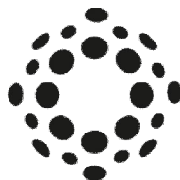


Vesa Ylänen

Tuloilman passiivisen lämmitys- ja  
jäähdytysjärjestelmän kannattavuuden  
tarkastelu

Opinnäytetyö  
Talotekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2014




MAMK

University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

		<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b> 6.5.2014
<b>Tekijä(t)</b> Vesa Ylänen	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Talotekniikka	
<b>Nimeke</b>  Tuloilman passiivisen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän kannattavuuden tarkastelu		
<b>Tiivistelmä</b> <p>Opinnäytetyön aiheena oli toimistorakennuksen tuloilman passiivinen lämmitys ja jäähdytys. Tulevaisuudessa ilmanvaihdon energiankulutukseen tullaan kiinnittämään entistä enemmän huomiota, sillä energiankulutusta tulisi vähentää. Opinnäytetyössä tutkittiin kolmea erilaista teknistä ratkaisua perustuen teknistaloudelliseen tarkasteluun ja IDA-ice simulointiin. Tavoitteena oli arvioida, kuinka tuloilman lämmitys ja jäähdytys voidaan toteuttaa energiatehokkaasti toimistorakennuksessa. Toisaalta tavoitteena oli pyrkiä selvittämään kolmen erilaisen teknisen ratkaisun investointikustannuksia ja eroja takaisinmaksuajoissa. Työn oli tilannut Retermia Oy.</p> <p>Tämä tutkimus perustui referenssirakennuksesta saatujen tietojen hyödyntämiseen. Simulointeihin valittiin kolme eri ratkaisua, joiden välillä suoritettiin teknistaloudellinen tarkastelu. Simuloinneissa käytettiin validoitua dynaamisen laskennan IDA-ice-ohjelmistoa ja muuttujina käytettiin lämpöporakaivojen lukumääriä sekä säätötapaa.</p> <p>Yhteenvetona todetaan, että simulointien perusteella passiivisella tuloilman jäähdytyksellä voidaan tuottaa riittävä tuloilman jäähdytysteho case-tapauksessa. Ohjelman laskema tarkkuus on riittävä investointikustannuksien ja takaisinmaksuajojen laskemista varten. Tulokset esitetään takaisinmaksukuvaajan avulla.</p>		
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  Ilmanvaihto, geoterminen energia, simulointi, energiatehokkuus, lämmitys, jäähdytys		
<b>Sivumäärä</b> 41+ liitteet (9 kpl)	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>		
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Mika Kuusela	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Retermia Oy	

## DESCRIPTION

		<b>Date of the bachelor's thesis</b> 6th of May 2014
<b>Author(s)</b> Vesa Ylänen	<b>Degree programme and option</b> Building services	
<b>Name of the bachelor's thesis</b> Techno-Economic Analysis of Passive Heating and Cooling of the Supply Air Systems		
<b>Abstract</b> <p>The subject of this Bachelor's thesis was about passive heating and cooling of the supply air in an office building. In the future, there will be more and more attention paid to the energy consumption of ventilation techniques, because the amount of energy consumption should be reduced. This thesis investigates three different technical solutions based on the techno-economic studies and the IDA-ice simulation. The aim of this thesis was to estimate how the heating and cooling of the supply air can be implemented in an energy efficient manner in the office building. Another objective was to examine variations in the investment costs and payback times of three different technical solutions. This project was ordered by Retermia Oy.</p> <p>The investigation in this thesis was based on utilization of the data received from the reference building. Three different solutions were chosen to be used in simulations and to be analyzed and compared in techno-economical studies. Simulations were done by using validated IDA-ice software and control the amounts of geothermal boreholes and adjusting methods were used as variables.</p> <p>The results of the performed simulations showed that, the needed cooling power of the supply air can be carried out by utilizing the passive cooling of the supply air system. The accurate in calculations performed by the software is sufficient for calculating the investment costs and payback times. The results are presented in a repayment graph.</p>		
<b>Subject headings, (keywords)</b> Ventilation, geothermal energy, simulation, energy efficiency, heating, cooling		
<b>Pages</b> 41+ annexes (9 pcs)	<b>Language</b> Finnish	<b>URN</b>
<b>Remarks, notes on appendices</b>		
<b>Tutor</b> Mika Kuusela	<b>Bachelor's thesis assigned by</b> Retermia Oy	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	TULOILMAN LÄMMITYS .....	2
2.1	Passiivilämmitysjärjestelmä ja -viilennysjärjestelmä .....	2
2.2	Kaukolämmitys .....	4
3	TULOILMAN JÄÄHDYTYS .....	6
3.1	Vedenjäähdytyskone .....	6
3.2	Kaukojäähdytys.....	7
3.3	Lämpö- ja kylmäkerroin.....	8
4	ETULÄMMITYS JA -VIILENNYSPATTERIN SÄÄTÖ .....	10
4.1	Säätöventtiilit .....	10
4.2	Energiatehokas etulämmitys ja -viilennys neulalämmönsiirtimellä .....	12
5	KANNATTAVUUSLASKENTA JA HERKKYYSANALYYSI.....	13
5.1	Korottoman takaisinmaksuajan menetelmä.....	14
5.2	Korollisen takaisinmaksuajan menetelmä .....	14
6	CASE-KOHTEEN ESITTELY JA KUVAUS .....	17
6.1	Geometriamalli .....	17
6.2	Vaihtoehto VE1.1.....	18
6.3	Vaihtoehto VE2 .....	20
6.4	Vaihtoehto VE3 .....	21
7	KANNATTAVUUSLASKENNASSA KÄYTETYT KUSTANNUSTEKIJÄT .	22
8	TUTKIMUSMENETELMÄN KUVAUS.....	26
8.1	Simuloinnissa käytetty ohjelma .....	27
8.2	Ilmanvaihtokone .....	28
8.3	Simulointien lähtötiedot VE1.1 .....	30
9	TULOKSET JA ANALYYSI.....	31
10	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	36
	LÄHTEET .....	39

## LIITTEET

1 Takaisinmaksuaikalaskelmat

2 Simuloidut vuotuiset järjestelmäenergiat VE1.1, VE1.2 ja VE1.3

3 Simuloidut vuotuiset vertailutapauksen järjestelmäenergiat VE2 ja VE3

## 1 JOHDANTO

Suomessa energiatehokkuuden huomioiminen tulee olemaan yhä merkittävämpi tekijä, koska EU:n ilmasto- ja energiapolitiikasta annetun lainsäädäntöpaketin tavoitteena on vähentää energiankulutusta 20 % vuoteen 2020 mennessä. Matalaenergiarakentaminen tulee yleistymään energianhinnan muuttuessa yhä kalliimmaksi, joten tulee tutkia kuinka passiivijärjestelmään perustuvia ratkaisuja voidaan kehittää ja ottaa käyttöön tuloilman lämmittämiseen ja jäähdytykseen. Samaan aikaan koneellisen jäähdytyksen käyttö tulee lisääntymään voimakkaasti erilaisissa toimisto- ja virastorakennuksissa, joten sen vuoksi tuloilman jäähdytyksen rooli taloteknisenä järjestelmänä tulee korostumaan.

Geotermisen energian suosion ennustetaan kasvavan globaalisti johtuen sen ympäristöystävällisyydestä ja kokonaiskustannustehokkuudesta. Geotermistä energiaa voidaan hyödyntää neulaputkitekнологiaan perustuvissa etulämmitys- ja viilennyspattereissa. Näillä järjestelmillä voidaan vähentää kasvihuonekaasuja ja ostoenergian tarvetta pitkällä aikavälillä. Tämän ratkaisun merkittävänä etuna on sen energiansäästöpotentiaali, koska geotermistä energiaa hyödyntävillä järjestelmillä voidaan säästää energiaa verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Heikkoutena geotermistä energiaa hyödyntävillä järjestelmillä on kohtuullisen suuret investointikustannukset hankintavaiheessa, jonka seurauksena sitä ei nähdä houkuttelevana valintana, ellei investointeja osata tehdä pitkän tähtäimen suunnitelmaan perustuen.

Tässä opinnäytetyössä tullaan tutkimaan, kuinka tuloilman lämmitys ja jäähdytys voidaan toteuttaa energiatehokkaasti ja optimaalisimmin. Tuloilman lämmitykseen ja jäähdytykseen liittyen tullaan suorittamaan kirjallisuuskatsaus. Referenssirakennus auttaa muuttujien määrittelyssä, joita tullaan simuloimaan validoidulla dynaamisen laskennan IDA-ice-ohjelmistolla. Simuloitujen vuosittaisten energiankulutustietojen ja selvitettyjen investointikustannusten perusteella voidaan suorittaa kolmen eri teknisten tuloilman lämmitys- ja jäähdytysratkaisun teknistaloudellinen vertailu laatimalla takaisinmaksuaikakuvaajat investointivaihtoehdoille, joiden perusteella tehdään johtopäätökset passiivijärjestelmän eroista perinteisempiin järjestelmiin. Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Retermia Oy:lle.

## 2 TULOILMAN LÄMMITYS

Toimistorakennusten lämmitysenergian kulutus muodostuu etupäässä huonetilan ja ilmanvaihdon lämmityksestä. Kiinteistöjen lämmitysenergian kokonaiskulutusta tarkasteltaessa on havaittu, että ilmanvaihdon osuus lämmitysenergian kokonaiskulutuksesta on merkittävä. Kiinteistöissä ilmanvaihtokoneissa on lämmöntalteenotto, jolla saadaan siirrettyä poistoilmasta lämpöä sisään otettavaan ilmavirtaan. Uudiskohteiden ilmanvaihto mitoitetaan mitoitussulkolämpötilassa täydellä ilmamäärällä, ja ohjaussuureina käytetään sisäänpuhallusilman lämpötilaa, kosteutta ja tilavuusvirtaa. Sisäänpuhallusilman lämpötilan ja kosteuden säätöön tarvitaan huoneantureita, poistokanavaantureita, sisäänpuhalluskanava-antureita ja ulkolämpötila-antureita. (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 89–90, 96.)

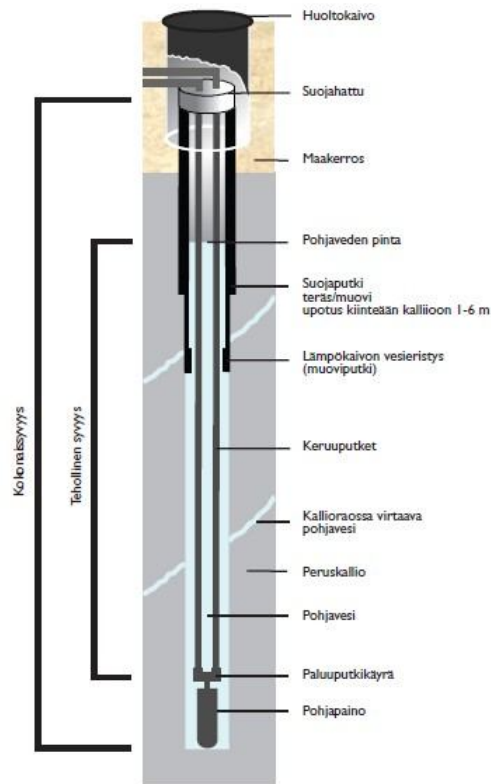
### 2.1 Passiivilämmitysjärjestelmä ja -viilennysjärjestelmä

Passiivilämmitysjärjestelmässä geotermistä energiaa tullaan hyödyntämään kierrättämällä porattuihin geoenergiakaivoihin asennetuissa lämmönkeruuputkistossa lämmönkeruunestettä, joka siirtää maaperästä kerääntyneen lämmön esimerkiksi neula-putkitekniikkaan perustuvalle etulämmityspatterille. Passiiviviilennysjärjestelmällä tarkoitetaan sitä, että hyödynnetään maaperän viileyttä rakennuksen tuloilman jäädytyksessä, jolloin tapauskohtaisesti jäähdystehontarpeesta riippuen saatetaan tarvita lisäjäähdystä, jos maaperästä saatava jäähdysteho ei riitä pitämään tuloilman sisäänpuhallusilman lämpötilaa asetusarvossaan. Geoterminen energia katsotaan oma-varaisenergiaksi, joka tuotetaan paikan päällä käyttökohteessa. Lämmitys- ja jäähdystyskäyttö tulee parantamaan järjestelmän kokonaiskannattavuutta ja tasapainoa, koska tällöin viedään lämpöenergiaa maahan kesällä viilennystilanteessa, kun taas talvella maasta otetaan lämpöenergiaa lämmitystilanteessa.

Lämpökaivon syvyys ja porareikien määrä perustuu vaadittavaan rakennuksen lämmitysenergian tarpeeseen. Juvonen (2009, 25) toteaa, että ”yleensä porareian syvyys on alle 200 metriä.” Tätä perustellaan sillä, että saattaa olla edullisempaa porata useampia reikiä, mikäli putkimetrejä tulee olla enemmän. Geoenergiakaivojen lämmönkeruunesteenä käytetään esimerkiksi pakkasen kestävästä etanoli-vesi liuosta. Hyvän lämmönsiirtoliuoksen ominaisuudet koostuvat korkeasta lämmönjohtavuudesta ja ominaislämpökapasiteetista, yhteensopivuudesta useiden materiaalien kanssa, kemial-

lisestä stabiiliudesta, pitkäikäisyydestä, palamattomuudesta, alhaisesta jäätymispisteestä sekä viskositeetista. Lisäksi lämmönkeruunesteen tulee olla myrkytöntä ja biologisesta hajoavaa sekä korrosoimatonta. Geologian tutkimuskeskuksen raportin mukaan Suomessa yli 200 metriä syvien geoenergiakaivojen poraaminen on melko harvinaista, mutta mikäli kyseessä on pieni tontti, jolle aiotaan porata geoenergiakaivoja, yli 200 metriä syviä kaivoja kannattaa harkita. Saman lämmitysenergiamäärän tuottamiseen syvempiä kaivoja tarvitaan lukumääräisesti vähemmän kuin matalampia kaivoja, jolloin on mahdollista sijoittaa geonergikaivot kauemmaksi toisistaan geonergiakentässä, mutta lopullinen energiakaivojen määrä tulee mitoittaa aina tapauskohtaisesti, koska energiakaivot vaikuttavat toisiinsa. Yhtenä syynä yli 200 metriä syvien geoenergiakaivojen harvinaisuuteen Suomessa on esitetty, että porauskalustoa on rajoitetusti saatavilla, jolla voidaan porata reilusti yli 200 metrisiä geoenergiakaivoja. (Holopainen, Vares, Ritola & Pulakka 2010, 28; Juvonen 2009, 25, 32; Leppäharju, Turunen & Kallio 2010, 4; RIL 259-2012, 72, 104.)

Suomen Kaivonporausurakoitsijat r.y tunnetaan nimellä Poratek. Poratek:n jäsenet ovat kehittäneet normilämpökaivon määritelmän, jonka mukaan lämpökaivot tullaan poraamaan vähintään 130 mm kokoisiksi halkaisijaltaan, koska siihen on helppo asentaa lämmönkeruuputkisto. Yleisesti Suomessa porattujen lämpökaivojen halkaisijat vaihtelevat välillä 105–165 mm. Lämpökenttä vaatii tonttitilaa, mutta lämpökaivoja voidaan porata myös esimerkiksi rakennusten tai pysäköintialueiden alle. Useamman kaivon järjestelmässä kokoojaputket johdetaan kaivoista konehuoneeseen maakanaleissa. Lämpökaivon teholliseksi syvyydeksi katsotaan se kaivon osuus, jossa keruuputket ovat vedessä. Kaivon yläosaan asennetaan suojaputki, joka estää pinnalta valuvien vesien ja irtoaineksen pääsyn lämpökaivon kautta pohjaveteen. Suojaputki upotetaan 1–6 metrin verran kiinteään kalliioon. Kuvan 1 mukaisesti kaivo vesieristetään vähintään 6 metrin syvyyteen muovisella eristysputkella. Mikäli lämpökaivo ei täyty pohjavedellä, niin se täytetään vedellä. Pohjapainoa käytetään laskemaan lämmönkeruuputkisto kaivon pohjalle. Lämpökaivo suljetaan vesitiiviillä suojahatulla, joka estää pintavesien ja irtoaineksen pääsyn kaivoon sekä paineellisen pohjaveden purkautumisen ulos. Energiansaanti normilämpökaivosta riippuu maaperän tyypistä, pohjaveden virtauksesta, reikien syvyydestä ja putkituksesta. Tästä syystä energiansaanti selvitetään tapauskohtaisesti. Koemittauksia suositellaan käytettäväksi energiansaannin todentamiseksi. Kuvassa 1 on normilämpökaivon rakenne. (Juvonen 2009, 25, 32; RIL 259-2012, 72–73.)



**KUVA 1. Normilämpökaivon rakenne (Juvonen 2009, 26)**

## 2.2 Kaukolämmitys

Kaukolämmön katsotaan olevan Suomen yleisin lämmitysmuoto, koska se nähdään erittäin toimintavarmana. Kaukolämmön saatavuus rajoittuu lähinnä kaupunki- ja taajama-alueille, ja sen energiatehokkuus pohjautuu sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantoon, jossa kaukolämmön tuotanto hyödyntää teollisuuden sähköntuotannon yhteydessä muussa tapauksessa hyödyntämättä jäävää lauhdelämpöä. Kaukolämmityksellä tarkoitetaan rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa, joka toimitetaan asiakkaina oleville kiinteistöille. Kaukolämmitykselle tyypilliset piirteet koostuvat siitä, että organisoitu toiminta toteutetaan liiketoiminnan muodossa ja lämmön tuotanto tapahtuu keskitetyssä kohteessa. Tämän lisäksi kaukolämpöjärjestelmille tyypillistä on, että lämpö jaetaan verkon välityksellä asiakkaille käyttäen jakelutekniikkana lämpimään veteen perustuvaa tekniikkaa. Asiakkaat muodostuvat asuintaloista, teollisuuskohteista, liikerakennuksista ja julkisista rakennuksista. Kaukolämmityksen vahvuuksiin voidaan lukea kuuluvaksi energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys, käyttövarmuus ja helppokäyttöisyys. Lisäksi kaukolämmityksen hyväksi puoliksi katsotaan se, että tuotanto voidaan jakaa tehokkaasti eri tuotantomuotojen kesken, ja että varakapasiteettia on käytettävissä. Kaukolämmityksen heikkou-

na pidetään investointien pitkiä takaisinmaksuaikoja, jotka aiheutuvat lämmöntuotantoon kohdistuvista suurista investoinneista. Lisäksi kaukolämmityksen heikkouksiin katsotaan kuuluviksi soveltumattomuus harvaan rakennetuille alueille, kykenemättömyys reagoida suuriin kulutusvaihteluihin ja siirtohäviöiden syntyminen. (Koskelainen ym. 2006, 25, 34; RIL 259-2012, 72.)

