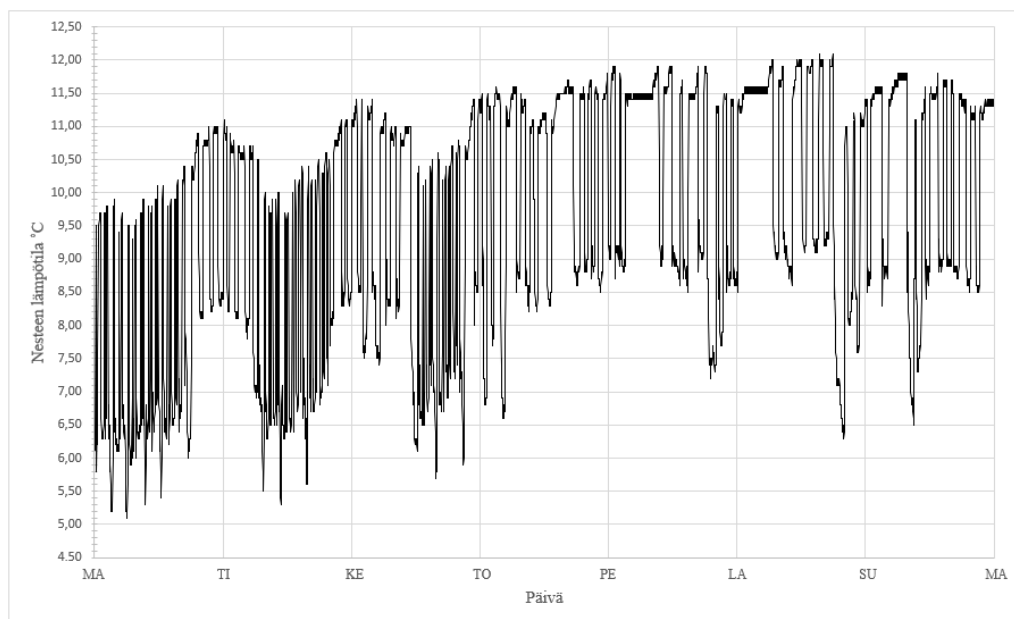
Kuva 32. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 1.12.2019-30.11.2020

Kuvassa 33 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja ajanjaksolta 14.-20.1.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat viikon aikana kuormituksesta riippuen 0,3 °C:n ja 6,7 °C:n välillä. Nesteen keskilämpötila on 2,6 °C.



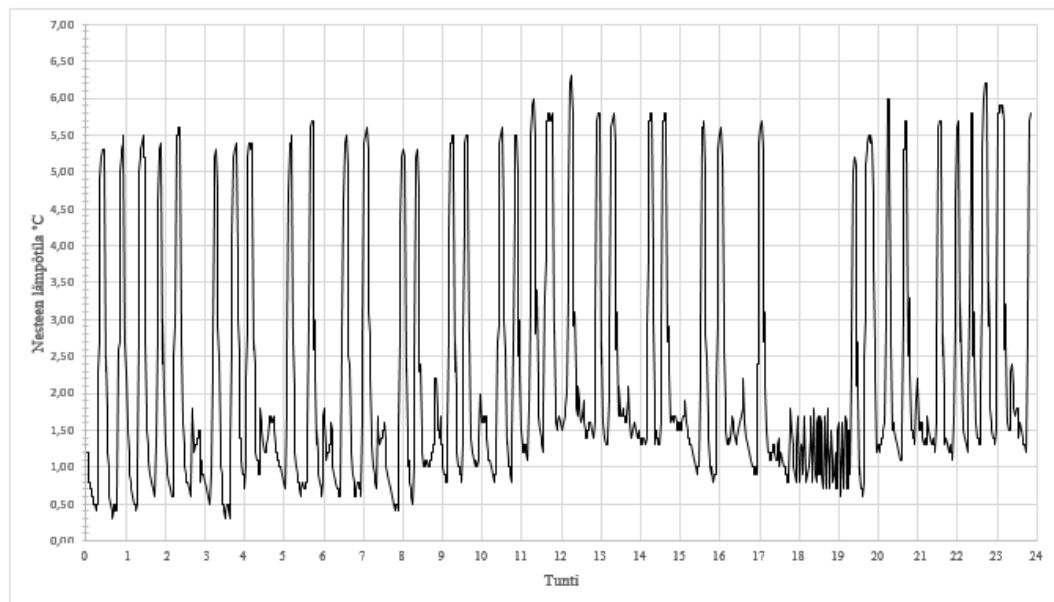
Kuva 33. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 14.-20.1.2020

Kuvassa 34 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja ajanjaksolta 15.-21.7.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat viikon aikana kuormituksesta riippuen 5,1 °C:n ja 12,1 °C:n välillä. Nesteen keskilämpötila on 9,6 °C.



