



Juuso Aitio

# Hybridilämmitysjärjestelmän rakentaminen julkiseen kiinteistöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

5.3.2024

# Tiivistelmä

Tekijä:	Juuso Aitio
Otsikko:	Hybridilämmitysjärjestelmän rakentaminen julkiseen kiinteistöön
Sivumäärä:	79 sivua + 8 liitettä
Aika:	5.3.2024
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	Yliopettaja Aki Valkeapää

---

Insinööriyössä selvitettiin lämmitysjärjestelmän saneerauksen vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin, taloudellisiin kuluihin ja sisäilman laatuun vapaajäähdytyksen ja älykkään kiinteistöautomaation avulla. Työssä on kuvattu hybridilämmitysjärjestelmän keskeisimmät laitteet, niiden toiminta ja mitoitusperusteet.

Työ toteutettiin analysoimalla opinnäytetyön aikana rakennetun Muurlan koulun hybridilämmitysjärjestelmän laitteita ja niiden mitoitusta sekä käyttämällä hyväksi kohteen valmistumisen jälkeen saatua todellista dataa. Tietoperustana käytettiin muun muassa aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, verkkojulkaisuja sekä asiantuntijoiden luentoja ja koulutuksia.

Insinööriyö osoitti, että projektille asetetut tavoitteet saavutettiin. Rahallista säästöä kertyi vuodessa yli 42 500 € ja hiilidioksidipäästöjä onnistuttiin pienentämään 95 480 kg CO<sub>2</sub>. Kohteessa on mahdollista vähentää 25 vuoden tarkastelujaksolla hiilidioksidipäästöjä 2 540 000 kg, joka vastaa 247 keskivertosuomalaisen vuotuista hiilidioksidipäästöä. Hiilidioksidipäästöjä on mahdollista tiputtaa vieläkin enemmän siirtymällä uusiutuvaan HVO-öljyyn. Rahallista säästöä 25 vuoden tarkastelujaksolla on laskelmien mukaan mahdollista saavuttaa yli 1 000 000 €. Myös sisäolosuhteiden viihtyvyyttä onnistuttiin parantamaan.

Työssä syntyi kattava määrä tietoa hybridilämmitysjärjestelmistä, joita vastaavia hankkeita harkitsevat tahot voivat käyttää hyödykseen harkitessaan ryhtymistä lämmitystapamuutoksiin.

Avainsanat: maalämpö, sähkökattila, öljylämmitys, lämpöpumppu, hybridilämmitysjärjestelmä, kannattavuus, takaisinmaksuaika

## Abstract

Author: Juuso Aitio  
Title: Construction of Hybrid Heating System in Public Building  
Number of Pages: 79 pages + 8 appendices  
Date: 5 March 2024

Degree: Master of Engineering  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Professional Major: HVAC Engineering  
Supervisors: Aki Valkeapää, Principal Lecturer

---

The thesis studied what effect a heating system renovation to implement free cooling and intelligent building automation had on carbon dioxide emissions, economic costs, and indoor air quality. The study also described the key devices of the hybrid heating system, their operation, and the principles of their sizing.

The thesis analysed the devices and the sizing of the hybrid heating system installed at a school, and used real data obtained from the completed system. The theoretical foundation included relevant literature, as well as lectures and training from experts.

The thesis demonstrated that the objectives of the renovation were achieved. Financially, over 42 500 € per year was saved, and carbon dioxide emissions were reduced by 95 480 kg. Over a 25-year period, it is possible to reduce the CO<sub>2</sub> emissions by 2 540 000 kg, equivalent to the annual emissions of 247 people, and to save over 1 000 000 €. Moreover, the carbon dioxide emissions could be further reduced by switching to renewable HVO oil. The indoor comfort was also improved. The thesis generated a comprehensive amount of information about hybrid heating systems, which can be utilized when considering similar projects and contemplating changes in heating methods.

Keywords: geothermal heat, electric boiler, oil heating, heat pump, hybrid heating.

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Öljylämmitys	4
3	Sähkölämmitys	7
4	Kaukolämpö	8
5	Maalämpö	10
5.1	Maalämpöpumpun toimintaperiaate	11
5.2	Maalämmön lämmönlähteet (kallioperä, maaperä ja vesistö)	12
5.3	Maalämpöpumppulaitoksen peruskytkentä	19
5.4	Lisä- ja varalämpö (sähkö- ja öljykattila, kaukolämpö, kytkentäperiaate)	20
6	Lämmitystehon tarpeen laskenta öljynkulutuksesta	24
7	Vesivaraajat	26
7.1	Lämminvesivaraaja	26
7.2	Puskurivaraaja	27
7.3	Hybridivaraaja	29
7.4	Kytkevävaihtoehtoja	30
7.5	Puskurivaraajan mitoitus	31
7.6	Käyttövesivaraajan mitoitus	33
8	Hybridilämmitysjärjestelmän mitoitus	36
9	Vapaaäähdytys maaputkistoa hyödyntäen	38
10	Energiakaivojen mitoitus	41
11	Tutkimiskohteen esittely	42
11.1	Tutkimuskohteen huipputehon tarkastelu	43
11.1.1	Lämmitysenergian laskenta tunnusluvuilla	43
11.1.2	Lämmitysenergian laskenta öljynkulutuksesta	44
11.1.3	Toteutunut huipputeho	45

11.2	Hybridijärjestelmän valinta ja mitoituksen tarkastelu	47
11.2.1	Maalämpöpumput	47
11.2.2	Kondenssiöljykattila	49
11.3	Toteutunut energiankulutus	51
11.4	Energiakentän mitoituksen tarkastelu	51
11.5	Vapaajäähdytyksen toteutus ja riittävyyden tarkastelu	55
12	Rakennusautomaatiojärjestelmä	60
12.1	Muurlan koulun rakennusautomaatiojärjestelmän kuvaus	60
12.2	Valvomo	61
12.3	VAK1 (alakeskus 1, lämmönjakohuone)	62
12.4	VAK2 (Vanhan osan ilmanvaihdon konehuone)	66
13	Investointilaskelmat	67
14	Hiilidioksidipäästöt	71
15	Yhteenveto	73
	Lähteet	77

#### Liitteet

Liite 1: Muurlan koulun rakennusautomaatio kaavio

Liite 2: Muurlan koulun maalämpö laiteluettelo

Liite 3: Maalämpöpumppu Vitocal 300-G 301.A45 tekniset tiedot

Liite 4: Kuvia projektin vaiheista

Liite 5: Jäähdytyspatterin alkuperäinen mitoitus TK01 luokkatilat

Liite 6: Jäähdytyspatterin alkuperäinen mitoitus TK02 liikuntasali

Liite 7: TK01 jäähdytyspatteri pahin mitoitustilanne.

Liite 8: Rakentamisen päästötietokannan CO<sub>2</sub>- päästökertoimet.

## Lyhenteet

- AI: *Analog input*. Analoginen sisääntulo.
- AO: *Analog output*. Analoginen ulostulo.
- COP: *Coefficient of performance*. Lämpökerroin.
- CHP: *Combined heat and power*. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto.
- DCF: *Discounted cash flow*. Diskontattu kassavirta.
- DI: *Digital input*. Digitaalinen sisääntulo.
- DO: *Digital output*. Digitaalinen ulostulo.
- HVO: *Hydrotreated vegetable oil*. Vetykäsitelty kasviöljy.
- KETS: Kuntien energiatehokkuussopimus.
- ModBus: Avoin väyläliikenneprotokolla.
- PID-säädin: *Proportional-integral-derivative*-säädin. suhde, integroiva ja derivaiva säädin.
- RAU: Rakennusautomaatio.
- ROI: *Return on investment*. Pääoman tuottoaste.
- RTU: *Remote terminal unit*. Automaatiossa käytettävä protokolla.
- SCOP: *Seasonal Coefficient of Performance*. Vuosilämpökerroin, lämpöker-  
toimen arvo koko lämmityskauden ajalta.

TCP/IP: *Transmission control protocol / internet protocol*. Tietoliikenneprotokolla tietokoneiden väliseen tiedonsiirtoon.

TRT: *Thermal Response Test*. Terminen vastetestti.

VAK: Valvonta-alakeskus.

VPN: *Virtual private network*. Virtuaalinen erillisverkko.

## 1 Johdanto

Insinöörityö on tehty Salon kaupungille, jossa opinnäytetyön tekijä toimii talotekniikkamestarina.

Useissa Suomen kunnissa on kasvava tarve toteuttaa energiansäästötoimia, joiden avulla tavoitellaan sekä taloudellisia säästöjä että ilmastotavoitteiden saavuttamista. Salon kaupunki on sitoutunut osallistumaan kuntien energiatehokkuussopimukseen, jotka ovat valtion ja eri toimialojen yhdessä valitsema keino täyttää Suomelle asetetut kansainväliset energiatehokkuusvelvoitteet ilman uuden lainsäädännön tai muiden pakotteiden tarvetta. Sopimukset pyrkivät tehostamaan energiankäyttöä eri sektoreilla, kuten teollisuudessa, energia- ja palvelualalla, kiinteistöalalla, kunnallisella sektorilla ja öljylämmityskiinteistöissä [Motiva 2022a].

Lämmitystapamuutokset ovat keskeisiä kuntien energiatehokkuustoimenpiteitä (KETS). Salon kaupunki on sisällyttänyt ilmasto- ja ympäristöohjelmaansa tavoitteen saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä [Salon kaupunki 2021b].

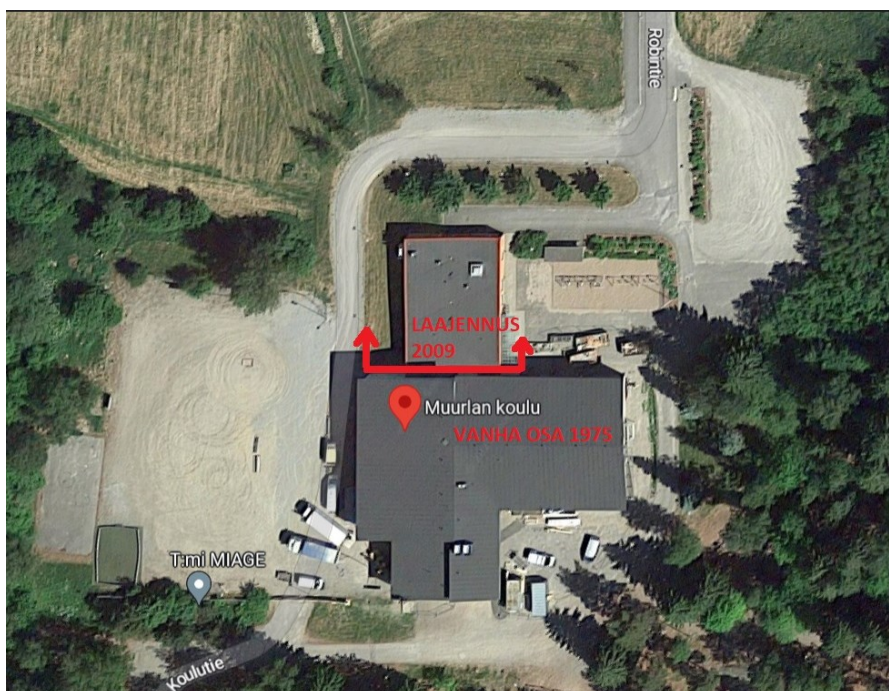
Opinnäytetyön tavoitteena on todentaa saavutetut taloudelliset säästöt ja päästövähennykset, kun vanha öljylämmitysjärjestelmä korvataan hybridilämmitysjärjestelmällä. Lisäksi tavoitteena on kerätä tietoa tulevia hankkeita varten. Tavoitteena on myös sisäilman viihtyvyyden parantaminen älykkäällä kiinteistöautomaatiolla ja vapaajäähdytyksellä.

Opinnäytetyössä kuvataan koulurakennuksen lämmitysjärjestelmän saneerauksen vaiheita, järjestelmän keskeisiä laitteita ja niiden mitoitusperusteita. Lopuksi tarkastellaan rakennetun hybridijärjestelmän kannattavuutta ja vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin. Opinnäytetyö on kvalitatiivinen tutkimus.



Opinnäytetyön kohteena on Muurlan koulu, joka sijaitsee Pyölin kylässä Salossa entisen Muurlan kunnan keskustan läheisyydessä. Muurlan koulun osoite on Robintie 30, 25130 Muurla.

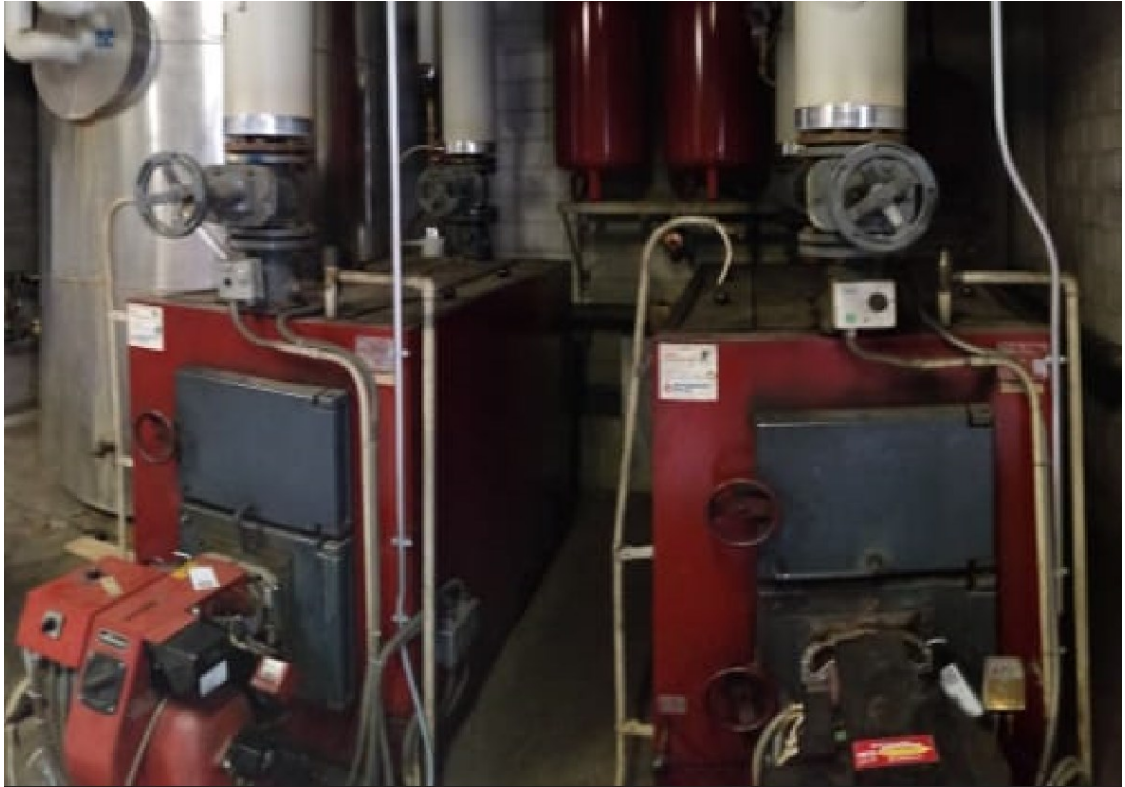
Muurlan koulussa (kuva 1) toimivat vuosiluokat 1–6, joissa on hieman yli 100 oppilasta. Lisäksi koulussa toimii iltapäiväkerho ja esikouluryhmä. Opettajia koulussa on kuusi- Lisäksi koulussa työskentelee yksi erityisluokanopettaja ja kolme koulunkäynninohjaajaa.



Kuva 1. Muurlan koulu [Google Maps, muokannut tekijä].

Muurlan koulun päärakennus on valmistunut vuonna 1975. Koulun laajennusosa valmistui syksyllä 2009. [Salon kaupunki 2021.]

Muurlan koulun 70-luvulla rakennettu öljylämmitysjärjestelmä (kuva 2) oli tullut elinkaarensa päähän. Huoltomies oli raportoinut lämmityskattiloissa olevista vuodoista ja jatkuvasta tarpeesta lisätä vettä lämmitysjärjestelmään.



Kuva 2. Muurlan koulun vanha öljylämmitysjärjestelmä.

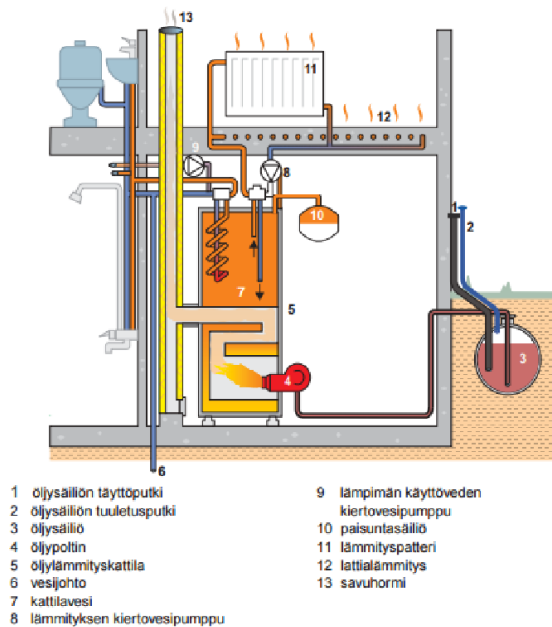
Suomen hallitusohjelmaan on linjattu fossiilisen öljyn lämmityskäytöstä luopuminen 2030-luvun alkuun mennessä. Julkinen sektori halutaan esimerkin näyttäjäksi, ja siirtyminen on linjattu vuoteen 2024 mennessä. [Ympäristöministeriö 2023.]

Hallitusohjelman linjausta noudattaen vanhan öljylämmitysjärjestelmän uusiminen vastaavanlaiseksi ei tullut enää kysymykseen, vaan oli pohdittava muita ekologisempia vaihtoehtoja.

Koulun vanha Schneider Electric AtmosTech -rakennusautomaatiojärjestelmä oli myös tullut elinkaarensa päähän, ja se päivitettiin projektin aikana Schneider Electric EcoStruxure -automaatiojärjestelmään, johon hybridilämmitysjärjestelmä liitettiin.

## 2 Öljylämmitys

Öljylämmitysjärjestelmä (kuva 3) koostuu öljypolttimesta, öljykattilasta, säätölaitteista ja öljysäiliöstä [Motiva 2022b]. Nykyaikaisten öljylämmityskattiloiden hyötysuhde on hyvä, jopa yli 90 %. 35 vuotta sitten hyötysuhde oli 75–80%. Nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että öljykattiloiden hyötysuhde on kehittynyt noin 10 prosenttia vuosikymmenessä [Harju 2006: 35; Motiva 2022b].

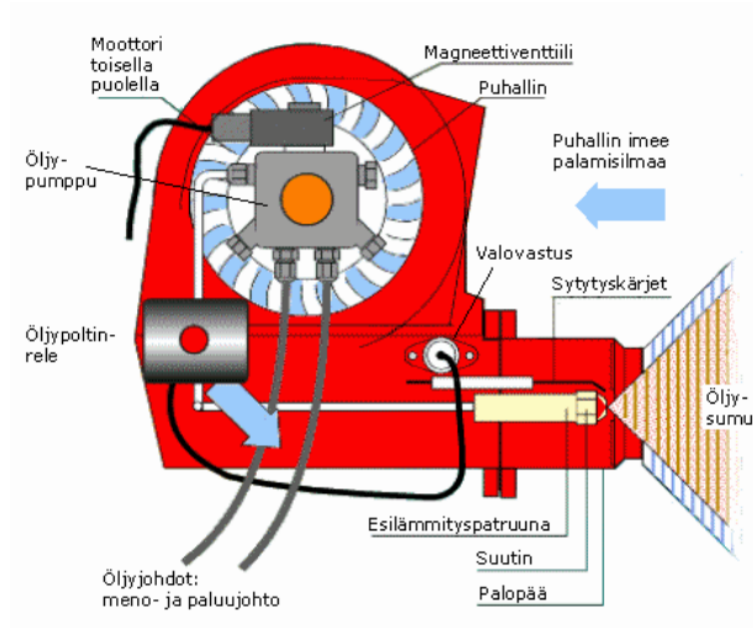


Kuva 3. Öljylämmitysjärjestelmä [Rakennustieto. 2005].

Kattilatermostaatti käynnistää öljypolttimeen (kuva 4) toiminnan kattilaveden lämpötilan perusteella. Sähkömoottori käynnistyy ja ohjaa öljypumppua sekä ilmapuhallinta, jotka sijaitsevat samalla akselilla. Ilmapuhallin huolehtii kattilan tulipesässä mahdollisesti esiintyvien palamattomien kaasujen poistamisesta. Öljypumpun saavutettua tarvittavan ruiskutuspaineen magneettiventtiili avautuu. Öljy virtaa suuttimen pitimessä olevan esilämmityspatruunan läpi suuttimeen ja siitä sumuna tulipesään.

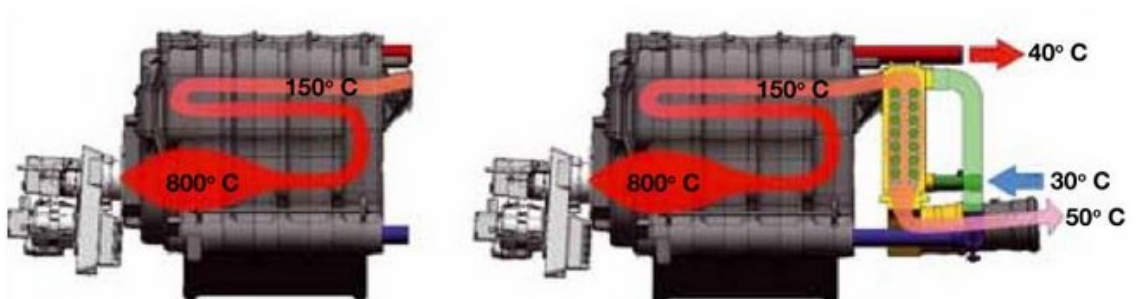
Öljysumu ja ilmapuhaltimen tuottama ilma sekoittuvat tulipesän jälkeen, ja sytytysmuuntajan avulla syntyvä korkeajännitteinen sähkövirta sytyttää öljysumun sytytyskärkien välillä olevan sähkökipinän avulla. Mikäli liekki ei syty, valovastus

havaitsee sen ja keskeyttää öljysumun ruiskutuksen kattilaan tietyn ajan kuluttua. Mikäli poltin on häiriötilassa, se voidaan käynnistää uudelleen painamalla keskusreleistössä olevaa painiketta. Polttoaineen ja ilman sekoittuminen tapahtuu polttimen palopään avulla, joka ohjaa pyörteisen ilmavirran polttoöljysumun joukkoon. [Harju 2006: 35.]



Kuva 4. Öljypoltin ja sen osat [Opetushallitus 2008].