Kaukolämmityksen mahdollisuuksiin katsotaan kuuluvan edulliset ja vähäpäästöiset polttoaineet, CHP-yhteistuotanto eli lämmön ja sähkön yhteistuotanto sekä prosessien jätelämpölähteiden hyödynnettävyys. Lisäksi mahdollisuutena pidetään sitä, että kaukolämpö soveltuu hyödynnettäväksi esimerkiksi katujen sulanapidossa. Uusiutuvan energian osuus kauko- ja sähkölämmön alueellisessa tuotannossa tulee kasvamaan huomattavasti. Kaukolämmityksen uhkatekijöihin esitetään kuuluvan rahoituksen hankinnan vaikeus ja kalleus, epäterve kilpailu ja sääntely. (RIL 259-2012, 160; Koskelainen ym. 2006, 25.)

Suomessa noudatetaan julkaisua K1, joka sisältää Energiateollisuus ry:n määräykset ja ohjeet rakennuksen kaukolämmitykselle. Julkaisu K1/2013 on astunut voimaan 01.09.2013. Uusia määräyksiä ja ohjeita on aloitettu soveltamaan 01.01.2014 jälkeen tapahtuvissa toimituksissa. Oleellisin muutos aikaisempaan K1-julkaisuun verrattuna koskee mitoituslämpötiloja, joita on alennettu. Suomessa ensiöpuolella ilmanvaihdon lämmönsiirtimien tulolämpötilan maksimiarvona käytetään 115 °C. Ilmanvaihdon lämmönsiirtimen paluulämpötilan mitoitusarvo toisiopuolella on enintään 30 °C, ja voidaan käyttää menolämpötilaa 60 °C. Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet mitoitetaan kattamaan suurin ilmanvaihdon lämmöntarve täydellä ilmapirralla mitoittavan ulkoilman lämpötilassa -26 °C säävyöhykkeellä yksi, jolloin siirtimen virtaukset ovat suurimmat. On katsottu edulliseksi käyttää alhaisia siirtolämpötiloja etenkin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon liittyvissä verkoissa, koska lämpötilan alentaminen lisää voimalaitoksen sähköntuotannon kapasiteettia. Taulukossa 1 ovat uudisrakennusten lämmitysverkon lämpötilojen maksimiarvot julkaisun K1/2013 mukaisesti. (K1 2013; Koskelainen ym. 2006, 29, 72.)

**TAULUKKO 1. Lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat mitoitusulkolämpötilassa uudisrakennuksia varten (K1 2013, 8)**

	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	TULO	PALUU	PALUU	MENO
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattorilämmitys - suositus	115	33 (max)	30 (max)	45 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattorilämmitys - poikkeustapaukset	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, lattialämmitys	115	33 (max)	30 (max)	35 (max)
Kosteiden tilojen mukavuuslattialämmitys	70	28 (max)	25 (max)	30 (max)
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Huomautus		Ensiöpuolen paluulämpötila saa olla enintään 3 °C korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila		

### 3 TULOILMAN JÄÄHDYTYS

Jäähdytysenergian tuotanto voidaan erotella kahteen päätapaan, keskitettyyn ja hajautettuun. Kaukojäähdytys edustaa keskitettyä järjestelmää, jossa jäähdytysenergia saadaan aikaan suurikokoisissa yksiköissä. Kaukojäähdytyksessä jäähdytysenergia toimitetaan kuluttajille putkistoa pitkin. Vedenjäähdytyskone edustaa hajautettua järjestelmää, jonka tyypillinen piirre on, että jäähdytys tuotetaan paikallisesti rakennusryhmälle tai rakennuskompleksille. Vedenjäähdytyskoneita käytetään tyypillisesti tuottamaan rakennuksen vaatima jäähdytysenergia. Ympärivuotista jäähdytystä tarvitsessa kohteissa vedenjäähdytyskoneita hyödynnetään kylmänä vuodenaikana vapaajäähdytykseen, jolloin kuluu vain pumppaus- ja puhallinenergiaa. (Koskelainen ym. 2006, 529; RIL 259-2012, 75.)

#### 3.1 Vedenjäähdytyskone

Vedenjäähdytyskone voidaan määritellä standardin SFS-EN 14511-1 mukaisesti nesteen jäähdytykseen suunnitelluksi tehdasvalmisteiseksi kylmälaitteeksi. Vedenjäähdytyskoneen toimintaperiaate perustuu höyrystimen, kylmäainekompressorin, sisäisen tai

ulkoisen lauhduttimen sekä tarkoituksenmukaisten ohjauslaitteiden käyttämiseen. Vedenjäähdytyskoneen toiminta perustuu siihen, että kylmäaine höyrystyy matalapaineisessa höyrystimessä. Höyrystimessä kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ympäristöstä, joka toimitetaan höyrystimeen jäädytettävästä kohteesta. Vedenjäähdytyskoneen välillisessä jäädytyksessä höyrystin on kosketuksessa väliaineeseen, esimerkiksi etyleeniglykoli-vesi liuokseen. Vedenjäähdytyskoneen kylmäprosessi ottaa käyttövoimansa tyypillisesti sähkötoimisesta kompressorista, joka korottaa höyrystyneen kylmäaineen painetta. Seuraavaksi lauhduttimen tehtävänä on nesteyttää kompressorin puristama korkeassa paineessa oleva kylmäainehöyry, ja vapauttaa lämpöä lauhduttimen väliaineeseen, joka on esimerkiksi etyleeniglykoli liuosta. Paisuntaventtiilin tehtävänä on laskea lauhtuneen ja nesteytyneen kylmäaineen painetta, jonka jälkeen kylmäprosessin edetessä kylmäaine virtaa uudestaan höyrystimeen. (Kaappola 2011, 55, 59, 75; Koskelainen ym. 2006, 531–532; Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011.)

Ilmalauhdutteisia vedenjäähdytyskoneita löytyy teholuokissa 5–5 000 kW, joiden lauhtumislämpötila on tyypillisesti 40–45 °C. Kaappola toteaa, että vedenjäähdytyskoneen tyypilliset toiminta-arvot koostuvat vedenjäähdytyskoneelle tulevan ja sieltä lähtevän veden välisestä lämpötilaerosta 5–6 °C sekä vedenjäähdytyskoneelta lähtevän veden lämpötilan ja höyrystymislämpötilan välisestä lämpötilaerosta 5–7 °C. Alhaisen teholuokan vedenjäähdytyskoneissa käytetään tyypillisesti hermeettisiä scroll-kompressoreita, kun suuren teholuokan vedenjäähdytyskoneet varustetaan yleensä puolihhermeettisillä ruuvikompressoreilla. (Kaappola 2011, 99–100.)

### **3.2 Kaukojäähdytys**

Kaukojäähdytyksessä jäädytysenergia tuotetaan keskitetyssä tuotantolaitoksessa liiketoiminnan muodossa asiakaskohtaisen energiantuotannon sijaan. Keskittämällä jäädytyksen tuotantoa suurempiin yksiköihin saavutetaan mittakaavaetu, jonka avustuksella parannetaan energiankäytön tehokkuutta, ja kohotetaan prosessien hyötysuhteita verrattuna asiakaskohtaisiin jäädytysjärjestelmiin, jotka hyödyntävät sähköä. Keskitetyssä jäädytysjärjestelmässä voidaan käyttää tilanteen mukaan edullisinta energiamuotoa kylmänlähteenä ja tarkoituksenmukaisinta tekniikkaa. Kaukojäähdytykseen siirryttäessä vähennetään merkittävästi kiinteistön sähkönkulutusta. Jäädytysenergian tuotannossa voidaan sähkönkulutusta vähentää melkein 90 %. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon etuna on, että kesäkaudella kaikkea lämpöä ei tarvita kauko-

lämpönä. Näin mahdollistetaan kaukojäähdytyksen tuottaminen absorptiotekniikalla, jossa käyttöenergiana on muussa tapauksessa hyödyntämättä jäävä kaukolämpö. Tällöin säästetään sähkön tarpeessa, jos kaukojäähdytys korvaa asiakaskohteessa sähköllä aikaansaattua jäähdytysenergiaa. Kaukojäähdytys alentaa kasvihuonekaasujen ( $\text{CO}_2$ ), typenoksidien ( $\text{NO}_x$ ) ja rikkidioksidin ( $\text{SO}_2$ ) päästöjä sekä hiukkaspäästöjen määrää. (Koskelainen ym. 2006, 529.)

Kaukojäähdytyksen toiminta-ajatuksena on, että vettä käytetään kylmän siirtoon sen lämpötilaa muuttamalla siten, että jakelulämpötilana pidetään tyypillisesti 7–10 °C, ja vesi lämpenee asiakaskohteessa 5–9 °C. Tästä pienestä lämpötilaerosta johtuen kaukojäähdytysverkossa tarvitaan suuri vesimäärä, koska veden virtausnopeutena pidetään 1–2 m/s. Kaukojäähdytysverkoston pumppauskapasiteetti mitoitetaan verkon pituuden mukaan, ja varmistetaan, että asiakkaille saadaan varattua riittävästi paine-eroa käytettäväksi. Kaukojäähdytysverkossa ei ole höyrystymisvaaraa kuten kaukolämpöverkossa, eikä painetasoa määrättäessä tarvitse mitoittaa kovin korkeata minimipainetasoa. Veden höyrystymispaineena käytetään 10 °C lämpötilassa noin 12,2 kPa. (Koskelainen ym. 2006, 530.)

### 3.3 Lämpö- ja kylmäkerroin

Kokonaisjäähdytysteho  $P_c$  määritellään standardin SFS-EN 14511-1 mukaisesti lämmönsiirtoaineen kylmälaitteelle tietyssä ajassa luovuttamaksi lämpötehoksi. Standardissa SFS-EN 14511-1 kerrotaan, että lämmitysteho  $P_H$  on kylmälaitteen lämmönsiirtoaineelle tietyssä ajassa luovuttama lämpöteho. Vedenjäähdytyskoneen lämmönlouvutustehoksi katsotaan lämmönsiirtoaineen lauhduttimelta tietyssä ajassa siirtämä lämpöteho. Tehot ilmoitetaan käyttäen yksikkönä wattia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011.)

Standardin SFS-EN 14511-1 mukaan kokonaisottoteho  $P_T$  saadaan selville, kun kylmälaitteen kaikkien komponenttien sähkönottotehot lasketaan yhteen. Kokonaisottoteho  $P_T$  ilmoitetaan yksikössä wattia. Tehollinen ottoteho  $P_E$  käytetään ilmoittamaan kylmälaitteen keskimääräinen sähköteho määritellyllä aikavälillä. Huomioon otettavat sähkötehot koostuvat kompressorin sähkönottotehosta, kaikista sulatusten vaatimista sähkönottotehoista, kylmälaitteen kaikkien säätö- ja ohjauslaitteiden sähkönottotehoista ja lämmönsiirtoaineen siirtymisen kylmälaitteen sisällä varmistavien laitteiden säh-

könottotehoista. Puhaltimet ja pumput katsotaan laitteiksi, joiden tehtävänä on varmistaa lämmönsiirtoaineen siirtyminen kylmälaitteen sisällä. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011.)

Lämpökertoimen COP-lyhenne tulee englanninkielisistä sanoista Coefficient Of Performance, ja sen tarkoituksena on ilmoittaa hetkellisen antolämmitys- ja syöttötehon suhde. Lämpökerroin on sitä korkeampi, mitä matalammalla lämpötilatasolla rakennuksen lämmitysjärjestelmä toimii. Lämpökerroin ilmaisee, mikä on tuotetun lämpötehon suhde käytettyyn tehoon kaavan 1 mukaisesti (Seppänen 1995, 378; RIL 259-2012, 73):

$$\text{Lämpökerroin} = \frac{\Phi_L}{P_k} = \frac{\Phi_L}{\Phi_L - \Phi_H} = \frac{\Phi_H}{P_k} + 1 = \text{kylmäkerroin} + 1 \quad (1)$$

jossa

$\Phi_L$  on lauhduttimen lämpöteho, kW

$P_k$  on kompressorin akseliteho, kW

$\Phi_H$  on höyrystimen kylmäteho, kW

Standardin SFS-EN 14511-1 mukaan kylmäkertoimelle käytetään lyhennettä EER, joka tulee englanninkielisistä sanoista Energy, Efficiency, Ratio. EER ilmoittaa vedenjäähdytyskoneen hetkellisen antojäähdytys- ja syöttötehon suhteen. Kylmäkerroin ilmaisee, mikä on tuotetun kylmätehon suhde käytettyyn tehoon kaavan 2 mukaisesti (Seppänen 1995, 378):

$$\text{Kylmäkerroin} = \frac{\Phi_H}{P_k} = \text{lämpökerroin} - 1 \quad (2)$$

jossa

$\Phi_H$  on höyrystimen kylmäteho, kW

$P_k$  on kompressorin akseliteho, kW

SEER-lyhenne tulee englanninkielisistä sanoista Seasonal, Energy, Efficiency, Ratio, ja sillä tarkoitetaan jäähdytyksen vuotuista kylmäkerrointa. SEER-luku kertoo keskimääräisen käytetyn ja tuotetun energian suhteen vuoden mittaisella ajanjaksolla.

SEER-luku lasketaan kaavan 3 mukaisesti (Washington State University Extension Energy Program 2011):

$$\text{SEER} = \frac{\text{vuotuinen tuotettu jäähdytysenergia}}{\text{vuotuinen käytetty sähköenergia}} \quad (3)$$

jossa

vuotuinen tuotettu jäähdytysenergia, kWh

vuotuinen käytetty sähköenergia jäähdytysenergian tuottamiseksi, kWh

Vuotuisia lämpö- ja kylmäkertoimia on mahdollista parantaa monilla eri tavoilla, mutta suurin osa parannustoimenpiteistä nostaa järjestelmän hintaa. Tästä seuraa, että kokonaisuutena taloudellisin ratkaisu ei ole lämpö- tai kylmäkertoimeltaan korkein, vaan tulee kokonaisenergiatarkastelun avulla tutkia, mikä ratkaisu tulee johtamaan pienimpään euromääräiseen ostoenergiankulutukseen. (Seppänen 1995, 378; RIL 259-2012, 73.)

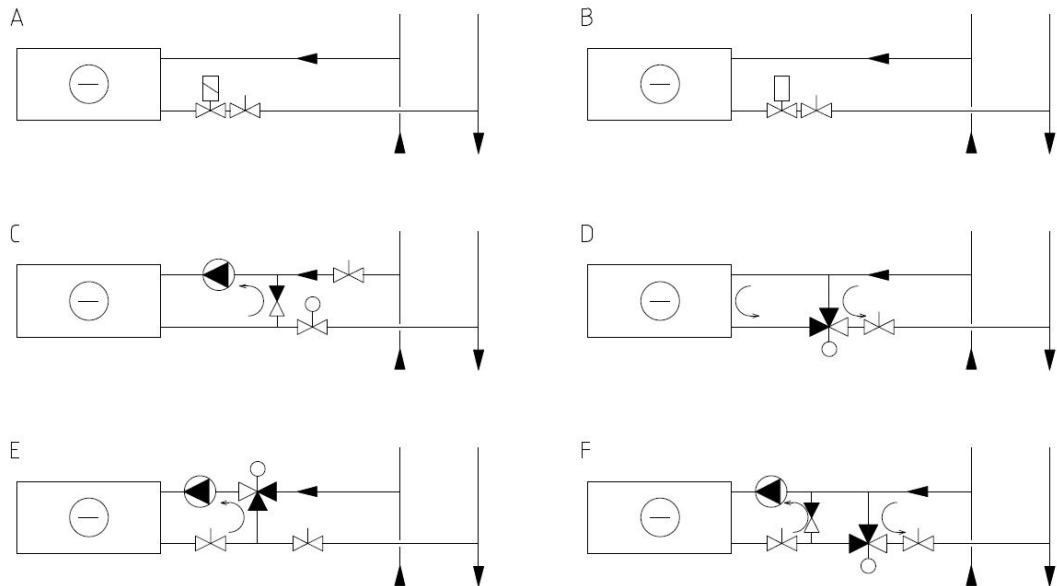
## 4 ETULÄMMITYS JA -VILENNYSPATTERIN SÄÄTÖ

Rakennuksen tuloilman lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien säädölle asetetaan tavoitteita, koska niiden saavuttamisella saadaan kiistattomia etuja, kuten rakennuksen lämpödynamiikan huomioiminen, hyvän sisäilmaston saavuttaminen sekä energiankulutuksen tehontarpeiden pitäminen alhaisina. Tästä syystä suunnittelua tarvitaan, sillä sen avulla saadaan ilmanvaihdon järjestelmien häviöistä vähäiset, säätölaitteille hyvä säädettävyyys ja säätötulos sekä optimoitu verkostomitoitus. Erityistä huomiota tulee vielä kiinnittää eri vuodenaikoina tarvittaviin ilmanvaihdon lämmityksen ja jäähdytyksen huipputehon tarpeisiin ja ilmanvaihdon järjestelmien pumppausenergian kulutukseen. (Koskelainen ym. 2006, 76; RIL 259-2012, 81.)

### 4.1 Säätöventtiilit

Paras lopputulos säätöominaisuuksien suhteen saavutetaan kytkennällä E, jonka merkittävä ero muihin kytkentöihin nähden on se, että virtaus pidetään melko vakiona patteripiirissä ja pääverkossa. Kolmitieventtiilin tehtävänä on toimia sekoittavana. Säätömahdollisuus tarkoittaa, että esimerkiksi lämmönsiirtonesteen virtausta voidaan

lisätä tai vähentää säätöventtiilin avulla, eli säätöventtiilillä kuristetaan virtausta. Kuvassa 2 ovat säätöventtiilien kytkentävaihtoehdot. (Aittomäki, Alijoki, Eerikäinen, Hakala, Kaappola, Lahdenperä, Rauno & Seinälä 1992, 377–378.)



