



Jimi Laakso

Passiivisen maaviilennyksen teho- ja energiatarkastelu toimistoraken- nuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

5.1.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Jimi Laakso
Otsikko:	Passiivisen maaviilennyksen teho- ja energiatarkastelu toimistorakennuksessa
Sivumäärä:	38 sivua + 1 liite
Aika:	5.1.2022
Tutkinto:	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-suunnittelu
Ohjaajat:	diplomi-insinööri Oskari Morén yliopettaja Aki Valkeapää

Insinööritoimiston tavoitteena on tutkia maalämpöjärjestelmän yhteyteen asennettavan maaviilennyksen hyödyntämistä toimistorakennuksen jäähdyttämisessä. Työssä hyödynnetään toimeksiantaja Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:n suunnittelukohdetta.

Tarkastelun kohteena on energiakaivoista saatava jäähdytysenergia ja sen riittävyys rakennuksen jäähdytystehontarpeen kattamiseksi. Työssä suunnittelukohteen vuotuisen jäähdytystehontarve simuloidaan ja tulosten perusteella rakennukselle määritetään energiakaivokenttä. Energiakaivokentän simulointi suoritetaan energiakaivokenttien mitoittamiseen tarkoitettulla Earth Energy Designer -ohjelmalla.

Tutkimuksen tulosten perusteella nähdään, että maalämpöjärjestelmän yhteydessä toteutettava passiivijäähdytys on energiatehokas tapa kattaa osa rakennuksen jäähdytystarpeesta. Maasta saatavalla passiivijäähdytyksellä ei kuitenkaan pystytä kattamaan koko rakennuksen jäähdytyskuormaa. Kesäisin tehontarpeen kasvaessa passiivijäähdytystä joudutaan tukemaan lisäjäähdytyksellä.

Avainsanat: passiivijäähdytys, maaviilennyksen, energiakaivokentän optimointi

Abstract

Author:	Jimi Laakso
Title:	Power and Energy Analysis of Passive Ground Source Cooling in Office Building
Number of Pages:	38 pages + 1 appendix
Date:	5 January 2022
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Building Services Engineering
Professional Major:	HVAC Design
Supervisors:	Oskari Morén, Master of Science Aki Valkeapää, Principal Lecturer

The aim of this bachelor's thesis was to examine the utilization of ground cooling in connection with a geothermal system in the cooling of an office building.

The cooling energy obtained from vertical boreholes and its sufficiency to cover the cooling needs of the building was examined in the thesis. The annual cooling demand of the building was simulated, and based on the results, the borehole field was optimized. The simulation of the borehole field was performed with Earth Energy Designer, a program for vertical borehole design.

Based on the results of the thesis, passive cooling in connection to a geothermal system is an energy-efficient way of covering part of the cooling needs of the studied building. However, passive ground cooling will not be able to cover the entire cooling load of the building. Especially in the summer, when the need for cooling increases, passive cooling must be supported by additional cooling.

Keywords: passive cooling, ground cooling, borehole optimization

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Geoenergia	1
3	Energiakaivot	4
3.1	Energiakaivojen rakenne ja toteutus	4
3.2	Lämmönsiirtonesteet	7
4	Kohteen esittely	8
4.1	Kohteen perustiedot	8
4.2	Rakenteiden lähtötiedot	8
5	Sisäiset lämpökuormat	11
5.1	Lämpökuorma ihmisistä	11
5.2	Lämpökuorma valaistuksesta	12
5.3	Lämpökuorma sähkölaitteista	12
6	Ulkoiset lämpökuormat	12
7	IFC-tietomallin luominen	13
8	Riuska	16
8.1	Lämpökuormat ja kylmäsillat	17
8.2	Vuotoilma	19
8.3	Säätiedot	20
8.4	Ilmanvaihtojärjestelmä ja palvelualueet	21
8.5	Riuskan tulokset	25
9	Energiakaivokentän mitoitus	26
10	Simuloinnin tulokset	33
11	Yhteenveto	35
	Lähteet	37
	Liitteet	
	Liite 1: Energiakaivokentän luonnos	

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on tarkastella maalämpöjärjestelmän yhteyteen asennettavan maaviileän hyödyntämistä toimistorakennuksen jäähdyttämässä. Insinööriyössä tutkitaan energiakaivoista passiivisesti saatavaa jäähdytysenergiaa ja sen riittävyyttä suunnittelukohteen jäähdytystehontarpeen kattamiseksi. Insinööriyössä perehdytään myös maa- ja kallioperästä saatavaan uusiutuvaan jäähdytysenergiaan sekä tekijöihin, jotka vaikuttavat energiakaivosta saatavaan jäähdytysenergian määrään.

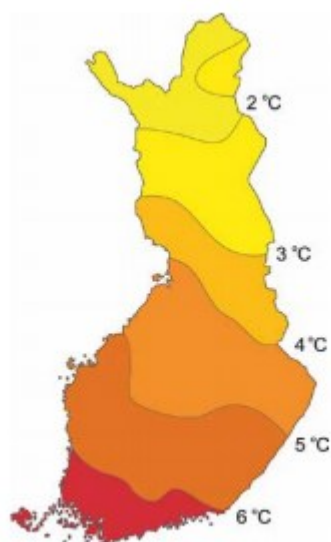
Työssä suunnittelukohde mallinnetaan ja vuotuinen jäähdytystehontarve simuloidaan. Tulosten perusteella rakennukselle mitoitetaan energiakaivokenttä. Energiakaivokentän simulointi suoritetaan energiakaivokenttien mitoitukseen tarkoitettulla Earth Energy Designer -ohjelmalla. Työn tuloksia voidaan jatkossa hyödyntää vastaavanlaisten kohteiden maaviilennysjärjestelmien suunnittelussa.

Insinööriyö tehtiin osana kiinteistön energiatehokkuuden parantamisselvitystä. Työssä hyödynnettiin toimeksiantajan Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:n suunnittelukohdetta. Insinööritoimisto Leo Maaskola on vuonna 1956 perustettu talo- ja rakennetekninen suunnittelu-, valvonta- ja projektinjohtotoimisto.

2 Geoenergia

Geoenergialla tarkoitetaan maa- ja kallioperästä saatavaa uusiutuvaa lämmitys- ja jäähdytysenergiaa. Maa- ja kallioperän pintakerrokseen varastoitunut energia on peräisin auringon lämpösäteilystä, kun taas syvemmällä kallioperässä esiintyvä lämpöenergia on lähinnä radioaktiivisten aineiden hajoamisesta syntynyttä geotermistä energiaa (1; 2).

Maaperän keskilämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan eli suurelta osin auringon säteilymäärän mukaan. Auringonsäteilyn vaikutus ulottuu vain noin 10–15 metrin syvyyteen, josta alaspäin lämpötila ei muutu vuodenaikojen mukaan. Vuosivaihteluvyöhykkeen alapuolella maanpinnan lämpötila kasvaa suurimaksi osin geotermisen lämpövuon eli geotermisen gradientin vaikutuksesta. Suomessa geotermisen gradientin voimakkuus on noin 0,5–1,0 °C sataa metriä kohden eli syvemmälle mentäessä keskilämpötila kasvaa noin yhden asteen sataa metriä kohti. Tämän johdosta eteläisessä Suomessa kallioperän lämpötila 300 metrin syvyydessä on noin 6–8 °C. (1) Kuvasta 1 ilmenee maanpinnan keskilämpötila maantieteellisen sijainnin mukaan.



Kuva 1. Maanpinnan vuotuinen keskilämpötila Suomessa (1).

Maanpinnan lämpötila pystytään arvioimaan tai mittaamaan kohtuullisen tarkasti. Puolestaan maanpinnan muiden lämpöteknisten ominaisuuksien arvioiminen on haastavampaa. Erilaisten kivilajien lämmönjohtavuuksissa on merkittäviä eroja, jotka voivat vaikuttaa oleellisesti energiakaivojen porareikien lukumäärään ja syvyyteen. Suomessa eri kivilajien lämmönjohtavuudet ovat 2–7 W/mK välillä. Näistä kivilajeista graniittiset kivilajit ovat yleisimmin esiintyvä kivilajiryhmä. Arviolta yli puolet Suomen kallioperän pinta-alasta koostuu graniittisista

kivilajeista, joista graniitti on yleisin. Graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,4 W/mK. Irtomaalajien lämmönjohtavuudet riippuvat taas pääosin maalajin kosteudesta. Vesipitoisen maalajin lämmönjohtavuus vaihtelee tyypillisesti 1–2 W/mK. Suomen yleisin maalaji on moreeni, joka on koostumukseltaan sekoitus erilaisia maalajikkeita. Moreenin keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 2 W/mK (1; 3). Taulukossa 1 on esitetty eri kivilajien lämmönjohtavuuksia Suomessa.

Taulukko 1. Eri kivilajien lämmönjohtavuuksia (3).

Kivilaji	Lämmönjohtavuus (W/mK)
Graniitti	2,9–4,2
Hiekkakivi	3,0–5,0
Saviliuske	1,7–3,5
Kalkkikivi	1,7–3,0
Kvartsiitti	5,0–7,0
Sora pohjavedenpinnan alla	1,6–2,0
Sora pohjavedenpinnan yllä	0,7–0,9

Taulukosta 1 voidaan nähdä, että kvartsiitin keskimääräinen lämmönjohtavuuskyky on huomattavasti korkeampi kuin muilla taulukon kivilajeilla. Kvartsiittia esiintyy kuitenkin Suomen kallioperässä melko vähän. Vain noin 4,3 % Suomen kallioperän pinta-alasta on kvartsiittia. (4)

3 Energiakaivot

Energiakaivo on kallioon porattu reikä, josta otetaan energiaa lämmitykseen sekä jäähdytykseen. Passiivisella maaviilennyksellä tarkoitetaan jäähdytysenergiaa, joka tuotetaan ilman maalämpöpumpun kompressorilla. Kiertovesipumpulla kierrätetään maassa viilentynyttä lämmönsiirtonestettä energiakaivojen ja ilmanvaihtokoneen tai jäähdytyslaitteiden välillä. Viileä lämmönsiirtoneste kulkee ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin tai puhallinkonvektorien läpi jäähdyttäen sisäilmaa ja palaa takaisin energiakaivojen keruuputkistoon. Jäähdytyspatterilta palaavaan lämmönsiirtonesteeseen sitoutunut lämpöenergia siirretään keruuputkistoa pitkin energiakaivoon, josta se varastoituu maahan. Jäähdytyskauden aikainen viilennys lataa lämpöenergiaa energiakaivoihin, jota voidaan hyödyntää seuraavan lämmityskauden aikana lämmitykseen. Tätä prosessia kutsutaan regeneroinniksi. Mitä korkeampi energiakaivojen lämpötila on jäähdytyskauden jälkeen, sitä parempi on lämmityksen hyötysuhde. (5; 1.)