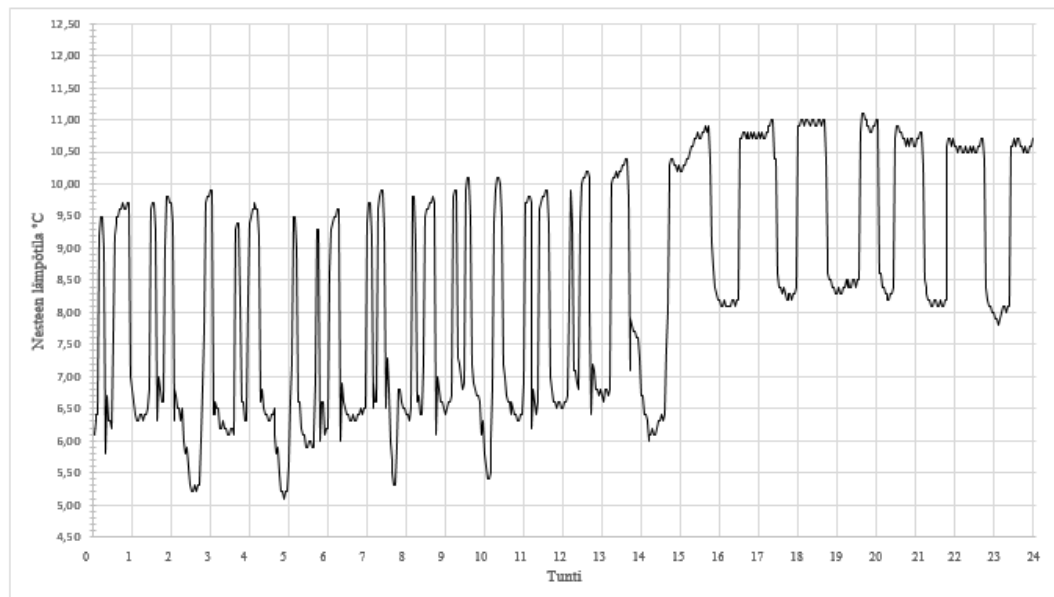
Kuva 34. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat aikavälillä 15.-21.7.2020

Kuvassa 35 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja päivältä 14.1.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat päivän aikana 0,3 °C:sta 6,2 °C:n ja nesteen keskilämpötila on 2,2 °C.



Kuva 35. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat 14.1.2020

Kuvassa 36 on kuvattu kohteen energiakentästä tulevan lämmönsiirtonesteen paluulämpötiloja päivältä 15.7.2019. Nesteen lämpötilat vaihtelevat päivän aikana 5,1 °C:sta 11,1 °C:n ja nesteen keskilämpötila on 8,3 °C.



Kuva 36. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötilat päivältä 15.7.2020

4.6 Kohde kaksi: simulointi- ja mittaustulosten keskinäinen vertailu

Alla olevassa taulukko 6 on esitetty simulointi- ja mittaustulosten kuukausittaiset lämmönsiirtonesteen keskilämpötilat sekä tulosten välinen lämpötilaero. Lämpötilaerot tulosten välillä ovat melko tasaiset koko vuoden ajan. Tämä johtuu siitä, että kohdetta simuloitaessa käytettiin suunnittelutiedoista saatuja kulutustietoja, jotka eivät olleet tarkastelu ajanjaksolta. Tarkasteltavan ajanjakson kulutus on ollut todellisuudessa alhaisempi, koska viime talvet ovat olleet leudompia kuin aiemmin. Simulointiohjelma on simuloimassa kuormittanut maaperää enemmän, jonka takia simulointituloksen nesteenlämpötilat ovat alhaisemmat kuin mittaustulokset.