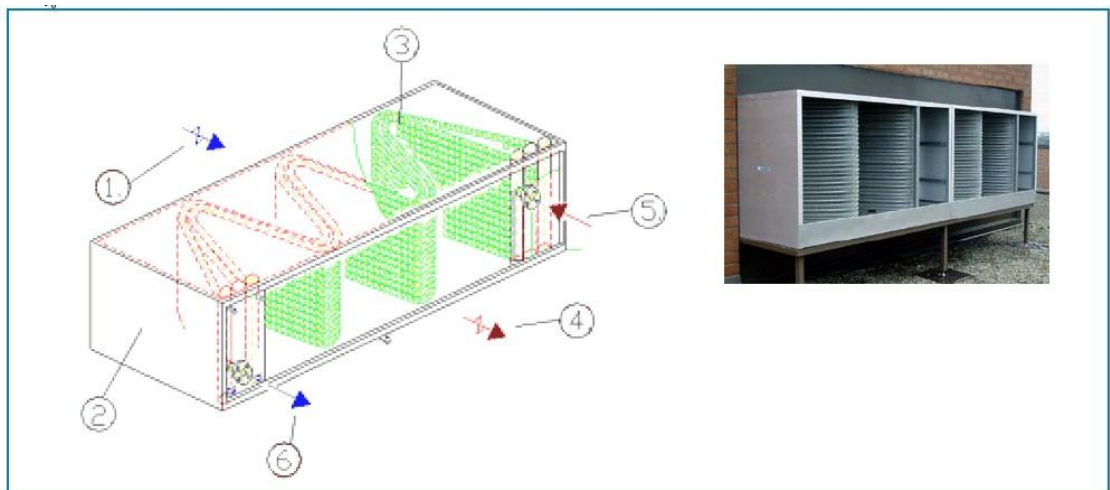
**KUVA 2. Säätöventtiilien kytkentävaihtoehdot (Aittomäki ym. 1992, 378, muokattu)**

Kytkenässä A virtauksen säätö suoritetaan magneettiventtiilillä on/off-säätönä. Kytkenässä A saavutetaan tyydyttävä tulos säädettävän kohteen kannalta vain, jos lämpötila muuttuu hitaasti virtauksen muuttuessa patteripiirissä. Haittana kytkennällä A on, että ei saavuteta vakaa säätöä, kun virtaus vaihtelee voimakkaasti patteripiirissä. Kytkenän B erona kytkentään A on, että magneettiventtiili on portaattomasti säätävä, jolloin virtauksen vaihtelut ovat pienempiä kuin kytkennän A on/off-säädöllä. (Aittomäki ym. 1992, 377–378.)

Kytkenässä D kolmitieventtiilin avulla saadaan patteripiirissä kiertämään melkein vakiovirtaus ja pääverkoston virtaus vaihtelee vähän. Patterille tulevan nesteen lämpötila pidetään vakiona. Tällöin patteripiirin virtausta säädetään siten, että muutetaan virtausta sen läpi, ja siksi sallitaan, että osa virtauksesta ohittaa patterin. Kytkenän F tarkoituksena on pitää patteripiirin virtaus vakiona erillisen pumpun avustuksella. Kolmitieventtiili toimii sekoittavana, kun sekoitetaan viileämpää paluunestettä sekoitusventtiiliä avaamalla, ja näin saadaan patterille tulevan nesteen lämpötilaa muutettua tarpeen mukaan, jolloin pääverkostosta otettava vesimäärä vaihtelee. (Aittomäki ym. 1992, 377–378.)

## 4.2 Energiätehokas etulämmitys ja -viilennys neulalämmönsiirtimellä

Retermian valmistama aaltomallinen neulalämmönsiirrin tulee hyödyntämään geotermistä energiaa, jota on varastoituneena kallioperässä, ja käyttää sen hyväksi tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergiana kuluttaen ainoastaan lähinnä puhallin- ja pumpausenergiaa. Tämä tulee merkitsemään, että kompressoria ei tarvita passiivijärjestelmässä perinteisten lämpöpumppujärjestelmien tapaan. Etulämmityspatterilla pyritään lämmityskaudella lämmittämään tuloilma  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Neulalämmönsiirrin etulämmityspatterina lämmittää tuloilmaa, mikäli tulevan nesteen lämpötila on korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. Tuloilman on tarkoitus kulkea lämmönsiirtopintana toimivan neulapinnan läpi, jolloin neulaputken sisällä virtaava lämmin lämmönsiirtoliuos lämmittää tuloilman. Lämmöntarpeen kasvaessa tullaan ottamaan loppu tarvittava lämmitysteho kaukolämmöstä, jotta tuloilman sisänpuhalluslämpötilan asetusarvo  $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$  saavutetaan. Kuvassa 3 on Retermia-runkoon asennettava neulalämmönsiirrin.



**KUVA 3. Neulalämmönsiirrin etulämmitys- ja viilennyspatterina (Retermia Oy 2013)**

Retermia neulalämmönsiirtimellä tullaan toteuttamaan energiatehokas tuloilman viilennys kierrättämällä etanoli-vesi liuosta etuviilennyspatterilla saavuttaen sisänpuhalluslämpötilan asetusarvo  $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$  siten, että ensimmäisessä portaassa kaukolämpöä lämmöntuottotapana hyödyntävää lämmityspatteria ei tarvita tuloilman lämmittämiseen, jolloin säästetään ilmanvaihdon ostolämmitysenergian kustannuksissa. Toisessa portaassa pienennetään lämmöntalteenoton pyörivän kennon pyörimisnopeutta. Kolmannessa portaassa lämmöntalteenoton kenno lakkaa pyörimästä. Neljännessä portaassa säädetään etulämmitys ja viilennyspatterin tehoa esimerkiksi kolmitieventtiilillä.

## 5 KANNATTAVUUSLASKENTA JA HERKKYYSANALYYSI

Laskentamenetelmänä voidaan käyttää korotonta takaisinmaksuajan menetelmää, jonka etuja ovat helppokäyttöisyys, yksinkertaisuus ja riittävä informaatioarvo päätöksen tueksi epävarmuuden vallitessa. Haittapuolena voidaan mainita, että siinä ei oteta huomioon koron vaikutusta, eikä investoinnin hankintamenon jäännösarvoa, koska laitteet ovat omassa käytössä läpi niiden koko taloudellisen käyttöiän, ja tästä syystä niiden jäännösarvo asetetaan nollassi. Ja toisaalta teknisten laitteiden jäännösarvo on vaikeasti ennustettavissa investointihetkellä. Korkokustannusten huomioimatta jättäminen ei aiheuta oleellista virhettä, koska niiden vaikutus on usein suhteellisen pieni. Korkotason ollessa alhainen ei tarvitse todennäköisesti korkokustannuksia ottaa huomioon investointilaskelmissa joiden kokonaishankintakustannukset eivät nouse suureksi. Lisäksi tässä työssä tehtävät laitehankinnat ovat suoritettavissa kokonaan oman pääoman ehtoisella rahoituksella.

Investointien kannattavuuslaskelmat ovat osa taloteknisten järjestelmien suunnitteluun. Niitä tarvitaan, jotta saadaan selville vaihtoehtoisten investointien paremmuus. Niiden perusteella voidaan taloudellisessa mielessä vertailla ja optimoida erilaisia investointivaihtoehtoja liittyen esimerkiksi ilmanvaihdon lämmityksen- ja jäähdytyksen toteutustapoihin. Kannattavuustarkastelun avulla voidaan selvittää erilaisten toteutusvaihtoehtojen taloudellisuutta ja optimoida rakennusten järjestelmien mitoitus. Kannattavuustarkastelu suoritetaan ennen investointeihin ryhtymistä. Kannattavuuslaskennan tulokset voidaan esittää kassavirtalaskelman muodossa tai takaisinmaksupiirroksen avulla. Kannattavuuslaskentaa varten ei ole syytä eritellä kustannuksia liian yksityiskohtaisesti, koska investoinnin tärkeimmistä pääoma- ja käyttökustannuksista riippuu millaiseksi takaisinmaksuaika muodostuu. (Koskelainen ym. 2006, 469.)

Herkkyyssanalyysiä tarvitaan, koska hankintahinnat ja investoinneista saatavat tuotot ovat epävarmoja, ja sen avulla voidaan tutkia, kuinka investointien kannattavuus muuttuu eri tekijöiden muuttuessa. Laskenta suoritetaan uudelleen jokaisen muutoksen jälkeen, ja tutkitaan, mikä vaikutus sillä on ollut lopputulokseen. Näillä eri skenaarioihin perustuvilla laskentatapauksilla pyritään löytämään kannattavin investointivaihtoehto ja välttämään erityisesti investointeja, jotka eivät olisi kannattavia. (Neilimo & Uusi-Rauva 2005, 225.)

## 5.1 Korottoman takaisinmaksuajan menetelmä

Hankintakustannuksella tarkoitetaan investointikustannusta, joka sisältää laitteiden hankinnasta aiheutuvat välittömät ja välilliset kustannukset, jolloin kustannukset koostuvat suunnittelusta, tarvikehankinnoista, työhankinnoista ja yleisistä kuluista sekä katteesta. Matalaenergiarakentamisen edullisuutta kyetään tarkastelemaan erittelemällä lisäkustannukset verrattuna tavanomaiseen uudis- tai korjausrakentamiseen, ja matalaenergiarakentamisen hankintakustannuksessa voidaan huomioda vähennyksinä saatavat investointi- ja energiakorjaustuet. (RIL 259-2012, 36.)

Elinkaarikustannukset koostuvat pääoma-, käyttö- ja ylläpitokustannuksista. Kustannuksia tarkastellaan keskimääräisinä vuosikustannuksina. Tämä tarkoittaa, että kannattavuuslaskennassa käytetään apuna ensimmäisen vuoden ja laskentajakson kustannuksia tai nykyarvoa. Menettely mahdollistaa takaisinmaksuajan määrittämisen investointivaihtoehdoille, ja se voidaan laskea, kun tiedetään hankintakustannusero ja vuotuiset energiakustannussäästöt. (RIL 259-2012, 37.)

Takaisinmaksuaika kertoo sen ajan, jonka kuluessa investointi maksaa itsensä takaisin. Takaisinmaksuaika lasketaan jakamalla investoinnin kustannukset vuotuisilla investoinnista saatavilla säästöillä kaavan 4 mukaisesti (Seppänen 2004, 392–393):

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Investoinnin kustannukset}}{\text{Vuotuiset säästöt}} \quad (4)$$

jossa

Takaisinmaksuaika, vuosi

Investoinnin kustannukset, €

Vuotuiset investoinnista saatavat säästöt, €

## 5.2 Korollisen takaisinmaksuajan menetelmä

Mikäli otetaan koron vaikutus huomioon takaisinmaksuaikaa määritettäessä, käytetään tarkasteluhetkeen diskontattuja nettotuottoja. Korollinen takaisinmaksuaika voidaan selvittää, kun tunnetaan koroton takaisinmaksuaika ja korko. Näin koron vaikutus voidaan ottaa huomioon. Korolla tarkoitetaan korvausta rahan käyttöön saamisesta lainantajalta. Lasketaan säännöllisiin vakiomaksueriin ja kiinteään korkoon perustuvan

investoinnin tuleva arvo, johon vaikuttavat korko ja pitoaika. (Haverila, Uusi-Rauva, Kouri & Miettinen 2009, 201.)

Korkoa korolle -laskelmissa tullaan selvittämään investoinnin kustannukset vuoden  $n$  kohdalla kertomalla investoinnin kustannukset tekijällä  $(1+i)^n$ . Investoinnin kustannukset vuoden  $n$  kohdalla  $a_n$  voidaan laskea kaavan 5 mukaisesti (Haverila ym. 2009, 201):

$$a_n = (1 + i)^n \cdot a \quad (5)$$

jossa

$a_n$  on investoinnin kustannukset vuoden  $n$  kohdalla, €

$a$  on investoinnin kustannukset, €

$i$  on investoinnin korko, %

$n$  on investoinnin pitoaika, vuosi

Diskonttaustekijän avulla voidaan ratkaista, mikä rahasumma on investoitava tänään, jotta  $n$  vuoden kuluttua investoinnin arvo olisi  $a_n$ . Diskonttaustekijä  $d$  lasketaan kaavan 6 mukaisesti (Haverila ym. 2009, 201):

$$d = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (6)$$

jossa

$i$  on investoinnin korko, %

$n$  on investoinnin pitoaika, vuosi

Tyypillisesti investointilaskennassa vuotuisten tuottojen ja menojen arvioidaan olevan vakioita. Tästä syystä vuotuisia tuottoja ja menoja ei silloin tarvitse yksitellen diskontata. Lasketaan vuotuisten tuottojen ja menojen erotus. Näin saadaan nettotuotto, jolle lasketaan investoinnin nykyarvo  $N$ . Jaksollisten suoritusten nykyarvotekijä  $a_n/i$  lasketaan kaavan 7 mukaisesti (Haverila ym. 2009, 202):

$$\frac{a_n}{i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (7)$$

jossa

$a_n/i$  on jaksollisten suoritusten nykyarvotekijä

$i$  on investoinnin korko, %

$n$  on investoinnin pitoaika, vuosi

Investoinnin nykyarvo  $N$  saadaan laskettua, kun kerrotaan vuotuisten tuottojen ja menojen erotus jaksollisten suoritusten nykyarvotekijällä  $a_n/i$ . Jäännösarvoa ei yleensä huomioida investointilaskennassa. Jos jäännösarvo  $J$  huomioidaan, niin se diskontataan. Investoinnin nykyarvo  $N$  lasketaan kaavan 8 mukaisesti (Haverila ym. 2009, 201–203):

$$N = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot T + \frac{1}{(1+i)^n} \cdot J \quad (8)$$

jossa

$N$  on investoinnin nykyarvo, €

$i$  on investoinnin korko, %

$n$  on investoinnin pitoaika, vuosi

$T$  on vuotuiset vakioksi oletetut nettotuotot (tuotot-menot), €

$J$  on investoinnin hankintamenon jäännösarvo, €

Korollisen takaisinmaksuajan kaava saadaan kaavasta 8, kun jäännösarvo  $N$  asetetaan nolaksi ja ratkaistaan kaavasta investoinnin pitoaika  $n$ . Tästä seuraa, että korollinen takaisinmaksuaika lasketaan kaavan 9 mukaisesti (Haverila ym. 2009, 201–206):

$$n = \frac{\ln \frac{T}{T-H \cdot i}}{\ln (1+i)} \quad (9)$$

jossa

$i$  on investoinnin korko, %

$n$  on investoinnin pitoaika, vuosi

$T$  on vuotuiset vakioksi oletetut nettotuotot (tuotot-menot), €

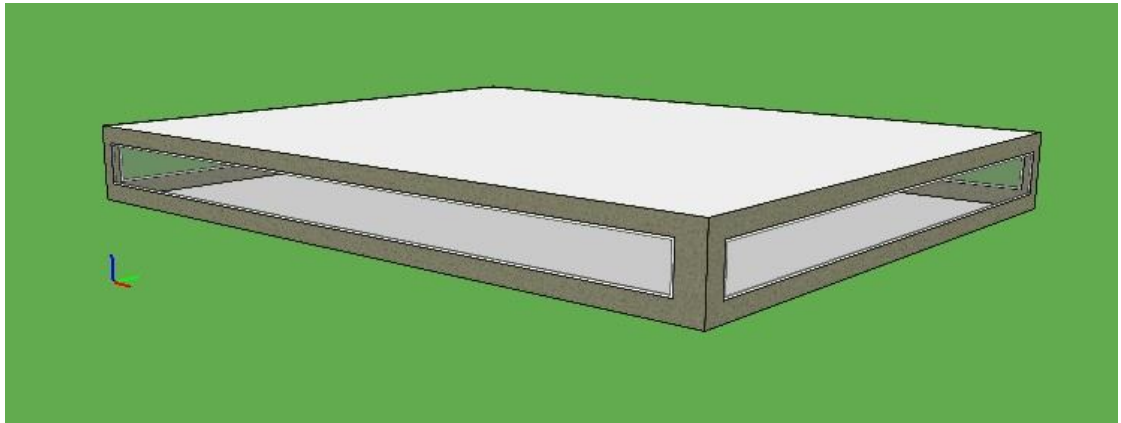
$H$  on investoinnin hankintameno, €

## 6 CASE-KOHTTEEN ESITTELY JA KUVAUS

Tutkimuksen simulointi tullaan suorittamaan hyödyntäen fiktiivistä yksinkertaistettua tilamallia Suomen rakentamismääräyskokoelman eli SRakMK:n osan D3 mukaisesta perustason avokonttorista, joka rajoittuu kaikkiin neljään ilmansuuntaan. Referenssirakennus auttaa muuttujien määrittelyssä, joita tullaan simuloimaan. Tavoitteena on simuloida tuloilman jäähtyksen ja lämmityksen energiankulutusta, sekä suorittaa kolmen eri toteutusvaihtoehtojen välinen teknistaloudellinen vertailu.

### 6.1 Geometriamalli

Laskelmissa tullaan käyttämään fiktiivistä toimistorakennusta, jonka sisämitat tulevat olemaan pituus 20 metriä, leveys 25 metriä ja korkeus 2,6 metriä. Geometriamallin lattia-ala on  $500 \text{ m}^2$ , ja tilavuus on  $1300 \text{ m}^3$ . Tulo- ja poistoilmavirraksi syötetään  $2,0 \text{ (dm}^3/\text{s})/\text{m}^2$ , joten koko toimistorakennuksen tulo- ja poistoilmavirta tulee olemaan  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Geometriamallia tarvitaan, jotta saadaan simuloitua ilmanvaihdon vuotuiset lämmityksen ja jäähtyksen energiantarpeet. Kuvassa 4 on yksinkertaistettu geometriamalli fiktiivisestä toimistorakennuksesta.



**KUVA 4. Rakennuksen geometriamalli**

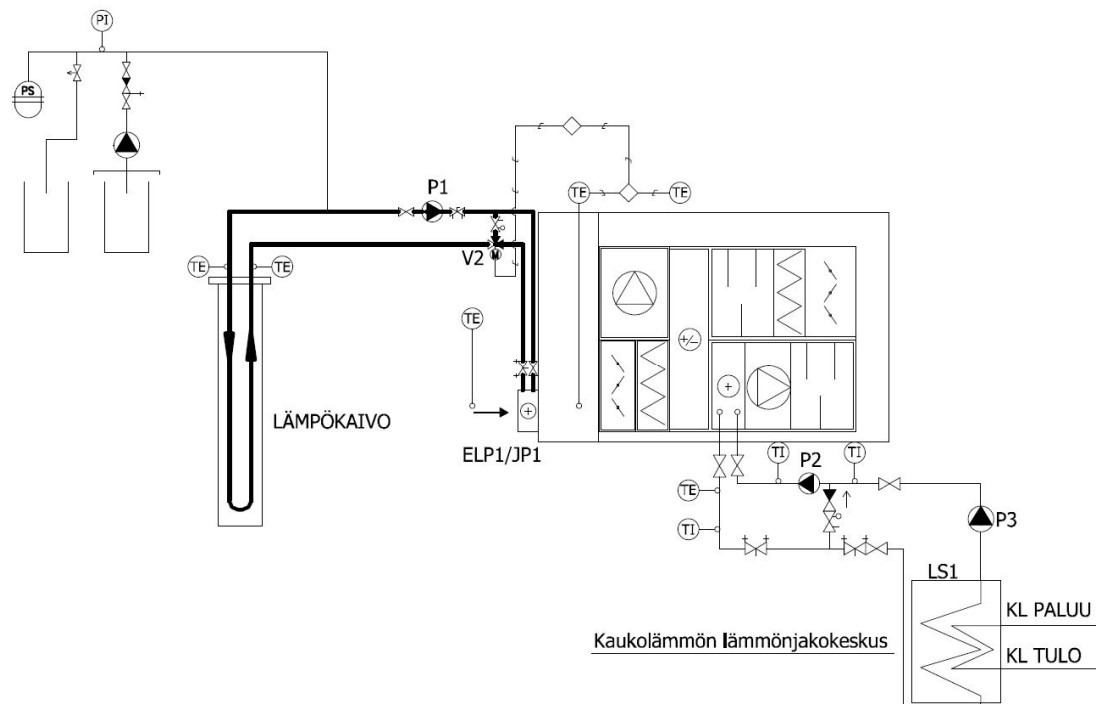
Rakennusvaipan ilmanvuotolukuna käytetään  $q_{50}$  arvoa  $1,5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ . Rakennuksen vaipan ja ikkunoiden U-arvot vastaavat vertailuarvoja, joita käytetään, kun lasketaan rakennuksen vaipan lämpöhäviön vertailuarvoa SRakMK:n osan D3 mukaisesti. Taulukossa 2 ovat simuloinnissa käytettävät rakenteiden U-arvot.