3.1 Energiakaivojen rakenne ja toteutus

Energiakaivojen syvyys vaihtelee yleisesti 120–300 metrin välillä. Porareikiä voidaan tarvittaessa porata syvemmällekin, mutta usein on edullisempaa porata useampi kaivo. Energiakaivon pienen halkaisijan ansiosta kaivo voidaan sijoittaa kohtalaisen pienelle alueelle. Kallion porattujen reikien halkaisijat Suomessa vaihtelevat 105–165 millimetrin välillä. Energiakaivon porareikä porataan tavallisesti pystysuoraan alaspäin. Vinoreikiä voidaan käyttää tilanteissa, joissa kaksi tai useampi porareikä joudutaan poraamaan lähemmäksi kuin 15 metriä toisistaan. Vinoon porattujen energiakaivojen lähtöpisteiden ei tulisi kuitenkin sijaita viittä metriä lähempänä toisistaan, eikä niiden välisen kaltevuuskulman tule olla liian pieni. Riittävä kaltevuuskulma riippuu vierekkäisten porareikien lukumäärästä ja syvyydestä. (2; 6.) Kuvassa 2 on esitetty energiakaivojen poreikien suositeltuja minimietäisyyksiä.

Kohde	Suosittelut 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 ^[14]
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket)-5 m (muiden putket)**
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

* porareiän ollessa pystysuora

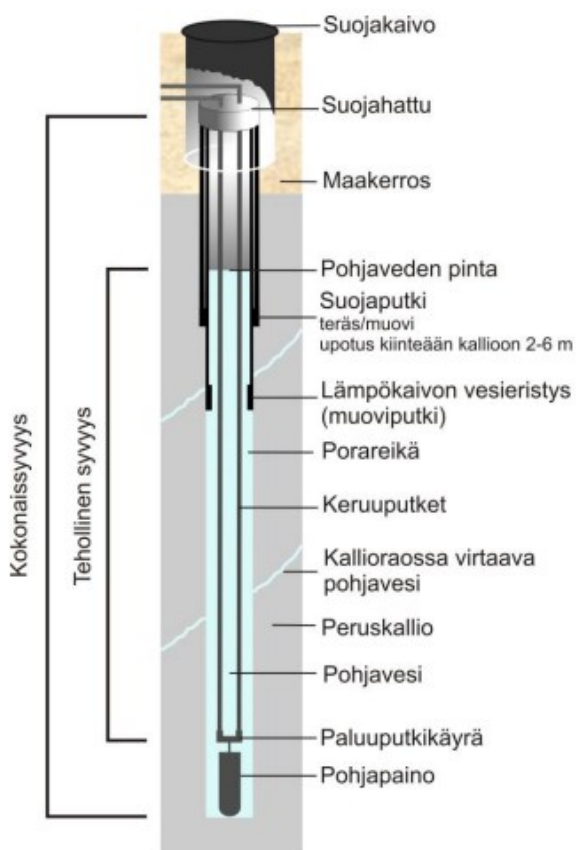
** etäisyys riippuu maaperän laadusta, kaivussyvyydestä ja kaivantoon sijoitettavista putkista

Kuva 2. Energiakaivojen porareikien suositellut minimietäisyydet (2).

Energiakaivon sijaintia suunniteltaessa on otettava huomioon alueella olevat muut energiakaivot, talousvesikaivot, etäisyys rakennuksista, rakennusten sijoittuminen ja tontin raja. Lisäksi porareiän sijainnin on oltava porauskaluston saatavutettavissa (2, 6).

Energiakaivojen lämmönkeruupiiri toteutetaan yleisimmin suljettuna keruupiirinä, joka koostuu energiakaivosta, lämmönkeruuputkistosta ja putkessa virtaavasta lämmönsiirtonesteestä. Keruuputkia on kahdentyypisiä: U-putkia ja koaksiaaliputkia. Näistä suljettu U-putki on energiakaivoissa yleisimmin käytetty keruuputkimalli. U-putkimallissa energiakaivoon asennetaan keruuputki, jonka mutkassa oleva pohjapaino laskee putken u-muotoisesti kaivon pohjalle. U-putkia on myös mahdollista asentaa kaksi samaan energiakaivoon eli kaksois-U-putki. Suomessa yleisimmin käytetty U-putki on ulkohalkaisijaltaan 40 millimetriä ja seinämän paksuudeltaan 2,4 millimetriä. Yli 300 metrin syvyisissä energiakaivoissa voidaan käyttää suurempiakin putkia, esimerkiksi ulkohalkaisijaltaan 45 tai 50 millimetrin putkea. Keruuputket ovat pääsääntöisesti valmistettu muovista, kuten polyeteenistä. Polyeteenin lämmönjohtavuus on 0,42 W/mK, joka on suuri verrattuna esimerkiksi polyvinyylikloridin (PVC) lämmönjohtavuuteen,

joka on vain 0,16 W/mK. (7; 2.) Kuvassa 3 on havainnollistettu tavanomaisen energiakaivon rakenne.



Kuva 3. Energiakaivon periaatekuva (2).

Keruuputken väliin on myös mahdollista asentaa erotin, joka pitää putken meno- ja paluupuolen erillään toisistaan. Menetelmällä yritetään vähentää putkihaarojen välistä haitallista lämmönsiirtoa. Lämmönsiirtoa tapahtuu etenkin syvemmissä energiakaivoissa, joissa lämmönsiirron vaikutus kasvaa pidemmän putken johdosta. Samanaikaisesti erotin siirtää putket lähemmäksi porakaivon seinämää, jolloin energiakaivon lämpövastus pienenee. (7)

3.2 Lämmönsiirtonesteet

Maaperän lämpötekniisiä ominaisuuksia voidaan pitää tärkeimpänä energiakaivojen mitoittamiseen vaikuttavana tekijänä, mutta mitoittukseen vaikuttaa olennaisesti myös lämmönsiirtonesteiden ominaisuudet. Hyvän lämmönsiirtonesteen ominaisuuksiin kuuluvat

- matala jäätymislämpötila
- alhainen viskositeetti
- hyvä lämmönjohtavuus
- korkea ominaislämpökapasiteetti (2).

Lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksien eroavaisuudet riippuvat liuosten pitoisuuksista ja lämpötilasta. Suomessa energiakaivojen keruuputkiston lämmönsiirtonesteinä käytetään yleisimmin veden ja etanolin muodostamaa liuosta. Liuosten etanolipitoisuudet vaihtelevat välillä 28–30 %, jolloin liuosten alin käyttölämpötila on noin $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Etanolia käytetään liuoksissa jäätymisen estoaineena, sillä lämmönsiirtonesteen lämpötila voi mennä alle nollan celsiusken. Aikaisemmin lämmönsiirtonesteissä jäätymisen estoaineena on voitu käyttää etyleeni- ja propyleeniglykolia. Näiden käytöstä on kuitenkin luovuttu niiden myrkyllisyyden takia. (2)

Etanolipohjaiset lämmönsiirtoaineet sisältävät alkoholilaissa määritellyjä denaturointiaineita. Niiden tarkoitus on tehdä etanoliliuoksesta juomakelvotonta. Lämmönsiirtonesteiden denaturointiin käytetään muun muassa metyyliketonia, isopropanolia ja n-butanolia. Lämmönsiirtonesteisiin on myös mahdollista sisällyttää korroosiota estäviä lisäaineita. Korroosionestoaineiden tarkoitus on estää käytettävän lämmönsiirtonesteen hajoamista. Kuitenkin nykyään energiakaivojen lämmönkeruupiirin putkistossa käytetään pääsääntöisesti ruostumattomia materiaaleja, eivätkä korroosionestoaineet ole välttämättömiä. (2)

4 Kohteen esittely

4.1 Kohteen perustiedot

Tarkasteltava kohde on vuonna 1993 valmistunut nelikerroksinen toimisto-/toimitalirakennus Espoossa. Pohjakerroksessa on autohalli sekä teknisiä ja tutkimukseen soveltuvia tiloja. Muissa kerroksissa on toimistotiloja, lukuun ottamatta ylintä kerrosta, jossa sijaitsevat IV-konehuoneet sekä saunatilat. Kohteessa on kaukolämpö sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto liuoskiertoisella lämmöntalteenotolla. Tilojen jäähdytys toteutetaan vedenjäähdytyskoneella ja katolla olevalla suora- ja epäsuorajäähdytyslaitteella. Kohteessa on tarkoitus siirtyä kaukolämmöstä maalämpöön ja samalla toteuttaa kohteen jäähdytys passiivisesti energiakaivoilla.