Jos oletettaisiin, että tarkasteluvuonna rakennuksen kulutustiedot olisi olleet todelliset. Tulos osoittaisi, että energiakenttä lämpiäisi todellisuudessa enemmän kuin simulointitulokset. Silloin tästä voitaisiin päätellä, että maalämpöpumppu toimisi arvioitua paremalla hyötysuhteella koko vuoden ajan, koska maaperästä saataisiin lämpimämpää lämmönsiirtonestettä.

Taulukko 6. Simulointi- ja mittaustulosten vertailu

	Simulointitulostulos	Mittausdata	
Kuukausi	Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila	Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila	Tulosten välinen lämpötilaero
Joulukuu	-2,2 °C	2,4 °C	4,6 °C
Tammikuu	-3,0 °C	2,3 °C	5,3 °C
Helmikuu	-3,3 °C	1,8 °C	5,1 °C
Maaliskuu	-2,3 °C	2,1 °C	4,4 °C
Huhtikuu	-0,4 °C	3,3 °C	3,7 °C
Toukokuu	1,5 °C	5,1 °C	3,6 °C
Kesäkuu	5,1 °C	8,9 °C	3,8 °C
Heinäkuu	5,3 °C	8,1 °C	2,8 °C
Elokuu	5,9 °C	9,1 °C	3,2 °C
Syyskuu	2,7 °C	6,9 °C	4,2 °C
Lokakuu	1,2 °C	5,1 °C	3,9 °C
Marraskuu	-0,3 °C	4,4 °C	4,7 °C

Mittausdatojen vertailun on hankalaa, koska nesteen lämpötilat vaihtelevat koko ajan noin puolentunnin välein jopa 4,5 °C. Tästä on vaikea päätellä, mitä järjestelmässä tapahtuu. Nopeat nesteen lämmönvaihtelut voi aiheuttaa se, että maalämpöpumppu sammuu kerran tunnissa hetkeksi aikaa. Tällöin nesteen lämpötila nousee hetkellisesti korkealle, kun maaperästä ei pureta energiaa. Kuvista voidaan kuitenkin päätellä, että iltaisin ja öisin maaperästä ei pureta energiaa niin paljon kuin päiväisin. Lämmityskaudella maaperästä puretaan huomattavasti enemmän energiaa, jolloin lämpötilavaihtelut ovat suuremmat kuin lämmityskauden ulkopuolella.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Saadut mittaustulokset osoittavat, että maaperän lämpötilat ovat simulointitulosta lämpimämmät. Tämä voi johtui simuloinnissa käytetyistä rakennuksen kulutustiedoista, jotka eivät olleet tarkasteluajanjaksolta. Tarkasteluajanjaksolla talvet ovat olleet leudompia, jolloin kohteiden rakennukset eivät ole tarvinnut niin paljon lämmitysenergiaa kuin aiemmin. Mittaustuloksista voidaan tulkita, että näiden kohteiden energiantarveta puretaan energiaa silloin kuin asukkaat ovat kotona hereillä. Talvi- ja kesäajan

mittaustuloksia vertaillaessa voidaan tulkita, että lämmönsiirtonesteen lämmönvaihte-
lut ovat suuremmat talvisin kuin kesäisin.

Tämän työn aikataulun puitteissa ei pystytty tekemään tarkkaa lähtötietojen selvitystä, jonka perusteella olisi saatu kohteiden tarkastelujakson kulutustiedot sekä laskettua lämpöpumppujen SPF-luku. Kohteiden tarkat poistoilmamäärät ja LTO:n hyötysuh-
teet olisi myös tullut selvittää, jotta olisi voitu laskea LTO:lla tuotettu lämpöenergian
määrä tarkemmin. Nämä tulisi selvittää ja laskea uudelleen, jotta voitaisiin tehdä uudet
simuloinnit, jonka tuloksia pystyttäisiin vertailemaan mittaustuloksiin. Kohteista saa-
tiin vain muutamalta vuodelta mittaustuloksia, jos mittausdataa olisi pidemmältä aika-
väliltä pystyttäisiin selvittämään, kuinka hyvin maaperää pystytään regeneroimaan.