Kondenssikattilan ja perinteisen lämmityskattilan pääasialliset erot ovat kattilan rakenteessa (kuva 5), savukaasuihin sitoutuneen energian hyödyntämisessä ja kattilaan integroidussa polttimessa.



Kuva 5. Perinteinen- ja kondenssiöljykattila [Lämmitysenergiayhdistys 2016].

Perinteisessä kattilassa kattilaveden lämpötila pysyy yleensä vakiona, noin 70–80 °C:n tasolla, jotta lämpimän käyttöveden valmistus onnistuu. Tämä tarkoittaa, että savukaasujen lämpötila on yleensä huomattavasti korkeampi, noin 100 °C. Kondenssikattila sen sijaan hyödyntää savukaasujen energiaa käyttöveden ja lämmitysverkostosta palaavan veden lämmittämiseen. Kun vesi höyrystyy, vapautuu energiaa, jota voidaan käyttää hyödyksi lämmityksessä. Kondenssikattilan savukaasujen lämpötila on yleensä vain 5–10°C verran korkeampi kuin verkoston paluuv veden lämpötila. Kondensoitunut vesi johdetaan viemäriin, ja tarvittaessa se on neutraloitava.

Savukaasuhäviöt ovat kondenssikattilassa huomattavasti pienemmät kuin perinteisessä kattilassa, koska savukaasuista lämmöntalteenotto on tehokkaampaa. Myös kattilan omakäyttöhäviöt ovat pienemmät, koska käyttölämpötilat ovat alhaisempia kuin perinteisessä kattilassa. Kondenssikattilan automatiikka säättää polttimen tehoa lämmitysjärjestelmän tarpeiden mukaan, ja polttoaineen energiasisältö voidaan hyödyntää paremmin kuin perinteisessä kattilassa. Palamishyötysuhde voi olla kaasulla jopa 109 % ja öljyllä 102 %, kun palamishyötysuhde lasketaan polttoaineen alemman (netto-) lämpöarvon mukaan. Jos laskennassa käytetään ylempää (brutto-) lämpöarvoa, ovat palamishyötysuhteet aina alle 100 %.

Kondenssikattilassa lämmin käyttövesi tuotetaan yleensä erillisessä varaajassa. Kattila toimii siten, että suurempaa tehoa käytetään, kun tarvitaan lämmintä käyttövettä. Muissa tilanteissa kattila tuottaa lämmitystarpeen mukaista lämpötilaa suoraan lämmitysverkostoon. [Lämmitysenergiayhdistys 2016: 9.]

Öljylämmityksen etuina voidaan mainita tehokkuus, sillä polttoöljy on erittäin energiatiheä polttoaine, yksi litra kevyttä polttoöljyä sisältää energiaa noin 10 kWh. Muita etuja on luotettavuus, säädettävyyden ja hyvä saatavuus.

Öljylämmityksen haittapuolia ovat polttoöljyn polttamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ja muut kasvihuonekaasut, jotka edistävät ilmastonmuutosta. Lisäksi

on olemassa riski öljyvuoodoille, jotka voivat aiheuttaa merkittäviä ympäristöhaittoja. Polttoöljyn hinta voi myös vaihdella suuresti markkinatilanteen ja geopolittisten tekijöiden vuoksi, mikä saattaa aiheuttaa epävarmuutta lämmityskustannuksissa. Lisäksi öljylämmitysjärjestelmät vaativat säännöllistä huoltoa ja öljysäiliön täyttämistä, ja itse öljysäiliö vie tilaa sekä vaatii erityisiä turvallisuusmääräyksiä sijoittelussaan.

### 3 Sähkölämmitys

Sähkövastus tai lämpövastus (kuva 6) on sähköinen komponentti, joka muuntaa sähköenergian lämpöenergiaksi vastuksen kautta. Se koostuu yleensä metallilangasta tai kalvosta, joka on kierretty spiraaliksi tai muotoiltu levyksi.



Kuva 6. Vesivaraajaan asennettava sähkövastus. Vastus on varustettu termostaatilla ja rajoitinyksiköllä [Gebwell].

Kun sähkövirta kulkee lämpövastuksen läpi, vastus vastustaa virtaa ja muuntaa osan sähköenergiasta lämpöenergiaksi vastuksen läpi. Tämä aiheuttaa vastuksen lämpötilan nousun.

Lämpövastuksen toiminta perustuu vastuksessa käytettyjen materiaalien ominaisuuksiin, erityisesti materiaalin resistanssiin. Resistanssi kuvaa materiaalin kykyä vastustaa sähkövirtaa, ja sitä mitataan yleensä ohmeina ( $\Omega$ ). Kun resistanssi kasvaa, myös vastuksen lämmöntuotto kasvaa.

Varaavassa vesikiertoisessa sähkölämmitysjärjestelmässä pyritään hyödyntämään vesivaraajan veden lämpöä varaava massa, esimerkiksi lämmittämällä

vettä sähkön hinnan ollessa matala ja ajoittamalla kulutusta hinnan ollessa korkea. Tyypillisesti varaajaa (kuva 7) varataan edullisella yösähköllä ja käytetään päivisin.



Kuva 7. Jäspi Ovali -energiavaraaja [Jäspi].

Sähkölämmityksen etuja ovat sen helppo asennus, vähäinen huollon tarve, eikä se tuota paikallisia päästöjä.

Sähkölämmityksen haittapuolena on usein korkeammat käyttökustannukset verrattuna muihin lämmitysmuotoihin, erityisesti alueilla, joissa sähkön hinta on korkea. Sähkölämmityksen ympäristövaikutukset riippuvat myös siitä, miten sähkö on tuotettu. Uusiutuvilla energialähteillä tuotettu sähkö on ympäristöystävällisempi vaihtoehto.

## 4 Kaukolämpö

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto, joka toimii keskitetysti. Kaukolämmössä lämpöenergiaa siirretään useille rakennuksille lämmöntuotantokeskuksista. Keskuksissa käytetään suuria kattiloita, jotka ovat tehokkaampia kuin

pienemmät, yksittäisissä rakennuksissa sijaitsevat kattilat. Kaukolämpöä tuotetaan erilaisissa tuotantolaitoksissa sekä erillisissä kaukolämmön lämmityskeskuksissa [Energiateollisuus. 2023].

Veden lämpötila, jolla kaukolämpöä toimitetaan asiakkaille, vaihtelee ulkolämpötilan mukaan ja on yleensä 70–115 °C. Kesäisin kaukolämpöä hyödynnetään lähinnä käyttöveden lämmittämiseen, jolloin sen lämpötila on noin 70 °C. Liitettävässä rakennus kaukolämpöverkkoon, asennetaan lämmönjakohuoneeseen kaukolämmön alajakokeskus (kuva 7), joka sisältää mm. lämmönsiirtimet, säätimet ja turvalaitteet. Kaukolämpö vaatii vain vähän huoltoa ja on luotettava, kun se on asianmukaisesti suunniteltu ja mitoitettu [Energiateollisuus 2023].



Kuva 8. Kaukolämmön alajakokeskus.

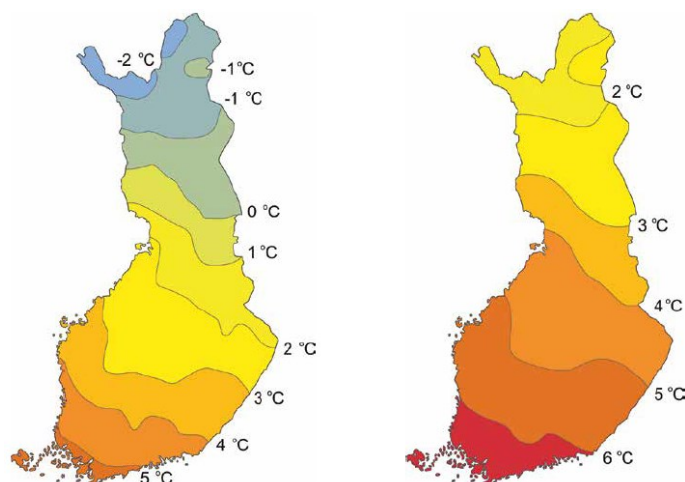
Kaukolämpö toimitetaan asiakkaille suljetussa, kaksiputkisessa järjestelmässä. Lämmin vesi siirretään kiinteistöjen alajakokeskusten kautta lämmitysverkostoon ja käyttövedeen. Kaukolämpövesi käsitellään mekaanisesti, jotta se olisi vapaa epäpuhtauksista ja hapesta, mikä ehkäisee verkostoon kohdistuvaa korroosiota. Kaukolämpövesi on usein värjätty, jotta mahdolliset vuodot olisi helpompi



havaita. Kaukolämmön luotettavuus on sen suuri etu, sillä keskimäärin kaukolämpökiinteistöt ovat ilman lämpöä vain noin 1–2 tuntia vuodessa [Energiateollisuus 2023].

## 5 Maalämpö

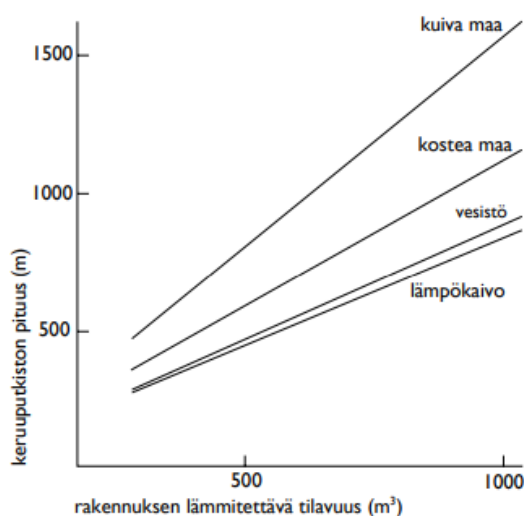
Maalämpö perustuu maahan varastoituneeseen aurinkoenergiaan. Syvemmälle mentäessä saatavilla oleva energian on peräisin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta vapautuvasta energiasta, jota kutsutaan geotermiseksi energiaksi. Kiinteistöiden energiakaivojen syvyydet ovat yleensä noin 200–400 metriä, joten niistä saatava energia on pääosin peräisin auringosta. Suomessa maan keskimääräinen pintalämpötila on noin 2 astetta ilman vuotuista keskiarvoa korkeampi, pintalämpötilan vaihtelua esiintyy maantieteellisesti sekä paikallisesti, mikä ilmenee kuvasta 8. Rakennetuilla alueilla lämpötila voi olla merkittävästi korkeampi kuin luonnonmetsissä. [Juvonen & Lapinlampi 2013: 7.]



Kuva 8. Ilmalämpötilan vuotuinen keskiarvo vertailukaudelta 1971–2000 (vasemmalla) ja maanpinnan lämpötilan vuotuinen keskiarvo (oikealla) [Juvonen & Lapinlampi 2013: 7].

Maahan varastoitunutta energiaa kerätään talteen erilaisilla keruujärjestelmillä, joita ovat kallioon porattu lämpökaivo (energiakaivo), maaperään asennettu vaakaputkisto eli maapiiri tai vesistöön upotettu vesistöpiiri. Keruujärjestelmän toteutustavasta riippuen tarvitaan eri pituisia keruuputkistoja. Kuvassa 9 on

esitetty eri keruujärjestelmiltä vaadittu putkistopituus lämmitettävää rakennustilavuutta kohti.



Kuva 9. Keruujärjestelmien suuntaa antavat putkistopituudet lämmitettävän tilavuuden funktiona [Juvonen & Lapinlampi 2013: 8].

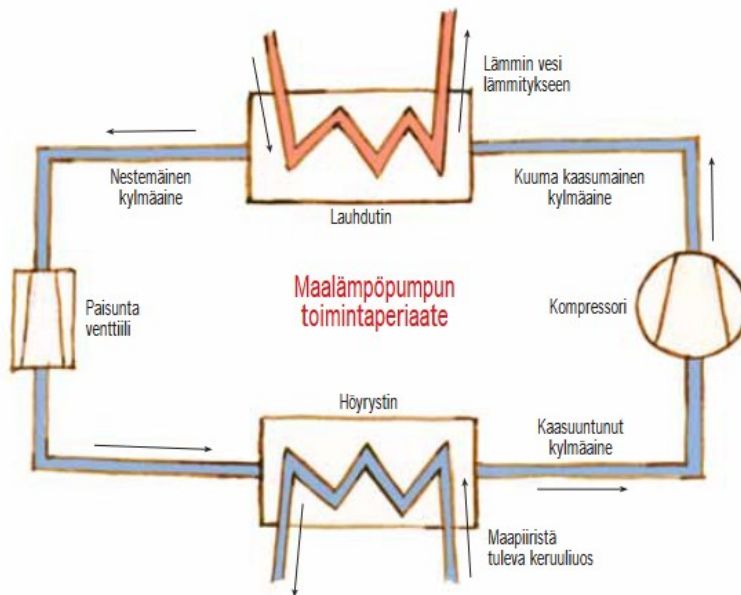
## 5.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumppujen toimintaperiaate perustuu lämmönsiirtoon alhaisemmasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Tämä tapahtuu kylmäaineen avulla, joka kiertää lämpöpumpun suljetussa kylmäainepiirissä (kuva 10). Lämpöpumpun kylmäainepiirissä kiertävä kylmäaine höyrystyy matalassa lämpötilassa, jolloin kylmäaine muuttuu kaasumaisen muotoon.

Tämän jälkeen kompressori nostaa höyrystyneen kylmäaineen paineen, mikä aiheuttaa kylmäaineen lämpötilan nousun. Korkean paineen ja lämpötilan kylmäaine siirtyy lauhduttimeen, jossa kylmäaine luovuttaa lämpöenergiansa lämmitysjärjestelmään. Tässä vaiheessa kylmäaine tiivistyy takaisin nestemäiseen muotoon, vapauttaen lauhtuessaan siihen varastoituneen lämpöenergian.

Paisuntaventtiilin kautta kylmäaineen paine lasketaan uudelleen, ja sen lämpötila alenee, jolloin kylmäaineen kierto alkaa alusta. Tämä prosessi mahdollistaa

lämpöenergian siirtymisen alhaisemmasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan.

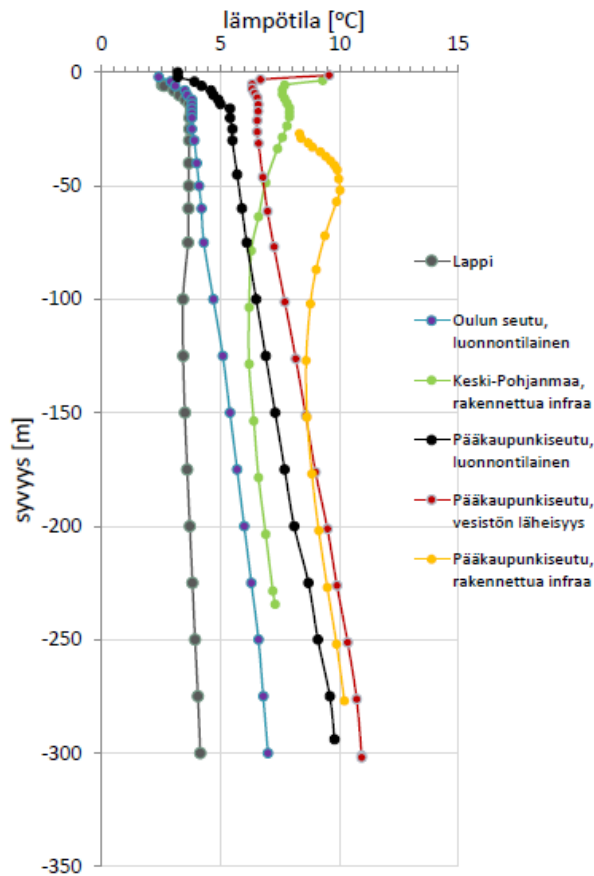


Kuva 10. Maalämpöpumpun toimintaperiaate [Motiva 2012].

Lämpöpumput voivat hyödyntää ympäristössä olevaa lämpöenergiaa, kuten ilman, maan tai veden sisältämää lämpöenergiaa. Lämpöpumput mahdollistavat energiatehokkaan ja ympäristöystävällisen lämmityksen, koska lämpöpumppujen tuottama lämpöenergia on suurelta osin peräisin uusiutuvista energialähteistä. [Motiva 2012.]

## 5.2 Maalämmön lämmönlähteet (kallioperä, maaperä ja vesistö)

Energiakaivo on yleinen tapa ottaa lämpöenergiaa kalliosta. Kallioon porataan reikä, joka on halkaisijaltaan tyypillisesti 4,5 tuumaa eli 114,3 mm. Kallion lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan, 10–15 metrin syvyyteen asti, jossa lämpötila Suomessa on 4–8 °C riippuen maantieteellisestä sijainnista. Lämpötilojen käyttäytyminen eri kallion syvyyksissä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Porareiän syvyyden vaikutus lämpötilaan Suomen eri vyöhykkeillä [Huusko 2022: 25].

Alaspäin maanpinnasta mentäessä nousee lämpötila asteittain maapallon keskustasta tulevan lämmön takia ns. geotermisen gradientin vaikutuksesta.

Lämpötilan nousu on Suomen paksussa kalliokilvessä pieni, normaalisti 100 metriä kohti 1–1,5 K. Geotermisen lämpövirran tiheys on vain 0,03–0,04 W/m<sup>2</sup> (kallion lämmönjohtavuus on 2,5–3,5 W/Km). Energiakaivosta saatava lämpö on peräisin auringon säteilyenergiasta. Jos maankamara oletetaan homogeeniseksi, voidaan maankamaran keskilämpötila noin tuhannen metrin syvyyteen asti laskea kaavalla 1 [Helsingin geoenergiapotentialiaali 2019].

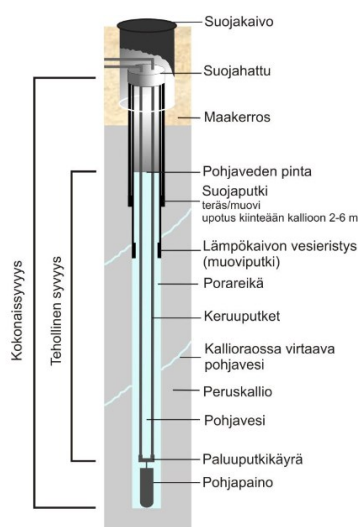
$$T(z) = T_0 + \frac{q}{k} * z \quad (1)$$

$T$  on maankamaran lämpötila (°C)  
 $z$  on syvyys (m)

$T_0$	on maanpinnan keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )
$q$	on geometrinen lämpövuoto maanpinnalla ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$k$	on maankamaraan lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ).

Lämmön määrä, joka voidaan ottaa käyttöön energiakaivosta, riippuu myös pohjaveden virtauksista ja kallion rakenteesta. Pohjaveden virtaus riippuu kalli-ossa olevien rakojen määrästä, jota ei voi ennustaa etukäteen. Jos pohjaveden virtaus on heikkoa, reikään kertyvä vesi voi jäätyä talvella. Vedenpinnan yläpuolinen osa lämpökaivosta on lähes tehoton. Kallioperän ollessa kaivon kohdalla niin ehjä, ettei kaivoon valu pohjavettä halkeamia pitkin, voidaan kaivo täyttää vesijohtovedellä. Pintaveden pääsyn estämiseksi energiakaivon yläpää tiivistetään.

Yleisin tapa kerätä lämpöä energiakaivosta (kuva 12) on välillinen kierto liuoksella. Porareikään asennetaan lämmönottoputkia, yleensä U-muotoisia, joko yksi tai kaksi lenkkiä. Lämmön ottamiseen on kehitetty myös erilaisia putkikarakenteita, kuten poimutettuja putkia ja paineella vasten kalliota laajennettavia putkia. Veden huonomman lämmönjohtokyvyn vuoksi keruuputket sijoitetaan niin lähelle kaivon kallioseinämää kuin mahdollista. Lämpökaivosta saatavan lämmön määrä riippuu kallioperän lämmönjohtavuudesta. Lämpötilakenttä asetuu lähes lopulliseen tasoon vasta useiden vuosien kuluttua. Lämpökaivosta voidaan kerätä lämpöä 80–150 kWh/m vuodessa. [Aittomäki 2012: 352.]



Kuva 12. Energiakaivon rakenne [Juvonen & Lapinlampi 2013: 35].

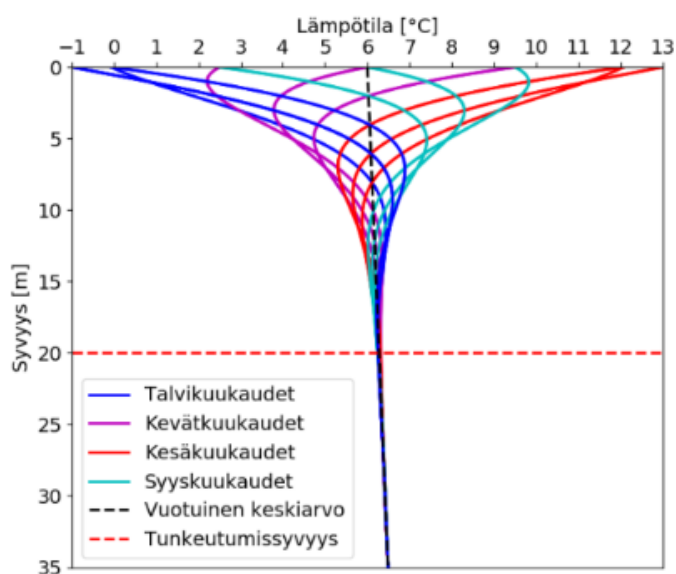
Kallioon porattuja reikiä voi myös hyödyntää vapaajäähdytyksen tuottamiseen ja jäähdytyskoneiston lauhdelämmön poistamiseen, mikä alentaa jäähdytyskoneiston lauhtumislämpötilaa kesällä. Suurissa kohteissa tarvitaan useampia reikiä. Reikien välisen etäisyyden on oltava riittävän suuri, vähintään noin 15–20 metriä, jotta reiät eivät vaikuta liikaa toisiinsa. Taulukossa 1 on esitetty suositellut minimietäisyydet eri kohteisiin. Kaivoja voidaan porata myös ns. vinoporauksella, jolloin reikien yläpäävät voivat olla lähempänä toisiaan. Kaivojen lämpötilatasoa voidaan palauttaa viemällä kallioon joko vapaajäähdytyksen tai koneellisen jäähdytyksen tuottamaa lämpöä. Kunkin kohteen suunnittelu ja tarkastelu on kuitenkin tehtävä kohteen erityispiirteiden mukaisesti. [Aittomäki 2012: 352.]

Taulukko 1. Energiakaivon porareian suositeltavat minimietäisyydet eri kohteisiin [Juvonen & Lapinlampi 2013: 25].