4.2 Rakenteiden lähtötiedot

Jäähdytyslaskelmissa täytyy huomioida rakenteiden massat ja paksuudet. Rakennuksen massa vaikuttaa lämmön varastoitumiseen ja kestoon, jolla lämpökuormat vaikuttavat. Raskasrakenteinen rakennus varaa päiväsaikaan itseensä lämpöä ja luovuttaa sitä yöllä, mikä taas vähentää päiväajan jäähdytystehon huippua (8). Rakenteiden lämmönläpäisykertoimet, materiaalit sekä paksuudet saatiin rakennuksen rakennesuunnitelmista. Lämmönläpäisykerrointa kuvataan U-arvolla, jonka yksikkö on ($\text{W/m}^2\text{K}$). Mitä pienempi U-arvo on, sitä parempi on rakenteen lämmöneristävyys. Kirjaamalla rakenteiden materiaalit ja paksuudet Riuska-ohjelmaan saadaan määriteltyä käytettyjen rakennetyyppien U-arvot.

Rakennuksen ulkoseinät ovat 310 mm ja 360 mm paksuja betonielementtiseiniä, joiden lämmönläpäisykerroin on $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Rakennuksessa on neljän tyyppisiä ulkoseinärakenteita. Ulkoseinien tarkemmat ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ulkoseinien materiaalit, paksuudet ja U-arvot.

	U-arvo (W/m²K)	Materiaali	Paksuus (mm)
US1	0,28	Teräsbetoni Mineraalivilla Teräsbetoni Pintakäsittely	60 140 160 / 110 -
US2	0,28	Kosteuseristys maan- pinna alapuolella Teräsbetoni Polyuretaanieriste Teräsbetoni Pintakäsittely	- - 60 90 160 -
US3	0,28	Kosteuseristys maan- pinnan alapuolella Teräsbetoni Ilmarako Polyuretaanieriste Teräsbetoni Pintakäsittely	- - 100 10 90 350 -
US4	0,28	Karkaistu julkisivulasi Tuuletusrako Tuulensuojalujalevy Metallirunko Mineraalivilla Höyrysulku Luja A-levy Pintakäsittely	6 20 4 - 140 - 10 -

Pääsääntöisesti rakennuksen ulkoseinät koostuvat taulukon 2 rakenteesta US1 eli betoni-sandwich-elementeistä.

Yläpohjarakenne koostuu pääosin bitumikermistasakatosta, jonka paksuus vaihtelee paikoittain. Laskelmissa yläpohjan lämmönläpäisykertoimena käytettiin 0,21 W/m²K. Yläpohjien tarkemmat ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Yläpohjan materiaalit, paksuudet ja U-arvot.

	U-arvo (W/m²K)	Materiaali	Paksuus (mm)
YP1	0,21	Suojakiveys Vedeneriste Polyuretaanieristys Polyeteenimatto Kevytsorabetonikallistus Ontelolaattaelementti Pintakäsittely	- - 100 5 - 20 - 250 -
YP2	0,22	Betonilaatat Kiinnityslaasti Teräsbetonilaatta Polystyreenieristys Vedeneristys Kallistusbetoni Ontelolaattaelementti Pintakäsittely	50 20 60 70 + 70 - 20 - 110 400 -
YP3	0,19	Teräsohutlevy Ristiin koolaus Tuulensuojakipsilevy Kantavat teräsprofiili Mineraalivilla Koolaus Höyrysulku Kipsilevy Sisäverhouslauta Pintakäsittely	0,7 50 + 100 9 - 200 100 0,2 13 12 -

Kiinteistön alapohjat ovat maanvaraisia teräsbetonilaattoja, joiden lämmönläpäisykerroin on 0,29 W/m²K. Alapohjan ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Alapohjan materiaalit, paksuudet ja U-arvo.

	U-arvo (W/m ² K)	Materiaali	Paksuus (mm)
AP1	0,29	Pintabetoni	50
		Teräsbetoni-laatta	200
		Solupolystyreeni	50
		Tiivistetty sora	200
		Perusmaa	-

Kiinteistön ikkunat ja ulko-ovet ovat alkuperäiset vuodelta 1993. Laskentamallissa käytetyn lasituksen lämmönläpäisykerroin oli 1,97 W/m²K ja g-arvo 0,62. Ulko-ovien U-arvo valittiin rakennuksen valmistumisvuoden rakentamismääräysten mukaan. Lämmönläpäisykertoimenä käytettiin 1,4 W/m²K.

5 Sisäiset lämpökuormat

Rakennuksen sisäiset lämpökuormat muodostuvat tilassa olevista henkilöistä, laitteista sekä valaistuksesta. Jäähdytyslaskelmissa ja olosuhdesimuloinneissa pyritään käyttämään todellisen tilanteen sisäisiä lämpökuormia. Koska tarkasteltavan kohteen sisäiset lämpökuormat eivät ole tiedossa, on laskelmissa käytetty Sisäilmastoluokituksen 2018 mukaisia toimistotilan suunnitteluarvoja (9).

5.1 Lämpökuorma ihmisistä

Rakennuksessa olevista ihmisistä vapautuu lämpöä. Lämmönluvutus riippuu henkilön koosta, toiminta-asteesta sekä ympäristön lämpötilasta (8). Simuloinnissa henkilön keskimääräisesti luovuttamalle lämmölle voidaan käyttää arvoa 125 W (1,2 MET, kehonpinta-ala 1,8 m²). Uloshengityksestä johtuvaa lämpötehoa arvioidaan fyysisen aktiivisuuden perusteella, joka esitetään MET-arvolla. MET on lyhenne metabolisesta ekvivalentista. Arvo kuvaa fyysisen aktiivisuuden aiheuttamaa kasvanutta energiankulutusta lepotasoon verrattuna. (10)

5.2 Lämpökuorma valaistuksesta

Valaisimien sähköteho voidaan suoraan laskea muuttuvan lämmöksi. Sähköteho on riippuvainen valaisintyypistä ja tilasta (8). Toimistotilan valaistus toteutetaan yleensä loisteputkivalaisimilla. Sisäilmastoluokituksen suunnitteluarvo toimistotilan valaistuksen lämpökuormalle on 12 W/m^2 (9).

5.3 Lämpökuorma sähkölaitteista

Kiinteistön sähkölaitteet koostuvat pääosin toimisto- ja atk-laitteista sekä pienkeittiön laitteista. Laitteiden aiheuttama lämmönluovutus on laitekohtaista, mutta tyypillisille toimistotilan laitteille voidaan käyttää Sisäilmastoluokituksen suunnitteluarvoa 15 W/m^2 (9).

6 Ulkoiset lämpökuormat

Aiemmin mainitut lämpökuormia aikaan saavat tekijät vaikuttavat tiloihin ympäri vuotisesti. Rakennuksen sisäiset kuormat säilyvät pääsääntöisesti vastaavanlaisina, ellei rakennukseen käyttötarkoitus tai toiminta muutu. Jäähdytystarpeen suurin yksittäinen osatekijä on kuitenkin ikkunoiden läpi tuleva auringonsäteily (8). Siihen vaikuttavia ikkunan ominaisuuksia ovat

- ikkunan lämmönläpäisykerroin
- auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin
- aurinkosuojaus
- suunta.

Ikkunalle ominainen g-arvo on suhdeluku, joka kuvaa auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerrointa. Suhdeluku ilmaisee, kuinka suuri osa ikkunaan kohdistuvasta auringonsäteilystä läpäisee ikkunan. Kokonaisläpäisy muodostuu auringonsäteilyn suorasta läpäisystä ja konvektiosta. Konvektio on lämmön siirtoa

kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana (11). Ikkunoiden kautta rakennuksen sisälle tuleva auringon säteilystä johtuva lämpökuorma voidaan laskea kaavalla 1 (12).

$$\dot{Q} = agfAI \quad (1)$$

\dot{Q}	on lämpökuorma auringonsäteilystä, W
a	on auringonsäteilyn osakulmasta riippuva kerroin
g	on auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin
f	on ikkunan suojauskerroin
A	on ikkunana valoaukon pinta-ala, m ²
I	on auringon säteilyteho ikkunaan, W/m ² .

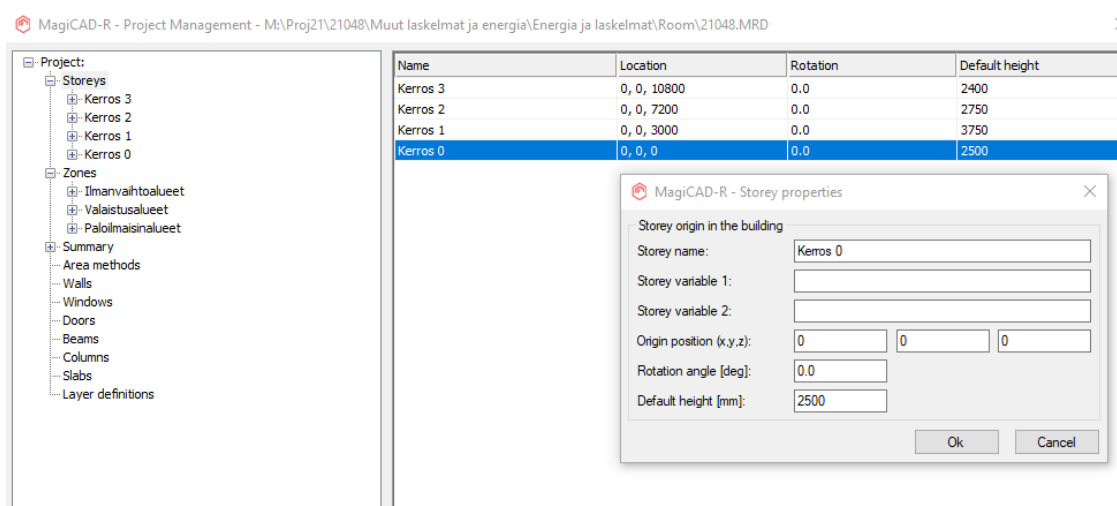
Auringonsäteilyn aiheuttamaa lämpökuormaa voidaan vähentää ikkunoidensuojauksella. Aurinkosuojaustapoja ovat ikkunapinnoitteet, sälekaihtimet ja lipat. Ikkunan yläpuolelle ja sivulle asennettava lippa vähentää huomattavasti lämpösäteilyn sisälle pääsyä. Valon pääsyä tiloihin ei kuitenkaan kannata estää kokonaan, koska tällöin valaistuksen tarve sisätiloissa kasvaa, joka puolestaan lisää valaistuksen lämpökuormaa.