**TAULUKKO 2. Rakenteiden U-arvoja (SRakMK D3 2012)**

Rakennusosa	Lämmönläpäisykerroin U W/(m <sup>2</sup> ·K)
Ulkoseinät	0,17
Yläpohja	0,09
Alapohja	0,16
Ikkunat	1,0
Ulko-ovet	1,0

## 6.2 Vaihtoehto VE1.1

Kaikkien vaihtoehtojen VE1.1, VE1.2, VE1.3, VE2 ja VE3 ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin energiamuotona toimii kaukolämpö. Vaihtoehdot eroavat toisistaan tuloilman jäädytyksen toteutustekniikan suhteen. Tarkastellaan ensiksi vaihtoehtoa VE1.1, joka on passiivijärjestelmäratkaisu. Simuloidaan vaihtoehto VE1.1 ainoastaan 200 metriä syvillä lämpökaivoilla, koska pumppauskustannukset nousevat porauskustannuksien kanssa rajoittaviksi tekijöiksi. Case-tapauksen mallinnusten perusteella ei havaittu olevan merkitystä sillä, pidetäänkö maassa vakiokiertoa vai ei, ja toisaalta silläkään ei ole merkitystä, onko patterilla muuttuva- vai vakiokierto. Kuvassa 5 on simuloinnin vaihtoehdon VE1.1 putkiyhtiökaavio.



**KUVA 5. Vaihtoehto VE1.1**

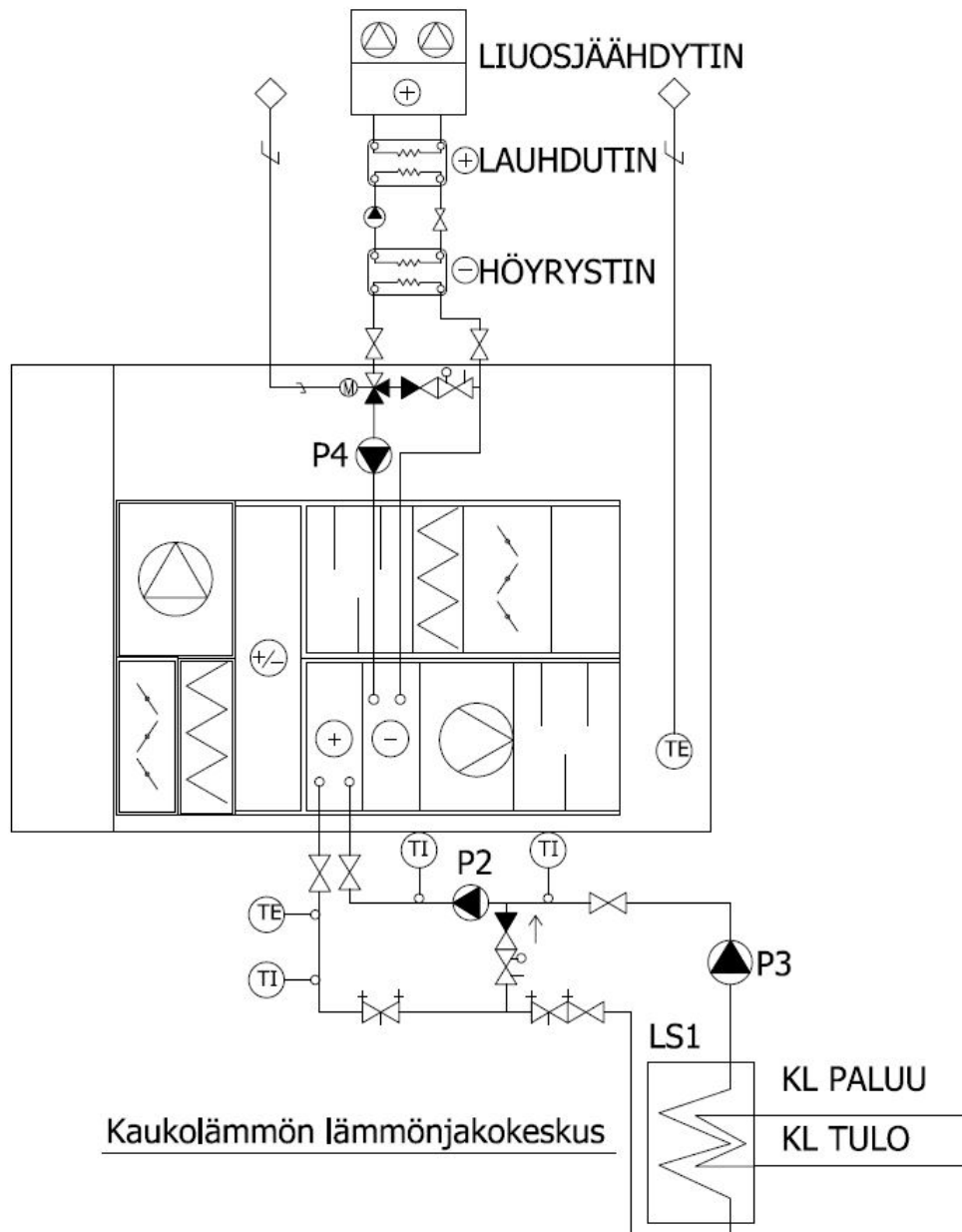
VE1.1 putkiipiiri tulee tarvitsemaan oman kiertopumpun, jolla lämpöporakaivopiirissä virtaus tullaan pitämään vakiona. VE1.1:ssä kolmitieventtiili mahdollistaa muuttuvan lämmönkeruunesteen virtauksen etulämmitys- ja viilennyspatterilla, jolla tullaan suorittamaan lämmönkeruunesteen virtauksen säätö muuttamalla paine-eroa eli kuristamalla virtausta. VE1.2 on identtinen VE1.1:sen kanssa, mutta lämpökaivojen lukumäärä on kaksi kappaletta. Samoin VE1.3 on identtinen VE1.1:sen kanssa, mutta lämpökaivojen lukumäärä on kolme kappaletta. Taulukossa 3 on VE1.1:sen, VE1.2:sen ja VE1.3:sen lähtötietoja.

**TAULUKKO 3. VE1.1, VE1.2 & VE1.3 lähtötietoja**

<b>Simuloitava tapaus</b>	<b>Liuosvirtaama lämpökaivopiirissä</b>	<b>Liuosvirtaama patteripiirissä</b>	<b>Lämpökaivojen lkm</b>	<b>Lämpökaivon syvyys, m</b>
VE1.1	vakio	muuttuva	1	200
VE1.2	vakio	muuttuva	2	200
VE1.3	vakio	muuttuva	3	200

### 6.3 Vaihtoehto VE2

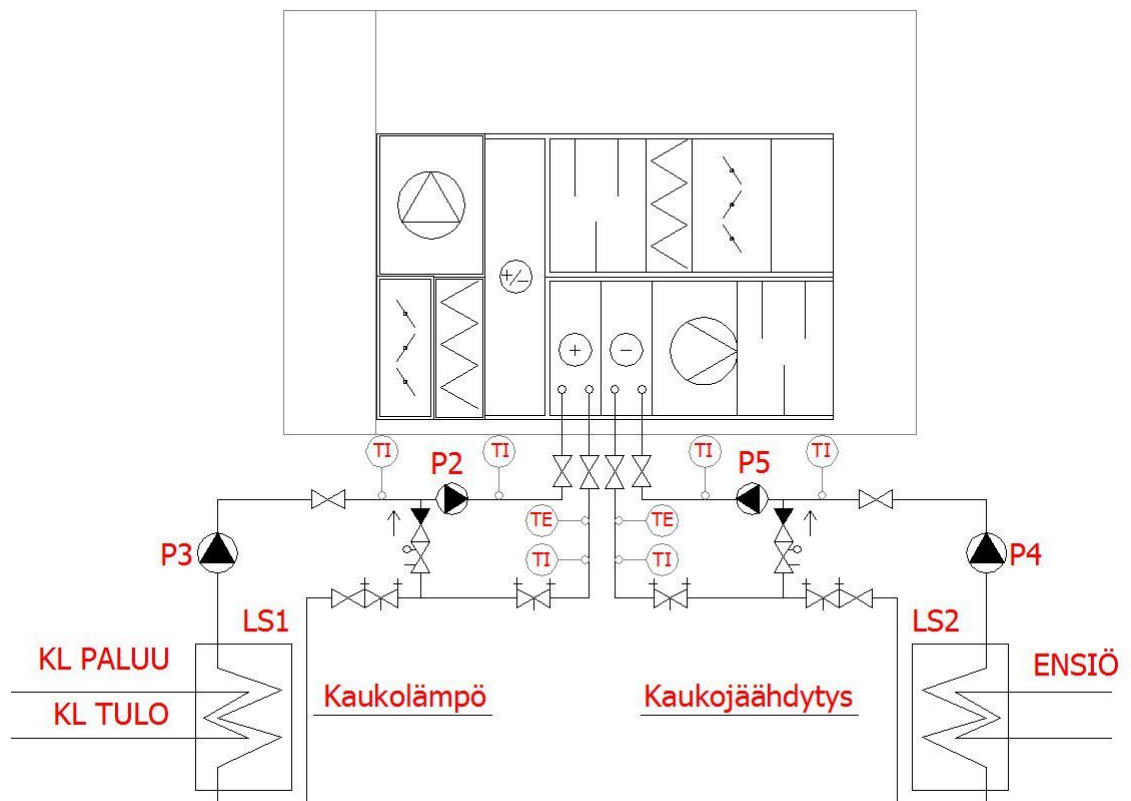
Vaihtoehto VE2 tarkoittaa tuloilmanjäähdytyksen toteuttamista vedenjäähdytyskoneella, jonka energiamuotona käytetään sähköä. Vedenjäähdytyskoneen jäähdytysprosessin tuotto-prosessin vuotuisena kylmäkertoimena käytetään 2,5. Kuvassa 6 on putki- ja sähkökaavio vaihtoehdon VE2 simulaatiotapauksesta.



KUVA 6. Vaihtoehto VE2

## 6.4 Vaihtoehto VE3

Vaihtoehto VE3 tarkoittaa tuloilmanjäähdytyksen toteuttamista kaukojäähdytyksellä, jonka jäähdytyksen tuottotavan hyötysuhde on 1. Vaihtoehto VE3 tarkoittaa, että tullaan valitsemaan tuloilman jäähdytyksen toteutusvaihtoehdoksi kaukojäähdytys, jolloin jaetaan keskitetyssä tuotantolaitoksessa tuotettua jäähdytettyä vettä putkiston välityksellä ilmanvaihdon jäähdytykseen. Kaukojäähdytyksessä toimistorakennuksesta siirretään lämmönsiirtimellä lämmennyt vesi paluuputkella takaisin jäähdytyslaitokselle, ja siellä lämmennyt vesi jäähdytetään uudelleen. Kuvassa 7 on putkipiirikaavio vaihtoehdon VE3 simulaatiotapauksesta.



**KUVA 7. Vaihtoehto VE3**

## 7 KANNATTAVUUSLASKENNASSA KÄYTETYT KUSTANNUSTEKIJÄT

Kaikki kannattavuuslaskennassa käytetyt kustannustekijät ovat arvonlisäverottomin hinnoin. Kaukolämpölaitteet koostuvat ilmanvaihdon lämmönsiirtimestä, säätölaitteista, pumpuista, paisunta- ja varolaitteista, lämpö- ja painemittareista sekä sulkuventtiileistä. Asiakkaan kaukolämpölaitteille ei voida määrittää tarkkaa käyttöikää. Yli 20 vuotta vanhat laitteet uusitaan kokonaisuudessaan, jolloin voidaan mitoittaa laitteet vastaamaan rakennuksen tosiasiallista lämmöntarvetta sekä tarkistaa tilausteho ja vesivirta. Taulukossa 4 ovat kaukolämpölaitteiden investointikustannukset VE1.1:seen, VE1.2:seen, VE1.3:seen, VE2:seen ja VE3:seen. (Ahonen 2014; Tuomainen 2014.)

**TAULUKKO 4. Kaukolämpölaitteiden investointikustannuksia (Ahonen 2014; Tuomainen 2014)**

	Yhteensä euroa, €
Lämmönsiirrin, automatiikka ja kiertovesipumppu	2 500

Lämmitysenergian hintoina laskelmissa tullaan käyttämään seuraavia kustannustekijöitä. Kaukolämpöliittymän tilaustehona tullaan käyttämään 24,3 kW vaihtoehdoissa VE2 ja VE3, jolloin tilausvesivirta on 0,27 m<sup>3</sup>/h, ja liittymismaksu on 5 834 € sekä perusmaksun suuruutena laskelmissa tullaan käyttämään 690 €/vuosi. Passiivinen tuloilman lämmitys mahdollistaa kaukolämmön lämmitystehon huipunleikkauksen, jonka seurauksena tarvitaan 11,5 kW:n kaukolämpöliittymä kahden lämpökaivon tapauksessa VE1.2. 11,5 kW:n kaukolämpöliittymän tilausvesivirta on 0,15 m<sup>3</sup>/h, ja tällöin liittymismaksun hinta on 4 473 € ja perusmaksu on 357,96 €/vuosi. VE1.1:sen kaukolämpöliittymän huipputehoksi tullaan valitsemaan 13 kW, joka on vain 47 % tuloilman lämmitystehon tarpeesta mitoittavalla ulkoilman lämpötilalla, mutta se tulee kattamaan yhdessä ilmanvaihdon lämmöntalteenoton kanssa 85 % vuotuisesta tuloilman lämmitysenergiatarpeesta, ja vuotuinen huippukäyttöaika tulee olemaan vain muutamia tunteja vuodessa. 13 kW kaukolämpöliittymän, jonka tilausvesivirta on 0,18 m<sup>3</sup>/h, liittymismaksuksi muodostuu 4 813 € sekä perusmaksun suuruutena laskelmissa tullaan käyttämään 441 €/vuosi. Energian hintana käytetään 56,97 €/MWh. (Haapiainen-Liikanen 2013; Koskelainen ym. 2006, 65, 444, 470–471.)

VE1.1 tapauksessa investointikustannukset koostuvat lämpökaivosta, neulalämmönsiirtimestä, säätöjärjestelmästä, kiertovesipumpusta ja putkimateriaaleista sekä asentamiseen käytetystä työajasta. VE1.1 mukaisten putki-, automaatio- ja laitehankintojen hinnaksi muodostuu 26 715 € Taulukossa 5 ovat laskennassa käytetyt VE1.1:sen investointikustannukset.

**TAULUKKO 5. VE1.1:sen investointikustannuksia (Castrén 2014; Hokkanen 2013; Kauhanen 2014; Kolmeks Oy 2014, 15; Pohjalainen 2014)**

	Yksikkö	€/yks	Euroa, €
Kaukolämpöliittymä	1 kpl		4 813
Lämpökaivo 1	200 m	30 €/m	6 000
Neulalämmönsiirrin etulämmitys- ja viilennyspatteri	1 kpl		4 440
Etulämmitys- ja viilennyspatterin putkityöt sekä materiaalit			8 500
Säätöjärjestelmä	1 kpl		1 320
Kiertopumppu	1 kpl		1 642
Yhteensä			26 715

VE1.2 vaihtoehdon putki-, automaatio- ja laitehankintojen hinnaksi muodostuu 32 375 € Investointikustannukset ovat taulukon 6 mukaiset, kun investoidaan passiivilämmitysjärjestelmään, jossa on kaksi lämpökaivoa, jota merkitään VE1.2.

**TAULUKKO 6. VE1.2:sen investointikustannuksia (Castrén 2014; Hokkanen 2013; Kauhanen 2014; Kolmeks Oy 2014, 15; Pohjalainen 2014)**

	Yksikkö	€/yks	Euroa, €
Kaukolämpöliittymä	1 kpl		4 473
Lämpökaivo 1	200 m	30 €/m	6 000
Lämpökaivo 2	200 m	30 €/m	6 000
Neulalämmönsiirrin etulämmitys- ja viilennyspatteri	1 kpl		4 440
Etulämmitys- ja viilennyspatterin putkityöt sekä materiaalit			8 500
Säätöjärjestelmä	1 kpl		1 320
Kiertopumppu	1 kpl		1 642
Yhteensä			32 375

Neulalämmönsiirrinratkaisuun perustuva lämmöntalteenottojärjestelmä huolletaan kerran vuodessa. Huoltotoimenpiteet huoltokertaa kohti koostuvat karkeasti kahden tunnin imuroinnista, viiden tunnin korkeapainepesusta ja yhden tunnin työstä, joka varataan ilmauksen ja neulapinnan tarkistamiseen sekä etanoli-vesi liuoksen näytteenottoon. Lisäksi tarvitaan 2 litraa SP130-pesuainetta, joka kustantaa 5,6 €/litra, ja 1 000–1 200 litraa vettä, jonka hintana laskelmissa käytetään 8,4 €/m<sup>3</sup>. Sähköenergiaa kuluu 10 kWh, jolloin yhden huoltokerran hinnaksi tulee näin ollen noin 491 € kun se lasketaan käyttäen 43 €/tuntiveloitusta käytetylle työajalle. (Snellman 2014; Vexve Oy 2013; VTT Lifeplan 2004.)

Vedenjäähdytyskoneen kompressorijärjestelmä kestää arviolta 15 vuotta. Suositus on, että vedenjäähdytyskoneelle suoritetaan 1–2 tarkastushuoltoa vuosittain riippuen käytötuntimäärästä. Kustannukset ovat luokkaa 500 € jokaiselta huoltokerralta. Vedenjäähdytyskoneen teknistä käyttöikää lyhentää hyvän hyötysuhteen takaamiseksi tarvittava tekniikka. Tästä seuraa, että laitteisto sisältää ohjausautomatikkaa, eri komponentteja kylmäainepiirissä, puhaltimia, pumppuja ja kompressoreita, minkä seurauksena ilmenee vaihtotarvetta. (Tuijula 2013.)