<b>Kohde</b>	<b>Suositteltu minimietäisyys</b>
Lämpökaivo	15 m nykyisin jopa 20 m
Lämpöputket ja kaukolämpöjohdot	3 m
Kallioporakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	7,5 m
Kiinteistökohtainen jätevedenpuhdistamo	Kaikki jätevedet 30 m, harmaat vedet 20 m
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat), 5 m (muiden)
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

Maan pintakerrokseen varastoituu kesällä Auringon lämpöä 5–7 metrin syvyyteen (kuva 13). Luonnollisen lämpötilan vaihtelun aiheuttama lämpövirran tiheys

on korkeintaan muutama watti neliometriä kohti. Geotermisen lämmön merkitys on mitätön verrattuna pintakerroksen lämpöön. Maasta saadaan lämpöä jäähdyttämällä maata ja siinä olevaa kosteutta, minkä vuoksi lämmönottoputket sijoitetaan vähintään 1–2 metrin etäisyydelle toisistaan ja 1–2 metrin syvyyteen (kuva 14). Koska Suomessa maan pintakerroksen lämpötila laskee syksyn ja talven aikana lähelle jäätymispistettä, putkiston jäähdytysvaikutus voi aiheuttaa roudan syvenemisen.



Kuva 13. Maankamaran lämpötila vaihtelee vuotuisen keskiarvon ympärillä noin 20 metrin syvyyteen asti vuodenajasta riippuen [Helsingin geoenergiapotentialiaali 2019].



Kuva 14. Maalämmönkeruupiiri maaperään [iStock].

Oikein mitoitetussa putkessa jäätyminen ehtii talven mittaan edetä putken loppupään lähelle. Liian lyhyen putken ympäriltä maa ehtii jäätyä kokonaan ennen kevättä, ja putken lämmöntuottokyky heikkenee. Tarpeettoman pitkässä putkessa loppuosan ympäriltä maa on vielä keväälläkin pitkälti sulana. On tärkeää, että maaperän lämpötila ehtii palautua kesäkuukausina takaisin syksyn tilanteeseen, sillä liiallinen lämmönotto voi aiheuttaa maahan pysyvän routakerroksen. Suurin mahdollinen lämmönotto riippuu ilmastosta ja maaperän laadusta. Hienorakeiset maaperät, kuten savi ja siltti, ovat edullisimpia, koska ne voivat pidättää runsaasti vettä, joka jäätyessään luovuttaa paljon lämpöä. Savesta voidaan Etelä-Suomessa ottaa energiaa 50–60 kWh/m vuodessa, kun taas Pohjois-Suomessa vastaava luku on noin puolet. Hiekka sisältää energiaa noin puolet saveen sitoutuneesta energian määrästä, mikä ilmenee taulukosta 2. Routivissa maaperissä, kuten savi ja siltti, vettä sisältävä maa ei jäädy putkiston ympärille, vaan routimisilmion takia jää kertyy puhtaana jääsylinterinä. Jään sulaessa jää putken ympärille tyhjä tila, joka maan liettyessä täyttyy. Sulamista ja lämpenemistä keväällä voidaan nopeuttaa viemällä maahan lisää lämpöä esimerkiksi aurinkokeräimillä, mutta tämä nostattaa järjestelmän kustannuksia merkittävästi.

Taulukko 2. Maaperän ja sijainnin vaikutus vuotuiseseen lämpömäärään [Laitinen 2011].

Sijainti	Savimaa	Hiekkamaa	Yksikkö
Etelä-Suomi	50–60	30–40	kWh/m
Keski-Suomi	40–45	15–20	kWh/m
Pohjois-Suomi	30–35	0–10	kWh/m

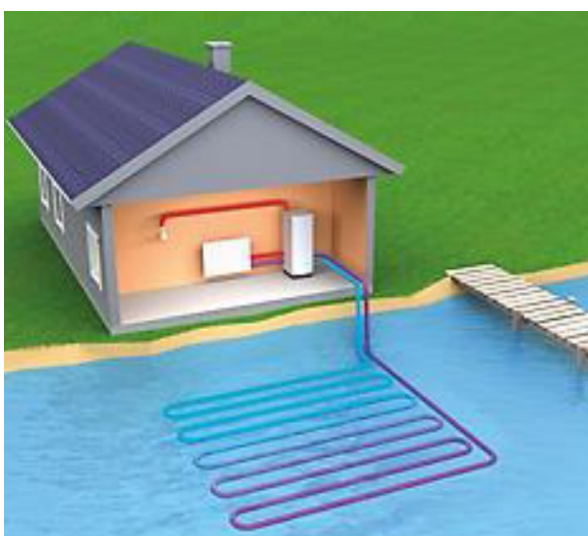
Lämmönotto tapahtuu yleisimmin vesi-/etanoliliuoksella, jonka pitoisuus on noin 25 %. Putkisto mitoitetaan siten, että virtaus on turbulenttia, liuoksen virtausnopeus on 0,5–0,8 m/s ja lämpötilan muutos on 2–3 astetta. Laminaarinen virtaus



johtaa merkittävästi huonompaan lämmönsiirtoon. Talvella maasta tulevan liuoksen lämpötila laskee muutaman asteen nollan alapuolelle. Putken suurimman mahdollisen pituuden rajoittaa painehäviö ja pumpun teho.

Lämmönotossa on tärkeää ottaa huomioon paitsi putkipituus myös alueelta saatava lämpömäärä. Usein saatavan lämpömäärän rajoituksena on käytettävissä oleva maa-ala. Syvemmältä maaperästä saadaan vähemmän lämpöä kuin pintakerroksista, sillä lämpötilan palautuminen tapahtuu hitaammin. Jäätyminen putken ympärillä on toinen rajoittava tekijä. Routivilla maalajeilla muodostuva jää työntää maata pois edestään ja putken ympärille syntyy jääsylinteri. Kun tämä sylinteri sulaa, putken ympärille jää tyhjää tilaa. Tämän johdosta asentaminen vaatii enemmän putkea ja on siten kalliimpaa. [Aittomäki 2012: 351.]

Vesistöistä lämpöä voidaan kerätä lämpöä avoimella tai suljetulla kytkennällä (kuva 15). Suurissa lämpöpumpuissa avoin kytkentä on usein käytetty tapa, jossa vesistöistä pumpattu vesi jäähtyy höyrystimessä 2–3 astetta. Jäätymisvaara on tärkeä tekijä järjestelmän mitoituksessa. Vesistöissä veden lämpötila laskee kevättalvella syvänteissäkin vain 1–2 asteen päähän 0 °C:sta, joten jäähditysvara ei ole paljoa. Jokiveden lämpötila saattaa olla jopa alle 0 °C eli alijäähtynyttä, jolloin se jäätyy välittömästi ollessa kosketuksessa kylmän pinnan kanssa. Virtauksen mukana voi kulkea jäähyhmää, joka voi tukkia laitteistoa.



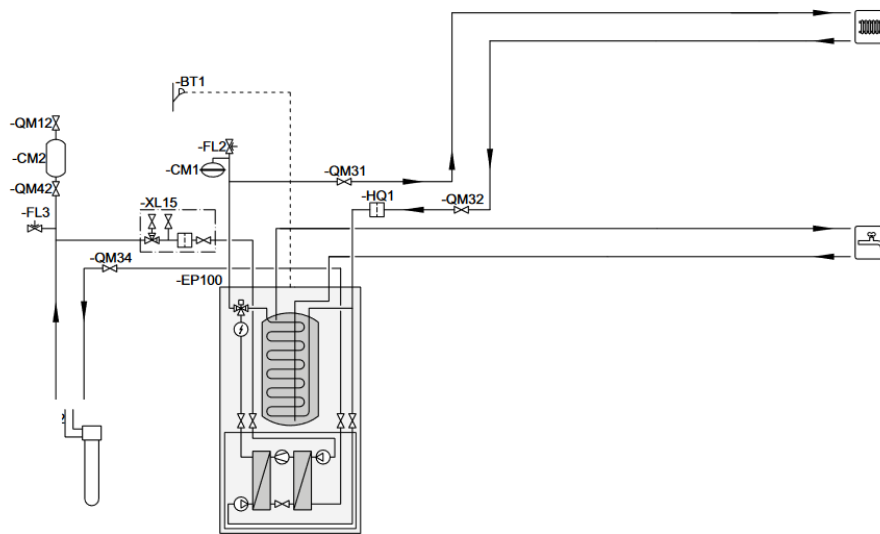
Kuva 15. Maalämmönkeruuputkisto vesistöissä.

Vesistöistä tapahtuva välillinen lämmöntuotto tapahtuu putkiston avulla. Pohjalle lasketaan muoviputki, jossa kierrätetään liuosta. Muoviputki ankkuroidaan vesistöjen pohjaan betonipainoilla, joiden paino on 5–10 kg. Painot kiinnitetään putkiin noin 3–5 metrin välein. Talvella pohjalla olevan veden lämpötila laskee lähelle 0 °C:sta, joten putken ympärille kertyy jäätä. Osa lämmöstä saadaan pohjasedimentistä, johon sitä kesäaikana varastoituu, ja lämpötila voi olla veden lämpötilaa korkeampi. Sallittu teho riippuu veden lämpötilasta ja virtauksista, ja on suunnilleen 40–50 W/m. Jos vedessä on virtauksia riittävästi, lämmönottoa ei rajoita lämpötilan lasku, kuten maaperässä. Tällöin putkisto voi olla lyhyempi. Putket voidaan sijoittaa tarkoituksella myös sedimenttiin, jolloin ne käyttäytyvät samalla tavalla kuin maaperässä, ja putkien ympärille kertyy jäätynyttä pohjainesta. Sedimentin sisältämä lämpö on peräisin kesällä lämpiävästä vedestä eli viime kädessä auringosta ja ulkoilmasta tulevasta lämmöstä. Sedimentistä otettavissa oleva lämpö on suunnilleen sama kuin maaperän vaakaputkistolla.

Putken ympärille kertyvän jään määrä tulee oikealla mitoituksella rajoittaa niin vähäiseksi, ettei jää nosta putkea ylös. Jos putkiston pituus on jostain syystä liian lyhyt, voidaan jäätymistä rajoittaa pienentämällä lämpöpumpun tehoa putkesta tulevan liuoksen lämpötilan laskiessa. [Aittomäki 2012: 353.]

### 5.3 Maalämpöpumpulaitoksen peruskytkentä

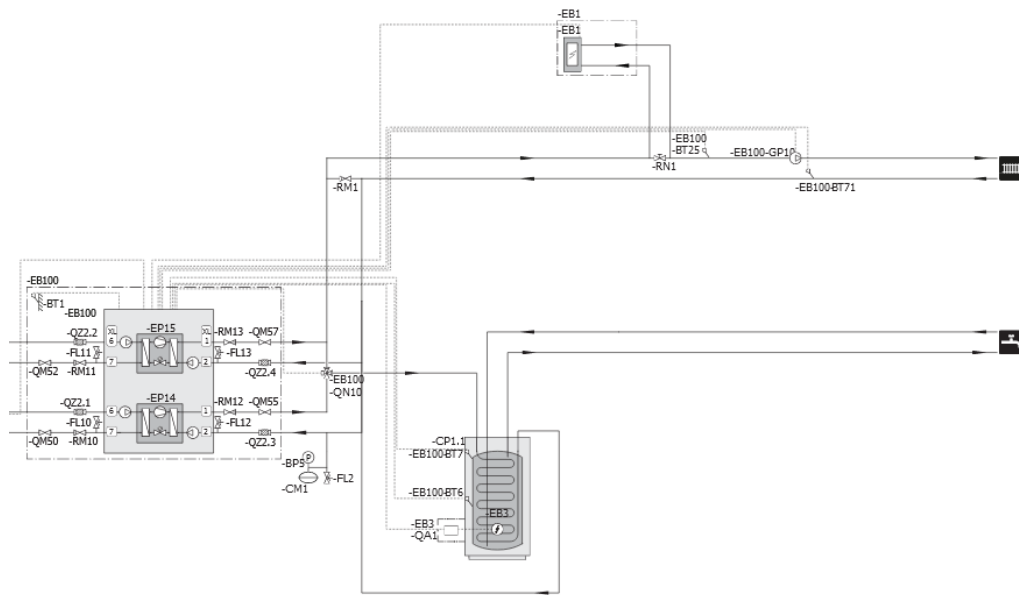
Kuvassa 16 on esitetty maalämpöpumpun peruskytkentä, jossa maalämpöpumppu on varustettu vaihtoventtiilillä, jonka avulla voidaan valmistaa lämmintä käyttövettä pumpun sisäiseen lämminvesivaraajaan. Kuvan 16 kaltaista kytkentää voidaan käyttää vain silloin, kun maalämpöpumpun kompressori on invertteriohjattu ja maalämpöpumppu ohjaa lämmitysverkoston virtaamaa. Lämmitysverkoston ja maalämpöpumpun virtaamien ollessa epäsymmetriset tulee maalämpöpumpun ja lämmitysverkoston väliin asentaa puskurivaraaja tasaamaan virtauksia. Tällöin puskurivaraajan jälkeen asennetaan erillinen shunttiipiiri lämmitysverkostolle.



Kuva 16. Maalämpöpumpun peruskytkentä [Nibe].

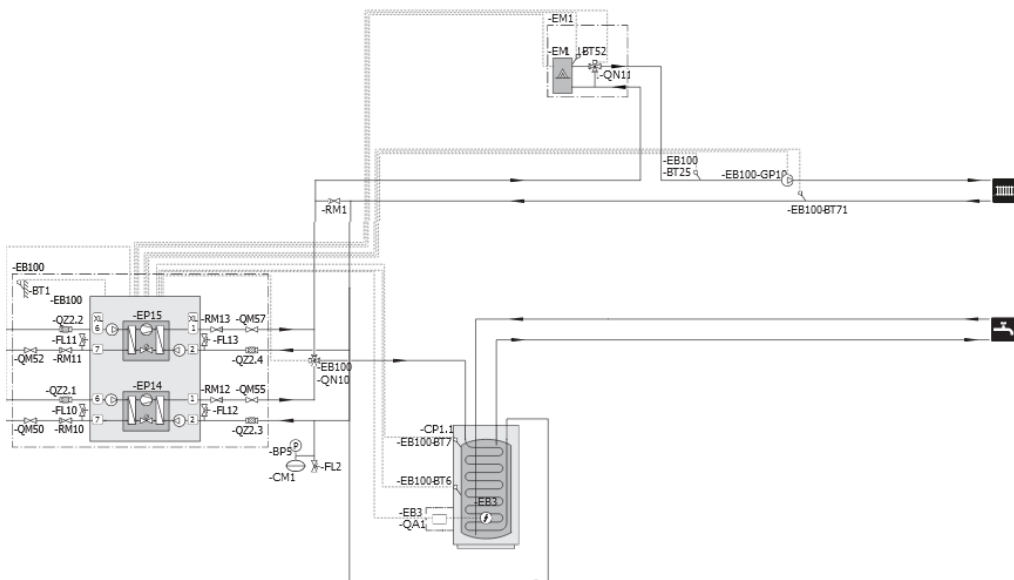
#### 5.4 Lisä- ja varalämpö (sähkö- ja öljykattila, kaukolämpö, kytkentäperiaate)

Lisälämmönlähde voidaan kytkeä maalämpöpumppujärjestelmään rinnan taikka sarjaan. Lämmitysjärjestelmään liitetty sähkökattila (kuva 17) kytketään usein suoraan sarjaan ilman erillistä shunttauskytkentää, sillä sähkökattilan tehoa voidaan ohjata portaittain. Useissa kattilamalleissa on 5–7 tehoporrasta. Lämminkäyttövesivaraaja varustetaan myös usein sähkövastuksilla. Näin pystytään varmistamaan lämpimän käyttöveden riittävän korkea lämpötila.



Kuva 17. Maalämpöjärjestelmä, jossa lisälämmönlähteenä sähkö [Nibe].

Öljykattila liitetään maalämpöjärjestelmään myös sarjakytkennällä, mutta öljykattilaan tulee lisätä shunttauskytkentä (kuva 18).



Kuva 18. Maalämpöjärjestelmä, jossa lisälämmönlähteenä öljykattila [Nibe].

Shunttauskytkentä mahdollistaa öljykattilalle sen optimaalisen toiminnan kannalta tärkeän korkeamman lämpötilan, mikä ehkäisee kondenssiveden muodostumisen kattilan tulipinnoille. Jos kondenssivettä pääsee syntymään kattilan tulipinnoille, aiheuttaa se kattilassa korroosiota ja lyhentää kattilan käyttöikä. Kattilan suunniteltua alhaisemmassa lämpötilassa polttoaine ei pala täydellisesti, mikä voi aiheuttaa nokea ja likaa kattilan sisällä. Tämä voi heikentää kattilan tehokkuutta ja vaatia useammin huoltoa. Perinteisen öljykattilan kattilaveden lämpötila tulisikin olla vähintään 70 °C.

Kaukolämpö soveltuu teknisesti erinomaisesti lisälämmönlähteeksi maalämpöpumpun kanssa, mutta kaukolämpöyhtiöiden vaatimukset kaukolämpöveden jäähtymälle sekä kaukolämmön hinnoittelu tekee siitä haastavan lisälämmönlähteen.

Kaukolämmön tuotannon taloudellisesti tehokkain osa-alue on peruslämmön tuottaminen. Tämä tapahtuu yleensä joko kiinteää polttoainetta käyttävällä kattilalla (KPA) tai vielä taloudellisemmin ja tehokkaammin CHP-laitoksella, joka tarjoaa korkeamman hyötysuhteen. Huippulämmön tuotanto hoidetaan erillisillä kattiloilla, kuten maakaasu-, kevytöljy- tai pellettilämmittimillä. Nämä huippulämpölaitokset toimivat yleensä varalla, ja niiden käyttöä pyritään rajoittamaan, sillä niiden käyttö voi olla taloudellisesti vähätuottoista tai jopa tappiollista.

Hybridikytkennässä kaukolämpöä tarvitaan vain vuoden kylmimpinä aikoina, jolloin kaukolämpöyhtiöt saattavat joutua tuottamaan kaukolämpöenergian kalliimmilla energiamuodoilla. Siksi jotkut kaukolämpöyhtiöt ovat ottaneet käyttöön hybriditarffi-hinnoittelun, jos rakennuksen pääasiallinen lämmönlähde on jokin muu kuin kaukolämpö. Hybriditariffi on selvästi kalliimpaa kuin kaukolämmön normaali kulutusmaksu.

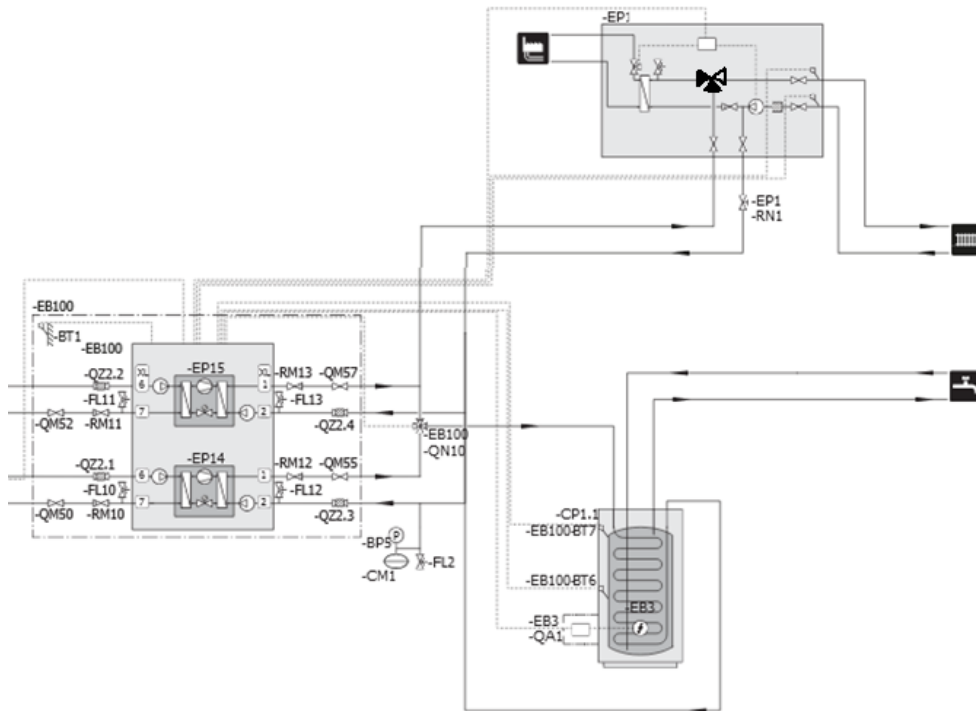
Vaikka paikkakunnalla ei olisikaan hybriditariffi-hinnoittelua, peritään kaukolämmöstä aina kuukausimaksu, esimerkiksi kaukolämpöä huipputehona käyttävä

kaukolämpöasiakas maksaa kesäkuukausina kuukausimaksun, vaikka ei käyttäisi energiaa laisinkaan. Kaukolämpöliittymän kiinteiden kustannusten vuoksi tulee hybridilämmityksestä herkästi taloudellisesti kannattamaton.

Kaukolämmön riittävän jäähtymän takaamiseksi K1/2021:ssä on julkaistu ”Rakennuksen kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet” -dokumentin, jossa on esitetty mallikytkentöjä ja määräyksiä hybridikytekennän toteuttamiseksi. Tämän lisäksi kaukolämpöyhtiöt ovat laatineen omia ohjeistuksiaan kaukolämmön liittämiseksi maalämmön pariin.

Maalämpöpumpun kanalta tehokkainta olisi kytkeä maalämpöpumppu sarjaan kaukolämmön kanssa ennen kaukolämmönvaihdinta, jolloin maalämpöpumpulle tulee lämmitysverkostosta haalea paluuvesi, ja kaukolämmöllä tuotettaisiin vain se osa lämpöenergiasta, mihin maalämpöpumppu ei kykene. Tämän kaltainen kytkentä heikentäisi kaukolämmön ensiöpuolen jäähtymää, ja siksi useimmat kaukolämpöyhtiöt kieltävät sen käytön.

Kuvassa 19 on esitetty kytkentätapa, jossa maalämpöpumppu on kytketty kaukolämmön kanssa rinnan 3-tieventtiiliä hyödyntäen.



Kuva 19. Maalämpöjärjestelmä, jossa lisälämmönlähteenä kaukolämpö [Nibe, muokannut tekijä].

Tämänkaltaisen kytkennän useat kaukolämpöyhtiöt hyväksyvät. Toinen hyväksytty tapa on käyttää 3-tieventtiilin sijaan lämmönsiirrintä, mutta silloin maalämpöpumpun energiatehokkuutta heikentää siirtimen asteisuus.