7 IFC-tietomallin luominen

Industry Foundation Classes eli IFC on kansainvälinen avoin tiedostoformaatti rakennuksen tietojen siirtämiseksi sovellusten välillä (13). Se on yleisin 3D-tilamallien tiedonsiirtoon käytetty tapa. Tässä työssä 3D-tilamalli luotiin käyttäen MagiCAD Room-ohjelmaa. Mallin tehtävänä on toimia Riuska-ohjelmalla suori-

tettävien energiasimulointien perustana. Riuskassa mallinnukseen täydenne-
tään laskelmiin vaikuttavat tiedot, kuten tilojen lämpökuormat, käyttöajat ja ra-
kenteet.

MagiCAD Room mallinnus aloitetaan luomalla uusi projektitiedosto. Projektin-
hallintavalikossa määritellään rakennuksen kerrokset ja niiden korkeusasemat
sekä rakenteiden paksuudet ja U-arvot. Mallinnuksessa on syytä käyttää todelli-
sia korkoasemia ja rakenteiden paksuuksia, mikäli ne ovat tiedossa. Tällöin
mallista tehtävä IFC-tiedosto on oikeassa korkoasemassa muiden suunnittelu-
alojen mallien kanssa. Tässä projektissa vain rakenteiden paksuuksilla ja kor-
keusasemilla on mallintamisessa merkitystä, koska muut tiedot syötetään
Riуска-simulointiohjelmiaan. Kuvassa 4 on esitetty määritetyt kohteen kerros- ja
huonekorkeudet.



Kuva 4. MagiCAD Roomin projektinhallintavalikko, jossa on kohteen kerros- ja huonekorkeudet.

Room-mallin piirtäminen tapahtuu avaamalla arkkitehtipiirustukset viitekuvaksi sovelluksen taustalle. Arkkitehtipiirustuksien mukaisesti sijoitetaan seinät oi-
keille paikoille käyttäen rakenteiden todellisia paksuuksia. Kun seinät on sijo-
itettu paikoilleen, voidaan ikkunat ja ovet piirtää malliin. Ikkunat mallinnetaan ik-

kunan ulkomitoilla ja ikkunoiden U- ja g-arvot määritellään myöhemmin Riuskassa. Ennen mallin muuttamista IFC-muotoon kaikki kohteen tilat täytyy vielä määritellä käyttäen Define Room -toimintoa. Toiminnolla tiloille luodaan nimi, numerointi ja huonekorkeus, jotta Riuskassa eri tilatyyppejä on helpompi jäsentellä sekä muokata ja simuloida. Kuvassa 5 on näyttökaappaus MagiCAD Room -projektin Define Room -toiminnosta.

The screenshot shows the 'MagiCAD-R - Room' dialog box with the following sections and fields:

- Room**
 - User code: [text box] ...
 - Room name: [text box] ...
 - Note: [text area]
 - Room height [mm]: [text box] 2500
 - Area (gross/net)[m2]: [text box] 0.0 [text box] 0.0
 - Room volume (gross/net)[m3]: [text box] 0.0 [text box] 0.0
- Ventilation**
 - ☒ By manual values
 - Supply airflow [l/s]: [text box] 0 [text box] [m3/h] 0
 - Extract airflow [l/s]: [text box] 0 [text box] [m3/h] 0
 - Primary flow for automatic values: ☒ Supply ☐ Extract
 - ☐ By area
 - Supply airflow [l/s,m2]: [text box] 0.0 [text box] [m3/h,m2] 0.0
 - ☐ By times per hour
 - Supply airflow [1/h]: [text box] 0.0
 - Extract airflow by percent of supply: [text box] 0
 - Air exchange rate [1/h]: [text box] 0.10
- Temperatures**
 - Temperature setpoint for heating [°C]: [text box] 0.0
 - Supply air temperature [°C]: [text box] 0.0
 - ☒ Transfer air temperature = outside temperature
 - Transfer air temperature [°C]: [text box] -26.0
- Roof Slab Exception**
 - Roof slab: [dropdown] -
 - Area coverage from room area [%]: [text box] 0
 - ☐ Use outside temperature
 - Background temperature [°C]: [text box] 0.0
- Floor Slab Exception**
 - Floor slab: [dropdown] -
 - Area coverage from room area [%]: [text box] 0
 - Background temperature [°C]: [text box] 0.0
- Heat Loss**
 - Total heat loss [W]: [text box] 0
 - ☐ Manual value
 - Manually given heat loss [W]: [text box] 0
 - Heat loss analysis... [button]

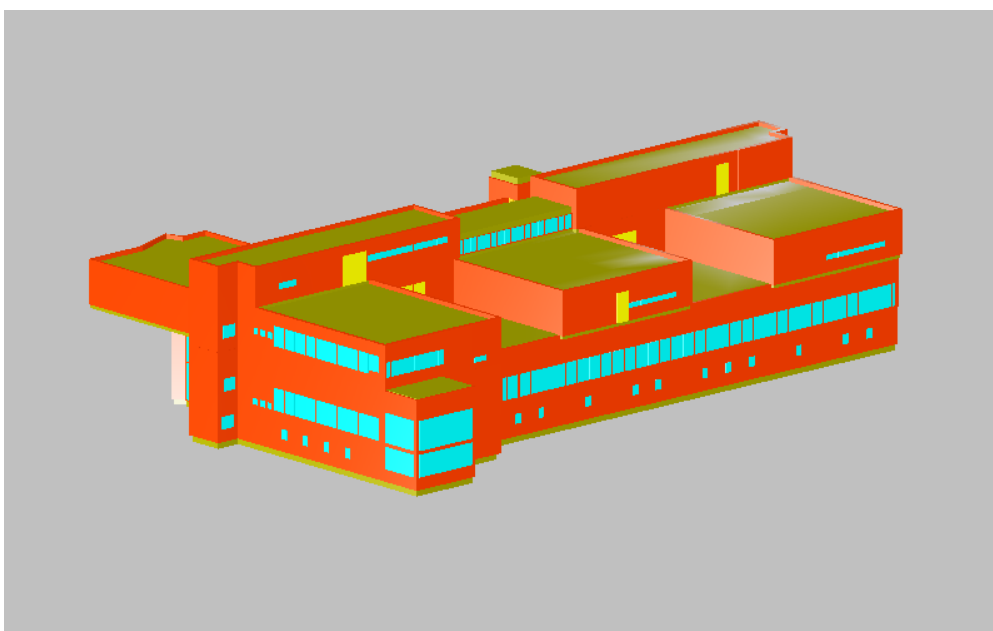
Buttons: Ok, Cancel

Kuva 5. MagiCAD Roomin Define Room -valikko.

Kun tarvittavat tiedot on syötetty Room-malliin, voidaan malli muuttaa IFC-muotoon. IFC-malli luodaan Room projektivalikosta. Vietäväksi valitaan kaikki tilat sekä rakenteet. Mallin tyyppiä valittiin IFC2x3, joka on yleisemmin käytetty tiedostomalli.

8 Riuska

Riuska on Granlund Oy:n kehittämä olosuhde- ja energiasimulointiohjelmisto, joka laskee rakennuksen IFC-tietomallin avulla rakennuksen ja sen tilojen lämpöteknisen käyttäytymisen erilaisissa kuormitus- ja sääolosuhteissa (14). Ohjelma vaatii toimiakseen simuloitavan rakennuksen tilamallin, joka tuodaan ohjelmaan IFC-tiedostomuodossa. Kuvassa 6 on havainnoitu suunnittelukohteen tilamalli.



Kuva 6. MagiCAD Room -sovelluksella luotu tilamalli kohteesta.

Riuskan energia- ja olosuhdesimuloinnit pohjautuvat käyttäjän määrittelemään informaatioon. Laskelmien kannalta olennaiset muuttujat tulisi muokata vastaamaan kohdetta mahdollisimman kattavasti. Tällaisia tekijöitä ovat

- lämpökuormat
- kylmäsillat
- vuotoilma
- säätiedot
- ilmanvaihtojärjestelmä ja palvelualueet.

Olemassa olevan kohteen simuloinnissa täytyy myös huomioida kohteesta saatavien lähtötietojen tarkkuus sekä muut laskentaan vaikuttavat tekijät. Haasteena tässä insinöörityössä oli laskentakohteen lähtötietojen puutteellisuus.

8.1 Lämpökuormat ja kylmäsiilat

Riuskassa laskentaprojektin perustaminen aloitetaan IFC-mallin tuonnilla. MagiCAD Room -ohjelmalla luodun tietomallin rakenteet ja tilatiedot siirtyvät samalla Riuskkaan. Rakenteita voidaan nyt muuttaa vastaamaan luvussa 4.2 mainittuja kohteen todellisia rakennetyyppejä. Erilaisien materiaaliominaisuuksien takia seinärakenteen U-arvo Riuskassa ei usein vastaa täysin rakennekuvien U-arvoa. Materiaalin paksuutta voidaan kuitenkin muokata Riuskassa vastaamaan haluttua U-arvoa. Suositeltavaa on muokata eristyksen paksuutta, jolloin rakenteen massa ei muutu huomattavasti.

Riuskassa on valmiiksi rakennusmääräysten mukaisia käyttöasteita ja aikatauluja tilatyypeittäin. Mikäli Riuskassa ei ole haluttuja aikatauluja tai käyttöasteita, niitä on mahdollista luoda itse. Kohteen laskentaprojektissa on käytetty Sisäilmastoluokituksen 2018 mukaisia toimistotilan käyttöasteita ja aikatauluja. Tilojen sisäiset lämpökuormat Riuskassa on asetettu vastaamaan luvussa 5 mainittuja Sisäilmastoluokituksen 2018 suunnitteluarvoja. Tilojen käyttöasteet ja aikataulut on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Toimistotilojen käyttöasteet ja aikataulut (9).