TRT-mittauksen ja simuloinnin tekeminen on mielestäni kannattavaa tehdä useam-
masta kaivosta koostuvalle energiakentälle. Simuloinnin avulla pystytään mitoitta-
maan järjestelmä optimaalisemmin ja saadaan arvioitua kuinka maaperä tulee reagoi-
maan pitkällä aikavälillä. Simulointi antaa luotettavan pohjan maalämpökohteiden
suunnitteluun ja sen avulla voidaan helposti tehdä suunnitelmista erilaisia variaatioita
kohteiden tarpeiden mukaan. Mielestäni TRT-mittauksen ja simulointiohjelman avulla
pystytään estämään kaivojen- ja energiakenttien yli- ja alimitoitus. Energiakentän ali-
mitoitus aiheuttaa kustannuksia, koska energiakenttää joudutaan elvyttämään sekä
sinne joudutaan mahdollisesti lisäämään uusia energiakaivoja. Vastaavasti ylimitoi-
tettu energiakenttä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia jo rakennusvaiheessa.

Mielestäni energiakaivoihin tulisi asentaa mittausanturit, joiden avulla kohteista voisi
kerätä mittaustuloksia koko ajan ja niitä voisi vertailla aiemmin tehtyihin simulointei-
hin. Kohteille voisi tehdä myös uuden simuloinnin vuosien päästä, johon asetettaisiin
todellisuudessa rakennuksen käyttämät lämmitys- ja jäähdytyskuormat. Uuden simu-
loinnin tuloksia voitaisiin vertailla todellisiin energiakentästä saatuihin lämpötiloihin.
Uudelleen simuloinnin avulla pystyttäisiin ottamaan huomioon simulointituloksen to-
dellisuus seuraavia kohteita suunniteltaessa. Mitä pidemmällä aikavälillä kohteiden
energiakenttien simulointia ja mittaustuloksia pystyttäisiin vertailemaan, sitä varmem-
maksi kohteiden energiakenttien optimointi tulevaisuudessa tulisi. Simuloinnin toden-
mukaisuus ja regeneroinnin kannattavuus tulisi myös todenmukaisemmaksi.

LÄHTEET

Motiva. 2012. Lämpöä omasta maasta – Maalämpöpumput. Viitattu 13.5.2020. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampo_omasta_maasta_maalampopumput.10752.shtml

Thermia www-sivut. 2020. Viitattu 13.5.2020. <https://www.thermia.fi/maalampo/maalampo1/miten-maalampo-toimii/>

Ympäristöministeriö. 2013. Helsinki: Ympäristöopas 2013, Energiakaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. <https://ym.fi/julkaisut>

Ympäristöministeriö. 2012 Helsinki: Lämpöpumppujen energialaskentaopas 2012. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

RT 103137. Lämpöenergian kausivarastointi. Rakennustieto 2020.

Tomallensenera www-sivut. 2020. Viitattu 20.05.2020. <https://www.tomallensenera.fi/maalampo>

Suomen kylmäyhdistys ry. 2017. Kylmäainetilanne 2017. <http://www.kylmayhdistys.com/www/att.php?type=2&id=175>

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf

LVI 11-10332. Lämpöpumput. 2002. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.

Gebwell. 2020. Kerrostalon kaivokentän suunnittelu. Viitattu 7.8.2020. <https://gebwell.fi/maalampo/kerrostalojen-maalampojarjestelmiin-tehokkuutta-kaivokentan-suunnittelulla/>

Guideline. 2016. For Seasonal Thermal Energy Storage Systems in the Built Environment. Viitattu 19.9.2020. http://e2b.ectp.org/fileadmin/user_upload/documents/E2B/EINSTEIN/einstein-guidelines_stes-tanks-del-38.pdf

Buildingphysics www-sivut. 2020. Viitattu 29.10.2020. <https://buildingphysics.com/eed-2/>

Gebwell www-sivut. 2020. Viitattu 4.11.2020. <https://gebwell.fi/maalampo/maajaahdytys/>

LVI-Nero Oy www-sivut. 2020. Viitattu 4.11.2020. <https://lvinero.fi/lvi-palvelut/lamitysarjestelma/maalampo/maakylma/>

Suomen RakMK, Energiatehokkuus. 2018. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohje 2018. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennukset ja rakentaminen.