## 6 Lämmitystehon tarpeen laskenta öljynkulutuksesta

Yleisesti lämmitysjärjestelmät suunnitellaan noudattaen ympäristöministeriön 1010/2017-asetusta, joka perustuu säävyöhykkeisiin ja niiden mitoittavaan ulkolämpötilaan. Rakennuksen lämmitystehon tarve lasketaan yleensä tilakohtaisesti, jotta voidaan määrittää tarvittava lämmitysteho ja valita sopivat lämmityslaitteet kullekin tilalle. Rakennuksen lämmitystehon tarve riippuu pääasiassa rakenteiden lämmönjohtumishäviöistä, ilmavuodoista ja ilmanvaihdosta. Paikkakunnan mitoittava ulkoilman lämpötila määrittelee lämmitystehon tarpeen tilalämmitykselle, ilmanvaihdolle ja muille järjestelmille. Jokaiselle järjestelmälle määritellään erilliset huipputehon tarpeet, jotka sitten lasketaan yhteen.

Auringon säteilylämpöä ei huomioida lämmitystehon laskennassa. Sisäiset lämmönlähteet vaikuttavat tehon tarpeeseen vain silloin, kun ne ovat merkittäviä ja jatkuvia. [Ympäristöministeriö 2017a.]

Tilakohtaisesti suoritettu laskenta kiinteistön lämmitystehon huipputarpeen selvittämiseksi on varsin aikaa vievää ja kyseistä tapaa käytetäänkin usein uusien rakennettavien rakennusten lämmitysjärjestelmää mitoittaessa. Vanhoista rakennuksista ei ole aina saatavilla luotettavaa tietoa esimerkiksi rakenteiden U-arvoista ja muista laskennan pohjalle tarvittavista lähtöarvoista. Huipputehon tarvetta laskettaessa voidaankin käyttää todennettua vuotuista öljynkulutusta, jolloin saadaan lämmitysjärjestelmän huipputeho selvitettyä nopeasti ja luotettavasti.

Lämmitysenergian tarve saadaan öljynkulutuksesta kaavalla 2.

$$Q = V \times q \times h \quad (2)$$

Q	on lämmitysenergian tarve (kWh)
V	on Öljyn kulutus vuodessa (dm <sup>3</sup> )
q	on polttoöljyn lämpöarvo (kWh/dm <sup>3</sup> )
h	on Öljykattilan hyötysuhde.

Huipputehon tarve saadaan laskettua vuotuisesta öljynkulutuksesta kaavalla 3.

$$\Phi_{mit} = \frac{\Phi_l}{H} = \frac{\Phi - \Phi_{kv}}{24 \cdot S / 17^\circ C - t_u} + \frac{(\Phi - \Phi_{kv}) \cdot 17^\circ C - t_u}{24 \cdot S} \quad (3)$$

$\Phi_{mit}$	on lämmityksen huipputehon tarve eli mitoitus-teho (MW)
H	on $24 \times S / (17^\circ C - t_u)$ = lämmityshuipun käyttöaika tarkasteluaikana (h)
S	on lämmitystarveluku tarkasteluaikana (°Cd)
$t_u$	on paikkakunnan mitoitusulkolämpötila (°C)
$\Phi$	on energiankulutus tarkasteluaikana (MWh)
$\Phi_{kv}$	on käyttöveden lämmittämiseen kulunut lämmitysener-gia tarkasteluaikana (kiinteä kulutus) (MWh)
$\Phi_l$	on lämmittämiseen kulunut energia tarkasteluaikana (MWh).



Esimerkiksi öljyn vuosikulutuksen ollessa 46,1 m<sup>3</sup>, Öljyn lämpöarvo 10 MWh/m<sup>3</sup> ja Öljykattilan hyötysuhde 0,8 saadaan sijoittamalla nämä kaavaan 2 lämmitysenergian tarpeeksi 369 000 kWh/v.

Viemällä saatu arvo kaavaan 3 ja käyttämällä mitoittavaa ulkolämpötilaa -26 °C, lämmitystarvelukuna 2161 h saadaan huipputehon tarpeeksi 171 kW.

## 7 Vesivaraajat

Vesivaraajat voidaan jaotella karkeasti kolmeen eri ryhmään: lämminvesivaraaja, puskurivaraaja ja hybridivaraaja. Varaajat ovat kaikki lämmön varastointilaitteita, ja ne poikkeavat toisistaan mm. rakenteen ja käyttötarkoituksen mukaan.

### 7.1 Lämminvesivaraaja

Lämminvesivaraaja (kuva 20) on laite, joka säilyttää ja pitää lämpimänä tietyn määrän käyttövettä. Sen tarkoitus on tarjota lämmintä vettä tarvittaessa esimerkiksi suihkussa käyntiin tai tiskaamiseen.

Lämminvesivaraajan toiminta perustuu varaajassa olevan veden lämmittämiseen esimerkiksi sähkövastuksella tai kiertämällä vettä lämmönvaihtimessa. Lämminvesivaraaja varastoi suuren määrän lämmintä vettä, jotta se voi vastata kysyntään silloin, kun lämpimän veden käyttö on huipussaan, kuten aamuisin tai iltaisin. Tämä välttää tarpeen mitoittaa koko lämmitysjärjestelmä huippukulutushetkien mukaan. Lämpöpumppua ei esimerkiksi kannata mitoittaa lämpimän käyttöveden kulutushuipun mukaan.



Kuva 20. Erikokoisia lämminvesivaraajia [Jäspi].

Lämminvesivaraajia on erilaisia kokoja ja malleja, jotka sopivat erilaisiin käyttötarpeisiin.

## 7.2 Puskurivaraaja

Puskurivaraaja (kuva 21) on lämmön varastointilaite, joka säilyttää lämpöenergiaa ja vapauttaa sen tarvittaessa. Sen tarkoitus on tasoittaa lämmöntuotantoa ja -kulutusta siten, että lämpöenergiaa tuotetaan silloin, kun sitä on saatavilla ja kulutetaan, kun sitä tarvitaan.

Puskurivaraaja liitetään yleensä lämmitysjärjestelmään, jossa se vastaanottaa lämpöä esimerkiksi aurinkokeräimiltä, lämpöpumpulta tai muilta vesikiertoiseen järjestelmään soveltuvilta lämmönlähteiltä. Kun lämpöenergiaa ei tarvita heti, se varastoidaan puskurivaraajaan, jossa lämpöenergia pysyy hyvin, koska hyvin eristetyn puskurivaraajan lämpöhäviöt ovat pienet.



Kuva 21. Puskurivaraaja [Jäspi].

Kun lämpöä tarvitaan, puskurivaraajasta pumpataan vettä lämmitysjärjestelmään, jolloin lämpö siirtyy kiinteistön lämmitykseen. Samoin käyttövesi usein esilämmitetään puskurivaraajassa olevissa kierukoissa. Tämä mahdollistaa lämmityksen käytön ympäristöystävällisellä ja taloudellisella tavalla, koska puskurivaraaja auttaa hyödyntämään lämpöenergiaa tehokkaasti ja vähentää lämmitysjärjestelmän toimintakustannuksia.

Lämpöpumppujärjestelmissä puskurivaraajia käytetään takamaan lämpöpumpuille riittävän pitkät käyntijaksot ja varmistamaan, että lauhduttimen läpi saadaan johdettua riittävä virtaus kulloisessakin tilanteessa. Maalämpöpumpun ja lämmitysverkoston virtaamien ollessa toisistaan poikkeavia ei järjestelmä voisi toimia ilman puskurivaraajaa.

### 7.3 Hybridivaraaja

Hybridivaraaja on lämminvesivaraaja (kuva 22), joka yhdistää useita erilaisia lämmönlähteitä lämmityksen optimoimiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi. Sen tarkoitus on tarjota joustava ja tehokas lämmitysratkaisu, joka hyödyntää eri lämmönlähteitä optimaalisesti.

Hybridivaraajassa voi olla esimerkiksi sisäänrakennettu sähkövastus, mutta sen lisäksi se voi hyödyntää esimerkiksi aurinkokeräintä, lämpöpumppua tai varaavaa takkaa. Lämmönlähteiden yhdistäminen mahdollistaa sen, että varaajan sisältämä vesi lämmitetään mahdollisimman vähäisellä energiankulutuksella.



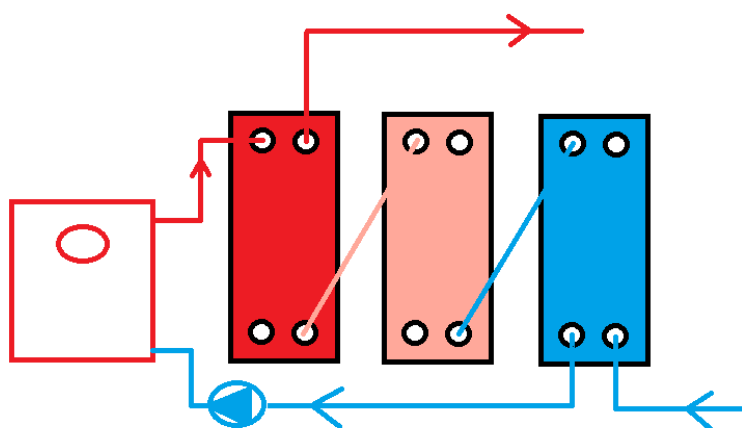
Kuva 22. Hybridivaraaja [Jäspi].

Hybridivaraaja liitettynä älykkääseen ohjausjärjestelmään mahdollistaa käytettävän lämmönlähteen valitsemisen sen mukaan, mikä on kulloinkin tehokkainta. Esimerkiksi aurinkokeräin voi olla ensisijainen lämmönlähde päiväsaikaan, kun taas yöllä maalämpöpumppu, sähkövastus tai varaava takka voivat hoitaa lämmityksen.

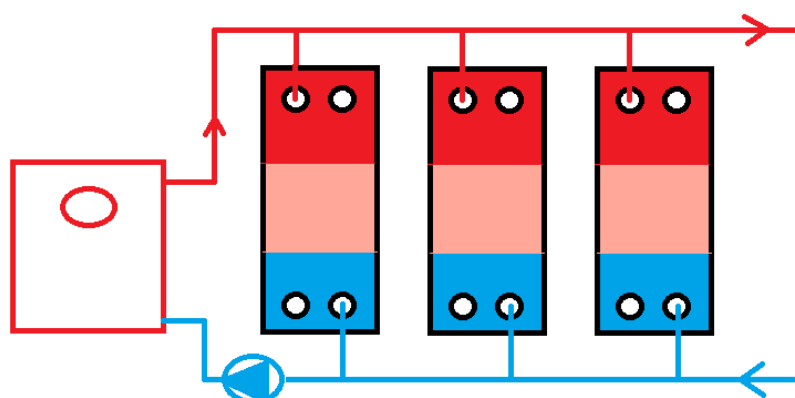
Hybridivaraajan tarkoitus on siis tarjota lämmitysratkaisu, joka on sekä energiatehokas että joustava. Tämä mahdollistaa merkittävien säästöjen tekemisen lämmityskustannuksissa.

## 7.4 Kytkevävaihtoehtoja

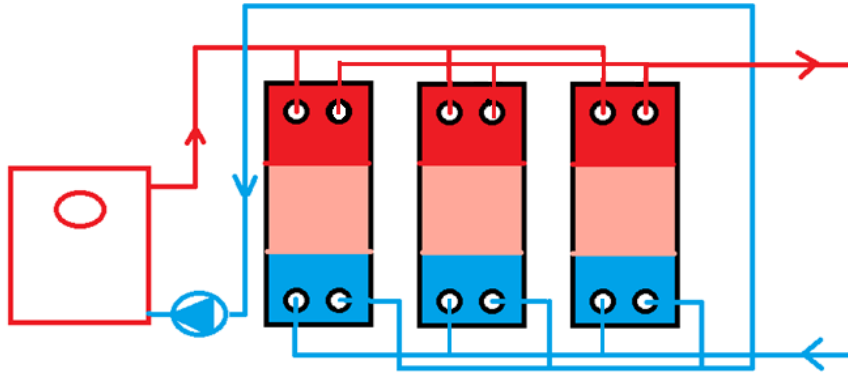
Vesivaraajat voidaan kytkeä keskenään käyttäen joko sarja- tai rinnankytkentäperiaatetta, sekä niiden eri variaatioilla, joita ovat esim. kaksi-, kolmi- ja neliputkikytkennät. Kytkeväperiaatteet ovat esitettynä kuvissa 23–25. Rinnankytkennän yksi sovellus eri LVI-järjestelmissä on Tichelmann-kytkentä, jota sanotaan käännetyn paluun kytkennäksi (kuva 25). Siinä kytkennässä järjestelmän jokaisen varaajan kautta kulkevan virtausreitit painehäviö on luonnostaan lähes sama. Kuvissa on esitetty värein lämpötilan periaatteellinen jakautuminen eri kytkennöissä.



Kuva 23. Puskurivaraajan sarjakytkentä.



Kuva 24. Puskurivaraajan rinnankytkentä.



Kuva 25. Puskurivaraajan Tichelmann-kytkentä.

Käytettävä kytkentä valitaan siihen liitetyn laitteiston ja tavoitellun edun mukaan. Puskurivaraajan sarjakytkentä etuja ovat mm. korkeampi lämpötila ja kylmempi paluulämpötila lämmönlähteelle. Jos lämmönlähteen ja verkoston virtaama on kovasti epäsymmetrinen, ei edellä esitetty välttämättä päde. Haittoina sarjaan kytkennässä on mm. suurempi kitkapainehäviö. Käytettäessä sarjankytkentää lämminvesivaraajissa ei niihin muodostu kerrostumaa, vaan varaajat ovat täynnä saman lämpöistä vettä. Rinnankytkennässä jokaisessa varaajassa on sama lämpötila ja sarjakytkentää pienempi kitkapainehäviö. Jos laitteistossa käytetään kierukoita, on rinnankytkentä parempi vaihtoehto.

## 7.5 Puskurivaraajan mitoitus

Lyhyet käynti- ja lepojaksot voivat aiheuttaa lämpöpumpun kompressorin vioittumisen, koska kompressorin tulee jäähtyä riittävästi ennen seuraavaa käynnistystä. Kompressorin jäähtyminen tapahtuu kylmäaineen kaasuvirran avulla, ja jos lepojakso on liian lyhyt, kompressorille ei jää tarpeeksi aikaa jäähtymykseen. Tämä voi johtaa kompressorin yllämpenemiseen ja ennenaikaiseen vaurioitumiseen.

Sekä Scroll- että mäntäkompressorille suositellaan enintään 12:tä käynnistystä tunnissa. Käyntijakson pituus on minimissään kaksi minuuttia, jotta moottori

jäähtyy riittävästi käynnistyksen jälkeen. Seisontajakso on vähintään kolme minuuttia, jotta moottori jäähtyy riittävästi ennen seuraavaa käynnistystä. Lisäksi maalämpöpumpputoimittajilla on omat suosituksensa käynti- ja lepojaksoiden pituudelle, jotka ovat yleensä 5–10 minuuttia ja 10–20 minuuttia. [Kaapola 2022.]

Käyntijaksoiden riittävä pituus on tärkeää myös järjestelmän energiatehokkuuden kannalta, sillä kylmäaineprosessin käynnistysvaihe kuluttaa enemmän sähköä kuin tasainen käyntijakso. Kompressorin elinkaaren pituus on noin 60 000–80 000 käyttötuntia tai 300 000 käynnistyskertaa. Käynnistysvälin ollessa maltillinen on laboratoriokokeissa päästy jopa 500 000 käynnistykseen. Ohjeellinen kompressorin vuotuinen käyttöaika on 2 000–4 000 tuntia, riippuen lämpöpumpun mitoituksesta täysiteholle tai osateholle sekä ohjaustavasta, nopeusohjattu eli invertteri tai perinteinen päälle/pois periaatteella. Nopeusohjattu kompressoripystyy jatkuvasti mukauttamaan toimintansa todellisen lämmöntarpeeseen, kiihdyttämällä tai hidastamalla kompressorin nopeutta. [Kaapola 2022.]

Puskurivaraajan tilavuus voidaan laskea kaavalla 4.

$$V = \frac{T\phi}{(c\Delta T)} / r \quad (4)$$

$V$	on varaajan tilavuus (dm <sup>3</sup> )
$T$	on lämpöpumpun lyhyimmän sallitun käyntijakson aika (s)
$\phi$	on lämpöpumpun teho (kW)
$c$	on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 (kJ/kg K)
$\Delta T$	on lämpötila ero varaajassa (K)
$r$	on veden tiheys (kg/dm <sup>3</sup> ).

Laskentaesimerkki:

Lämpöpumppu mitoitetaan usein niin, että vesi lämpenee virratessaan lauhduttimen läpi 5 astetta. Oletetaan, että lämpöpumppujen teho on 40 kW. Halutaan, että kompressorin käyntijakso on vähintään 5 minuuttia, kun vesi säiliössä lämpenee 5 astetta. Kuinka paljon vettä pitää vähintään olla säiliössä?

Säiliössä tai jatkuvasti lauhduttimen läpi virtaavassa putkistossa, tai näiden yhdistelmässä, pitää olla vettä vähintään

$$\frac{5 * 60s * 40kJ/s}{4,2 \frac{kJ}{kg} K * 5K} = 571 kg \sim dm^3$$

## 7.6 Käyttövesivaraajan mitoitus

Lämpöpumppujärjestelmällä tuotetun huippulämmön määrä on yleensä pienempi kuin perinteisillä lämmöntuotantojärjestelmillä, joten lämmintä vettä on varastoitava kulutuspiikkien varalle. Lämminvesivaraajan koko määräytyy lämpimän käyttöveden tarpeen mukaan, ja sen on oltava riittävän suuri, jotta lämmintä käyttövettä riittää jatkuvasti. Lämminvesivaraajissa on yleensä myös lisälämmönlähde, kuten sähkövastus, jolla voidaan tarvittaessa nostaa veden lämpötilaa. Lämpimän käyttöveden lämpötilan on oltava vähintään 55 °C. Jos kohteessa on lämpimän käyttöveden kiertojohto, lämmityslaitteistolta lähtevän veden lämpötilan tulisi olla vähintään 58 °C, jotta veden lämpötila ei laske alle rakennusmääräyksissä asetetun 55 °C:n. [Ympäristöministeriö 2017b.]

Veden kulutuksen arviointiin voi käyttää taulukossa 3 esitettyjä arvoja.



Taulukko 3. Veden kulutuslukuja ja kulutusjakauma asuintaloissa [LVI kalenteri 2023].

Toimenpide	Kulutus (dm <sup>3</sup> /krt)	Kulutus (dm <sup>3</sup> /krt)
Peseytyminen		
- Suihku		60–90
- Ammekylpy		250–300
WC:n huuhtelu		4/6/9
Ruoanlaitto ja astioiden pesu		2–6
- Pesukone		15–20
- Käsinpesu, altaassa		30–60
- Käsinpesu, juoksevalla vedellä		80–120
Vaatteiden pesu		35–65 dm <sup>3</sup> /kg
Auton pesu		150–200

Kuten taulukosta 3 havaitaan, muodostaa peseytyminen suurimman osan veden kulutuksesta. Koulukiinteistön ollessa kyseessä voidaan kulutushuipun ajatella muodostuvan siitä, että liikuntatapahtuma on päättynyt ja kaikki menevät kerralla suihkuun ja tämän lisäksi muutama muu vesipiste koulussa on käytössä.

Esimerkkikoulussa on liikuntasalin yhteydessä 18 suihkua. Kun mukaan lasketaan muutama muu vesipiste, voidaan ajatella suihkuja olevan 23 kpl. Taulukon 3 mukaan voidaan olettaa suihkussa käynnin kuluttavan vettä 90 dm<sup>3</sup> suihkussa kävijää kohti, eli yhteensä lämmintä vettä kuluu 2 070 dm<sup>3</sup>. Huippukulutuksen ajatellaan kestävän 30 minuuttia.

Suihkusta tuleva 38 °C:inen vesi tuotetaan sekoittamalla lämminvesivaraajasta saatavaan 58 °C:iseen veteen vesijohtoverkon 5 °C:ista vettä. Tällöin 58 °C:isen veden määrä saadaan laskettua kaavalla 5.

$$V = \frac{2070 \text{ dm}^3 \cdot (38 - 5)^\circ\text{C}}{(58 - 5)^\circ\text{C}} = 1298 \text{ dm}^3 \quad (5)$$

Mikäli lämminvesivaraajan vesi on viileämpää, tarvitaan sitä enemmän. Laskeetaan lämpöpumpun tuottama lämmin käyttövesi 30 minuutin aikana.

$$V_{pumppu} = T_{pumppu} \Phi / c \Delta T \quad (6)$$

$V_{pumppu}$	on lämpöpumpun tuottaman lämpimän veden tilavuus (dm)
$T_{pumppu}$	on lämpöpumpun käyntiaika, jonka se lämmittää käyttövettä (s)
$\Phi$	on lämpöpumpun teho (kW)
$c$	on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 (kJ/kg K)
$\Delta T$	on kylmän ja tuotettavan lämpimän veden lämpötilaero, (K).

Oletetaan, että rakennus on varustettu vaihtuvalauhdutteisella maalämpöpumpulla, joka pystyy tuottamaan lämpöä 40 kW:n teholla vuorotellen sekä lämmitysverkostoon että käyttöveteen. Lämpöpumppu tuottaa lämmintä vettä puolen tunnin aikana seuraavasti:

$$40 \text{ kJ/s} * 0,5 * 3600 \text{ s} / (53 \text{ K} * 4,2 \text{ kJ/kg K}) = 323 \text{ kg} \sim \text{dm}^3$$

Tällöin varaajassa pitää olla lämmintä 58°C:ista vettä:

$$1298 \text{ dm}^3 - 323 \text{ dm}^3 = 975 \text{ dm}^3$$

Jos varaajassa oleva vesi on viileämpää tai lämpötilakerrostuma sekoittuu, tarvitaan varaajakapasiteettia enemmän. Esilämmittämällä kylmää käyttövettä puskurivaraajassa voidaan parantaa lämpimän käyttöveden tuottoa. Esilämmitys pienentää kylmän ja tuotettavan lämpimän veden lämpötilaeroa, jolloin samalla lämpöpumpputeholla tuotettavan lämpimän veden määrä kasvaa.

Lämpimän veden riittävyyden varmistamiseksi varustaisin esimerkkilaskennan kohteen kahdella 750 litran lämminvesivaraajalla. [Kaapola 2022.]

## 8 Hybridilämmitysjärjestelmän mitoitus

Maalämpöjärjestelmän kokonaistalous muodostuu lämpöpumpun tuottaman lämmön ja lisälämmön yhteissummasta. On tärkeää tarkastella järjestelmää kokonaisuutena ottamalla huomioon myös lisälämpö, sillä kallis lisälämpö voi syödä lämpöpumppuinvestoinnin säästöt. Lisälämpöä valittaessa on kiinnitettävä huomiota energian lisäksi myös tehon hintaan. [Kauppila 2021.]

Maalämpöjärjestelmissä mitoitusaste on noussut korkeaksi, mikä tarkoittaa, että lisälämmön osuus on usein hyvin pieni. Tällöin energian hinnalla on vähäinen merkitys, mutta lisälämmöllä tuotettavan huipputehon myötä tehon hinnan merkitys on suuri. [Kauppila 2021.]