Toimistotilat	
Kellonaika	07:00–18:00
h/vrk	11
vrk/vko	5
Henkilötiheys (m ² /hlö)	12
Käyttöaste	0,55
Valaistus (W/m ²)	12
Laitteet (W/m ²)	15
Ihmiset (W/m ²)	6

Rakennuksen runkomateriaali vaikuttaa kylmäsiltojen suuruuteen. Kylmäsiltojen lisäkonduktanssit määriteltiin Suomen rakentamismääräyskokoelman rakenne-
materiaalien taulukkoarvoilla (15). Lisäkonduktanssit on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Riuskassa käytetyt kylmäsiltojen lisäkonduktanssit.

Kylmäsilat	Lisäkonduktanssit (W/mK)
Ulkoikkunan liitos	0,04
Ulko-oven liitos	0,04
Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	0,08
Ulkoseinän ja välipohjan liitos	0,00
Ulkoseinän ja alapohjan liitos	0,24
Ulkoseinä, jossa nurkka ulospäin	0,06
Ulkoseinä, jossa nurkka sisäänpäin	-0,06

8.2 Vuotoilma

Olemassa olevien rakennuksien ilmanvuotoluku voidaan mitata tai se voidaan selvittää suunnitelmista tai kohteen muista asiakirjoista. Uudiskohteissa ilmanvuotoluku on yleensä tiedossa, mutta olemassa olevien rakennusten ilmanvuotoluku ei välttämättä ole saatavilla, jolloin voidaan käyttää taulukoituja arvoja. Rakennusvuoteen perustuvia ilmanvuotolukuja on esitetty esimerkiksi ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen energiatodistuksesta. Ilmanvuotoluvun taulukkoarvot ovat kuitenkin sen aikaisia sallittuja maksimiarvoja, ja ne voivat poiketa merkittävästi kohteen todellisesta ilmanvuotoluvusta. Kyseisen kohteen asiakirjoista ei selvinnyt rakennusvaipan ilmanvuotolukua. Keskustelin rakennuksen ilmanvuotoluvusta kokeneemman suunnittelijan kanssa, joka osasi arvioida rakennuksen valmistumisvuodelle tyypillisen arvon. Laskennassa ilmanvuotolukuna q_{50} käytettiin arvoa $2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Ilmanvuotoluvulla kuvataan rakennuksen keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa 50 pascalin paine-erolla rakennusvaipan pinta-alaa kohden. Rakennusvaipan pinta-alalla tarkoitetaan ulkoseiniä sekä ylä- ja ala-pohjaa (16). Vuotoilman tiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Riuskassa käytetyt vuotoilmatiedot.

Ilmanvuotoluku q50 (m³/hm²).	Vuotoilmakerroin (1/h)	Vuotoilmavirta (m³/h)	Kokonaistilavuus (m³)
2,0	0,045	522	11 635

8.3 Sää tiedot

Auringon kokonaissäteilyn määrä vaikuttaa jäähdytystehontarpeen laskennan tuloksiin merkittävästi. Suuria ikkunapintoja omaavassa rakennuksessa jäähdytystehontarve ilmenee voimakkaimmin auringon säteilyn aikana. Tästä syystä eri suuntaan olevissa tiloissa jäähdytystehontarve voi vaihdella huomattavasti. Laskennassa käytetyn ulkolämpötilana vaikutus tilan jäähdytystarpeeseen on vähäinen. Ulkoa sisään johtumalla tulevan lämmön osuus kokonaislämpökuormasta on yleensä pieni. (8)

Jäähdytystehontarpeen laskennassa käytetään yleensä tuntikohtaisia sää tietoja. Tässä projektissa käytettiin Riuskan tietokannassa olevaa mallivuoden 2012 sää dataa. Mitoituspaikkakunnaksi valittiin vuoden Helsinki, vaikka kohde sijaitseekin Espoossa. Tämä tehtiin sen takia, että simuloinnissa voidaan käyttää valmista tietokantaa. Vuosisää dataan on kirjattu koko vuoden ulkolämpötilat ja auringon säteily. Mitoituspäivänä käytettiin keskiviikkoa 11. heinäkuuta. Mitoituspäivän tiedot on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Mitoituspäivän tarkemmat tiedot.

Paikka- kunta	Mittauspäivä	Max °C	Min °C	Max kJ/kg	Min kJ/kg	Selkeys- kerroin	Maan läm- pötila °C
Helsinki	11.heinäkuuta	25	16	55	37	0,8	7

Kohteen suuntauksen määrittäminen Riuskaan on myös oleellista (17). Suuntaus on joskus mahdollista saada selville asemakuvaan merkityn pohjoisnuolen

avulla. Mikäli asemakuvaan ei ole merkitty pohjoisnuolta, voidaan olemassa olevan rakennuksen suuntaus selvittää karttapalvelun avulla. Riuskassa laskenta-kohteen suuntaukseksi asetettiin 47 astetta pohjoiseen eli suunnilleen koillinen.

8.4 Ilmanvaihtojärjestelmä ja palvelualueet

Riuska luo laskentaprojektiin oletuksena vain yhden ilmanvaihdonpalvelualueen, johon se jakaa kaikki kohteen tilat. Palvelualueita voidaan kuitenkin halutessa luoda lisää. Palvelualueita luodessa käyttäjä voi määritellä ilmanvaihtokoneen tyypin, aikataulun ja vaikutusalueen. Myös ilmanvaihtokoneiden rakennetta ja toimintaa pystytään muokata vastamaan todellista kohdetta.

Kohteessa on neljä erillistä tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää, joissa kaikissa on lämmityspatterit. Lisäksi toimistotiloja palvelevat ilmanvaihtokoneet TK1 ja TK2 ovat varustettu jäähdytyspattereilla ja lämmöntalteenotoilla. TK1, TK2 ja TK3 sijaitsevat kolmannen kerroksen IV-konehuoneessa. TK4 sijaitsee pohjakerroksen autohallissa. Ilmanvaihtokoneiden tiedot on esitetty taulukoissa 9–12.

Taulukko 9. IV-koneen TK1 tiedot.

TK1	
Palvelualue	Toimistotilat (2. krs)
Tuloilmavirta	1/1-teho: 2,78 m ³ /s
Poistoilmavirta	1/1-teho: 2,50 m ³ /s
Käyntilupa	ma–pe 5.00–19.00, la-su 10.00–14.00
LTO	neste, hetkellinen mittaus 39 %
Säätötapa	Aikaohjelma, sisäänpuhalluksen asetusarvo 20 °C
Sis.puh.ilman lämpötila	19 °C

Taulukko 10. IV-koneen TK2 tiedot.

TK2	
Palvelualue	Tuotantotilat (1. krs)
Tuloilmavirta	1/1-teho: 2,1 m ³ /s
Poistoilmavirta	1/1-teho: 1,95 m ³ /s
Käyntilupa	ma–pe 5.00–19.00, la-su 10.00–14.00
LTO	neste, hetkellinen mittaus 22 %
Säätötapa	Aikaohjelma, sisäänpuhalluksen asetusarvo 19,5 °C
Sis.puh.ilman lämpötila	19 °C

Taulukko 11. IV-koneen TK3 tiedot.

TK3	
Palvelualue	Saunatilat
Tuloilmavirta	1/1-teho: 0,3 m ³ /s
Poistoilmavirta	1/1-teho: 0,3 m ³ /s
Käyntilupa	pe–la 10.00–20.00
LTO	–
Säätötapa	Aikaohjelma, sisäänpuhalluksen asetusarvo 19,5 °C
Sis.puh.ilman lämpötila	20 °C

Taulukko 12. IV-koneen TK4 tiedot.

TK4	
Palvelualue	Autohalli
Tuloilmavirta	1/1-teho: 1,95 m³/s
Poistoilmavirta	1/1-teho: 2,10 m³/s
Käyntilupa	ma–su 5 h/pv
LTO	–
Säätötapa	Aikaohjelma, sisäänpuhalluksen asetusarvo 10 °C
Sis.puh.ilman lämpötila	20 °C

Kohteessa on keskitettyjen ilmanvaihtokoneiden lisäksi seitsemän erillistä huippuimuria ja kuusi kiertoilmapuhallinta, joiden tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 13. Huippuimuri voidaan Riuskassa luoda I isäämällä laskentaprojektiin uusi ilmanvaihtokone, jonka tuloilmavirta ja tuloilmapuhaltimen teho asetetaan mahdollisimman pieneksi. Tuloilmapuhaltimen vaikutus jää näin niin olemattomaksi, ettei se vaikuta laskentaan.