Vedenjäähdytyskoneessa on valmiina oma säätö- ja sähkökeskus sekä sisäänrakennettu kiertovesipumppu. Vedenjäähdytyskoneen lisäksi tarvitaan noin 200 litran paluuvesisäiliö, joka toimitetaan eristettynä. Jäähdytyspatterille tarvitaan kolmitieventtiili. VE2 mukaisten putki-, automaatio- ja laitehankintojen hinnaksi muodostuu 26 310 €. Investointikustannukset ovat taulukon 7 mukaiset, kun investoidaan vaihtoehtoon VE2.

**TAULUKKO 7. VE2 investointikustannuksia (Jäppinen 2014; Kauhanen 2014; Toriseva 2013; Tuijula 2013; Kauhanen 2014; Kietäväinen 2014)**

	<b>Yksikkö</b>	<b>Euroa, €</b>
Kaukolämpöliittymä	1 kpl	5 834
Vedenjäähdytyskone	1 kpl	6 500
Paluuvesisäiliö	1 kpl	1 000
Jäähdytyspatteri	1 kpl	2 500
Kolmitieventtiili	1 kpl	470
Putkityöt ja materiaalit		8 500
Säätöjärjestelmä	1 kpl	1 320
G3-tason suodatin koneen imupuolelle	1 kpl	46
Ulkosäleikkö	1 kpl	140
<b>Yhteensä</b>		<b>26 310</b>

Kaukojäähdytyslaitteet koostuvat ilmanvaihdon lämmönsiirtimestä, säätölaitteista, pumpuista, paisunta- ja varolaitteista, lämpö- ja painemittareista sekä sulkuventtiileistä. VE3 vaihtoehdon mukaisten putki-, automaatio- ja laitehankintojen hinnaksi muodostuu 18 470 € Taulukossa 8 ovat VE3:sen investointikustannukset.

**TAULUKKO 8. Kaukojäähdytyslaitteiden investointikustannuksia (Ahonen 2014; Jäppinen)**

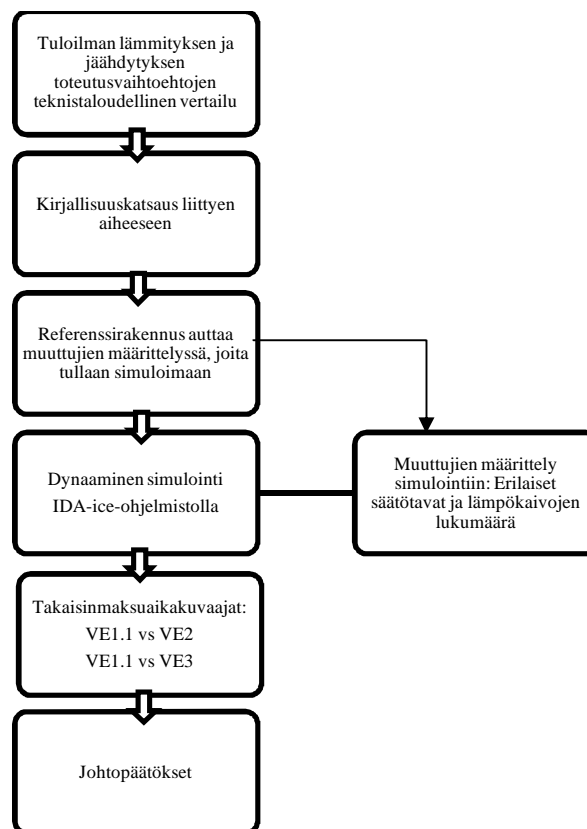
	<b>Euroa, €</b>
Kaukolämpöliittymä	5 834
Kaukojäähdytysliittymä	10 000
G3-tason suodatin koneen imupuolelle	46
Kaukojäähdytyksen siirrin ja automatiikka	2 590
<b>Yhteensä</b>	<b>18 470</b>

Kaukojäähdytyksen hintatiedot eivät ole julkisia. Tästä syystä tullaan haastattelemaan suunnittelutoimiston LVI-ryhmän päällikköä, jolta saadaan tietää, että kaukojäähdytyksen liittymismaksu kustantaa noin 8 000–10 000 €, perusmaksun suuruus on noin 1 000 €/vuosi, ja energian hintana voidaan käyttää 30 €/MWh, kun tilaustehoksi oletetaan 17 kW. Kaukojäähdytyksen vuosittaiset huoltokustannukset tulevat olemaan 60 € (Saarela 2014.)

Sähköenergian hintana on käytetty laskelmissa Etelä-Savon Energia Oy:n sähkömyyntihinnaston mukaisesti 7,2 snt/kWh. Lisäksi otetaan huomioon, että energian siirtomaksu on 3,10 snt/kWh, ja sähkövero on 2,4 snt/kWh. (Etelä-Savon Energia Oy 2013; RIL 259-2012, 18.)

## 8 TUTKIMUSMENETELMÄN KUVAUS

Tullaan tutkimaan kuinka tuloilman lämmitys ja jäähdytys voidaan toteuttaa energia- tehokkaasti ja optimaalisimmin toimistorakennuksessa, joten siihen liittyen tullaan suorittamaan kirjallisuuskatsaus. Tullaan simuloimaan vuosittaiset järjestelmäenergiat validoidulla dynaamisen laskennan IDA-ice-ohjelmistolla, ja selvitettyjen investointi- kustannusten perusteella voidaan suorittaa kolmen eri teknisten tuloilman lämmitys- ja jäähdytysratkaisun teknistaloudellinen vertailu laatimalla takaisinmaksuaikakuvaajat investointivaihtoehdoille. Lopuksi tullaan tekemään tarvittavat johtopäätökset laadit- tujen kannattavuuskuvaajien pohjalta. Kuvassa 8 on tutkimusmenetelmän hierarkiaku- vaus.



**KUVA 8. Tutkimusmenetelmän hierarkiakuvaus (Qiao 2013, muokattu)**

## 8.1 Simuloinnissa käytetty ohjelma

Simulointiin käytetään IDA-ice 4.51-ohjelmistoa, joka on ruotsalais-suomalaisena yhteistyönä kehitetty validoitu tuntitason dynaaminen simulointiohjelmisto, ja se tukee IFC-tiedonsiirtoa. Työssä käytetty IDA-ice 4.51-ohjelmisto sisältää borehole-mallin 0.3. Rakennuksen geometriamalli voidaan luoda IDA-ice ohjelmistolla käyttäen DWG-muodossa olevia arkkitehtipohjia. Dynaamiselta laskentatyökälulta vaaditaan, että lämmönsiirron laskenta kykenee ottamaan huomioon rakenteiden lämmönvarausominaisuuden ajasta riippuvaisena. (LVI-ohjekortti 10-10527; SIY Sisäilmatieto Oy.)

Borehole-malli mahdollistaa, että lämmönsiirto lasketaan 3-dimensionaalisesti, joten ohjelman täytyy yhdistää 1-dimensionaalinen lämmönkeruunesteestä tapahtuva lämmönsiirto maa-ainekseen ja täyteaineeseen, 1-dimensionaalinen lämmönsiirto maa-aineeseen lämmönkeruunesteestä ja täyteaineesta ja 2-dimensionaalinen lämmönsiirto lämpöporakaivon ympäriltä täyteaineeseen sekä lämmönkeruunesteeseen. Lämmönkeruunesteen lämmönjohtavuuden, tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin on oltava vakioita laskennan suorittamiseksi. Borehole-malli laskee energiataseen lämmönkeruunesteelle kaavan 10 mukaisesti (Equa 2013):

$$\begin{aligned}
 & \rho_{Liq} \cdot c_{p,Liq} \cdot V_{Liq} \cdot \frac{dTd_{i,j}}{dt} \\
 & = m_i \cdot c_{p,Liq} \cdot (Td_{i,j-1} - Td_{i,j}) + K_{LiqGrout,i} \cdot (T_{Groutd,i,j} - Td_{i,j}) \\
 & + K_{LiqEarth,i} \cdot (T_{Real,i,j} - Td_{i,j}) \\
 \\
 & \rho_{Liq} \cdot c_{p,Liq} \cdot V_{Liq} \cdot \frac{dT u_{i,j}}{dt} \\
 & = m_i \cdot c_{p,Liq} \cdot (T u_{i,j+1} - T u_{i,j}) + K_{LiqGrout,i} \cdot (T_{Groutd,i,j} u_{i,j} - T u_{i,j}) \\
 & + K_{LiqEarth,i} \cdot (T_{Real,i,j} - T u_{i,j})
 \end{aligned} \tag{10}$$

jossa

$Td_{i,j}$  on lämpötila alaspäin virtaavassa lämmönkeruunesteessä porakaivon  $i$  liitoksessa  $j$ , °C

$Td_{i,j-1}$  on lämpötila alaspäin virtaavassa lämmönkeruunesteessä porakaivon kerroksessa  $j=1$ , °C

$T u_{i,j}$  on lämpötila ylöspäin virtaavassa lämmönkeruunesteessä porakaivon  $i$  liitoksessa  $j$ , °C

$T_{u,i,j+1}$  on lämpötila liitoksessa  $j$ , °C

$m_i$  on lämmönkeruunesteen massavirta porakaivossa, kg/s

$T_{u,i,j+1}$  on lämpötila liitoksessa  $j$ , °C

$\rho_{\text{Liq}}$  on lämmönkeruunesteen tiheys, joka lasketaan lämmönkeruunesteen tyyppin, jäätymispisteen ja saapuvan sekä lähtevän lämmönkeruunesteen lämpötilojen keskiarvojen perusteella, kg/m<sup>3</sup>

$c_{p,\text{Liq}}$  on lämmönkeruunesteen ominaislämpökapasiteetti, joka lasketaan lämmönkeruunesteen tyyppin, jäätymispisteen ja saapuvan sekä lähtevän lämmönkeruunesteen lämpötilojen keskiarvojen perusteella, J/(kg·K)

$K_{\text{LiqGroutd},i,j}$  on lämmönsiirtymiskerroin lämmönkeruunesteen ja porakaivon täytemateriaalin välillä porakaivossa  $i$ , W/K

$K_{\text{LiqEarth},i}$  on lämmönsiirtymiskerroin lämmönkeruunesteen ja maa-aineksen välillä porakaivossa  $i$ , W/K

$T_{\text{Groutd},i,j}$  on täyteaineen lämpötila alaspäin virtaavissa lämmönkeruuputkien ympärillä kerroksessa  $j$  porakaivossa  $i$ , °C

$T_{\text{Groutu},i,j}$  on täyteaineen lämpötila ylöspäin virtaavissa lämmönkeruuputkien ympärillä kerroksessa  $j$  porakaivossa  $i$ , °C

$T_{\text{real},i,j}$  on maa-aineksen lämpötila porakaivossa  $i$  liitoksessa  $j$

$n_{\text{zhole}}$  on liitoksien lukumäärä porakaivossa

## 8.2 Ilmanvaihtokone

Rakennus tullaan varustamaan koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä, minkä ominaissähkötehoksi syötetään 2 kW/(m<sup>3</sup>/s), jonka SRakMK:n osa D3 asettaa raja-arvoksi. Ilmanvaihtokoneessa ovat toimintoina suodatus, lämmitys ja jäähdytys. Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottolaitteena toimii pyörivä LTO, jonka lämpötilasuhteena eli lämmöntalteenottolaitteiston lämmönsiirtimen tuloilman lämpötilan muutoksen suhteena poisto- ja ulkoilman lämpötilojen erotukseen lämmönsiirtimessä käytetään 65 %. Lämmöntalteenoton jäteilman minimilämpötilaksi asetetaan -5 °C, jolla estetään lämmöntalteenottolaitteen jäätyminen. Ilmanvaihdonenergiankulutus tullaan simuloimaan 1 m<sup>3</sup>/s ilmamäärällä, jolloin sisäänpuhallusilman asetusarvo on lämmitystilanteessa +19 °C ja viilennystilanteessa +17 °C. Taulukossa 9 ovat ilmanvaihdon energiamuotojen vuosihyötysuhteet ja kylmäkertoimet. (SRakMK D3 2012; SRakMK D5 2012.)

**TAULUKKO 9. Energiamuotojen vuosihyötysuhteita ja vuotuisia kylmäkertoimia (SRakMK D5 2012, 44, 57)**

Kaukolämpö	0,94
Sähkölämmitys	1,0
Vedenjäähdytyskoneen sähkö	2,5
Kaukojäähdytys	1

Toimistorakennusta tullaan käyttämään arkisin klo 7–18, ja ilmanvaihtokonetta tulee ohjaamaan aikaohjelma, joka on sidottu tilan viikko-vuorokausirytmiiin siten, että ilmanvaihdon käyntiaika on 06:00–19:00, koska ilmanvaihto käynnistyy yksi tunti ennen rakennuksen käyttöajan alkua, ja toisaalta lopetetaan yksi tunti käyttöajan päättymisen jälkeen siten, että rakennuksen käyttöajan ulkopuolella ulkoilmavirta on vähintään 0,15 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup>. Toimistorakennuksen todellinen käyttö yleensä eroaa standardikäytöstä, joka kuvaa toimistorakennuksen vakioitua käyttöä, koska käyttäjien toiminnot poikkeavat siitä. Simuloinnissa tullaan käyttämään toimistorakennuksen standardikäytön mukaisia sisäisiä lämpökuormia SRakMK:n osan D3 mukaisesti, ja sisäistä lämpökuormaa tulee valaistuksesta 12 W/m<sup>2</sup>, kuluttajalaitteista 12 W/m<sup>2</sup> ja ihmisistä 5 W/m<sup>2</sup>. Ihmisten lämpökuorma ei sisällä kosteuteen sitoutunutta lämpöä. Käyttöaste 0,65 kertoo vuorokauden keskimääräisen valaistuksen ja kuluttajalaitteiden sekä ihmisten läsnäolon rakennuksen käyttöajan aikana. Sää tietona käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaista sää tiedostoa Helsinki-Vantaa. Testivuosi sää tiedostolle on 2012. Taulukossa 10 ovat toimistorakennuksen ilmanvaihdon käyntiaika ja lämpökuormat. (SRakMK D3 2012.)

**TAULUKKO 10. Toimistorakennuksen ilmanvaihdon käyntiaika ja lämpökuormat (SRakMK D3 2012)**

Käyttötarkoitussuokka	Käyntiaika			Käyttöaste	Valaistus W/m <sup>2</sup>	Kuluttajalaitteet W/m <sup>2</sup>	Ihmiset <sup>a</sup> W/m <sup>2</sup>
	aika	h/24h	d/7d				
Toimistorakennus	6–19	13	5	0,65	12	12	5

<sup>a</sup> ei sisällä kosteuteen sitoutunutta lämpöä, kokonaislämmönluovutus saadaan jakamalla kertoimella 0,6

### 8.3 Simulointien lähtötiedot VE1.1

Lämpöporakaivot tullaan syöttämään teoreettisesti 200 metriä syviksi kohtisuoraan alas, ja lämpökaivot tulevat sijaitsemaan xy-koordinaatistossa, jossa lämpöporakaivojen välinen etäisyys on 20 metriä. Esimerkiksi kolmen lämpökaivon tapauksessa x-koordinaatit ovat 0 m, 20 m ja 40 m, sekä kaikilla lämpökaivoilla on sama y-koordinaatti. Taulukossa 11 on simuloinnissa käytetty lämpökaivojen sijoittelu xy-koordinaatistoon, joka kuvaa geoenergiakenttää.

**TAULUKKO 11. Lämpöporakaivojen sijoittelu geoenergiakentässä**

Lämpökaivon nro	x-koordinaatti, m	y-koordinaatti, m
1	0	0
2	20	0
3	40	0

Geologian tutkimuskeskuksen raportissa Leppäharju, Turunen ja Kallio (2010, 6) toteavat, että ”Suomen kivilajien keskimääräinen lämmönjohtavuus on Peltoniemen (1996) mukaan 3,24 W/(m·K), ja kivilajien lämmönjohtavuus vaihtelee Suomessa yleisimmin välillä 2–4 W/(m·K).” GTK:n aiemmat geoenergiatutkimukset ovat osoittaneet, että kvartsimaasälpägneissin lämmönjohtavuuden voidaan olettaa olevan suhteellisen korkea 3,5–3,8 W/(m·K) johtuen kvartsipitoisuudesta, joka nostaa kivilajin lämmönjohtavuutta. (Leppäharju ym. 2010, 6.)

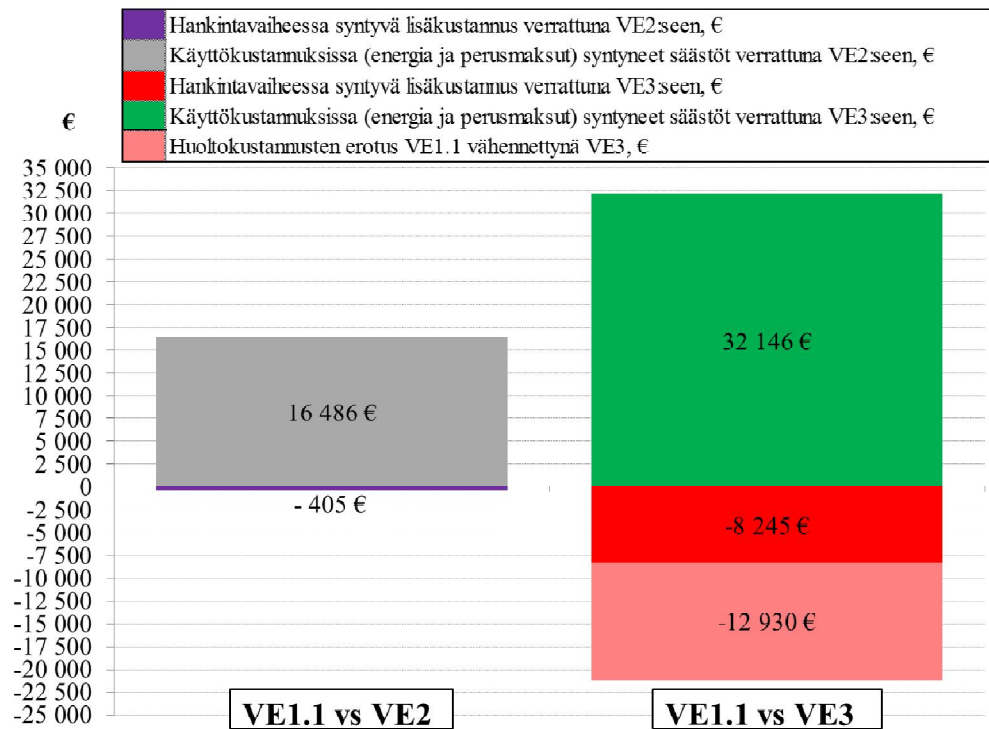
Lämmönkeruunesteinä tullaan käyttämään 30-prosenttista etanoli-vesi liuosta, joka kestää jäätyttömänä -17 °C saakka, ja syötetään sen lämmönjohtavuudeksi 0,42 W/(m·K) ja massavirraksi lämmönkeruuputkessa 0,5–1,2 kg/s. Lämmönkeruuputkena porakaivopiirissä käytetään PEH DN 40 PN 8, joten putken ulkohalkaisija on 40 mm ja seinämän paksuus 3 mm. Lämmönkeruuputkiston tyyppinä käytetään yksinkertaista U-mallia. Kallioperän oletetaan olevan kivilajiltaan kvartsimaasälpägneissisiä, joten tullaan käyttämään kallion lämmönjohtavuutena 3,8 W/(m·K), ominaislämpökapasiteettina 840 J/(kg·K). Kallion keskimääräiseksi lämpötilaksi tullaan asettamaan +5 °C ja tiheydeksi 2880 kg/m<sup>3</sup>. Lisäksi simuloinnissa tarvittavat tiedot koostuvat täyteaineena toimivan veden ominaislämpökapasiteetista 4180 J/(kg·K) ja tiheydestä 1000 kg/m<sup>3</sup>. Taulukossa 12 ovat simuloinnissa käytetyt lämmönkeruupiirin tiedot.