Investoinniltaan kalliin maalämpölaitoksen tehoa on järkevää optimoida niin, että saavutetaan pääoma- ja käyttökustannusten elinkaariminimi. Optimointi johtaa nykyisin usein maalämpölaitoksissa erittäin korkeisiin, jopa 95–100 %:n energiankattavuuteen, kun energian ja tehon hinnat nousevat ja lämpöpumpputekniikan ominaishinta laskee. Optimoinnissa kannattaa ottaa huomioon myös tulevaisuuden näkymät, kuten mahdolliset energianhintojen nousut, jotka voivat johtaa korkeampaan mitoitukseen. [Kauppila 2021.]

Maalämpöjärjestelmän optimaalisella mitoisteholla saavutetaan järjestelmän mitoitusoptimi, jolloin pääoma- ja käyttökustannukset ovat mahdollisimman pienet. Optimiin vaikuttavat muun muassa lisäenergian hinta ja hintarakenteet. Järjestelmän kokonaiskustannuksiin vaikuttavat esimerkiksi tehomaksujen laskutusperuste, maalämpöjärjestelmän ominaisinvestointi euroa kilowattia kohden sisältäen lämmönlähteen, lämpökuorman profiili ja pysyvyys, jäähdytyskuorma, jäähdytystehon hinta, pääoman hinta ja investointituet. [Kauppila 2021.]

Lämpöpumppujärjestelmän suunnittelussa ja tarkastelussa on otettava huomioon kokonaisuus, mukaan lukien lisä- ja varalämmön tuotanto. Osatehomitoitussa järjestelmässä tarvitaan aina lisälämpöä, jotta saavutetaan tarvittava mitoisteho. Lämpöpumppujärjestelmissä on hyvä varautua mahdollisiin häiriötilanteisiin varalämmönlähteen avulla. [Kaapola 2020].

Kriittinen osa maalämpöpumpun toiminnassa on kompressori. Suuremmissa kohteissa voi olla hyödyllistä suunnitella maalämpöjärjestelmä, joka sisältää useita pieniä lämpöpumpppuyksiköitä kompressoreineen tai yhden suuremman lämpöpumpun, joka toimii esimerkiksi kahdella kompressorilla. Tällä tavoin voidaan taata, että yhden kompressorin rikkoutuessa muut jatkavat toimintaa lisäten järjestelmän toimintavarmuutta ja pienentäen varalämmönlähteen mitoitusastetta. [Kaapola 2020].

Mahdollisia vara- ja lisälämmön tuotantotapoja on useita, joista suosituimpia ovat sähkö ja öljy. Talvella lisälämmöllä on pystyttävä tuottamaan korkeampaa lämpötilaa kuin lämpöpumpulla, jotta se voi täydentää lämpöpumpun lämpöä tarvittaessa. [Kauppila 2021.]

Öljy on tähän asti ollut kokonaisuudessaan paras ja taloudellisin lisälämpömuoto suurissa kohteissa, joissa vanhoja öljylaitoksia voidaan hyödyntää tai uusia öljykattiloita asentaa. Lisälämmönkulutus on yleensä pieni, joten säiliöt voivat olla suhteellisen pieniä. Tulevaisuudessa fossiilinen öljy voidaan korvata uusiutuvilla nestemäisillä polttoaineilla, jolloin myös päästöjä voidaan vähentää. [Kauppila 2021.]

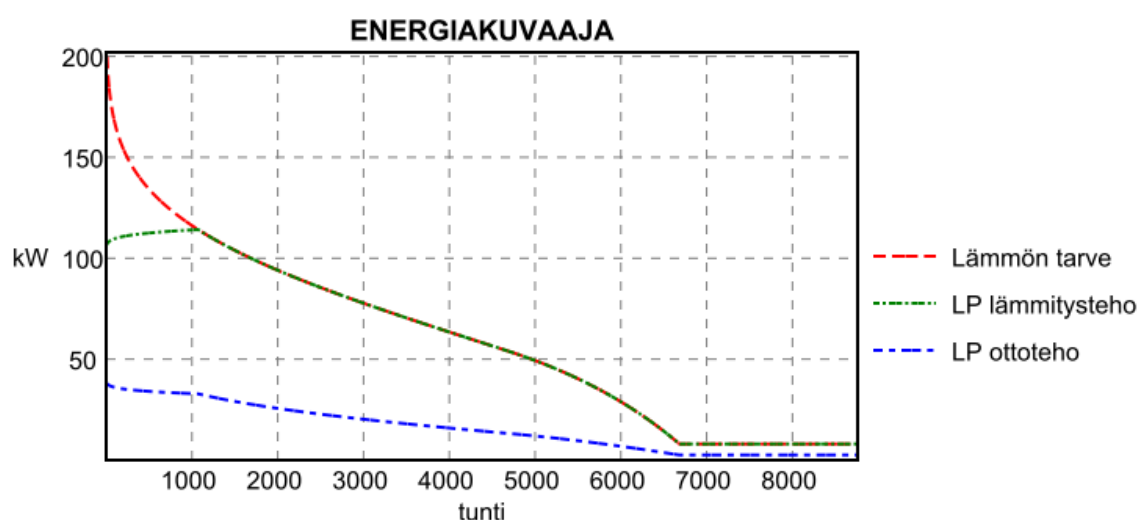
Sähkö on myös suosittu lisälämmönlähde, koska se on hankintakustannuksiltaan edullinen ja helppokäyttöinen. Suuremmissa kohteissa, joissa tarvitaan enemmän tehoa, suositellaan erillistä sähkökattilaa, jossa on portaittainen säätö ja tehonrajoitusautomaattikka. Sähkökattila kannattaa varustaa sisäisellä ulkolämpötilan ohjauksella, jotta sähkötehonkulutus voidaan optimoida tarpeen mukaisesti. Sähkölämmityksen haasteena ovat tehomaksujen hintataso ja vaihtelevat laskutusperusteet. [Kauppila 2021.]

Useasti isoissa kohteissa, joissa halutaan eron kokonaan fossiilisista energiamuodoista, joudutaan suurentamaan sähköliittymän kokoa sekä vaihtamaan tonttikaapeli suuremmaksi. Tyypillinen tällainen kohde on öljylämmitteinen suuri

koulu- tai virastorakennus, johon asennetaan maalämpöjärjestelmä sähkökattilalla. Investointimielessä edullisempaa on jättää öljylämmitys vara- ja huipputehon lähteeksi, varsinkin jos öljylämmitysjärjestelmä on toimintakuntoinen.

Muutettaessa kiinteistö täysin pois fossiilisesta energiamuodosta on mahdollista hakea energia-avustuksia, mikä helpottaa näiden muutosten investointikustannuksia.

Osateholle 60–80% (kuva 26) huipputehon tarpeesta mitoitettu lämpöpumppu tuottaa noin 95 % vuotuisesta lämpöenergiasta [Motiva 2012]. Tätä kirjoittaessa kyseinen mitoitus on usein osoittautunut investointikustannuksiltaan optimaaliseksi ratkaisuksi.



Kuva 26. 95 % vuotuisesta lämpöenergiasta kattava maalämpöpumpun energiakuvaaja.

## 9 Vapaajäähdytys maaputkistoa hyödyntäen

Energiakaivoja voidaan hyödyntää myös jäähdytykseen, mikä on jopa suositeltavaa, koska jäähdytyslämpö edistää maaperän lämpötilan palautumista ja mahdollistaa energiakentän pitkäaikaisen hyödyntämisen, eli maaperän lämpötase tasapainottuu.

Vapaajäähdytys perustuu maaperän ympärivuotiseen, suhteellisen alhaiseen pysyvään lämpötilaan. Vapaajäähdytys toteutetaan asentamalla maaperään putkisto, jossa kiertää jäähdytettävä liuos. Putkisto voidaan sijoittaa joko vaakatasoon maan pinnan alle tai porata pystysuuntainen kaivo, johon putket sijoitetaan. Vapaajäähdytys maaputkiston avulla sopii erityisen hyvin yhdistettäväksi maalämpöpumpun kanssa, koska samaa liuosputkistoa voidaan hyödyntää sekä lämmitys- että jäähdytystarkoituksiin.

Jäähdytyskäytössä on otettava kuitenkin huomioon muutamia asioita. Energiakaivojen keskisyvyydellä olevan maaperän tasapainolämpötila on Etelä-Suomessa noin 8 °C, johon varsinkin uusien energiakaivojen tila palautuu melko pian talven jälkeen. Esimerkiksi, kun jäähdytysteho on noin 20–30 W/m, jäähdytystehon siirto energiakaivosta edellyttää noin 10 K:n lämpötilaeroa, jolloin liuoksen keskilämpötila nousee nopeasti lähelle +20 °C ja ylikin kuormituksen jatkuessa.

Normaalit ilmastoinnin jäähdytyslaitteet tarvitsevat toimiakseen 10–15 °C vettä. Rakennuksen jäähdytysverkosto erotetaan tavallisesti maaliuospiiristä lämmönsiirtimellä, jossa menetetään usein noin 1–2 K:n lämpötilaero näiden kahden verkoston välillä. Tämä tarkoittaa, että vapaajäähdytyskäytössä energiakaivojen tehosaanto jää yleensä pieneksi, ja suoraa jäähdytystehoa on saatavissa 10–20 W/m riippuen muun muassa energiakentän kuormitushistoriasta.

Tämän vuoksi energiakaivoja hyödynnetään usein konejäähdytyksen kautta johdettamalla konejäähdytyksessä syntynyttä lauhdelämpöä energiakaivoihin. Käytävissä oleva lämpötilaero liuoksen ja maaperän tasapainolämpötilan välillä voi nousta tasolle 20–30 K, jolloin energiakaivojen lämmönsiirtoteho kasvaa vastaavasti.

Suunniteltaessa energiakenttä lauhdelämpökäyttöön tulee rakenteissa ottaa huomioon muun muassa suurten lämpötilaerojen aiheuttamat lämpöliikkeet ja jännitykset muoviputkistossa. Polyeteenimuovin lämpölaajeneminen on jopa 15-

kertainen teräsputkeen verrattuna, ja suurten runkoputkien aiheuttama lämpöjännitys voi olla useita kymmeniä kilonewtoneita. [Sandberg 2014: 277.]

Jos vapaajäähdytyksen tuottoyksikön muodostavat maaputkisto, siihen yhdistetty lämmönsiirrin, jolla kylmä siirretään esim. tuloilmaan, sekä liuoksen kierrätyspumppu, voidaan jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin laskea kaavalla 7.

$$\varepsilon_E = \frac{\varphi_{tu}}{P_{tu}} \quad (7)$$

$\varepsilon_E$	on jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin
$\varphi_{tu}$	on maapiiristä saatava kylmäteho (W)
$P_{tu}$	on liuoksen pumppaukseen käytettävä sähköteho (W).

Maaperässä olevasta putkistosta saatava kylmäteho lasketaan kaavalla 8.

$$\varphi_{tu} = q L (T_{lk} - T_{maa}) \quad (8)$$

$q$	on liuosputkiston kohduktanssi pituusyksikköä kohden (W/mK)
$L$	on liuosputkiston kokonaispituus (m)
$T_{lk}$	on liuoksen keskilämpötila (°C)
$T_{maa}$	on maaperän lämpötila (°C).

Liuoksen keskilämpötilana käytetään meno- ja paluulämpötilojen keskiarvoa. Maaperän lämpötilaa voidaan arvioida lisäämällä paikkakunnan vuotuisen ulkoilman keskilämpötilaan 1,5 K. Rakennuksen lämmöntarpeen mukaan normaalisti mitoitetulle pystyputkistolle konduktanssi saa tyypillisesti arvoja väliltä  $q = 1\text{--}2$  W/(mK) sekä vaakaputkistolle puolet pystyputkiston arvosta.

Kaavan 7 nimittäjän pumppausteho lasketaan virtaaman, pumpun paineentulon ja hyötysuhteen avulla. Tällöin painehäviö lasketaan ottaen huomioon liuosputkien pituus, kytkentätapa (sarjaan tai rinnan). Painehäviöön lasketaan mukaan myös putkiston muut virtausvastukset sekä liuoslämmönsiirtimen painehäviö. Liuoksen tilavuusvirran arvona käytetään pumpun läpi kulkevaa kokonaistilavuusvirtaa. [Energialaskentaopas 2011: 16.]

Vapaaäähdytys maaperästä toteutettuna tarvitsee sähköä vain liuoskiertoon, joten sen kylmäkerroin voi olla jopa 50, maaperän tasapainolämpötilan aiheuttamien rajoitusten puitteissa.

## 10 Energiakaivojen mitoitus

Energiakaivojen mitoituksella on tärkeää varmistaa riittävä energian saanti kaivosta ja koko maalämpöjärjestelmän tehokas toiminta. Oikein mitoitettujen energiakaivojen vaikutus voi vaikuttaa myös vuosittaisiin säästöihin. Virheellinen mitoitus voi aiheuttaa kaivojen jäätymistä ja keruuputkiston vaurioitumista. Yksittäisiä kaivoja mitoitetaan usein karkeilla arvoilla, kuten kWh/m tai W/m. Karkeina arvoina käytetään esimerkiksi Etelä-Suomessa 78–85 kWh/m ja 40–43 W/m. Kaivokenttien mitoitus edellyttää huolellisuutta, erityisesti vierekkäisten kaivojen etäisyyden vaikutus toisiinsa ja maaperän kivilajien lämmönjohtavuus pitää huomioida. [Juvonen & Lapinlampi 2013.]

Alimitoitus voi johtaa kaivon tai sen osan jäätymiseen, mikä estää lämmönkeuruunesteen kierron ja voi aiheuttaa putkiston rikkoutumisen. Kaivon sulamiseen voi mennä pitkä aika, vaikka lämmönotto kaivosta lopetettaisiin. Tässä tapauksessa voi joutua poraamaan uusia kaivoja tai liittämään uusia kaivoja olemassa olevaan järjestelmään. Lievempi alimitoitus voi johtaa vähäisempään energian saantiin ja lämpöpumpun suurempaan sähkönkulutukseen, mikä alentaa lämpöpumpun hyötysuhdetta. [Huusko 2022.]

Energiakaivojen ylimitoitus ei ole haitallista lämpöpumppujärjestelmälle, kunhan otetaan huomioon esimerkiksi keruuputkiston painehäviö lämpöpumpun mitoituksessa. Ylimitoitus vaikuttaa lähinnä investointikustannuksiin ja takaisinmaksuaikaan. Syvemmästä kaivosta saadaan kuitenkin enemmän ilmaisenergiaa pitkällä aikavälillä, mikä vähentää lämpöpumpun sähkönkulutusta ja johtaa kustannussäästöihin. Erityisesti suuremman energiantarpeen yhteydessä on tärkeää välttää alimitoitusta energiakentän suhteen. [Huusko 2022.]



Energiakentät tulisi oikeaoppisesti mitoitaa TRT-mittauksella (Thermal Response Test, terminen vastetesti) saatujen tietojen perusteella, ja käyttää energiakenttien simulointiin tarkoitettuja ohjelmia, jotta voidaan varmistua energiakentän oikeasta mitoituksesta. Energiakenttien simulointiin on kehitetty mm. seuraavat ohjelmat: Eed, Glhepro, Ews, Pygfunction ja Ida-ice. [Huusko 2022.]

Kaivosta saatava teoreettinen jatkuva lämpöteho stationääritilassa voidaan laskea analyttisesti yksinkertaisen kaivomallin ns. ruotsalaisella ”peukalosäänöllä” professori Bo Nordellin mukaan kaavalla 9.

$$\varphi = \frac{2\pi\lambda H(T_0 - T_b)}{\ln\left(\frac{H}{d}\right)} \quad (9)$$

$\varphi$	on kaivosta saatava teoreettinen jatkuva lämpöteho stationääritilassa (W)
$\lambda$	on kiven lämmönjohtavuus (W/mK)
$T_0$	on maanpinnan keskimääräinen lämpötila (°C)
$T_b$	on keruunesteen keskimääräinen lämpötila (°C)
$H$	on kaivon syvyys (m)
$d$	on kaivon halkaisija (m).

Lasketaan kaavalla 9, 320 m syvän kaivon lämpöteho. Kaivo sijaitsee Etelä-Suomessa. Kallioperä on graniittia, jonka suositeltu laskennassa käytetty lämmönjohtavuuden arvo on 3,4 W/(mK).

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot \frac{3,4 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot 320 \text{ m} \cdot (6 \text{ C}^\circ - 1 \text{ C}^\circ)}{\ln\left(\frac{320 \text{ m}}{0,115 \text{ m}}\right)} = 4\,310 \text{ W}$$

Vuodessa kaivosta voitaisiin teoriassa ottaa lämpöenergiaa  $8760 \text{ h} \times 4310 \text{ W} = 37\,756 \text{ kWh}$ .

## 11 Tutkimiskohteen esittely

Muurlan koulun öljylämmityskattilat olivat tulleet elinkaarensa päähän ja olivat välittömän uusimisen tarpeessa. Korvaavaksi järjestelmäksi vaadittiin energiatehokkaampaa ja ekologisempaa järjestelmää.

Aikaisemmin saatujen positiivisten kokemusten perusteella vastaavista hankkeista oli projektin alusta asti selvää, että korvaava lämmitysjärjestelmä tuottaisi suurimman osan energiasta maalämmöllä. Koulun radiaattoriverkosto on mitoitettu öljylämmitysjärjestelmän korkeisiin lämpötiloihin, ja täten tiedostettiin, ettei maalämmöllä pystyisi tuottamaan verkoston mitoituksen vaatimaa korkealämpöistä menovettä. Tueksi tarvittaisiin järjestelmä, jolla pystytään tuottamaan vaadittu vara- ja huipputeho.

Hankkeeseen palkattiin ulkopuolinen konsultti mitoittamaan ja suunnittelemaan maalämpöhybridijärjestelmä. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan suunnittelun ja toteutuneen järjestelmän mitoituksellista riittävyttä, niin teoriassa kuin järjestelmän valmistumisen jälkeen saadulla todellisilla tuloksilla.

### 11.1 Tutkimuskohteen huipputehon tarkastelu

Muurlan koulu on ollut käytössä vuodesta 1975 ja se sai laajennuksen vuonna 2009, jolloin koululle muodostuivat seuraavat pinta-alat ja tilavuudet:

- Tilavuus: 10 450 m<sup>3</sup>
- Kokonaisala: 2 529 m<sup>2</sup>
- Kerrosala: 2 442 m<sup>2</sup>
- Huoneistoala: 2 259 m<sup>2</sup>

Konsultti on ilmoittanut huipputehon tarpeeksi 200 kW. Kuinka kyseiseen arvoon on päästy, ei ole tiedossa.

#### 11.1.1 Lämmitysenergian laskenta tunnusluvuilla

Tilavuus ja pinta-alatiedoilla kyetään hahmottamaan järjestelmän huipputeho helposti tunnuslukujen avulla, jotka perustuvat vastaavan ikäisten rakennusten todennettuihin ominaiskulutuksiin W/m<sup>3</sup> tai W/m<sup>2</sup>.

Käytetään huipputehon tarkasteluun arvoa  $70 \text{ W/m}^2$ , joka on tyypillinen ominaiskulutuksen arvo koulurakennukselle. Kun ominaiskulutus kerrotaan kokonaisalalla, saadaan huipputehontarpeeksi noin  $177 \text{ kW}$  ( $70 \text{ W/m}^2 * \text{kokonaisala } 2529 \text{ m}^2 = \sim 177 \text{ kW}$ ).

Jos käytetään tilavuuteen perustuvaa koulurakennukselle tyypillistä arvoa  $17 \text{ W/m}^3$ , niin huipputehontarpeeksi saadaan  $178 \text{ kW}$  ( $17 \text{ W/m}^3 * \text{tilavuus } 10450 \text{ m}^3 = \sim 178 \text{ kW}$ ). Kun huipputeho kerrotaan huipputehon käyttöajalla, joka Muurlassa on  $2161 \text{ h}$ , saadaan vuotuiseksi lämmitysenergiatarpeeksi  $383 \text{ MWh}$  ( $177 \text{ kW} * 2161 \text{ h} = \sim 383 \text{ MWh/v}$ ).

Tunnuslukuja ei tule käyttää mitoituksen perustana, sillä pienet muutokset lähtöarvoihin tuovat suuret erot lopputuloksiin, eikä niitä silloin voi pitää luotettavana. Virhe korostuu kiinteistön koon kasvaessa. Tunnuslukuilla mitoitettua järjestelmää tulee herkästi liian suuriksi tai pieniksi todelliseen tarpeeseen nähden.

### 11.1.2 Lämmitysenergian laskenta öljynkulutuksesta

Muurlan koulusta on saatavilla öljyntoimitukset vuosilta 2015–2018 ja tarkempaa mittausta ajanjaksolta 8.2018–8.2019, jotka on esitetty kuvassa 27.

## Muurlan koulu

kk	vuosi	lämpö		sähkö
			kWh	kWh
3	2018			14896
4	2018			13253
5	2018			12708
6	2018			7538
7	2018			7141
8	2018		7544	11713
9	2018		15364	13060
10	2018		32773	14424
11	2018		50081	15371
12	2018		44009	14562
1	2019		62143	17286
2	2019		48118	13659
3	2019		51061	16210
4	2019		30496	14391
5	2019		19725	14195
6	2019		6963	8921
7	2019		2229	6744
8	2019		10706	12193

## Öllytoimitukset

vuosi	litraa
2015	45301
2016	43195
2017	49836
2018	37383

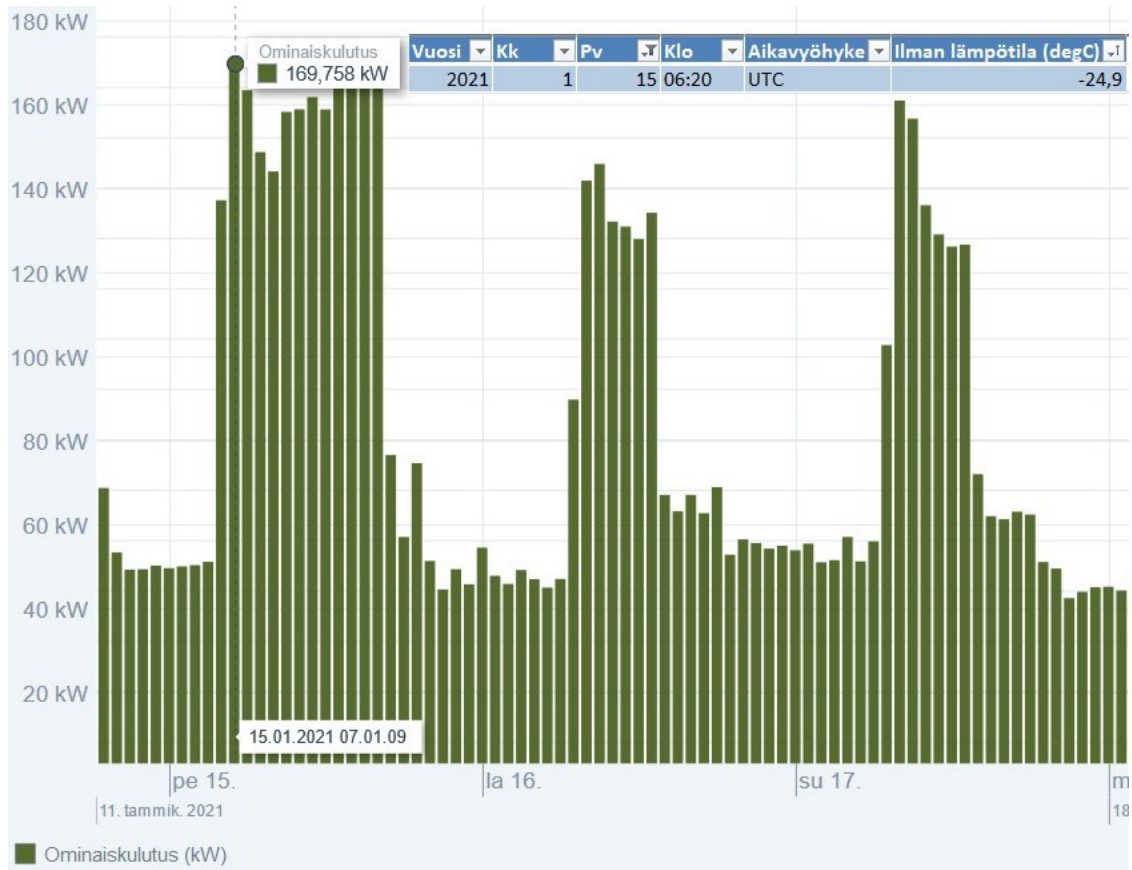
Kuva 27. Muurlan koulun öljyn toimituksen ja energiankulutuksen tietoja.