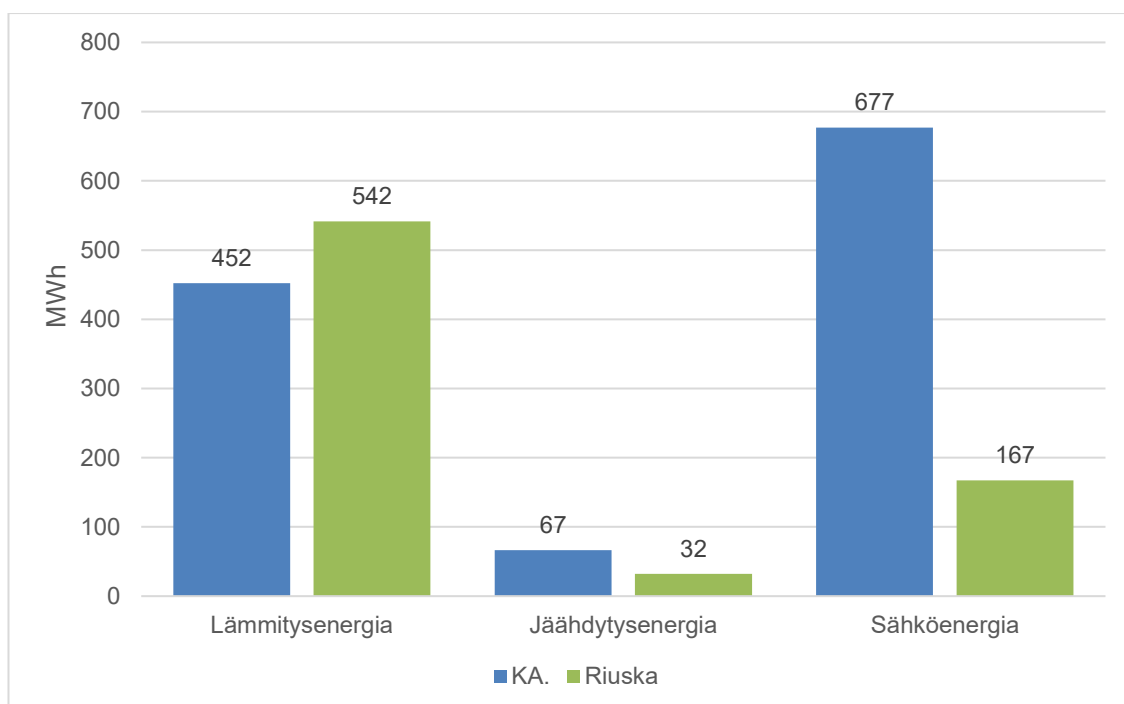
Taulukko 13. Huippuimurien ja kiertoilmapuhaltimien tiedot

Huippuimuri / Kiertoilmakone	
PK-5	0,280 m³/s, sosiaalitilat
PK-6	0,210 m³/s, sosiaalitilat
PK-7	0,100 m³/s, lämmönjakohuone
PK-8	0,05 m³/s, hissikonehuone
PK-9	0,05 m³/s, hissikuilu
PK-10	0,100 m³/s, IV-konehuone
PK-11	0,200 m³/s, pesuhuone, ma–su 7.30–9.30, 15.30–17.00
KsK-1	Autohalli, 10 kW, lämmitysraja 8 °C
KsK-2	Autohalli, 10 kW, lämmitysraja 8 °C
KsK-3	Autohalli, 10 kW, lämmitysraja 8 °C
KsK-4	Autohalli, 10 kW, lämmitysraja 8 °C
KsK-5	Tuulikaappi, sähkölämmitys, lämmitysraja 8 °C
KsK-6	Tuulikaappi, sähkölämmitys, lämmitysraja 8 °C

Jokaista konetta ohjataan erillisellä kello-ohjauksella. Koneiden ohjaus- ja säätötavat ovat hyvin rajoittuneita. Poistokoneiden ohjauksesta ei saatu varmuutta. Huollon mukaan pukuhuoneiden poistot käyvät kellon ympäri ja teknisten tilojen luultavasti lämpötilaohjatusti. Myöskään autohallin ilmanvaihtokoneen ohjauksesta ei ole täyttä varmuutta. Huollon tietämyksen mukaan kone kävisi yhden tunnin iltaisin ja toisen aamuisin. Kohteen suurimmissa ilmanvaihtokoneissa TK1 ja TK2 on nestekiertoiset lämmöntalteenottopatterit. Hetkellisten lämpötilojen mukaan lämmöntalteenotot toimivat vain välillä 20–40 %. Lämmöntalteenottopattereiden pidemmän aikavälin toimintaa ei ole tutkittu vallitsevan koronatilanteen vuoksi.

8.5 Riuskan tulokset

Riuskan simuloinnin tulokset poikkeavat osittain rakennuksen mitatusta energiankulutuksesta. Kuvassa 7 on havainnollistettu Riuskalla suoritettujen simuloinnin tulokset sekä kohteen vuosien 2017–2019 mitattu keskimääräinen energiankulutus.



Kuva 7. Vuosien 2017–2019 energiankulutuksien keskiarvo ja Riuskan simuloinnin tulokset.

Kuvaajasta voidaan nähdä, että vuosien 2017–2019 keskimääräinen sähkö- ja jäähdytysenergian kulutus eroaa huomattavasti simuloinnin tuloksista. Merkittävästi suuremman sähkönkulutuksen syynä voidaan pitää vanhaa serveritilaa, joka on myöhemmin poistettu rakennuksesta. Serveritilan jatkuva jäähdyttäminen on myös syynä vertailuvuosien korkeammalle jäähdytysenergian kulutukselle.

9 Energiakaivokentän mitoitus

Rakennuksen energiakaivokenttä suunniteltiin lämmitystä sekä jäähdytystä varten. Lähtökohtana energiakaivokentän mitoituksessa toimi rakennuksen lämmitysenergiantarve. Energiakaivokentän simulointi suoritettiin Earth Energy Designer -simulointiohjelmalla, joka on kehitetty energiakaivojen suunnitteluun sekä mitoitukseen. EED-ohjelman käytöllä voidaan varmistaa riittävä energian saataavuus kallioperästä sekä mitoittaa energiakaivokenttä optimaaliseksi. (18)

Energiakaivokentän mitoitus aloitettiin tekemällä perusratkaisun energiakaivokentän esimitoitus sekä esisimulointi, joka toimii perustana energiakaivokentän optimoinnille. Esimitoituksessa tarkasteltiin energiakaivokentän kaivojen alustavaa määrää tutkimalla energiakaivosta saatavaa jäähdytystehoa. Energiakaivosta saatava jäähdytysteho laskettiin kaavan 2 avulla (19).

$$\dot{Q} = \rho \dot{V} c_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

\dot{Q} on jäähdytysteho energiakaivosta, W

ρ on lämmönsiirtonesteen tiheys, kg/m³

\dot{V} on lämmönsiirtonesteen virtaama putkessa, m³/s

c_p on lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti, J/kgK

T_o on ulosvirtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila, °C

T_i on sisään virtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila, °C.

Esimitoituksessa lämmönsiirtonesteenä käytettiin ominaislämpökapasiteetiltään 3 640 J/kgK ja tiheydeltään 956 kg/m³ olevaa lämmönsiirtonestettä. Lämmön-

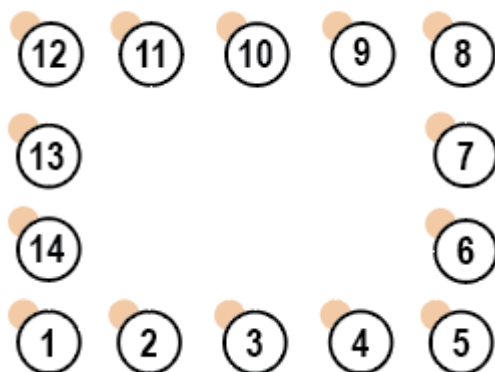
siirtonesteen tilavuusvirtaus oli 0,6 l/s ja nesteiden lämpötilan erotus 5 °C. Yhden kaivon jäähdytystehoksi saatiin noin 10,5 kW. Tarkastelun perusteella energiakaivokentän perusratkaisuksi valittiin 14 energiakaivon kokoonpano, jossa yhden energiakaivon syvyydeksi määritettiin 300 metriä.

Energiakaivokentän koon esimitoituksessa on myös tärkeää ottaa huomioon energiakaivojen sijaintien mahdolliset rajoitteet. Energiakaivojen määrän kasvassa rakennuksen tontin koko saattaa toimia rajoittavana tekijänä energiakaivokentän optimoinnissa. Tällöin energiakaivokentälle täytyy asettaa energiakaivojen maksimimäärä, eli määrä, joka mahtuu rakennuksen tontille noudattaen energiakaivojen porareikien suositeltuja minimietäisyyksiä.

Energiakaivojen lukumäärän rajaamisen jälkeen voidaan määritellä energiakaivojen asemat toisiinsa nähden. Kaivokentän asettelun suunnittelussa pitää huomioida energiakaivojen välinen etäisyys. Liian lähelle toisiaan tai virheellisesti mitoitetuilla energiakaivoilla on mahdollisuus jäätymä talvella, jolloin myös koko maaperä jäätyy. Maaperän jäätyminen voi johtaa maaperässä olevien lämpövirtojen heikkenemiseen. Maaperän jäätyessä vesi ei pääse liikkumaan esteettä maa- ja kallioperässä ja näin siirtämään maan lämpöenergiaa keruuputkistossa liikkuvaan lämmönsiirtonesteeseen. Energiakaivo voi myös hajota, kun porareikissä oleva vesi jäätyy. (20)

Liitteessä 1 on esitetty energiakaivokentän luonnos, jossa on esitetty energiakaivojen sijainnit. Koska energiakaivojen kokoonpano ei vastannut täysin EED-simulointiohjelmassa olevia kaivokentän asetteluita, täytyi ohjelmassa käyttää energiakaivojen epäsäännöllistä kokoonpanoa. Toiminto vaatii toimiakseen energiakaivojen sijaintien koordinaatit. Energiakaivoluonnoksen perusteella kaivoille määritellään koordinaatit x- ja y-akselille. Koordinaattien avulla EED arvioi kaivojen kokoonpanoa lähimpänä olevan approksimaation simulointia varten (18). EED:ssä tehdyn tarkastelun tuloksena energiakaivokentän kokoonpanoksi valittiin 4 x 5 energiakaivon avoin suorakulmio. Energiakaivojen välinen etäisyys

on 15 metriä ja syvyys 300 metriä. Kokonaisuutena energiakaivokenttä on yhteensä 4 200 metriä syvä. Kuvassa 8 on havainnollistettu miltä kokoonpano näyttää.



Kuva 8. Havainnekuva EED-simulointiohjelman 4 x 5 energiakaivon kokoonpanosta

Energiakaivokentän simulointia jatketaan määrittämällä energiakaivokentän sisällä kulkevien keruuputkien ja lämmönsiirtonesteen ominaisuudet. Simuloinnissa käytettäväksi keruuputkeksi valittiin tyypillinen polyeteeni U-putki. U-putken taulukkoarvot on lueteltu taulukossa 14.