**TAULUKKO 12. Lämmönkeruupiirin tiedot**

Kallion (kvartsimaasälpägneissi) lämmönjohtavuus	3,8 W/(m·K)
Kallion (kvartsimaasälpägneissi) ominaislämpökapasiteetti	840 J/(kg·K)
Kallion (kvartsimaasälpägneissi) keskimääräinen lämpötila	+5 °C
Kallion (kvartsimaasälpägneissi) tiheys	2880 kg/m <sup>3</sup>
Täyteaineen (vesi) lämmönjohtavuus	0,6 W/(m·K)
Täyteaineen (vesi) ominaislämpökapasiteetti	4180 J/(kg·K)
Täyteaineen (vesi) tiheys	1000 kg/m <sup>3</sup>
Lämmönkeruunesteen (etanoli-vesi liuos) massavirta	0,5–1,2 kg/s
Lämmönkeruunesteen (etanoli-vesi liuos) lämmönjohtavuus	0,42 W/(m·K)
Lämmönkeruunesteen (etanoli-vesi liuos) jäätymispiste	-17 °C
Lämmönkeruuputki	PEH DN 40 PN 8

**9 TULOKSET JA ANALYYSI**

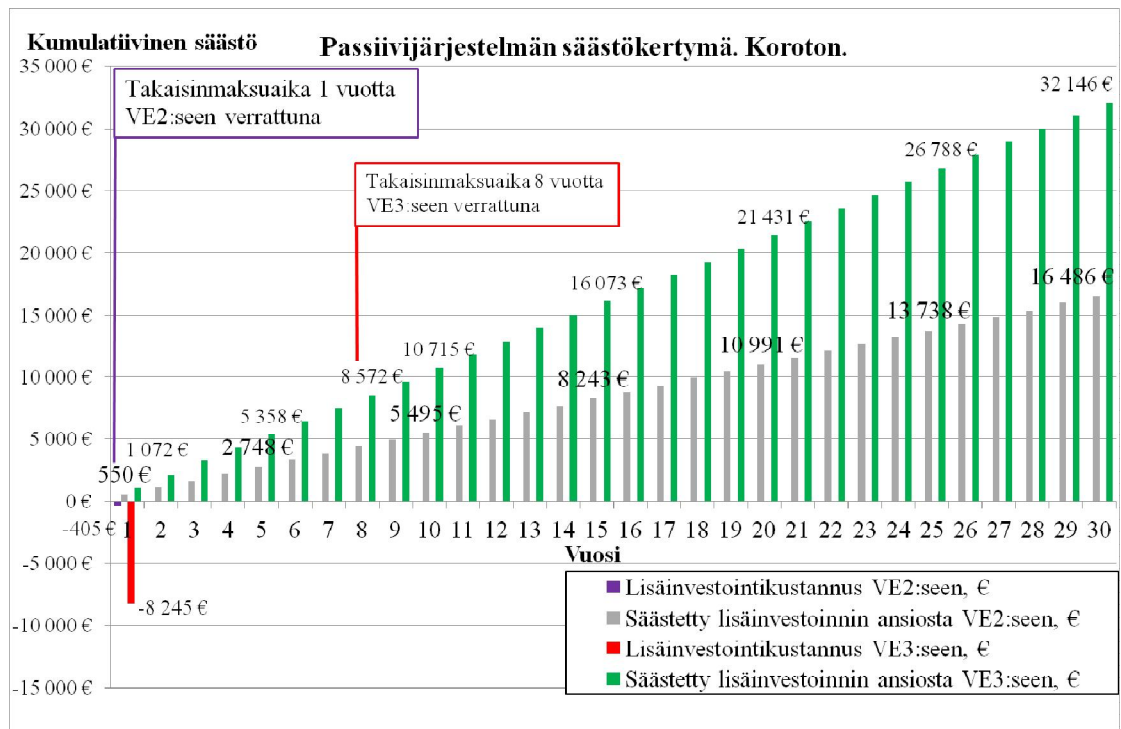
Tässä opinnäytetyössä kannattavuuslaskennan tarkkuuteen ovat vaikuttaneet laitteiden hankintahinnat, huoltokustannukset ja huoltojen määrät, laitteiden tekniset käyttöiät sekä sähköenergian- ja lämmitysenergianhinnat. Vertailua ja kannattavuuslaskelmien luotettavuutta vaikeutti se, että muuttuvat kustannukset, kuten huoltokustannukset, ovat varsin suuria verrattuna vuosittaisiin VE1.1:llä säästettyihin euromääriin nähden. Virhettä syntyy simulointien tuloksiin, koska simuloinnissa pohjana on käytetty oletusta, että lämpökaivot ovat pystysuoria, mitä poratut lämpökaivot eivät todellisuudessa ole. Yhdellä 200-metrisellä lämpökaivolla voidaan tuottaa riittävä tuloilman jäähdytysteho 1 m<sup>3</sup>/s ilmavirralla mikä tarkoittaa, että kesäaikaan sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo +17 °C saavutetaan. Yhden lämpökaivon tapaus on optimaalisin tapaus, kun kilpaillaan kaukojäähdytyksen ja vedenjäähdytyskoneen hankinnan kanssa. Laskentajakson pituus on 30 vuotta kaikissa kannattavuuslaskentakuvaajissa. Kuvassa 9 ovat kannattavuuslaskelmien tulokset.



**KUVA 9. VE1.1 versus VE2 ja VE1.1 versus VE3**

Passiivijärjestelmä VE1.1 tuottaa riittävän vuotuisen tuloilman jäähdytyksen, ja vähentää tuloilman lämmityksen ostoenergiaa noin 22 % case-tapauksessa, kun verrataan VE2:seen ja VE3:seen. VE1.1 on investointikustannuksiltaan 405 € kalliimpi kuin VE2. VE1.1:llä tullaan saavuttamaan vuosittainen 550 € säästö verrattuna VE2:seen. VE1.1:sen investointikustannuksen ero on noin 2 % suurempi verrattuna siihen, että päädytään VE2:seen. VE1.1:sen takaisinmaksuaika on noin yksi vuosi verrattuna VE2:seen.

VE1.1:llä tullaan saavuttamaan 1 072 € vuosittainen säästö, kun vaihtoehtona on VE3. VE3 on 8 245 € edullisempi kuin VE1.1 kyseessä olevassa case-tapauksessa. VE1.1 edellyttää noin 45 % suurempaa alkuinvestointia verrattuna VE3:seen. VE1.1:sen takaisinmaksuaika on noin kahdeksan vuotta verrattuna VE2:seen. Kuvassa 10 on VE1.1:sen kannattavuuslaskentakuvaaja verrattuna VE2:seen ja VE3:seen.



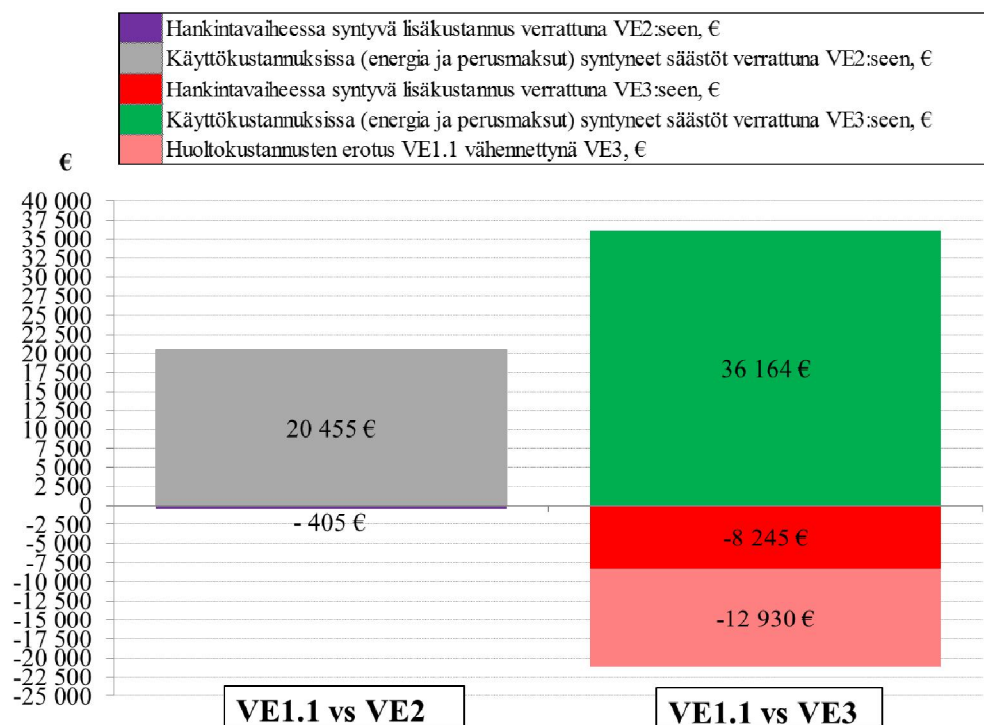
**KUVA 10. VE1.1 versus VE2 ja VE1.1 versus VE3**

Kaukojäähdytysjärjestelmällä VE3 ja passiivijärjestelmällä VE1.1 on selkeästi pidempi elinkaari kuin vedenjäähdytyskoneratkaisulla VE2. 15 vuoden tekninen käyttöikä on hyvä arvio vedenjäähdytyskoneelle, joten se joudutaan luultavasti uusimaan kerran laskentajakson pituuden ollessa 30 vuotta, mistä seuraa kustannuksia noin 6 500 €. Tätä uusintainvestointia ei ole otettu huomioon kannattavuuskuvaajissa. Kaukojäähdytyksen toteuttamista kustannustehokkaasti VE3:sen tapauksessa hankaloittaa se, että jäähdytyksen vuotuinen käyttötarve on lyhyt ja kulutusvaihtelu on suurta. Kaukojäähdytysverkon rakentamisesta seuraavat suuret kustannukset, jotka lopulta vieritetään asiakkaan maksettavaksi, jolloin asiakkaan vuosittaiset käyttökustannukset VE3:ssa ovat korkeat.

Suoritetaan VE1.1:sen investoinnin kannattavuuden tarkastelu suhteessa VE2:seen ja VE3:seen siten, että oletetaan lämpö- ja sähköenergian hinnoille 4 %:n vuotuinen hinnan nousu. Kaukolämmön energiahinnat ovat nousseet viimeisten kolmen vuoden aikana noin 5 %, kun kyseessä on 10 kW tehontarve, ja tarkastellaan kaukolämpöenergian hinnan vuosimuutosta Tilastokeskuksen julkaisemasta tilastosta, jonka lähteenä on Energiateollisuus ry. Sähköenergian hinnan nousu on viimeisen kuuden vuoden aikana ollut yritys- ja yhteisöasiakkaiden kohdalla noin 4 % vuosimuutoksen mukainen, kun tarkastellaan sähköenergian hinnan vuosimuutosta Tilastokeskuksen jul-

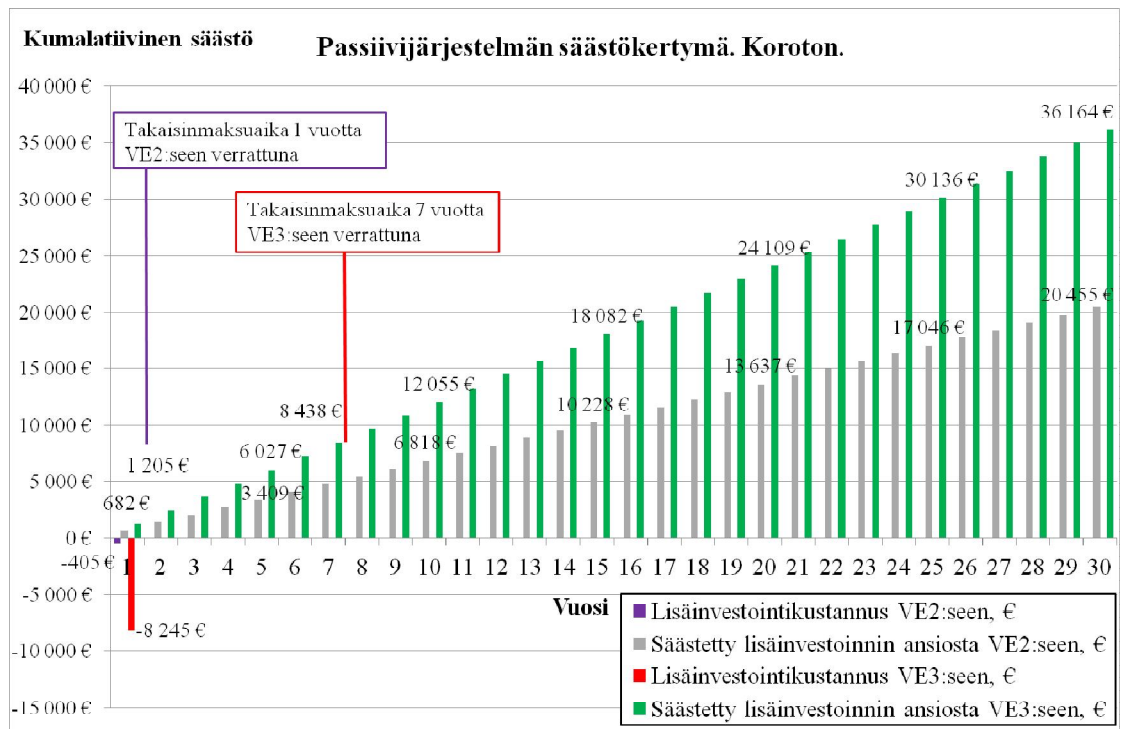
kaisemasta tilastosta, jonka lähteenä on Energiamarkkinavirasto. (Tilastokeskus 2014.)

Mikäli lämpö- ja sähköenergian hintojen 4 %:n vuotuinen hinnan nousu tulee toteutumaan, vuosittaiset bruttomääräiset säästökertymät nousevat 24 % VE1.1:sen eduksi, kun verrataan VE2:seen. VE1.1:sen bruttomääräinen vuosittainen säästökertymä on 682 €suurempi verrattuna VE2:seen. VE1.1:sen takaisinmaksuaika on noin yksi vuosi verrattuna VE2:seen. Kuvassa 11 ovat VE1.1:sen kannattavuuslaskentatulokset, kun huomioidaan lämpö- ja sähköenergian hinnoille 4 %:n vuotuinen hinnan nousu.



**KUVA 11. VE1.1 versus VE2 ja VE1.1 versus VE3**

Mikäli lämpö- ja sähköenergia hintojen 4 %:n vuotuinen hinnan nousu tulee toteutumaan, vuosittaiset bruttomääräiset säästökertymät nousevat noin 12 % VE1.1:sen eduksi, kun verrataan VE3:seen. Vuosittaiset säästöt VE1.1:stä ovat 1 205 €verrattuna VE3:seen. VE1.1:sen takaisinmaksuaika on noin seitsemän vuotta verrattuna VE3:seen. Kuvassa 12 on VE1.1:sen kannattavuuslaskentakuvaaja verrattuna VE2:seen ja VE3:seen, kun huomioidaan lämpö- ja sähköenergian hinnoille 4 %:n vuotuinen hinnan nousu.