Ajanjaksolle 9.2018–8.2019 lämpöenergiaksi on mitattu 373 668 kWh. Vuodet 2018 ja 2019 vastaavat melko lähelle normaalivuotta vuoden 2019 ollessa hie-  
man lämpimämpi. Jakamalla 373 668 kWh lämpöenergia käyttöajalla 2161 h saadaan huipputehoksi noin 173 kW.

Öllyntoimitusten perusteella voidaan arvioida öljynkulutukseksi 46 m<sup>3</sup> vuodessa. Luvussa 6 on esitetty kaavat lämpöenergian ja huipputehon laskemiseksi öljyn-  
kulutuksesta. Näitä kaavoja käyttäen saadaan lämpöenergian kulutukseksi 369 MWh/v ja huipputehon tarpeeksi 171 kW.

### 11.1.3 Toteutunut huipputeho

Kohteen automaatiojärjestelmästä voidaan tarkastella valmistuneen järjestel-  
män toteutunutta huipputehoa ajanhetkellä, jolloin ulkona vallitsee mitoitusläm-  
pötila -26 °C. Kuvassa 28 on esitetty lähimmäksi mitoitusilannetta osuva hetki,  
joka on ollut 15.1.2021.



Kuva 28. Toteutunut lämmitysjärjestelmän mitoitustilanne.

Kuva 28 osoittaa lämmitystehon olevan likimain 170 kW ulkolämpötilassa  $-24,9$  °C, joten ulkolämpötilassa  $-26$  °C tehon voidaan olettaa olevan 170–180 kW välissä.

Muurlan koulun tapauksessa kaikki edellä esitetyt tavat johtivat melko lähelle todellista mitoitustehoa. Konsultin esittämän 200 kW:n ja mitatun tehon välinen erotus saattaa selittyä kohteen ilmanvaihtokoneiden ns. ”pakkaspudotus”-toiminnasta, joka puolittaa ilmanvaihdon määrän, kun ulkolämpötila on alle  $-11$  °C. Pakkaspudotus tehdään ilmanvaihtokoneen suojelemiseksi jäätymiseltä ja muilta vaurioilta sekä energian säästämiseksi ja sisäilman suhteellisen kosteuden laskemisen ehkäisemiseksi haitallisen alas.

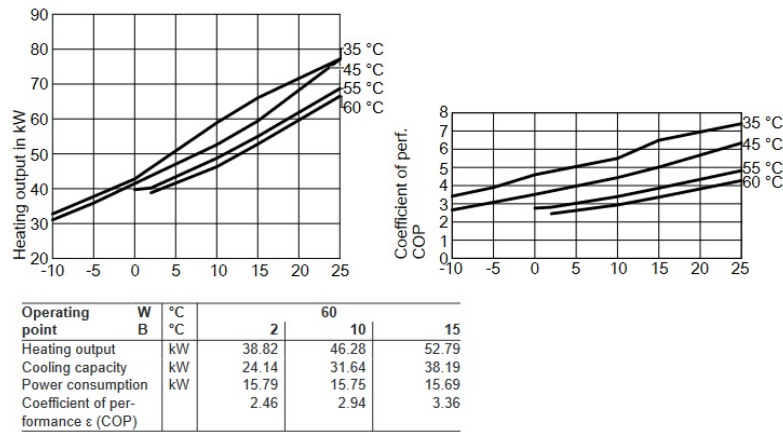
## 11.2 Hybridijärjestelmän valinta ja mitoituksen tarkastelu

Koulun todellisen lämmitystehon tarpeen mitoitusulkolämpötilassa todettiin olevan noin 175 kW. Lämpö tuotetaan rakennukseen maalämmöllä, ja lisälämmityksenä toimii kondenssiöljykattila. Maalämpöpumput ovat on/off-toimintaperiaatteen pumppuja, ja niitä on yhteensä kolme kappaletta. Maalämpöpumput, kondenssiöljykattila ja varaajat ovat sijoitettuna tekniseen tilaan. Maalämmön on tarkoitus kattaa 95 % energian tarpeesta. Lisälämmitystä saadaan kondenssiöljykattilasta. Lisäksi käyttöveden kulutuspiikkejä helpotetaan lämminvesivaraajalla, johon on asennettu sähkövastuksia, joita ohjataan kiinteistöautomaation avulla portaittain.

### 11.2.1 Maalämpöpumput

Kouluun asennetut kolme maalämpöpumppua ovat Viessmannin Vitocal 300-G:n mallia 301.A45. Lämpöpumppujen teho standardin EN 14511 (B0W35°C) mukaan on 42,8 kW, yhteensä siis 128,4 kW. Standardin mukaisissa toimintaolosuhteissa pumppujen hyötysuhde on 4,8. [Viessmann.]

Kyseisillä pumppuilla pystytään tuottamaan maksimissaan noin 60 °C:ista vettä. Mitä kuumempaa vettä lämpöpumpputekniikalla tuotetaan, sitä enemmän hyötysuhde ja lämpöteho laskee, kuten kuvasta 29 voidaan havaita.



Kuva 29. Vitocal 300-G 301.A45 -lämpöpumpun lämpöteho ja lämpökerroin riippuen ulkoilman ja liuoksen lämpötilasta, kun lauhduttimelta lähtevän veden lämpötila on 60 °C [Viessmann, muokannut tekijä].

Lämmitysjärjestelmän mitoitusilanteessa, jossa lämmitysjärjestelmästä otetaan kaikki teho käyttöön (maapiirin liuoslämpötila +2°C) lämmitysteho onkin vain noin 39 kW/pumppu eli yhteensä 117 kW ja lämpökerroin noin 2,5. Lämmitysteho laskee siis standardin EN 14511 (B0W35°C) tilanteesta noin 9 % (126kW–117 kW) ja hyötysuhde noin 48 % (4,8–2,5).

Kuvassa 30 on esitetty maalämpöpumpun tyypillisiä energiantuotto-osuuksia eri mitoitusasteilla. Haluttaessa tuottaa 95 % rakennuksen vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta, pitää maalämmön lämmitysteho olla vähintään 60 % huipputehon tarpeesta.

Teho-osuus	Energiaosuus
50 %	91 %
60 %	95 %
70 %	97 %
80 %	99 %

Kuva 30. Maalämpöpumpun tyypillisiä energiantuotto-osuuksia eri tehoasteilla.

Muurlan koulun maalämpöpumput (kuva 31) pystyvät tuottamaan mitoitustilanteessa 116 kW. Kohteen lämmityksen huipputehontarve on 175 kW, joten maalämpöpumpun tehopeitto on likimain 66 %. Muurlan koulun maalämpöjärjestelmällä kyettäisiin kattamaan tämän tarkastelun perusteella noin 95–97% kokonaislämmityksen energiantarpeesta.



Kuva 31. Muurlan koulun maalämpöpumppu.

### 11.2.2 Kondenssiöljykattila

Koulun lämmitysjärjestelmään asennettiin Viessmann 300-T -kondenssiöljykattila ja siihen Weishaupt WL20/2-CZ -öljypoltin (kuva 32). Kondenssiöljykattilan nimellislämmitysteho 80/60°C on 146 kW, ja sen vuotuinen bruttohyötysuhde on 97 %. Öljypolttimen tehoalue on 70–200 kW. Suuttimia öljypolttimessa on kaksi, ja ne käynnistyvät portaittain kiinteistöautomaation ohjaamana kulloisenkin lämmitystehontarpeen mukaan. Suutin 1 on mitoitettu 60 %:n lämpötehon mukaan



ja suutin 2 40 %:n lämpötehon mukaan. Muurlan koulun kattilatehon ollessa 147 kW on suuttimen 1 teho 88,2 kW ja suuttimen 2 teho 58,2 kW.



Kuva 32. Muurlan koulun kondenssiöljykattila ja poltin.

Maalämpöjärjestelmällä lämmitysteho on 116 kW, joten mitoitusolosuhteissa kondenssiöljykattilan tehon pitää olla vähintään 58 kW. Huippu- ja varatehojärjestelmää mitoittaessa tulee ottaa kuitenkin huomioon maalämpöpumppujen mahdollinen vikaantuminen. Minimissään tulee varautua yhden pumpun rikkoutumiseen mitoitusolanteessa. Muurlan koulun hybridijärjestelmänjärjestelmän kaksi maalämpöpumppua voivat olla pois toiminnasta ennen kuin sisälämpötila kiinteistössä lähtee laskuun. Pelkästään kondenssiöljykattila kykenee pitämään kiinteistön sisälämpötilan 21 °C:ssa vielä noin -20 °C:n ulkoilman lämpötilalla. Huippu- ja varatehojärjestelmän mitoitusta voidaan pitää riittävänä.

### 11.3 Toteutunut energiankulutus

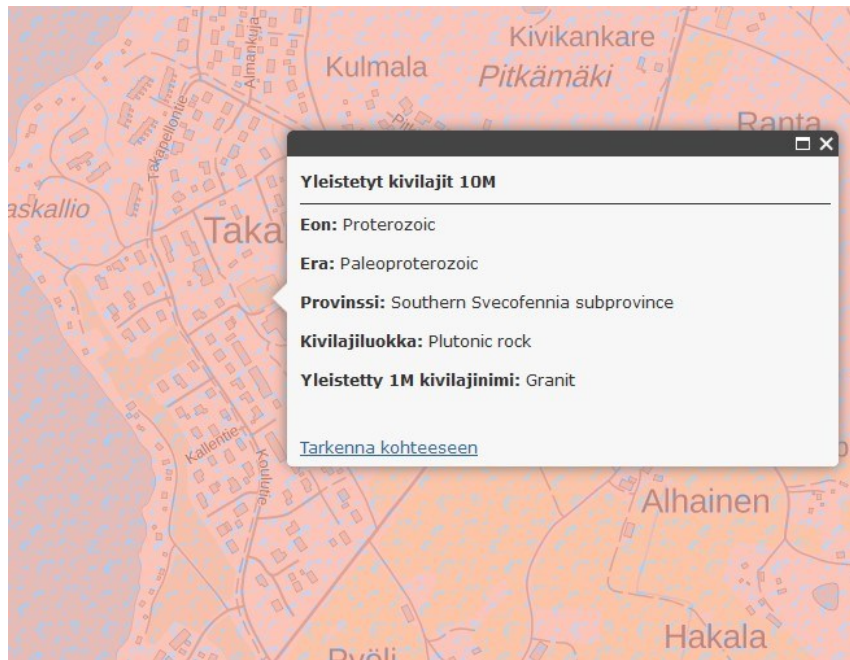
Muurlan koulun hybridijärjestelmään on asennettu energiamittarit maalämpöpumpuille ja kondenssiöljykattilalle. Ajanjaksolla syksystä 2020 kevääseen 2023 (15.3.) lämmitysenergiaa on tuotettu seuraavasti:

- Maalämpöpumput yhteensä: 757 MWh
- Kondenssiöljykattila: 29 MWh
- Yhteensä: 786 MWh.

Maalämpöjärjestelmällä on seurantajaksolla tuotettu 96 % lämmitysenergian tarpeesta. Alkuperäinen tuottotavoite 95 % maalämpöjärjestelmällä on siis seurantajaksolla ylitetty.

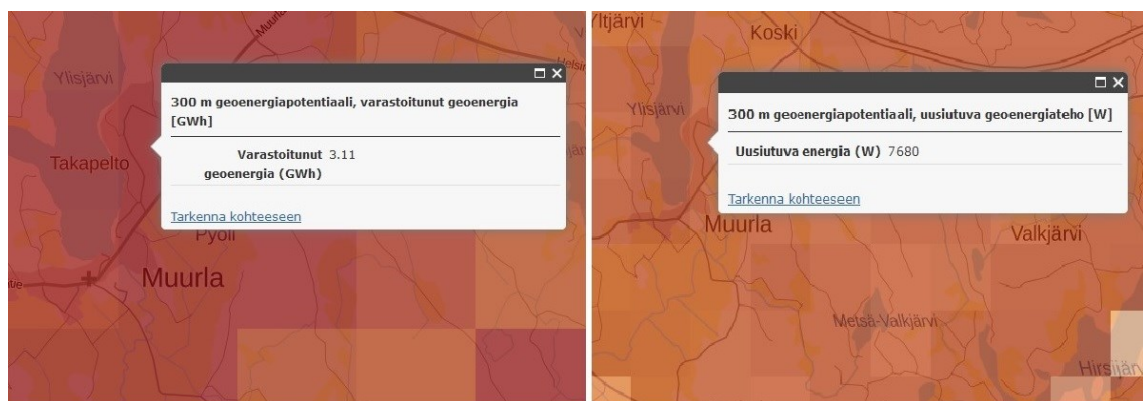
### 11.4 Energiakentän mitoituksen tarkastelu

Muurlan koulu sijaitsee Etelä-Suomessa, ja koulun tontin kallioperä koostuu Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) aineiston mukaan graniitista (kuva 33), jolla on hyvät lämmönjohtavuusominaisuudet. Graniitin suositeltu laskennassa käytetty lämmönjohtavuuden arvo on  $3,4 \text{ W/(mK)}$  lämmönjohtavuuden vaihteluvälin ollessa  $2,10\text{--}4,07 \text{ W/(mK)}$ . [GTK.]



Kuva 33. Muurlan koulun tontin kallioperä [GTK].

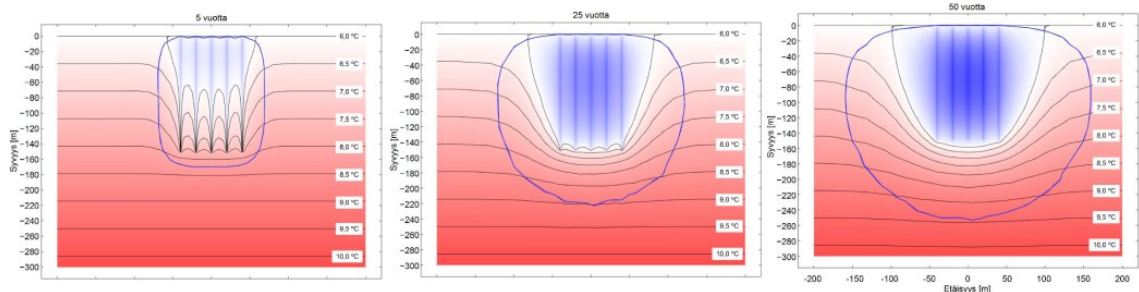
GTK:n aineiston mukaan Muurlan koulun tontin geenergiapotentiaali on hyvä (kuva 34), ja sitä voidaan pitää energiakaivojen poraukseen soveltuvana.



Kuva 34. Muurlan koulun tontin geenergiapotentiaali [GTK].

Muurlan koulun hybridijärjestelmän suunnitellut konsultti on mitoittanut suoraan porattuja 10 x 320 m:n mittaisia energiakaivoja, ja kaivojen yhteissyvyys on 3200 m. Kaivojen etäisyys toisistaan on 20 metriä.

Kaivojen vähimmäisetäisyydeksi suositellaan 20 metriä, jotta kaivot eivät vaikuttaisi toisiinsa liikaa. Kaivokentän käyttöikä on kymmeniä vuosia, ja kaivojen keskinäinen vaikutus toisiinsa korostuu kaivokentän käyttöiän loppupuolella. Kuvassa 35 on esimerkki lämpökaivokentän toiminnasta pitkällä aikavälillä. Kuvissa esitetään, miten 25 kaivon kentästä (5 x 5-muodostelma) tehtävä lämmönotto vaikuttaa kallion lämpötiloihin 5, 25 ja 50 vuoden kuluttua kaivon käytön aloittamisesta. Kaivojen syvyydet ovat 150 metriä ja kaivojen välinen etäisyys 20 metriä. Kaivoista otetaan lämpöä suurin mahdollinen määrä siten, että yhdenkään kaivon seinämän lämpötila ei laske nollaan asteeseen. [Helsingin geoenergiapotentialiaali 2019].



Kuva 35. Esimerkki lämpökaivokentän lämmönoton vaikutuksesta kallioperän lämpötiloihin 5, 25 ja 50 vuoden kuluttua kaivokentän käytön aloituksesta [Helsingin geoenergiapotentialiaali 2019].

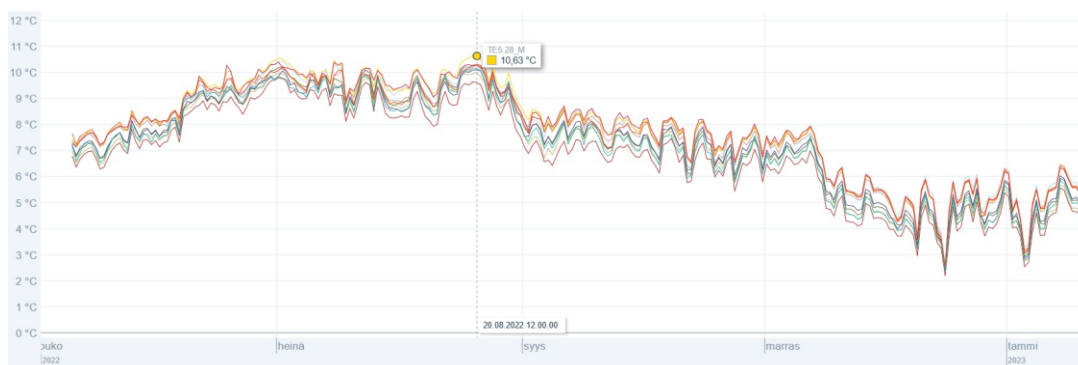
Yleisesti uskotaan, että porareivät ovat suoria, mutta käytännössä ne kuitenkin lähes aina taipuvat. Taipuman määrään ja suuntaan vaikuttavat monet tekijät, erityisesti kallioperän ominaisuudet, kuten rakoilu, rakenteet ja kivilajit sekä niiden ominaisuudet. Myös käytetty porauskalusto ja poraajan ammattitaito vaikuttavat tulokseen.

Helsingin kaupunki on mitannut energiakaivojen taipumia eri hankkeiden yhteydessä vuosina 2008–2017. Mittaustietoja on saatavilla 22 energiakaivosta, ja mitatut taipumat vaihtelevat 3 metristä 85 metriin. Porareikien pituudet vaihtelevat 140 metristä 300 metriin. [Maalämpökaivot Helsingissä.]

Ennakkoon on mahdotonta ennustaa maalämpökaivon taipuman suuntaa ja määrää. Kuitenkin usein lähekkäin poratut reiät taipuvat samalle suunnalle. Tämä tapahtuu, koska alueen kallioperässä on samankaltaisia ominaisuuksia. [Helsingin geoenergiapotentiaali 2019.]

Luvun 10 laskentaesimerkissä (kaava 9) saatiin yhden 320 metriä syvän energiakaivon teoreettiseksi jatkuvaksi lämpötehoksi 4310 W ja energiatuotoksi 37 753 kWh. Kertomalla tuotot Muurlan kouluun porattujen kaivojen lukumäärällä (10 kpl) saadaan kaivokentän tehotuotoksi 43 kW ja energiatuotoksi 377 530 kWh. Ajanjaksolla 9/2018–8/2019 Muurlan koulun lämpöenergian kulutukseksi on mitattu 373 668 kWh. Jos maalämpöpumppujen vuotuinen lämpökerroin olisi 4,5 ja koko energiamäärä tuotettaisiin maalämpöpumpuilla, niin maalämpöpumppulaitteiston sähkön kulutus vuodessa olisi 83 037 kWh ja maasta otetun ilmaisenergian määrä 290 631 kWh.

Maalämpökenttä on oikein mitoitettu ja maalämpöpumppu toimii tehokkaasti energiakentän jäätyttä, jos lämmönkeruunesteen minimi on  $-1\text{ °C}$  25 vuoden päätteeksi tai  $-1,5\text{ °C}$  50 vuoden päätteeksi. Kuukauden käyntijaksoon sisältyy päivä- ja tuntikohtaista vaihtelua, ja turvallinen raja-arvo sallii kylmempiä jaksoja väliin [Leppähaju 2023]. Kuvassa 36 on esitetty mittausdataa noin 2 vuotta vanhan Muurlan koulun energiakentän liuoslämpötiloista. Mittauksen perusteella joulukuussa on saavutettu kylmin liuoslämpötila, n.  $2,1\text{ °C}$ , ja 20.8.2022 korkein lämpötila,  $10,63\text{ °C}$ .