Taulukko 14. EED-ohjelmassa käytetyn U-putken taulukkoarvot.

U-putki PE40x2,4	
Ulkohalkaisija (mm)	40,00
Seinämän paksuus (mm)	2,40
Lämmönjohtavuus (W/mK)	0,42
U-kappaleen putkiväli (mm)	60,00

Simuloinnissa käytettäväksi lämmönsiirtonesteeksi asetettiin 28-prosenttinen etanoli, jota käytettiin myös esimitoituksessa. Vesi-etanoliliuoksen jäätymispiste

on $-18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Liuoksen keskimääräisen lämpötilan ei kuitenkaan pitäisi missään vaiheessa mennä alle $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n, koska energiakaivokenttä voi jäätyä, eikä kentästä saada enää yhtä suurella teholla energiaa. Taulukossa 15 on esitetty kyseisen lämmönsiirtonesteen taulukkoarvot 0°C :n lämpötilassa.

Taulukko 15. Lämmönsiirtonesteen ominaisuudet.

Lämmönsiirtonesteen ominaisuudet	
Lämmönjohtokyky (W/mK)	0,384
Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	3 640
Tiheys (kg/m^3)	956
Viskositeetti (kg/ms)	0,00173
Jäätymispiste ($^{\circ}\text{C}$)	$-18,5$

Energiakaivokentän mitoittamiseen vaikuttavat myös olennaisesti kohteen maaperän ominaisuudet. Maaperän ominaisuuksia on mahdollista tutkia TRT-mittauksella eli termisen vasteen testillä, jonka avulla voidaan selvittää maa- ja kallioperän lämmönjohtavuus. Energiakaivokentän suunnitteluvaiheessa kohteeseen ei ollut vielä tehty TRT-mittausta, minkä takia kallioperän ominaisuuksien selvittämisessä käytettiin apuna Geologisen tutkimuskeskuksen havainto- ja mittaus-tietoa. Tietokannan mukaan tutkittavan alueen kallioperän pääkivilaji on graniitti. EED-ohjelman kirjastosta valittiin kyseisen kivilajin taulukkoarvot. Ohjelmassa on myös valmiina maanpinnan vuotuinen keskilämpötila, sekä maaperän geotermien lämpövuoto eri kaupungeille. Taulukossa 16 on esitetty EED-ohjelmassa käytetyt maaperän ominaisuudet.

Taulukko 16. Kallioperän ja maanpinnan ominaisuudet.

Maaperän ominaisuudet	
Lämmönjohtokyky (W/mK)	3,00
Volumetrinen lämpökapasiteetti (MJ/m ³ K)	2,30
Maapinnan lämpötila (°C)	7,00
Maaperän lämpövuoto (W/m ²)	0,05

EED-ohjelman peruskuorma välilehdellä voidaan määritellä suunnittelukohteen vuotuinen lämmitys- ja jäähdytystehontarve energiakaivokentän simulointia varten. Arvot voidaan täyttää joko vuotuisella tai kuukausittaisella energiankulutuksella. Tässä työssä simulointi suoritettiin kuukausittaisilla arvoilla. Suunnittelukohteen jäähdytystehontarve oli Riuskassa tehtyjen laskelmien mukaan noin 32 MWh. Kohteen kuukausittainen energiankulutus on esitetty kuvassa 9.

Peruskuorma

Peruskuorma (Ilman LKV):

☐ Vuosittainen energia ja kuukausittainen profiili

☒ Kuukausittaiset energia-arvot

[MWh]	Lämpö	Viileä	Maa
Vuotuinen	454,470	32,200	Päivitys
SPF	3,00	99999,00	
	<input type="checkbox"/> Suora	<input checked="" type="checkbox"/> Suora	
Tammikuu	76,423	0,005	50,944
Helmikuu	67,794	0,049	45,147
Maaliskuu	63,318	0,524	41,688
Huhtikuu	34,823	2,158	21,057
Saattaa	16,515	4,961	6,049
Kesäkuu	8,820	6,042	-0,162
Heinäkuu	3,626	8,947	-6,530
Elokuu	5,771	6,965	-3,118
Syyskuu	16,494	2,190	8,806
Lokakuu	34,911	0,337	22,937
Marraskuu	56,583	0,011	37,711
Joulukuu	69,391	0,000	46,261
Summa:	454,47	32,189	270,79

Lämminkäyttövesi (LKV):

Vuotuinen 0,000 SPF 3,00

[MWh]	Lämpöpumppu	Maa	Rakennus
Lämpö	454,47x1/3 (151,49)	+ 454,47x2/3 (302,98)	= 454,47
LKV	0x1/3 (0)	+ 0x2/3 (0)	= 0
Viileä	32,189x0 (0)	+ -32,189x1 (-32,189)	= -32,189
Lämpö	Lämpöpumppu 151,49	Maa 302,98	Rakennus 454,47
Viileä	Lämpöpumppu 0	Maa 32,189	Rakennus -32,189

Maaperästä saatu lämpöenergia 302,98+0-32,189=270,79

Graafi Sulje

Kuva 9. EED-simulointiohjelmaan täytetty kuukausittainen energiankulutus.

Pohjakuormien täyttämisen jälkeen voidaan täyttää rakennuksen kuukausittaiset huippukuormat. Simuloidusta tuntidatasta saadut huippukuormat syötettiin eri kuukausille EED-ohjelmassa olevaan taulukkoon. Kuvassa 10 on kuva syötetyistä kuukausittaisista huippukuormista.

Huippukuorma				
	Huippu lämpö		Huippu viilennys	
	Teho [kW]	Kesto [h]	Teho [kW]	Kesto [h]
Tammikuu	317,000	1,000	0,000	1,000
Helmikuu	308,000	1,000	0,574	1,000
Maaliskuu	248,000	1,000	7,023	1,000
Huhtikuu	153,000	1,000	15,823	1,000
Saattaa	84,000	1,000	26,023	1,000
Kesäkuu	63,000	1,000	28,805	1,000
Heinäkuu	32,000	1,000	30,010	1,000
Elokuu	49,000	1,000	48,540	1,000
Syyskuu	94,000	1,000	15,522	1,000
Lokakuu	127,000	1,000	6,475	1,000
Marraskuu	284,000	1,000	0,000	1,000
Joulukuu	292,000	1,000	0,000	1,000

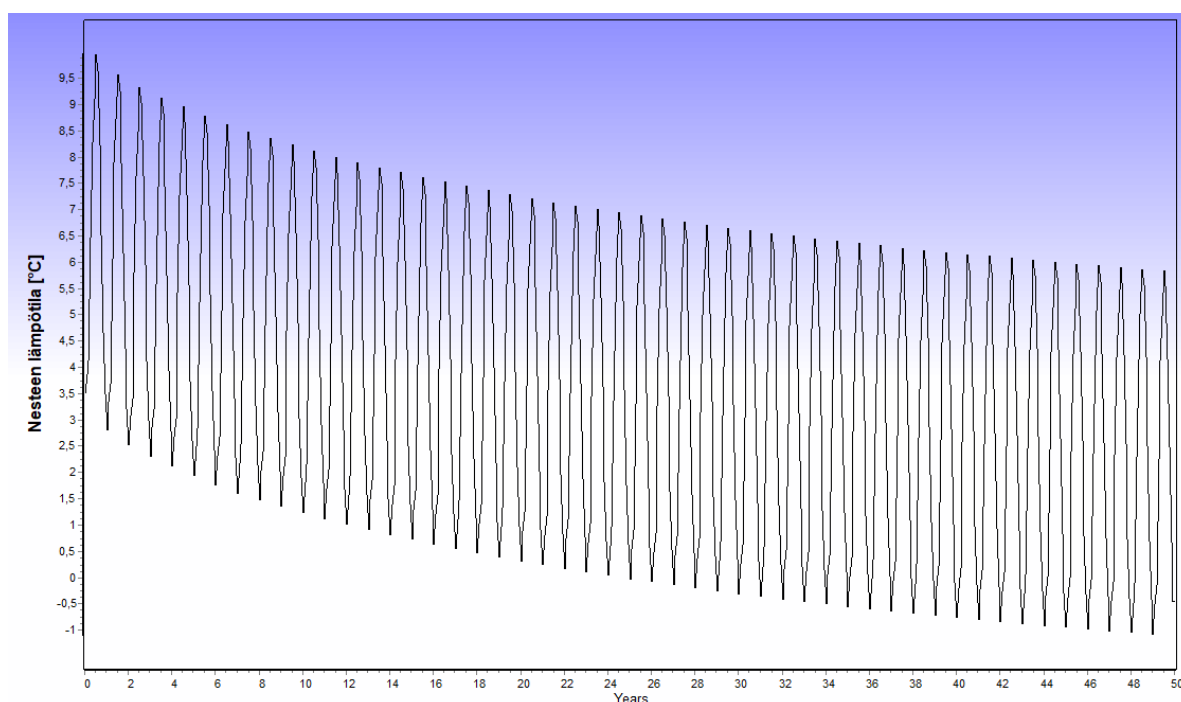
Kuva 10. Kohteen kuukausittaiset huippukuormat.

Energiakaivoja simuloidessa on valittava simulointiajanjakso, eli kuinka monen vuoden ajalta simulointi dataa tarkastellaan. Tässä työssä simuloinnin tarkastelujaksona käytetään 50:tä vuotta. Maaperän lämpötila laskee vuosittain, kun maasta siirretään rakennuksen lämmitykseen lämpöenergiaa. Tämän takia olisi hyvä tarkastella lämmönsiirtonesteen lämpötiloja vähintään 20 vuoden ajan, jotta tiedetään, ettei maaperä jäädy. Maaperän viilentymistä hidastaa kuitenkin maalämpöjärjestelmän yhteyteen asennettava maaviileä, joka jäähdytyskauden aikana palauttaa lämpöenergiaa maaperään.