**KUVA 12. VE1.1 versus VE2 ja VE1.1 versus VE3**

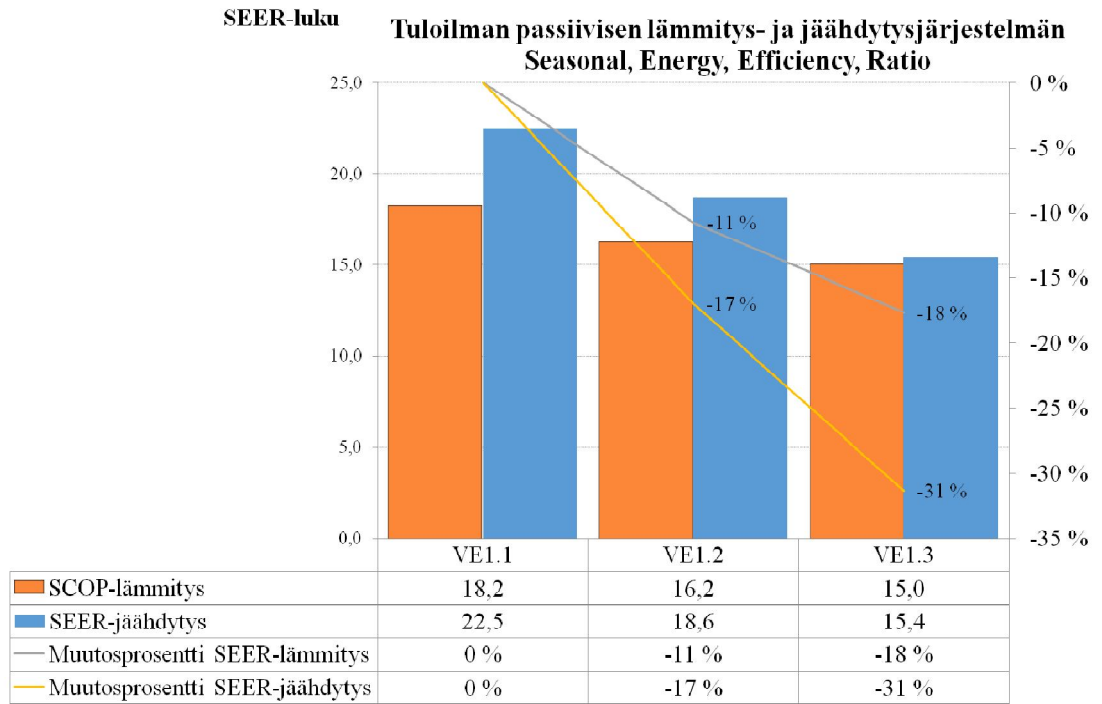
Kuvassa 13 on passiivijärjestelmän SEER-lukuvertailu riippuen lämpökaivojen lukumäärästä. SEER- ja SCOP-luvut tulevat huononemaan, kun lämpökaivojen lukumäärä tulee kasvamaan, ja tähän on syynä liuosvirtaaman kasvusta aiheutuva pumppausenergian kasvu, joka on suoraan verrannollinen painehäviöön. VE1.1:sen tapauksessa passiivijärjestelmästä saadaan yhdellä 200 metriä syvällä lämpökaivolla vuotuisesti jäähdytysenergiaa 2 260 kWh, ja apulaitteiden energiat koostuvat 40 kWh puhallinenergiasta ja 60 kWh pumppausenergiasta. Neulalämmönsiirtimellä toteutetulla passiivijärjestelmälle voidaan laskea tuloilman jäähdytyksen SEER-luku kaavan 3 mukaisesti:

$$\text{SEER-JÄÄHDYTYS} = \frac{\text{vuotuinen tuotettu jäähdytysenergia}}{\text{vuotuinen käytetty sähköenergia}} = \frac{2\,260}{40+60} \approx 22,5 \quad (3)$$

jossa

vuotuinen tuotettu jäähdytysenergia, kWh

vuotuinen käytetty sähköenergia jäähdytysenergian tuottamiseksi, kWh



**KUVA 13. Passiivijärjestelmä Seasonal, Energy, Efficiency, Ratio**

VE1.1:sen tapauksessa passiivijärjestelmästä saadaan yhdellä 200 metriä syvällä lämpökaivolla vuotuisesti lämmitysenergiaa 7 559 kWh, ja apulaitteiden energiat koostuvat 343 kWh puhallinenergiasta ja 71 kWh pumppausenergiasta. Neulalämmönsiirtimellä toteutetulla passiivijärjestelmälle voidaan laskea tuloilman lämmityksen SCOP-luku kaavan 3 mukaisesti:

$$\text{SCOP-LÄMMITYS} = \frac{\text{vuotuinen tuotettu lämmitysenergia}}{\text{vuotuinen käytetty sähköenergia}} = \frac{7559}{343+71} = 18,2 \quad (3)$$

jossa

vuotuinen tuotettu lämmitysenergia, kWh

vuotuinen käytetty sähköenergia lämmitysenergian tuottamiseksi, kWh

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

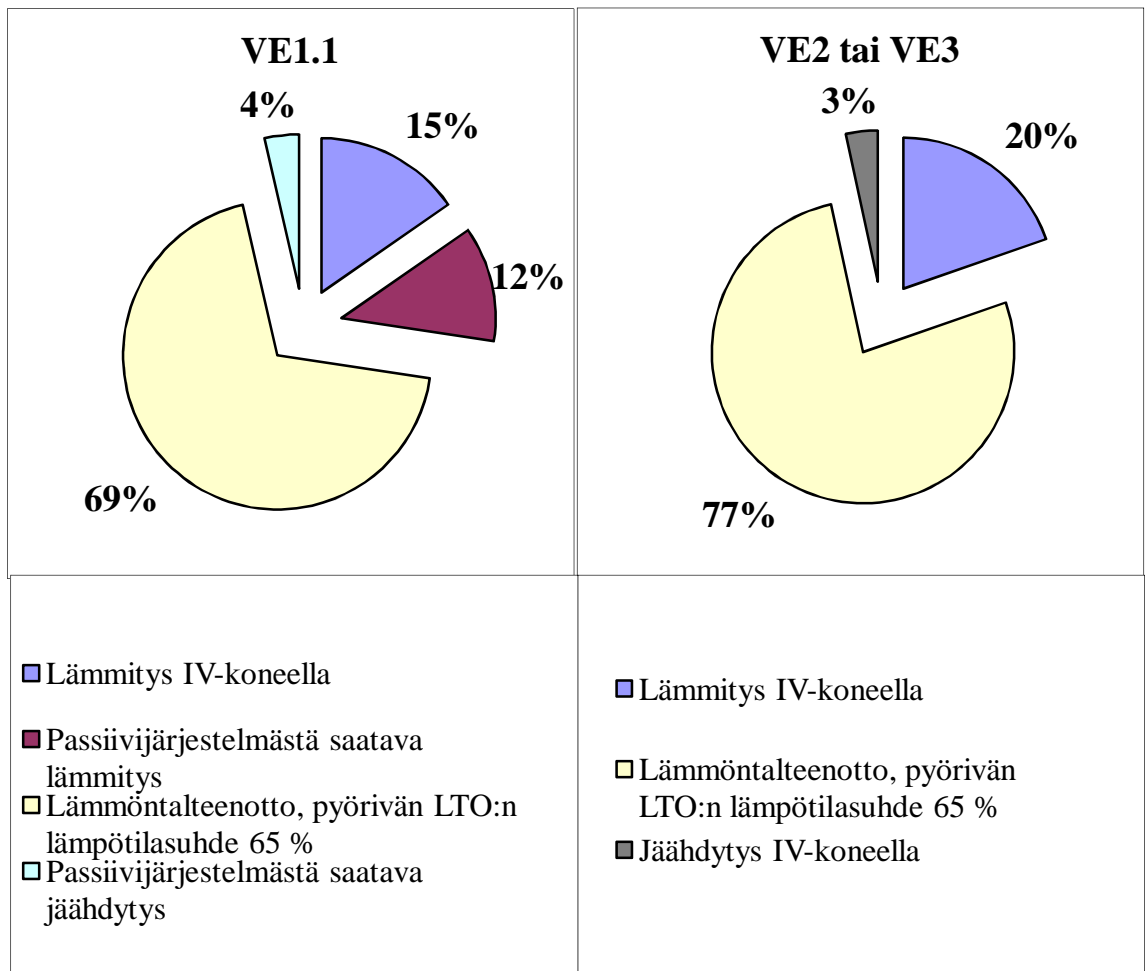
Tehdyn työn perusteella nyrkkisääntönä todetaan, että VE1.1:sen tapaukseen tulee riittämään yksi 200-metrinen lämpökaivo. Passiivijärjestelmän VE1.1 edullisuus perustuu kaukolämmön huipputehon leikkaukseen kyseessä olevassa case-kohteessa. Passiivijärjestelmän VE1.1 takaisinmaksuaika tulee lyhentymään, jos ilmanvaihdon käyntiaika on pidempi kuin SRakMK:n osan D3 standardikäyttö, sekä jos rakennus

tulee sijaitsemaan pohjoisempana kuin Helsinki. Energiatehokkuutta parantavat investoinnit tulee tehdä pitkällä eli yli kahdeksan vuoden tähtämellä VE1.1:sen tapauksessa, koska 30 vuoden laskentajaksolla säästökertymistä nähdään, että kahdeksannen vuoden jälkeen VE1.1 alkaa tuottamaan voittoa verrattuna VE3:seen.

Suomessa ollaan menossa lähes nollaenergiarakentamiseen, jolloin suurta hetkellistä tehontuottoa ei vaadita lämmitysjärjestelmiltä, minkä vuoksi tulevaisuudessa tulevat menestymään järjestelmät, jotka toimivat kustannusoptimaalisesti matalilla mitoituslämpötiloilla. Muuttuva maailma avaa mahdollisuuden omaksua passiiviseen järjestelmään perustuvan filosofian. Tutkimus- ja opetusikästä johtuen case-kohteeseen tulee kaukolämpöliittymä ja passiivinen tuloilman lämmitys sekä jäähdytys. Voidaan kyseenalaistaa, oliko ylipäättänsä järkevää, että passiivijärjestelmässä toimii lisälämmitysmuotona kaukolämpö. Jatkossa tulee tutkia passiivista tuloilman lämmitystä ja jäähdytystä siten, että energiantarve katetaan kokonaan esimerkiksi geoenergiaan perustuvilla järjestelmillä, jolloin hyödynnetään muun muassa lämpöpumputeknologiaa.

Tässä opinnäytetyössä tehtyjä laskelmia case-kohteen energiakustannuksista ei voida verrata suoraan muiden toimistorakennusten toteutuneisiin energiakulutuksiin, koska simulointi perustuu standardikäytön mukaisiin arvoihin. Case-kohteen vertailun toteutuneisiin toimistorakennuksien energiankulutustietoihin tekee mahdottomaksi eroavaisuudet ilmanvaihtomäärissä, ilmavuodoissa, ilmanvaihdon käyttöajoissa ja lämmöntalteenoton ominaisuuksissa.

VE1.1 tulee kattamaan yhdessä ilmanvaihdon lämmöntalteenoton kanssa vuotuisesta tuloilman lämmitysenergiatarpeesta noin 85 %, ja loppu tarvittava tuloilman lämmitysenergia tullaan ottamaan kaukolämmityksestä. Kaukolämmitystä tullaan tarvitsemaan, koska ei ole järkevää mitoittaa VE1.1:stä kattamaan koko tuloilman lämmitysenergiatarvetta, koska mitoitusulkolämpötilat tulevat esiintymään harvoin, ja ne ovat lyhytkestoisia. Kuvassa 14 ovat prosenttiosuudet tuloilman lämmityksestä ja jäähdytyksestä case-tapauksessa.



**KUVA 14. Prosentiosuudet tuloilman lämmityksestä ja jäähdytyksestä**

Jos tullaan toteuttamaan passiivijärjestelmä siten, että ilmanvaihdon lämmöntalteenoton lämpötilasuhde on 75 %, tällöin lisälämmitystä ilmanvaihtokoneen lämmityspatterista tullaan tarvitsemaan noin 5 %. Yksi syy paremman lämpötilasuhteen ohella on se, että passiivijärjestelmässä talviaikainen tuloilman esilämmitys tulee aikaansaamaan sen, että tehokas ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmä tulee pysymään läpi vuoden täydellä teholla aina, kun sitä tarvitaan, eli huurteenesto ei tule alentamaan ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta. VE1.1 eli passiivijärjestelmä edustaa siinä suhteessa uutta filosofiaa, että siinä ei pyritä lähtökohtaisesti suuriin tuotettuihin vuotuisiin tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian määriin. Passiivijärjestelmä VE1.1 eroaa muista sillä, että sitä käytetään sekä lämmitykseen että jäähdytykseen, jolloin hyödynnetään maaperää myös lämpövarastoksi. Passiivijärjestelmän VE1.1 investointikustannukset jakaantuvat tuloilman jäähdytyksen ja lämmityksen kesken. Yhteenvedon todetaan, että passiivisella tuloilman jäähdytyksellä tuotetaan riittävä tuloilman jäähdytysteho case-tapauksessa.

## LÄHTEET

Ahonen, Tomi 2014. Tarjouspyyntö Oy Danfoss Ab. Tekninen myyjä.

Aittomäki, Antero, Alijoki, Tapio, Eerikäinen, Jussi, Hakala, Pertti, Kaappola, Esko, Lahdenperä, Heikki, Rauno, Ossi & Seinelä, Altti 1992. Kylmäteknikka. Helsinki: Kylmätuki.

Castrén, Markus 2014. Tarjouspyyntö Retermia Oy. Toimitusjohtaja.

Equa Simulation Finland Oy 2013. Description of the IDA ICE borehole model. Saatavissa: <http://www.equa.fi/>. Päivitetty 16.3.2013. Luettu 12.02.2014.

Energiateollisuus ry 2013. Rakennuksen kaukolämmitys määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2013. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1\\_2013\\_rakennustenkaukolammitys\\_2.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1_2013_rakennustenkaukolammitys_2.pdf) Päivitetty 31.3.2014. Luettu 03.05.2014.

Etelä-Savon Energia Oy 2013. Saatavissa: [http://www.eso.fi/files/1213/8295/7333/shkn\\_myyntihinnat\\_1.1.2013.pdf](http://www.eso.fi/files/1213/8295/7333/shkn_myyntihinnat_1.1.2013.pdf). Päivitetty 1.1.2013. Luettu 11.2.2014

Haapiainen-Liikanen, Auli 2014. Tarjouspyyntö Etelä-Savon Energia Oy. Energianeuvontainsinööri.

Haverila, Matti J, Uusi-Rauva, Erkki, Kouri, Ilkka & Miettinen, Asko 2009. Teollisuustalous.

Hokkanen, Simo 2013. Tarjouspyyntö Suomen Talotekniikka -yhtiöt. Työnjohto.

Holopainen Riikka, Vares, Sirje, Ritola, Jouko & Pulakka, Sakari 2010. Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2546.pdf>. Luettu 02.01.2014.

Juvonen, Janne 2009. Lämpökaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38833/YO\\_2009\\_Lampokaivo\\_26\\_4\\_2011.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38833/YO_2009_Lampokaivo_26_4_2011.pdf?sequence=1). Luettu 02.01.2014.

Jäppinen, Juha 2014. Tarjouspyyntö Camfil Oy. Myynti.

Kaappola, Esko, Hirvelä, Aulis, Jokela, Matti & Kianta, Jani 2011. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Kauhanen, Sami 2014. Tarjouspyyntö Teknocon Oy. Laskenta.

Kietäväinen, Mikko 2014. Tarjouspyyntö Halton Oy. Avainasiakaspäällikkö, suunnittelijamarkkinointi & myynti.

Kolmeks Oy 2014. Pumppu- ja LVI-tuotehinnasto 2014. www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kolmeks.fi/materiaalipankki/pumppu-ja-lvi-hinnasto>. Päivitetty 1.1.2014. Luettu 12.02.2014.

Koskelainen, Lasse, Saarela, Rauli & Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Energiateollisuus ry.

Leppäharju, Nina, Turunen, Tuomo & Kallio, Jarmo 2010. Bergansin geoenergiatutkimukset ja energiakaivokentän mallinnus. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: <http://berganskiinteistot.files.wordpress.com/2010/05/bergans-geoenergia-19-3-10.pdf>. Luettu 13.02.2014

LVI-ohjekortti 10-10527. 2013. Kesäajan huonelämpötilan vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen. Rakennustieto Oy.

Neilimo, Kari & Uusi-Rauva, Erkki 2005. Johdon laskentatoimi. Helsinki. Edita.

Pohjalainen, Aki 2014. Tarjouspyyntö Entos Optimisäätö Oy. Myynti.

Retermia Oy 2013. Retermia runkoon. Saatavissa: [http://www.retermia.fi/html/kuvat/paino/Retermia\\_runkoon.pdf](http://www.retermia.fi/html/kuvat/paino/Retermia_runkoon.pdf) . Päivitetty 28.8.2007. Luettu 12.02.2014.

RIL 259-2012. Matalaenergiarakentaminen: toimitilat. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Saarela, Tapio 2014. Etteplan Design Center Oy. Henkilöhaastattelu. LVI-ryhmän päällikkö.

Seppänen, Olli 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Suomen LVI-liitto ry.

Seppänen, Olli 1995. Rakennusten lämmitys. Suomen LVI-yhdistysten liitto.

SIY Sisäilmatiето Oy. IDA-ice-esitys. Saatavissa: <http://www.sisailmatieto.com/pdf/ice3.0-esitys.pdf>. Päivitetty 9.8.2002. Luettu 02.01.2014.

Snellman, Robert 2014. Tarjouspyyntö Oy T. Stenbacka Ab. Myynti.

Suomen Standardisoimisliitto SFS 2011. SFS-EN 14511-1. Lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitetut, sähkökäyttöisellä kompressorilla toimivat huoneilmastointikoneet, nestejäähdyttimet ja lämpöpumput. osa 1: käsitteet ja määritelmät.

Suomen ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Osa D2. Helsinki.

Suomen Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Osa D3. Helsinki.

Suomen ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012. Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Määräykset ja ohjeet 2012. Osa D5. Helsinki.

Tilastokeskus 2014. Energian hinnat. www-dokumentti. Saatavissa:  
<http://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/index.html>. Päivitetty 20.3.2014. Luettu 15.4.2014.

Toriseva, Hannu 2013. Tarjouspyyntö Kojacool Oy. Aluemyyntipäällikkö.

Tuijula, Teppo 2014. Carrier Oy. Myyntipäällikkö.

Tuomainen, Sirkku 2014. Tarjouspyyntö Gebwell Oy. Kaukolämpömyyjä.

Qiao, Zhengjun 2013. Optimization of the Annual Energy Balance in Ground coupled Building systems. Saatavissa:  
[http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Qiao\\_2013.pdf](http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Qiao_2013.pdf). Luettu 15.4.2014.

Vexve Oy. 2013. Tietoa vedenkulutuksesta. www-dokumentti. Saatavissa:  
<http://www.vexve.com/fi/verto/tietoa-vedenkulutuksesta/veden-hinta/>. Päivitetty 1.2.2014. Luettu 10.4.2014.

VTT Lifeplan 2004. Tuotteiden käyttöinformaatio ja sen käyttö rakennushankkeessa. www-dokumentti. Saatavissa: <http://ce.vtt.fi/lifeplan/>. Luettu 22.4.2014.

Washington State University Extension Energy Program. 2011. Energy Solutions Database. www-dokumentti. Saatavissa:  
<http://energyexperts.org/EnergySolutionsDatabase/ResourceDetail.aspx?id=3920>. Päivitetty 1.1.2011. Luettu 10.4.2014.