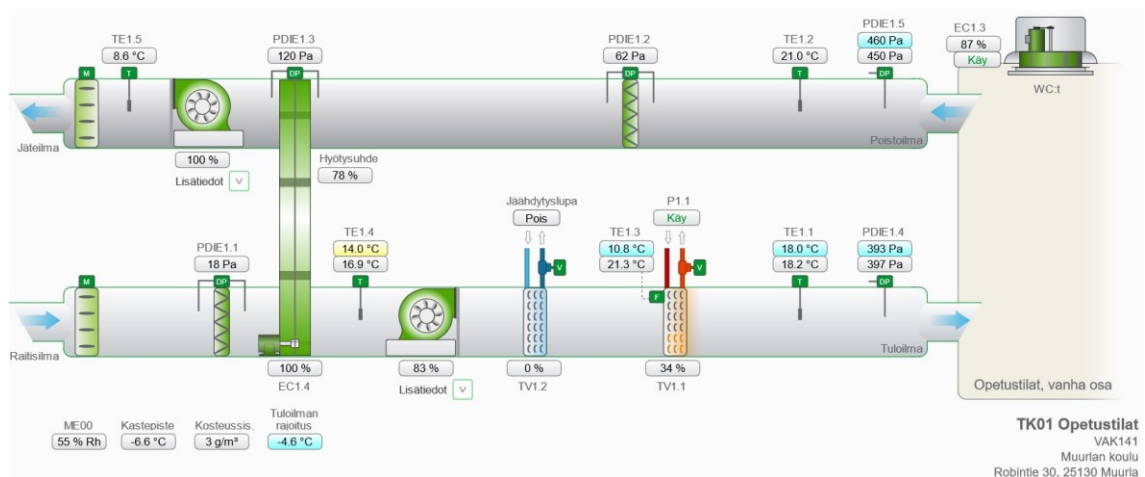


Kuva 36. Muurlan koulun mitattua maapiirin liuoslämpötilaa.

Edellä esitettyjen laskelmien ja mitatun datan perusteella voidaan todeta energiakentän olevan kapasiteetiltaan riittävä, vaikka laskentaa suoritettaisiin huomionmillaikin lähtöarvoilla tai kaivot syvällä kallioperässä hieman risteilisivätkin, varsinkin kun kohteen energiakaivoja käytetään vapaajäähdytykseen kesällä, joka regeneroi energiakaivoja.

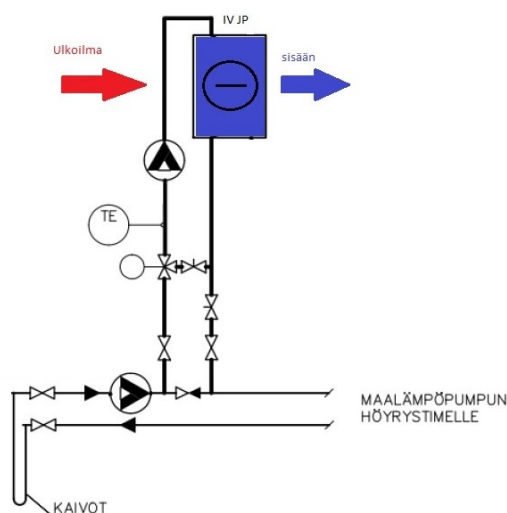
### 11.5 Vapaajäähdytyksen toteutus ja riittävyyden tarkastelu

Muurlan koulun jäähdytys on toteutettu ilmanvaihdon kautta ilmanvaihtokoneisiin liitetyillä jäähdytyspatterilla kuvan 37 mukaisesti. Ilmanvaihtokoneita koulussa on 3 kpl, joista ns. vanhan osan TK01 (luokkatilat) ja TK02 (liikuntasali) jäähdytyspatterit on kytketty energiakaivojen liuospiiriin. Laajennusosan ilmanvaihtokoneen jäähdytys on toteutettu erillisellä jäähdytyskojeella.



Kuva 37. Muurlan koulun ilmanvaihtokoneen TK01 automaatiografiikka.

Kytkemällä jäähdytyspatterit suoraan energiakaivojen liuospiiriin (kuva 38), joissa Muurlan koulun tapauksessa kiertää n. +2 - +11 °C 30 %:inen vesi-etanoliliuos (kuva 36), saadaan koko liuoksen kylmäenergia siirrettyksi jäähdytyspattereille, toisin kuin erillisellä siirtimellä toteutetussa ratkaisussa, joissa menetetään siirtimen asteisuuden verran (1–2 °C) jäähdyttävän liuoksen lämpötilasta.



Kuva 38. Muurlan koulu jäähdytyspiirin kytkentä.

Muurlan koulun jäähdytyspatterit on mitoitettu seuraavan tilanteen mukaan (tarkemmat tiedot liite 5 ja 6):

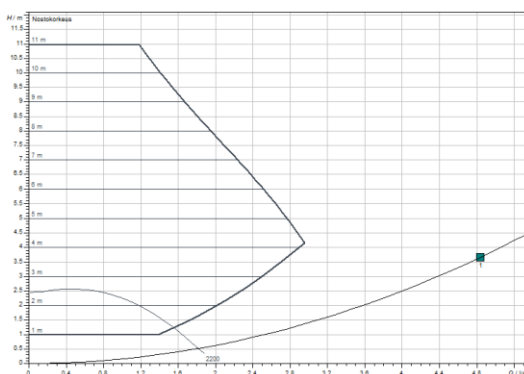
TK 01 (luokkatilat) Ilmamäärä  $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , ilman lämpötila sisään  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , suhteellinen kosteus sisään  $50 \%$ , tulevan jäähdytysnesteen lämpötila  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ , ilman lämpötila ulos  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , suhteellinen kosteus ulos  $92 \%$ , lähtevän nesteen lämpötila  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ , nesteen nopeus  $1,1 \text{ m/s}$ , nestevirta  $1,9 \text{ l/s}$ , painehäviö  $27,1 \text{ kPa}$  ja jäähdytysteho  $45,6 \text{ kW}$ .

TK 02 (liikuntasali) Ilmamäärä  $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , ilman lämpötila sisään  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , suhteellinen kosteus sisään  $50 \%$ , tulevan jäähdytysnesteen lämpötila  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ , ilman lämpötila ulos  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , suhteellinen kosteus ulos  $91 \%$ , lähtevän nesteen lämpötila  $11,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , nesteen nopeus  $1,5 \text{ m/s}$ , nestevirta  $2,94 \text{ l/s}$ , painehäviö  $36,6 \text{ kPa}$  ja jäähdytysteho  $50,1 \text{ kW}$ .

Kuten kuvasta 36 voidaan havaita, maapiirin liuoksen lämpötila nousee kesän edetessä sekä jäähdytyslämmön vaikutuksesta. Muurlan koulun energiakentän korkein mitattu liuoslämpötila on 10.8.2022 ollut  $10,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , eli  $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  korkeampi kuin mitoituksessa käytetty tulevan jäähdytysnesteen lämpötila. Mikäli jäähdytyspatterin läpi virtaava nestevirta pidetään samana kuin mitoitusilanteessa, tarkoittaa liuoslämpötilan nousu heikompaa jäähdytyspatterin jäähdytystehoa.

Jäähdytystehoa voidaan kuitenkin kasvattaa nostamalla jäähdytyspatterin läpivirtaavan nesteen tilavuusvirtaa l/s, mikä tarkoittaa nesteen nopeuden nousua ja painehäviön kasvua. Tilavuusvirran kasvattamisen rajoittavina tekijöinä voidaan pitää kohteeseen asennetun pumpun suorituskykyä sekä jäähdytyspatterin painehäviön nousua. Jäähdytyspatterin suurin sallittu painehäviö on yleensä 50 kPa.

Muurlan koulun lämmitysjärjestelmän suunnitellut konsultti on tyypittänyt kohteen jäähdytyspiirin pumpulle arvot 2 l/s ja 50 kPa. Aikaisemmin esitetyistä jäähdytyspatterin mitoitusiedoista huomataan, että vaaditun virtaaman tulisi olla 4,84 l/s ja mitoittavan painehäviön 36,6 kPa. Kohteen konsultti on siis mitoittanut järjestelmään suorituskyvyltään liian pienen pumpun. Kouluun asennettu pumppu on Wilo Stratos 30/1-12. Kuvasta 39 voidaan havaita, ettei kouluun asennettu pumppu tuota vaadittua suorituskykyä.



Kuva 39. Muurlan koulun jäähdytysverkon pumpun pumppukäyrä.

Muurlan koulun liikuntasalin ilmanvaihtokone on toteutettu CO<sub>2</sub>-säädöllä, mikä tarkoittaa, että ilmanvaihtokoneen puhaltimen pyörintänopeutta säädetään ihmistä tulevan hiilidioksidikuormituksen mukaan. Mitä suurempi on mitattu hiilidioksidiarvo (ppm), ja mitä enemmän ihmisiä on tilassa yhtäaikaisesti, sitä suurempi puhaltimen pyörimisnopeus ja päinvastoin. Luokkatiloja palvelevalla ilmanvaihtokoneella on ohjelmoidut toiminta-ajat. Opetusluokkien ollessa käytössä ilmanvaihtokone tuottaa vakioilmavirralla ilmaa luokkiin, ja opetuksen loppua ilmanvaihto sulkeutuu.

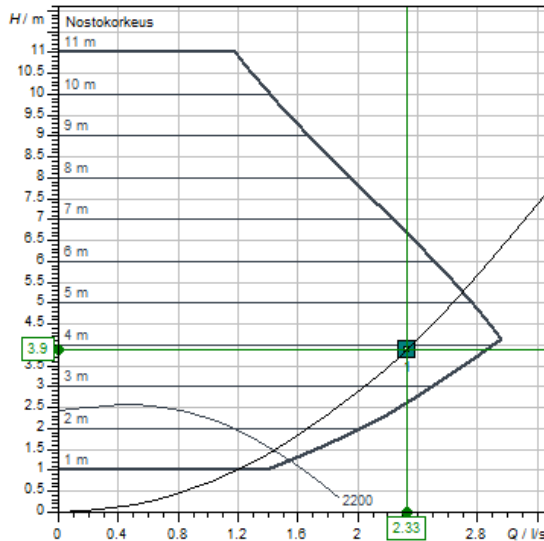


Vuoden lämpimin ajanjakso ajoittuu koulun kesälomalle, jolloin koulu on joko suljettuna tai merkittäväällä vajaakäytöllä. Liikuntasali on kesäisin käytössä, mutta käyttö painottuu iltakäyttöön. Koulurakennuksessa prioriteettina on luokkatilojen viihtyvyys, ja automatiikan avulla jäähdytyskapasiteetti voidaan ohjata kokonaan luokkatilojen käyttöön. Ilmatieteenlaitoksen sivuilta saatavan datan mukaan vuonna 2022 Muurlan koulua lähinnä olevalta sääasemalta, Kiikalan lentokentältä, on mitattu kuumimmaksi ulkolämpötilaksi +30,9 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 42 % 28.6.2022 klo 13. Kuumin ulkolämpötila yhdessä korkeimman liuoslämpötilan +10,6 °C kanssa muodostavat järjestelmälle mitoituksellisesti haastavimman tilanteen.

Kyseiset uudet mitoitusolosuhteet syötettiin IV Product Desinger G3:een, millä alkuperäiset mitoituksetkin on tehty. Liitteessä 7 on esitetty laskennan tulos, josta voidaan havaita seuraavat arvot:

TK 01 (luokkatilat) Ilmamäärä 2,4 m<sup>3</sup>/s ilman lämpötila sisään 30,9 °C, suhteellinen kosteus sisään 42 %, tulevan jäähdytysnesteen lämpötila 10,6 °C, ilman lämpötila ulos 15 °C, suhteellinen kosteus ulos 92 %, lähtevän nesteen lämpötila 16,9 °C, nesteen nopeus 1,3 m/s, nestevirta 2,33 l/s, painehäviö 30,9 kPa ja jäähdytysteho 61,4 kW.

Kasvattamalla pumpun tuottamaan nestevirtaa pystyy jäähdytyspatteri jäähdyttämään ns. pahimman tilanteenkin niin, että sisäänpuhallusilman lämpötila on edelleen +15 °C. Koululle asennettu pumppu pystyy myös tuottamaan vaaditut uudet suoritusarvot, kuten kuva 40 osoittaa.



Kuva 40. Pumpun toimintapiste uudessa mitoitustilanteessa.

Muurlan koulun ilmanvaihtokanavistoa ei ole alkujaan suunniteltu jäähdytykselle, ja kanavistosta puuttuukin jäähdytyskäytössä vaadittava kondenssieritys, joka tulisi toteuttaa esimerkiksi käyttämällä solukumieristettä, kondenssitiivistä umpisolueristettä tai kondenssiitivistä kivivillaeristettä. Muurlan koulun kanavisto on vain lämpöeristetty. Kanavisto ei saa kohdata kastepistettä, jotta vesi ei tiivistyisi kanavan pinnalle ja täten aiheuttaisi kosteusvahinkoja kiinteistölle. Kastepistelämpötila voidaan laskea kaavalla 10. [LVI kalenteri 2023: 67.]

$$T_d = \frac{b \cdot \left( \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(rh) \right)}{a - \left( \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(rh) \right)} \quad (10)$$

$T_d$	on kastepistelämpötila (°C)
$T$	on lämpötila (°C)
$rh$	on suhteellinen kosteus desimaalilukuna (esim. 55 % = 0,55)
$a$	on 17,27
$b$	on 237,7
$ln$	on luonnollinen logaritmi.

Esimerkiksi sijoittamalla kaavaan 10 uuden jäähdytyspatterin mitoituksen lämpötilan 30,9 °C ja rh:n 42 % saadaan kastepistelämpötilaksi 16,47 °C, eli kysei-

sessä tilanteessa ei ilmaa voida jäähdyttää jäähdytyspatterin täydellä kapasiteetilla. Siksi Muurlan koulun automatiikkaan on ohjelmoitu kastepistelaskenta, joka estää jäähdyttämisen kastepistelämpötilaan jättäen lämpötilan varalta 1–2 °C korkeammaksi, mikä puolestaan vähentää jäähdytystehoa.

Tärkein mittari järjestelmän toimivuutta tarkasteltaessa on koulun käyttäjien viihtyvyys, ja saadun palautteen mukaan he ovat olleet erittäin tyytyväisiä jäähdytyksen tuomaan helpotukseen kesän helteillä. Muurlan koulun vapaajäähdytystä voidaankin täten pitää riittävänä.

## 12 Rakennusautomaatiojärjestelmä

Rakennusautomaatiojärjestelmä (RAU-järjestelmä) on tietojärjestelmä, joka valvoo, ohjaa ja hallinnoi rakennuksen teknisiä järjestelmiä automaattisesti. Näitä järjestelmiä ovat esimerkiksi lämmitys-, ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät, valaistusjärjestelmät, turvajärjestelmät, hissit ja kulunvalvonta.

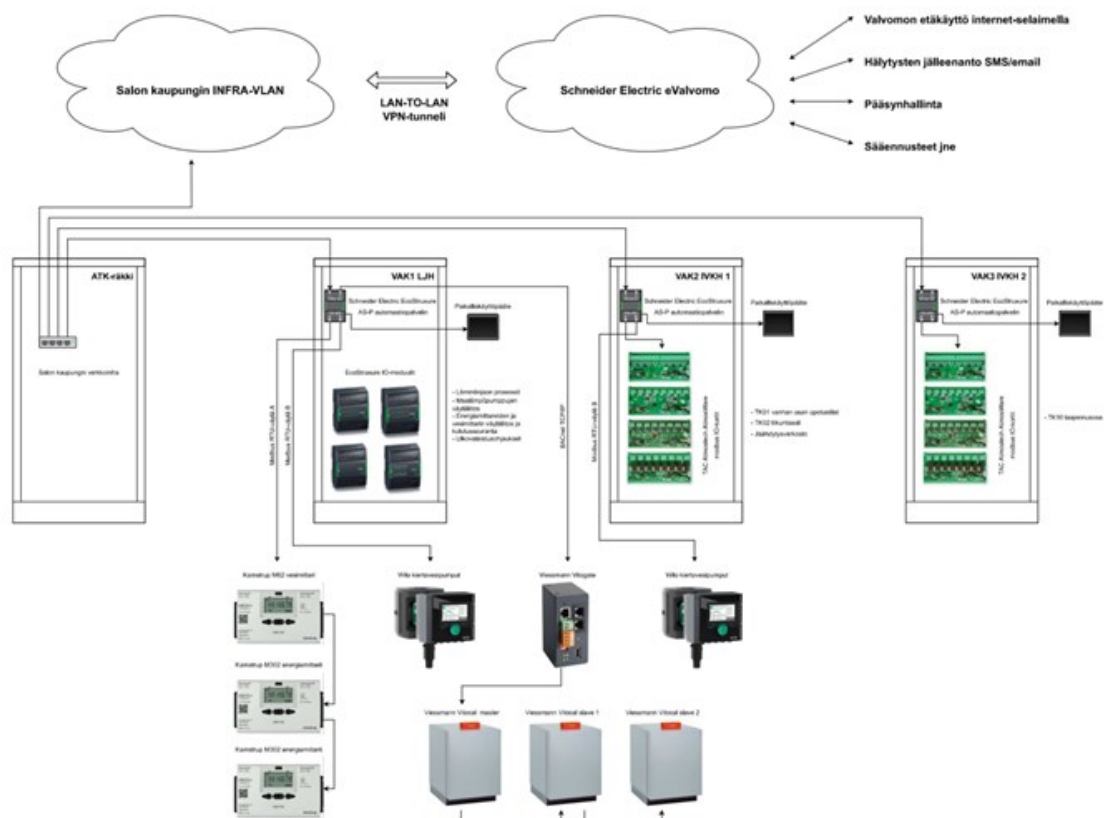
RAU-järjestelmä koostuu usein valvonta-alakeskuksista (VAK), jotka keräävät tietoa rakennuksen eri järjestelmistä antureiden ja anturiverkkojen kautta. Tämän tiedon perusteella järjestelmä voi automaattisesti säätää esimerkiksi lämpötilaa tai valaistusta rakennuksessa, optimoida energiankulutusta ja tehostaa rakennuksen toimintaa.

RAU-järjestelmä voi myös tarjota käyttäjille reaaliaikaista tietoa rakennuksen eri järjestelmien toiminnasta ja mahdollistaa niiden etäohjauksen. RAU-järjestelmä parantaa rakennuksen energiatehokkuutta, vähentää ylläpitokustannuksia ja parantaa yleistä turvallisuutta ja mukavuutta. [Sandberg 2014: 287.]

### 12.1 Muurlan koulun rakennusautomaatiojärjestelmän kuvaus

Muurlan koulun rakennusautomaatiojärjestelmä (kuva 41) koostuu kolmesta alakeskuksesta, niihin liitetyistä IO-laitteista, antureista, toimilaitteista sekä väylälaitteista.

Muurlan koulun rakennusautomaatiojärjestelmä oli toteutettu kokonaisuudessaan öljylämmitysjärjestelmän aikana Schneider Electric Atmostech -rakennusautomaatiojärjestelmällä. Maalämpösaneerauksen yhteydessä rakennusautomaatiojärjestelmä päivitettiin uuteen Schneider Electric EcoStruxure Building Operation (EBO) -järjestelmään hyödyntäen vanhat Atmostech AtmosWare-IO -kortit. Lämmönjaon alakeskus toteutettiin uudella EBO-alakeskuksella kokonaisuudessaan uusin IO-laittein. [Gustafsson 2023.]



Kuva 41. Muurlan koulun rakennusautomaatio-kaavio.

## 12.2 Valvomo

Kohteen alakeskukset on liitetty Salon kaupungin verkkoinfrassa sijaitsevaan infraverkkoon. Infraverkosta alakeskukset pystyvät kommunikoimaan Schneider Electricin hallinnoiman eValvomo-pilvivalvomoalustan kanssa lan-to-lan -VPN-tunnelin yli. eValvomossa Schneider Electric'in hallinnoimilla palvelimilla ajetaan Schneider Electric EcoStruxure Enterprise Server (ES) -valvomo-ohjelmistoa,

joka kokoaa koko Salon kaupungin EcoStruxure-järjestelmällä toteutetun rakennusautomaatiojärjestelmäkannan yhteen valvomoon.

eValvomo hallinnoi kohteiden käyttöoikeuksia. Kaikilla käyttäjillä on omat henkilökohtaiset käyttäjätunnukset, ja kyseisille käyttöoikeuksille on määritelty kohteet, joihin kyseisellä käyttäjällä on käyttöoikeudet. eValvomon kautta välitetään kohteiden hälytykset SMS-viestein huoltomiehille ja kaupungin kiinteistöpäivystykseen. eValvomon kautta kohteisiin on toteutettu myös mm. sääennustepohjainen lämmitysjärjestelmien automaattinen asetusarvokompensointi sekä käyttöaikajaksotus.

Kohteen sisäisesti alakeskukset kommunikoivat kiinteistön TCP/IP-verkon yli siten, että kohde toimii tarvittaessa myös täysin itsenäisesti kiinteistön sisäisesti, ja paikallinen järjestelmän käyttö on toteutettu kunkin alakeskuksen yhteyteen sijoitetulla paikallisella kosketusnäyttöisellä käyttöpäätteellä. [Gustafsson 2023.]

### 12.3 VAK1 (alakeskus 1, lämmönjakuhuone)

Alakeskuksen ohjaavana laitteena toimii Schneider Electric EcoStruxure SmartX Automation Server (AS-P). Kyseiseen laitteeseen on liitetty AS-P-laitteen ja IO-korttien väliseen käyttöön tarkoitettulla IObus-väylällä IO-kortit fyysisiä IO-pisteitä varten. Alakeskukseen on fyysisien IO-pisteiden lisäksi liitetty Modbus RTU-sarjaliikenneväylällä maalämpöpumpun ja öljykattilan energiamittarit sekä maapiirin kiertovesipumput ja käyttöveden kiertopumppu. [Gustafsson 2023.]

Maalämpöpumppu on liitetty rakennusautomaatioon BACnet TCP/IP -protokollaa hyväksikäyttäen Viessmannin Vitogate-rajapinnan avulla. Rajapinnan kautta luetaan maalämpöpumpun tilatietoja ja lämpötilatietoja, jotka esitetään prosessigrafiikassa, ja historiatietoa kerätään trendiseurantoihin.

Maalämpöpumpulta on liitettyä rakennusautomaatiojärjestelmään fyysisillä IO-pisteillä myös maapiirin pumppujen käynnistyspyynnit. Rakennusautomaatiojärjestelmä käskää Modbus RTU-väylään yhdistetyt pumpput käyntiin ja seis sekä säätää niiden tehotasoa. Pumppujen ohjaus on valittu tällaiseksi, koska väyläliitännän kautta saadaan laajempi tietomäärä pumpuilta, ja näin ollen voitiin käyttää väyläliitännäisiä pumppuja. Maapiirissä on lisäksi pääliuospumppu, joka varmistaa riittävän virtauksen maalämpöpumpuille. Sen tehonsäätö on toteutettu väyläjärjestelmän ja rakennusautomaatiojärjestelmän ohjauksen avulla. Lisäksi sekä maalämpöpumppuyksikön omia maapiirin pumppuja että pääliuospumppua voidaan tarvittaessa hyödyntää jäähdytysverkon toiminnassa.

Maalämpöpumppu tuottaa itsenäisesti puskurivaraajaan lämpöenergiaa lämmitysjärjestelmän tarpeisiin. Maalämpöpumppu tuottaa myös maalämpöpumpun käyttövesivaraajaan asetusarvonsa mukaista käyttövettä. Legionella-bakteerin neutralisointi on toteutettu öljykattilan tuottamalla energialla jaksoittain tehtävällä käyttövesivaraajan lämpötilan nostolla. [Gustafsson 2023.]