10 Simuloinnin tulokset

Rakennuksen energiakaivokenttä suunniteltiin lämmitykseen sekä jäähdytykseen. Tässä insinööriyössä tarkasteltiin energiakaivoista saatavaa passiivista jäähdytystä. Lähtökohtana energiakaivojen määrälle oli rakennuksen energiankulutus, joka simuloitiin Riuskalla toimistorakennuksen taulukkoarvojen mukaisesti. EED-simuloinnin tuloksena optimaaliseksi energiakaivojen määräksi valikoitui 14 energiakaivon ratkaisu, jonka määrittä rakennuksen lämmitystarve. Yhden energiakaivon syvyydeksi määritettiin 300 metriä. Kokonaisuutena energiakaivokentän yhteispituus on 4 200 metriä.

Energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen lämpötilaa tarkasteltiin 50 vuoden simulaatiojaksolla. Energiakaivokentän toimivuuden varmistamiseksi, täytyy lämmönsiirtonesteiden lämpötilojen pysyä sallituissa rajoissa. Lämmönsiirtonesteen keskilämpötila ei saisi tarkastelujakson aikana laskea alle $-1,5\text{ °C:n}$. Lisäksi lämmönsiirtonesteen keskimääräinen lämpötila ei saa laskea missään vaiheessa alle -5 °C:n . Kuvassa 11 on esitetty lämmönsiirtonesteen lämpötilan vaihtelu 50 vuoden sisällä.



Kuva 11. Lämmönsiirtonesteen lämpötilan kehitys 50 vuoden aikana.

Kuvasta nähdään, että lämmönsiirtonesteen kuukausittainen lämpötila pysyy 50 vuoden tarkastelujaksolla yli $-1,5$ asteen. Ensimmäisen simulointivuoden jäähdytyskaudella nesteen keskilämpötila on noin 9 °C , minkä jälkeen lämpötila laskee vuosittain. Nesteen maksimilämpötila tarkastelujaksolla on noin 10 °C ja minimilämpötila noin -1 °C .

Jäähdytystehoja energiakaivoista saadaan jäähdytyskauden aikana keskimäärin 35 W/m kuukausitasolla. Huipputeho on 42 W/m , kun lämmönsiirtonesteen keskilämpötila on 8 °C ja minimiteho 32 W/m lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan ollessa $9,5\text{ °C}$. Passiivisella jäähdytyksellä saatava 147 kW:n keskimääräinen jäähdytysteho riittää kattamaan juuri ja juuri rakennuksen 145 kW:n kokonaisjäähdytystehontarpeen. Kesäisin jäähdytystehontarpeen kasvaessa passiivijäähdytystä joudutaan kuitenkin tukemaan lisjäähdytyksellä, koska lämmönsiirtonesteen lämpötila vaihtelee ja jäähdytysteho riippuu liuoksen lämpötilaerosta. Loppuosuus jäähdytystehontarpeesta täytyy tuottaa maalämpöpumpun kompressorilla aktiivijäähdytyksenä tai lisäämällä järjestelmään vedenjäähdytyskone.

On otettava myös huomioon, että osa kohteen työntekijöistä on kesäisin lomalla. Työntekijöiden ollessa lomalla rakennuksen sisäiset kuormat ovat myös pienemmät, jolloin rakennuksen jäähdytystehontarve laskee.

Energiakaivokentän simulointi suoritettiin myös käyttäen simuloidun energiankulutuksen tuntidataa. Tuntitasolla tehdyssä simuloinnissa tarkasteltiin ensimmäisen simulointivuoden lämmönsiirtonesteen lämpötilan vaihtelua. Tuntitasolla tehdyn simuloinnin tuloksena huomattiin, että lämmönsiirtonesteen lämpötila käy jäähdytyskauden aikana hetkittäin liian korkealla, jolloin maasta saatava jäähdytysteho ei riitä kattamaan rakennuksen jäähdytystehontarvetta. Ensimmäisen simulointivuoden aikana lämmönsiirtonesteen lämpötila on liian korkealla 250 tunnin ajan. Tämä tarkoittaa, että noin kahdeksan prosenttia jäähdytyskauden ajasta passiivijäähdytys ei pysty kattamaan koko rakennuksen jäähdytystehontarvetta. Osuus kuitenkin laskee vuosittain, kun lämmityskaudella maaperästä siirretään rakennuksen lämpöenergiaa. Vastaavasti 15 simulointivuoden jälkeen osuus on laskenut noin kahteen prosenttiin jäähdytyskauden kestosta.

Simuloinnin tuloksena kohteen energiakaivokentästä otetaan jäähdytysenergiaa keskimäärin noin 8 kWh/m. Maasta saatava jäähdytysenergia on kuitenkin riippuvainen jäähdytystehosta. Jäähdytysenergian kasvaessa maasta saatavan jäähdytystehon määrä laskee. Tämän insinööriyön simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että kohteen energiakaivoista saatava jäähdytysenergia riittää, mutta jäähdytystehontarpeen hetkittäiset kasvut toimivat rajaavana tekijänä. Jäähdytysenergia riittää, koska energiakaivokentät mitoitetaan pääsääntöisesti lämmitykselle, ja lämmitys vaatii yleisesti ottaen suuremman kaivokentän.

11 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia maalämpöjärjestelmän yhteyteen asennettavan maaviileän hyödyntämistä toimistorakennuksen jäähdyttämisessä. Työssä

perehdyttiin energiakaivoista passiivisesti saatavaan jäähdytysenergiaan sekä tekijöihin, jotka vaikuttavat energiakaivoista saatavaan jäähdytysenergian määrään.

Espoossa sijaitsevan toimistorakennuksen energiaselvityksen yhteydessä tahdottiin tutkia, olisiko rakennuksen jäähdytys mahdollista toteuttaa maasta saatavalla passiivisella jäähdytyksellä. Toteutettavuutta tutkittiin simuloimalla rakennuksen vuotuinen jäähdytystehontarve, jonka perusteella rakennukselle mitoitettiin energiakaivokenttä. Energiakaivokentän simulointi tehtiin energiakaivokenttien mitoitukseen tarkoitetulla Earth Energy Designer -ohjelmalla. Simulointin tuloksena kohteelle suunniteltiin 14 energiakaivon kokonaisuus, jonka yhteissyvyys on 4 200 metriä.

Insinööriyön tulosten perusteella voidaan todeta, että maalämpöjärjestelmän yhteydessä toteutettava passiivijäähdytys on ympäristöystävällinen ja energiatehokas tapa kattaa osa rakennuksen jäähdytystarpeesta. Maasta saatavalla passiivijäähdytyksellä ei kuitenkaan pystytä kattamaan koko rakennuksen jäähdytyskuormaa. Kesäisin tehontarpeen kasvaessa passiivijäähdytystä joudutaan tukemaan lisäjäähdytyksellä. Energiakaivojen hyödyntäminen jäähdytyksessä on kuitenkin suositeltavaa, koska jäähdytyksen johdosta energiakaivoon siirretty lämpö edesauttaa maaperän lämpötilan palautumista ja mahdollistaa energiakentän pitkäaikaisen käytön.

Lähteet

- 1 Sandberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointiteknikka osa 1, Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 2 Juvonen, Janne. 2013. Energiakaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Verkkoaineisto. Ympäristöopas. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf> 2013. Luettu 6.9.2021.
- 3 Alanen, Raili. Koljonen, Sirpa. Saari, Pekka. 2003. Energian varastoinnin nykytilanne. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>> 2003. Luettu 2.10.2021.
- 4 Turunen, Mikko. 2018. Suomen kallioperä. Verkkoaineisto. Suomen kansallinen geologian komitea. <<https://www.geologia.fi/2018/04/25/suomen-kalliopera/>> 2018. Luettu 2.10.2021.
- 5 Maalämpö kiinteistön jäähdytyksessä. 2021. Verkkoaineisto. Tom Allen Senera. <<https://www.tomallensenera.fi/maalampo/maalampo-liikekiinteistoon>> Luettu 11.11.2021.
- 6 Maalämpöpumput. 2018. LVI 11–10624. Rakennustieto Oy.
- 7 Acuña, José. 2009. Local Conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Ex-changers. KTH Royal Institute of Technology
- 8 Rakennuksen jäähdytystarpeen määrittäminen. 1992. LVI 34–10203. Rakennustieto Oy.
- 9 Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmastoluokitus 2018. RT 07-11299. Rakennustieto Oy.
- 10 Kutinlahti, Eija. 2018. MET - energiankulutuksen ja fyysisen aktiivisuuden mittari. Verkkoaineisto. Lääkärikirja Duodecim. <<https://www.terveyskirjasto.fi/dlk01039>> 2018. Luettu 4.6.2021.
- 11 Aurinkolämpösanasto. 2020. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolamposanasto> Päivitetty 5.8.2020. Luettu 27.10.2021.

- 12 Sandberg, Esa. 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointiteknikka osa 2, Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 13 InfraBIM-sanasto. 2014. Verkkoaineisto. Building SMART Finland. <https://www.buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2013/10/Infra-BIM_Sanasto_0-7.pdf> 2014. Luettu 11.6.2021.
- 14 MagiCAD Comfort & Energy. 2021. Verkkoaineisto. MagiCAD Group. <https://www.magicad.com/fi/mc_software/magicad-comfort-energy/#ominaisuudet-autocadille> 2021. Luettu 19.7.2021.
- 15 Energiatehokkuus. 2018. Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmityshontarpeen laskenta. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 16 Paloniitty, Sauli. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Verkkoaineisto. Suomen Rakennusmedia Oy. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK130504.pdf>> 2012. Luettu 24.10.2021.
- 17 Morén, Oskari. 2021. Room- ja Riuska-ohje. Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy.
- 18 EED – Earth Energy Designer. 2021. Verkkoaineisto. Building Physics. <<https://www.buildingphysics.com/2021>> Luettu 1.11.2021.
- 19 Çengel, Yunus. 2003. Heat Transfer. A Practical Approach, McGraw Hill.
- 20 Oksanen, Henri. 2015. Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Aalto-doc-tietokanta.