**LIITE 1(1).**  
**Takaisinmaksuaikalaskelmat**

Tuloilman lämmityksen energian hinta, ennen investointia	57	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, investoinnin jälkeen	57	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, ennen investointia	127	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, investoinnin jälkeen	127	€/MWh
Apulaiteiden energian hinta	127	€/MWh
Lämmitysenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Sähköenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	4.6	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	2.2	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	4.1	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.1	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	12.2	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.3	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	9.6	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	0	MWh/v
Investointikustannusten ero	405	€
Vuotuinen ero kaukolämmityksen perusmaksussa investoinnin eduksi	249	€/vuosi
Ylimääräinen G3-tason suodatin koneen imupuolella, ennen investointia	92	€/vuosi
Investointikustannukset ilman korkoa	405	€
Laskenta-ajanjakso	30	vuotta
Vuotuinen investointikustannus, ei huomioi korkoa.	14	€/vuosi
Kaukolämmön jakokeskuksen vuosihyötysuhde	0.94	Vuosihyötysuhde
Vedenjäähdytyskoneen vuotuinen kylmäkerroin, tuotetun jäähdytysenergian suhde käytettyyn sähköenergiaan	2.5	SEER
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, investoinnin jälkeen	581	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, ennen investointia	741	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, investoinnin jälkeen	0	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, ennen investointia	115	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	583	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	281	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	526	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	272	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta	397	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta	152	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset	1	vuotta
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	2 196	€/vuosi
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	2 377	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	476	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	546	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	752	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	206	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, huomioitu energian hinnannousu	1	vuotta

**VE1.1 versus VE2**

**LIITE 1(2).  
Takaisinmaksuaikalaskelmat**

Tuloilman lämmityksen energian hinta, ennen investointia	57	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, investoinnin jälkeen	57	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, ennen investointia	30	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, investoinnin jälkeen	127	€/MWh
Apulaiteiden energian hinta	127	€/MWh
Lämmitysenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Sähköenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	4.6	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	2.2	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	4.1	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.1	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	12.2	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.3	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	9.6	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	0	MWh/v
Investointikustannusten ero	8 245	€
Vuotuinen ero kaukolämmityksen perusmaksussa investoinnin eduksi	249	€/vuosi
Ylimääräinen G3-tason suodatinkoneen imupuoella, ennen investointia	92	€/vuosi
Huoltokustannus kaukojäähdytys	60	€
Huoltokustannus passiivijärjestelmä	491	€
		€
Investointikustannukset ilman korkoa	8 245	€
Laskenta-ajanjakso	30	vuotta
Vuotuinen investointikustannus, ei huomioi korkoa.	275	€/vuosi
Kaukolämmön jakokeskuksen vuosihyötysuhde	0.94	Vuosihyötysuhde
Kaukojäähdytys keskuksen vuosihyötysuhde	1.0	Vuosihyötysuhde
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, investoinnin jälkeen	581	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, ennen investointia	741	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, investoinnin jälkeen	0	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, ennen investointia	68	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen perusmaksu, ennen investointia	1 000	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	583	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	281	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	526	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	272	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta	10	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta	1 062	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset	8	vuotta
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	58	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden energian, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	2 196	€/vuosi
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	2 377	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	88	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	546	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	661	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	1 118	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, huomioitu energian hinnannousu	7	vuotta

**VE1.1 versus VE3**

**LIITE 1(3).**  
**Takaisinmaksuaikalaskelmat**

Tuloilman lämmityksen energian hinta, ennen investointia	57	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, investoinnin jälkeen	57	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, ennen investointia	127	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, investoinnin jälkeen	127	€/MWh
Apulaiteiden energian hinta	127	€/MWh
Lämmitysenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Sähköenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	4.8	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	2.2	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	4.1	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.1	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	12.2	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.3	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	8.9	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	0	MWh/v
Investointikustannusten ero	6 632	€
Vuotuinen ero kaukolämmityksen perusmaksussa investoinnin eduksi	332	€/vuosi
Ylimääräinen G3-tason suodatin koneen imupuolella, ennen investointia	92	€/vuosi
Investointikustannukset ilman korkoa	6 632	€
Laskenta-ajanjakso	30	vuotta
Vuotuinen investointikustannus, ei huomioi korkoa.	221	€/vuosi
Kaukolämmön jakokeskuksen vuosihyötysuhde	0.94	Vuosihyötysuhde
Vedenjäähdytyskoneen vuotuinen kylmäkerroin, tuotetun jäähdytysenergian suhde käytettyyn sähköenergiaan	2.5	SEER
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, investoinnin jälkeen	540	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, ennen investointia	741	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, investoinnin jälkeen	0	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, ennen investointia	115	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	604	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	283	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	526	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	272	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta	500	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta	150	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset	10	vuotta
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	2 163	€/vuosi
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	2 377	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	592	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	551	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	752	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	201	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset, huomioitu energian hinnannousu	8	vuotta

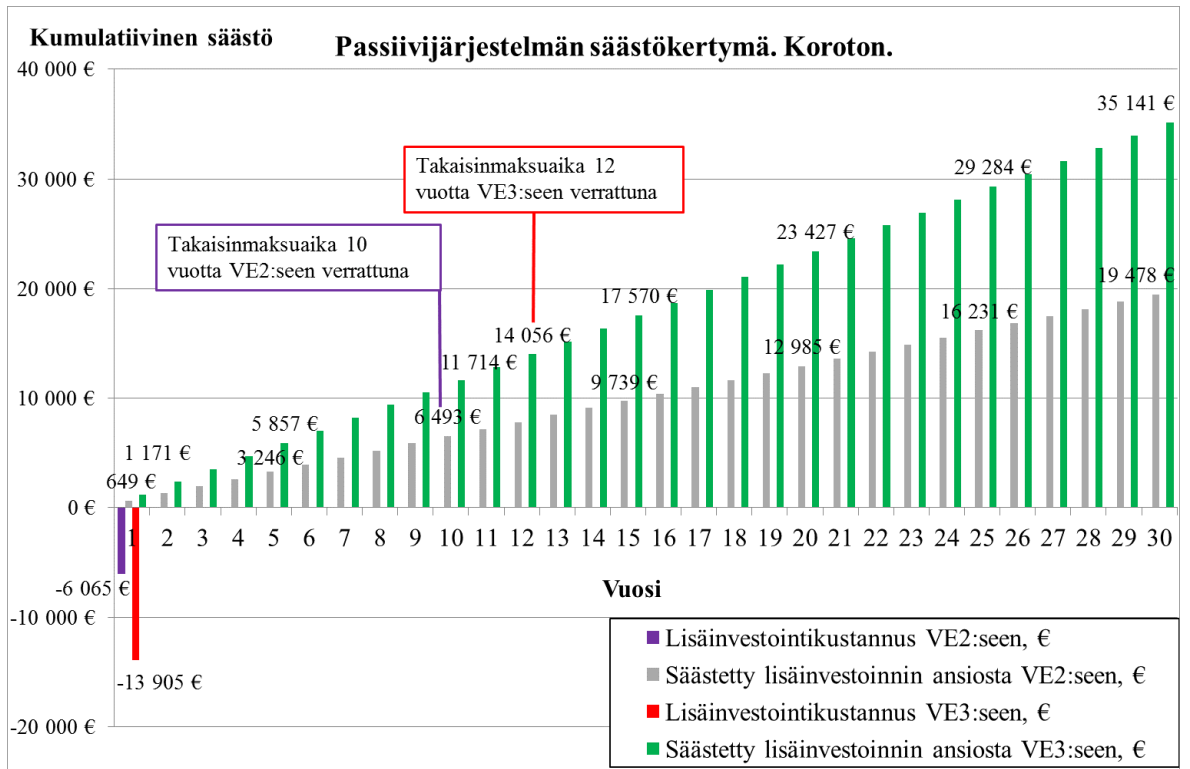
**VE1.2 versus VE2**

**LIITE 1(4).  
Takaisinmaksuaikalaskelmat**

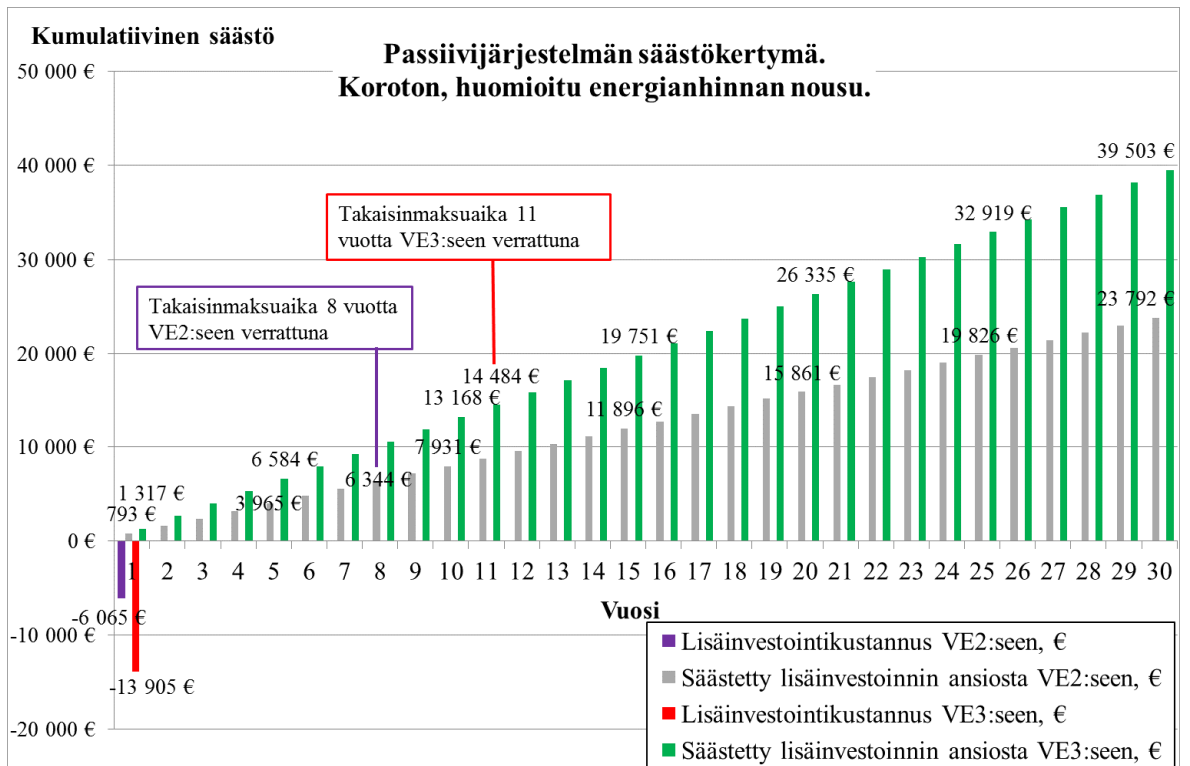
Tuloilman lämmityksen energian hinta, ennen investointia	57	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, investoinnin jälkeen	57	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, ennen investointia	30	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, investoinnin jälkeen	127	€/MWh
Apulaiteiden energian hinta	127	€/MWh
Lämmitysenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Sähköenergian vuotuinen hinnannousu	4	%
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	4.8	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	2.2	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman lämmityksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	4.1	MWh/v
Toimistorakennuksen tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden laskettu yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.1	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	12.2	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, ennen investointia	2.3	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman lämmityksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	8.9	MWh/v
Toimistorakennuksen laskettu tuloilman jäähdytyksen yhden vuoden kulutus, investoinnin jälkeen	0	MWh/v
Investointikustannusten ero	14 472	€
Vuotuinen ero kaukolämmityksen perusmaksussa investoinnin eduksi	332	€/vuosi
Ylimääräinen G3-tason suodatinkoneen imupuolella, ennen investointia	92	€/vuosi
Huoltokustannus kaukojäähdytys	60	€
Huoltokustannus passiivjärjestelmä	491	€
Investointikustannukset ilman korkoa	14 472	€
Laskenta-ajanjakso	30	vuotta
Vuotuinen investointikustannus, ei huomioi korkoa.	482	€/vuosi
Kaukolämmön jakokeskuksen vuosihyötysuhde	0.94	Vuosihyötysuhde
Kaukojäähdytys keskuksen vuosihyötysuhde	1.0	Vuosihyötysuhde
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, investoinnin jälkeen	540	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman lämmitykseen, ennen investointia	741	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, investoinnin jälkeen	0	€/vuosi
Energiakustannus tuloilman jäähdytykseen, ennen investointia	68	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen perusmaksu, ennen investointia	1 000	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	604	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput investoinnin jälkeen	283	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman lämmitykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	526	€/vuosi
Apulaiteiden energiakustannus tuloilman jäähdytykseen sis. puhaltimet, pumput, ennen investointia	272	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta	112	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta	1 060	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset	12	vuotta
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	111	€/MWh
Tuloilman lämmityksen apulaiteiden energian hinta, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	58	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen energian hinta, huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	247	€/MWh
Tuloilman jäähdytyksen apulaiteiden energian, huomioitu energian hinnannousu	247	€/MWh
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	2 163	€/vuosi
Tuloilman lämmityksen energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	2 377	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman lämmityksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	204	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, investoinnin jälkeen	551	€/vuosi
Tuloilman jäähdytyksen ja apulaiteiden energiakustannus huomioitu energian hinnannousu, ennen investointia	661	€/vuosi
Syntynyt säästö tuloilman jäähdytyksessä investoinnin ansiosta, huomioitu energian hinnan nousu	1 113	€/vuosi
Investoinnin takaisinmaksuaika, ei huomioida korkokustannukset, huomioitu energian hinnannousu	11	vuotta

**VE1.2 versus VE3**

**LIITE 1(5).  
Takaisinmaksuaikalaskelmat**



**VE1.2 versus VE2 ja VE1.2 versus VE3**



**VE1.2 versus VE2 ja VE1.2 versus VE3, huomioitu energianhinnan nousu**

**LIITE 2(1).**  
**Simuloidut vuotuiset järjestelmäenergiat VE1.1, VE1.2 ja VE1.3**

<b>Vuotuiset järjestelmäenergiat: VE1.1</b>		<b>Tammi</b>	<b>Helmi</b>	<b>Maalis</b>	<b>Huhti</b>	<b>Touko</b>	<b>Kesä</b>	<b>Heinä</b>	<b>Elo</b>	<b>Syys</b>	<b>Loka</b>	<b>Marras</b>	<b>Joulu</b>	<b>kWh</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Yht. vuosi</b>
<b>Energiantarve, kWh</b>	<b>Kuukausi</b>													
Lämmitysenergia IV-koneen patteri		1 842	1 688	1 576	571	9	2	0	0	71	604	1 401	1 827	<b>9 591</b>
Jäähdytysenergia IV-koneen patteri		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
IV-koneen lämmöntalteenotosta, pyörivä LTO, ottama lämmitysenergia		5 180	4 980	5 568	4 569	2 821	1 617	641	1 147	2 854	3 859	4 614	5 342	<b>43 192</b>
IV-koneen jäähdytyksen talteenotosta ottama jäähdytysenergia		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Passiivijärjestelmästä ottama lämmitysenergia		1 707	1 667	1 358	346	21	0	0	0	17	154	841	1 448	<b>7 559</b>
Passiivijärjestelmästä ottama jäähdytysenergia		0	0	0	9	116	306	950	857	22	0	0	0	<b>2 260</b>
Primäärijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		501	478	549	528	507	534	536	535	532	505	527	550	<b>6 282</b>
Primäärijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>7</b>
Passiivijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		9	8	9	9	9	10	10	10	10	9	9	9	<b>111</b>
Passiivijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		63	54	64	35	8	12	23	18	5	18	39	66	<b>405</b>

**LIITE 2(2).**  
**Simuloidut vuotuiset järjestelmäenergiat VE1.1, VE1.2 ja VE1.3**

<b>Vuotuiset järjestelmäenergiat: VE1.2</b>		<b>Tammi</b>	<b>Helmi</b>	<b>Maalis</b>	<b>Huhti</b>	<b>Touko</b>	<b>Kesä</b>	<b>Heinä</b>	<b>Elo</b>	<b>Syys</b>	<b>Loka</b>	<b>Marras</b>	<b>Joulu</b>	<b>kWh</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Yht. vuosi</b>
<b>Energiantarve, kWh</b>	<b>Kuukausi</b>													
Lämmitysenergia IV-koneen patteri		1 690	1 552	1 444	527	8	2	0	0	75	593	1 335	1 691	<b>8 917</b>
Jäähdytysenergia IV-koneen patteri		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
IV-koneen lämmöntalteenotosta, pyörivä LTO, ottama lämmitysenergia		4 906	4 739	5 329	4 504	2 819	1 618	644	1 152	2 851	3 842	4 491	5 094	<b>41 989</b>
IV-koneen jäähdytyksen talteenotosta ottama jäähdytysenergia		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Passiivijärjestelmästä ottama lämmitysenergia		2 133	2 044	1 729	455	24	0	0	0	19	184	1 033	1 832	<b>9 453</b>
Passiivijärjestelmästä ottama jäähdytysenergia		0	0	0	9	116	306	950	857	22	0	0	0	<b>2 260</b>
Primäärijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		502	478	549	528	507	534	535	535	531	505	528	550	<b>6 282</b>
Primäärijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>6</b>
Passiivijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		9	8	9	9	9	10	10	10	10	9	9	9	<b>111</b>
Passiivijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		93	81	96	53	10	17	31	23	6	27	58	98	<b>593</b>

**LIITE 2(3).**  
**Simuloidut vuotuiset järjestelmäenergiat VE1.1, VE1.2 ja VE1.3**

<b>Vuotuiset järjestelmäenergiat: VE1.3</b>		<b>Tammi</b>	<b>Helmi</b>	<b>Maalis</b>	<b>Huhti</b>	<b>Touko</b>	<b>Kesä</b>	<b>Heinä</b>	<b>Elo</b>	<b>Syys</b>	<b>Loka</b>	<b>Marras</b>	<b>Joulu</b>	<b>kWh</b>
<b>Energiantarve, kWh</b>	<b>Kuukausi</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Yht. vuosi</b>
Lämmitysenergia IV-koneen patteri		1 602	1 521	1 364	514	7	2	0	0	71	584	1 303	1 620	<b>8 588</b>
Jäähdytysenergia IV-koneen patteri		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
IV-koneen lämmöntalteenotosta, pyörivä LTO, ottama lämmitysenergia		4 745	4 793	5 203	4 464	2 818	1 619	646	1 153	2 852	3 836	4 431	4 964	<b>41 524</b>
IV-koneen jäähdytyksen talteenotosta ottama jäähdytysenergia		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Passiivijärjestelmästä ottama lämmitysenergia		2 382	2 514	1 935	508	26	0	0	0	20	199	1 124	2 033	<b>10 741</b>
Passiivijärjestelmästä ottama jäähdytysenergia		0	0	0	9	116	306	950	857	22	0	0	0	<b>2 260</b>
Primäärijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		502	502	550	528	507	534	536	535	531	505	527	550	<b>6 307</b>
Primäärijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>6</b>
Passiivijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		9	8	9	9	9	10	10	10	10	9	9	9	<b>111</b>
Passiivijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		116	106	121	67	13	22	42	30	8	33	72	124	<b>754</b>

**LIITE 3.**  
**Simuloidut vuotuiset järjestelmäenergiat VE2 ja VE3**

<b>Vuotuiset järjestelmäenergiat: VE2 tai VE3</b>		<b>Tammi</b>	<b>Helmi</b>	<b>Maalis</b>	<b>Huhti</b>	<b>Touko</b>	<b>Kesä</b>	<b>Heinä</b>	<b>Elo</b>	<b>Syys</b>	<b>Loka</b>	<b>Marras</b>	<b>Joulu</b>	<b>kWh</b>
<b>Energiantarve, kWh</b>	<b>Kuukausi</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Yht. vuosi</b>
Lämmitysenergia IV-koneen patteri		2 411	2 299	2 000	642	17	2	0	0	71	711	1 813	2 258	<b>12 224</b>
Jäähdytysenergia IV-koneen patteri		0	0	0	9	116	306	950	857	22	0	0	0	<b>2 260</b>
IV-koneen lämmöntalteenotosta, pyörivä LTO, ottama lämmitysenergia		6 277	6 145	6 337	4 574	2 926	1 563	563	1 101	2 782	4 096	5 379	6 046	<b>47 789</b>
IV-koneen jäähdytyksen talteenotosta ottama jäähdytysenergia		0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	<b>3</b>
Primäärijärjestelmän puhaltimien kuluttama energia		509	485	541	512	531	526	528	551	515	521	527	524	<b>6 270</b>
Primäärijärjestelmän pumppujen kuluttama energia		2	2	1	1	0	1	3	2	0	1	1	2	<b>16</b>