Patteriverkostojen normaalia ulkolämpötilakompensointikäyrän määrittämää asetusarvoa kompensoidaan sääennusteilla, jolloin pelkän lämpötilaeron aiheuttaman jäähdytysvaikutuksen lisäksi saadaan kompensoitua esimerkiksi tuulen ja auringonpaisteen aiheuttama vaikutus kiinteistön lämpötehortarpeessa.

Patteriverkostojen säädöllistä eli verkostojen venttiileiden PID-säätimelle annettavaa asetusarvoa kompensoidaan maalämpöpumpun lämmityksen puskurivaraajan asetusarvon ja lämpötilan sen hetkiselällä eroarvolla. Tällä pyritään siihen, että lämpöpumppujen tehontuoton portaittaisesta luonteesta johtuen lämpöpumpun asteminuuttilaskennan mukaan elävää tehointegraalisäätöä tuetaan antamalla patteriverkoston menoveden laskea hieman alle laskennallisen asetusarvon silloin, kun maalämpöpumpun lämmityksen puskurivaraajan lämpötila on alle asetusarvonsa. Vastaavasti patteriverkoston menoveden lämpötilan annetaan nousta yli asetusarvonsa silloin, kun lämpöpumppujen lämmityksen puskurivaraaja on maalämpöpumpun asetusarvoa korkeampi. Lisäksi ominaisuudella

pyritään takaamaan IV-verkostoille vaadittu lämpöteho kaikissa toimintatilanteissa. [Gustafsson 2023.]

IV-verkostojen normaalia ulkolämpötilakompensointikäyrän määrittämää asetusarvoa kompensoidaan kyseiseen verkostoon liitettyjen ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden säätöarvon mukaan. Tällä pyritään sekä määrittelemään alhaisin säädöllisesti järkevä asetusarvo IV-verkoston menoveden lämpötilalle sekä varmistamaan, että ilmanvaihtokoneilla on tarvittava määrä lisälämpöenergiaa saatavillaan. [Gustafsson 2023.]

Kohteen kondenssiöljykattila on kaksitehoisella polttimella varustettu. Öljykattila on aina käytössä ensimmäisellä portaalla ja tarvittaessa sekä maalämpöpumppu että rakennusautomaatiojärjestelmä voivat pyytää öljykattilan toisen portaan käyntiin.

Rakennusautomaatiojärjestelmä säätää tarvittaessa kolmitieventtiilillä lisätehoa lämmitykselle maalämpöpumppujärjestelmän häiriötilanteissa sekä lämmityksen pääverkoston menoveden lämpötilan laskiessa riittävästi alle öljykattilan päälämmitysverkoston säädöllisen asetusarvon. Öljykattilan kolmitieventtiilin lämpötilasäätöohjelman asetusarvo on IV- ja patteriverkostojen suurin lämpötilan asetusarvo vähennettynä hystereesialueella. Hystereesialueen suuruus riippuu ulkolämpötilasta siten, että kylmemmissä ulkolämpötiloissa hystereesialue on nolla astetta, koska laitosta ei ole maalämmön osalta täystehomitoitettu. Toisaalta lämpimämmillä keleillä halutaan maksimoida maalämmön käyttöä ja minimoida öljykattilan roolia. Lähellä maalämpöjärjestelmän maksimitehomitoituksen ulkolämpötilaa lämmitysverkostojen vesivirtaamat ovat myös lähellä mitoitusvirtaamia, jolloin maalämpöpumppu saa puskurivaraajaansa syötettynä lämmitysverkostoissa jäähtynyttä vettä, ja maalämpöpumppulaitteisto toimii öljykattilalta otettavasta lisätehosta huolimatta oikeassa suhteessa lisäenergiankäyttöön nähden. [Gustafsson 2023.]

Maalämpöpumppu lämmittää käyttövesivaraajiensa lämpimän käyttöveden joko lämpöpumpulla tai öljykattilalta. Rakennusautomaatiojärjestelmä säätää lähtevän käyttöveden lämpötilan asetusarvoonsa sekoittamalla tarvittaessa maalämpöpumpun käyttövesivaraajasta saatavaan lämpimään käyttöveteen sähkövastuksin lämpenevästä käyttöveden tulistusvaraajasta.

Tulistusvaraajassa on viisi sähkövastusporrasta, ja niiden käyntiä ohjataan alakeskuksella siten, että varaajan alaosan lämpötilamittauksen kohdalla käyttöveden lämpötila on aina vähintään 60 astetta ja toisaalta varaajan yläosaa pidetään vielä hieman korkeammassa lämpötilassa. Kahden lämpötilamittauksen säätötavalla pyritään siihen, että sähkövastuksien ohjaus reagoi mahdollisimman hyvin todelliseen käyttötilanteeseen sekä siihen, että tulistusvaraajan lämpötila olisi aina legionella-turvallisella alueella.

Käyttöveden kiertovesipumpun tuottamaa tilavuusvirtaa säädetään käyttöveden kierron paluulämpötilan mukaan. Tällä pyritään siihen, että käyttöveden paluulämpötila olisi sekä legionella-turvallisella alueella että paluulämpötila ei normaalissa säätötilanteessa olisi merkittävästi korkeampi maalämpöpumppujen käyttöveden puskurivaraajien lämpötilaa, jolloin järjestelmä ajautuu tilanteeseen, jossa käyttöveden kiertovedellä lämmitetään sähköllä lämpenevällä tulistusvaraajan vedellä maalämpöpumppujen käyttövesivaraajia. [Gustafsson 2023.]

Koulun vanhan osan ilmanvaihtokoneiden TK01 tai TK02 pyytäessä jäähdytystehoa ohjaa rakennusautomaatiojärjestelmä ensin jäähdytysverkoston ja maapiirin pääliuospumppun käyntiin. Jäähdytysverkoston kiertovesipumpun tilavuusvirtaa säädetään IV-koneiden jäähdytyspattereiden jäähdytystehontarpeen mukaan siten, että tilavuusvirta olisi riittävä, mutta pyrkien kuitenkin välttämään turhaa energiankulutusta. Maapiirin pääliuospumppun tehoa säädetään sarjassa jäähdytysverkoston menoveden lämpötilasäädössä jäähdytysverkoston kolmitiesekoitusventtiilin säädön jälkeen. Tällä pyritään välttämään kesäaikana läm-



pökaivojen turhaa sekoitusta liian suurella virtaamalla kaivojen meno- ja paluupuolen lämpötilaeron maksimoimiseksi, jotta lämpökaivoilta riittäisi paremmin jäähdytystehoa loppukesään saakka. [Gustafsson 2023.]

#### 12.4 VAK2 (Vanhan osan ilmanvaihdon konehuone)

Molemmat ilmanvaihtokoneet ovat EC-puhaltimin ja pyörivällä lämmöntalteenotokennolla varustettuja. EC-puhaltimien puhallustehoa säädetään kammiopainesäädöllä, jolla vakioidaan ilmamäärät suodattimien likaantumisen aiheuttaman painehäviön noususta huolimatta.

Tuloilman lämpötilan asetusarvo määritellään ulkolämpötilan kompensointikäyrältä. Asetusarvon määrittely on toteutettu ulkolämpötilan mukaan, koska lämmityskaudella tuloilman lämpötila pidetään vakiona huoneilman lämpötilasta riippumatta, jolloin varsinainen kiinteistön lämmitysjärjestelmä saa vastata tilojen lämmittämisestä. Tuloilman lämpötila pidetään tasolla, joka takaa yläjakoi- sen ilmanvaihdon toiminnan. Kesäaikaan ulkolämpötilaan sidottu asetusarvo antaa tuloilman lämpötilan nousta hieman. Tällä pyritään siihen, että tiloja ei jäähdytettäisi liikaa, jotta tilojen lämpöviihtyvyys pysyisi hyvänä myös hellejaksojen aikana.

Tuloilman lämpötila pidetään asetusarvossaan säätämällä sarjassa lämmöntalteenottoa, lämmityspatteria sekä jäähdytyspatteria. Jäähdytyspatterin käyttö on sallittu vain ulkolämpötilariippuvaisen jäähdytyslupa-asetusarvon ollessa päällä. Lämmöntalteenotto ajetaan ulkolämpötilan mukaan täydelle teholle huolimatta tuloilman lämpötilan säädöstä. Toiminto aktivoituu noin 10 asteen ulkolämpötilassa, ja sillä pyritään maksimoimaan ilmaisenergioiden käyttö lämmityskauden aikana.

Jäähdytyskäytössä eristämättömien ilmanvaihtokanaviston osien kondenssiriskin vähentämiseksi ulkoilman kosteuden ja lämpötilan mittauksesta lasketaan

kastepiste, joka hystereesialueen kanssa määritetään tuloilman minimilämpötila-asetukseksi silloin, kun tämä laskennallinen turvaraja on arvoltaan normaalia tuloilman säädöllistä asetusarvoa korkeampi. [Gustafsson 2023.]

### **13 Investointilaskelmat**

Kappaleessa käydään läpi keskeisimmät hankkeen investoinnin kannattavuutta mittaavat menetelmät, kuitenkin esittämättä niiden matemaattisia kaavoja taikka pureutumatta menetelmien problematiikkaan. Käytetyt kannattavuutta mittaavat menetelmät ovat koroton ja korollinen takaisinmaksuaika, sijoitetun pääoman tuottoaste (ROI, return on investment) ja diskontattu kassavirta (DCF=discounted cash flow).

Muurlan koulun hybridijärjestelmän investointikustannukset koostuvat järjestelmän rakentamisen kustannuksista, jotka olivat arvonlisäverottomalta urakkahinnaltaan 229 000 € ja automaatiojärjestelmän päivittämisen ja laajentamisen hinnasta, joka oli arvonlisäverottomalta urakkahinnaltaan 36 940 €, eli yhteensä kustannukset olivat 265 940 € alv.0 %. Jäännösarvona käytetään puolta energiakentän rakentamisen kustannuksista, jotka olivat 45 100 €. Laskentakorkona käytettiin 5 %, inflaatioon laskettiin 3 % ja energian eskalaatioon laskettiin 3 %. Lämmitysöljyn hinnaksi laskettiin 16 c/kWh ja sähkön kokonaishinnaksi 14 c/kWh. Nämä sekä muut laskennan lähtöarvot on esitetty kuvassa 42.

	Hybridi	Vanha		
I	265 940	0	€	Hankintahinta
U	0	0	€	Uusinnat
Q <sub>lämpö</sub>	12 113	374 283	kWh/a	Öljyn kulutus vuodessa
W <sub>sähkö</sub>	115 205	0	kWh/a	Sähkön kulutus vuodessa
K <sub>huolto</sub>	0	0	€/a	huoltokulut vuodessa
J	45 100	0	€	Jäännösarvo
n <sub>U</sub>	0	0		uusinnan ajakohta
n	25	25	a	Laskenta-aika
i	5 %	5 %		Laskentakorko
f	3 %	3 %		Inflaatio
f <sub>e</sub>	3 %	3 %		Energian hinnan inflaatio eli eskalaatio
H <sub>lämpö</sub>	16	16	snt/kWh	Polttoöljyn hinta
H <sub>sähkö</sub>	14	14	snt/kWh	Sähkön kokonaishinta siirto + energia
K <sub>lämpö</sub>	1938,14	59885,28	€/a	Polttoöljyn vuosikustannus
K <sub>sähkö</sub>	16128,75	0	€/a	Sähköenergian vuosikustannus
ΣK <sub>energia</sub>	18066,89	59885,28	€/a	Sähkö + öljy vuosikustannus
T	41818,39		€/a	Vuosikustannusten ero
r = (i - f)/(1 + f)	1,942 %	1,942 %		Reaalikorko
r <sub>e</sub> = (i - f <sub>e</sub> )/(1 + f <sub>e</sub> )	1,942 %	1,942 %		Energian hinnan reaalikorko
e <sub>r</sub> = (f <sub>e</sub> - f)/(1 + f)	0,000 %	0,000 %		Energian reaalin hintakehitys

Kuva 42. Investointilaskennassa käytetyt arvot.

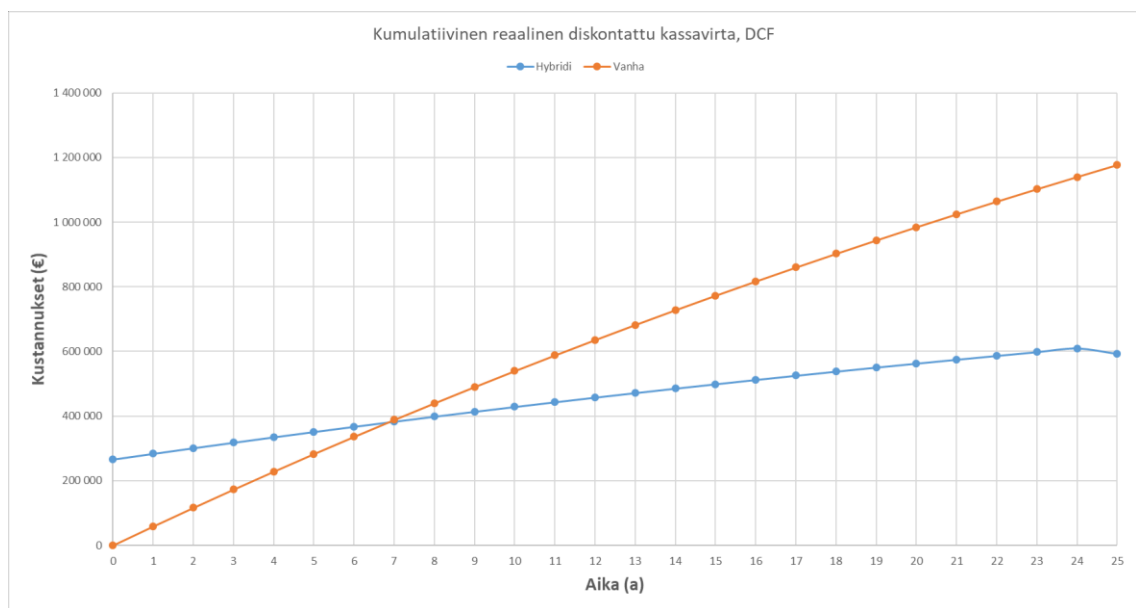
Energiankulutuksen tiedot on haettu rakennusautomaatiosta. Sähkönkulutustiedot on saatu automaatiojärjestelmään lämmönjakohuoneen ryhmäkeskukseen sijoitetusta sähkömittarista, joka mittaa kaikkea ryhmäkeskukseen kytkettyjen laitteiden sähkönkulutusta, ei siis pelkästään maalämpöpumppujen kuluttamaa energiaa. Näitä muita laitteita ovat mm. järjestelmän pumput, lämpimänkäyttövesivaraajan vastukset ja tilan valaistus. Kulutustiedot on haettu aikaväliltä 9.2022–8.2023 ja ne on esitetty kuvassa 43.

pvm	Koko lämmitysjärjestelmän sähkön kulutus (kWh)	Tuotettu lämmitysenergia (kWh)	Öljyllä tuotettu energia (kWh)	Muulla kuin öljyllä tuotettu energia (kWh)	Koko laitoksen COP
syys.22	5709,05	16849,49	0	16849,49	2,95
loka.22	8589,6	22109,01	0	22109,01	2,57
marras.22	12032,53	32265,52	240	32025,52	2,66
joulu.22	16485,52	47626,41	3330	44296,41	2,69
tamm.23	14284,27	42966,51	2930	40036,51	2,80
helm.23	13147,2	39660,19	2720	36940,19	2,81
maal.23	15839,07	42696,3	1990	40706,3	2,57
huhti.23	10778,31	26059,11	120	25939,11	2,41
touko.23	7384,23	16008,1	0	16008,1	2,17
kesä.23	4136,96	5707,53	0	5707,53	1,38
heinä.23	3472,88	3358,99	0	3358,99	0,97
elo.23	3345,73	4119,25	420	3699,25	1,11
<b>Yhteensä</b>	<b>115205,35</b>	<b>299426,41</b>	<b>11750</b>	<b>287676,41</b>	<b>2,50</b>
% osuus kok.			3,92 %	96,08 %	

Kuva 43. Muurlan koulun lämmitysjärjestelmästä mitattuja arvoja.

Muurlan koulun hybridijärjestelmä säästi laskentavuonna energiakustannuksissa 41 818,39 € vuodessa verrattuna vanhaan öljylämmitysjärjestelmään. Jos

energian hinnat pysyisivät 25 vuotta muuttumattomina, syntyisi säästöä tuona aikana 1 045 459,75 €. Yksikertaiseksi takaisinmaksuajaksi muodostuisi 6,4 vuotta. Korolliseksi takaisinmaksuajaksi muodostuisi 6,9 vuotta. Korollinen takaisinmaksuaika huomioi energian hinnan vuotuiset korotukset ja laskentakoron. Sijoitetun pääoman tuottoasteeksi tulee 21 %. Kuvassa 44 on esitetty graafisesti kumulatiivinen reaalin diskontattu kassavirta, josta voidaan havaita hybridijärjestelmän maksaneen itsensä takaisin seitsemännen vuoden kohdalla.



Kuva 44. Muurlan koulun kumulatiivinen reaalin diskontattu kassavirta.

Muurlan koulussa päivitettiin koko kiinteistön automatiikka, joten automatiikan päivityksen kustannuksista voidaan laskea kuuluvaksi hybridijärjestelmän kustannuksiin puolet, jolloin järjestelmän investointikustannuksiksi saadaan 247 470 €.

Vanhan öljylämmitysjärjestelmän pumput ja elektroniikka kuluttivat myös jonkin verran sähköä. Niille arvioidaan sähköenergian kulutukseksi 5 % uuden järjestelmän sähkökulutuksesta eli 5 760 kWh/vuosi.

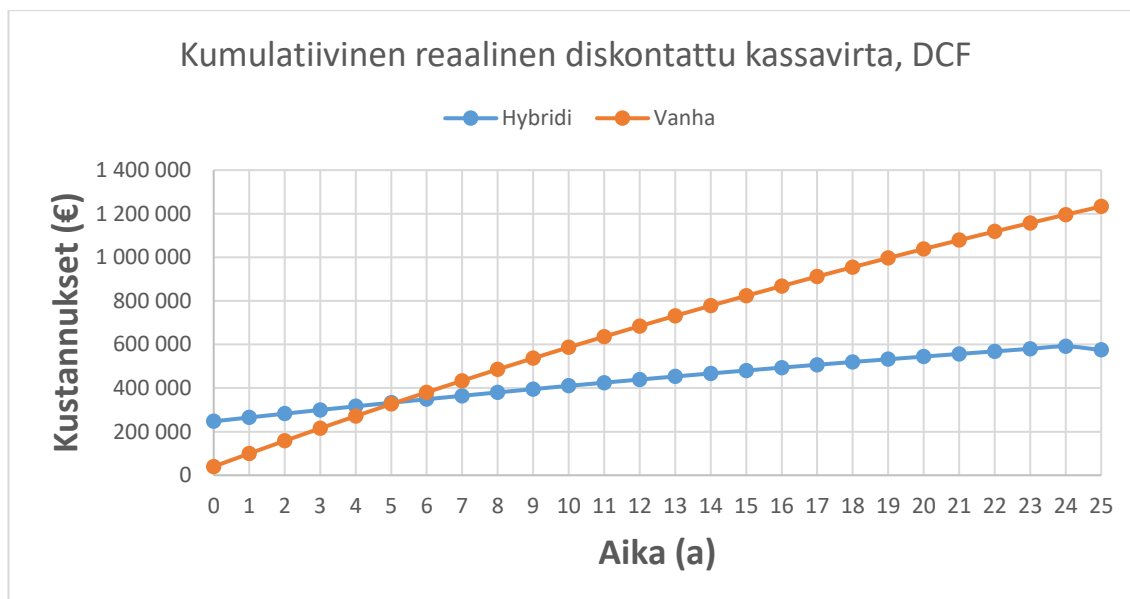
Kuten opinnäytetyön alussa mainitaan, niin vanha öljylämmitysjärjestelmä oli tullut tiensä päähän ja oli uusimisen tarpeessa. Uusimisen kustannuksiksi on

laskelmissa arvioitu 40 000 €. Uudet laskenta-arvot on esitetty kuvassa 45. Öljypolttimien hyötysuhteet on myös pidetty samana (hybridijärjestelmän kondenssiöljykattilan hyötysuhde on 97 % ja vanhan järjestelmän 80 %).

	Hybridi	Vanha		
I	247 470	40 000	€	Hankintahinta
U	0	0	€	Uusinnat
Q <sub>lämpö</sub>	12 113	374 283	kWh/a	Öljyn kulutus vuodessa
W <sub>sähkö</sub>	115 205	5 760	kWh/a	Sähkön kulutus vuodessa
K <sub>huolto</sub>	0	0	€/a	huoltokulut vuodessa
J	45 100	0	€	Jäännösarvo
n <sub>U</sub>	0	0		uusinnan ajakohta
n	25	25	a	Laskenta-aika
i	5 %	5 %		Laskentakorko
f	3 %	3 %		Inflaatio
f <sub>e</sub>	3 %	3 %		Energian hinnan inflaatio eli eskalaatio
H <sub>lämpö</sub>	16	16	snt/kWh	Polttoöljyn hinta
H <sub>sähkö</sub>	14	14	snt/kWh	Sähkön kokonaishinta siirto + energia
K <sub>lämpö</sub>	1938,14	59885,28	€/a	Polttoöljyn vuosikustannus
K <sub>sähkö</sub>	16128,75	806,43745	€/a	Sähköenergian vuosikustannus
ΣK <sub>energia</sub>	18066,89	60691,72	€/a	Sähkö + öljy vuosikustannus
T	42624,83		€/a	Vuosikustannusten ero
$r = (i - f)/(1 + f)$	1,942 %	1,942 %		Reaalikorko
$r_e = (i - f_e)/(1 + f_e)$	1,942 %	1,942 %		Energian hinnan reaalikorko
$e_r = (f_e - f)/(1 + f)$	0,000 %	0,000 %		Energian reaalin hintakehitys

Kuva 45. Laskennan 2 arvot.

Laskennassa 2 Muurlan koulun hybridijärjestelmä säästää energiakustannuksissa laskentavuonna 42 624,83 € verrattuna vanhaan öljylämmitysjärjestelmään. Jos energian hinnat pysyisivät 25 vuotta muuttumattomina, syntyisi säästöä tuona aikana 1 065 620,75 € yksikertaisen takaisinmaksuajan ollessa 4,9 vuotta. Korollinen takaisinmaksuaika on 5,2 vuotta ja sijoitetun pääoman tuottoaste 27 %. Kuvassa 46 on esitetty graafisesti kumulatiivinen reaalin diskontattu kassavirta, josta voidaan havaita hybridijärjestelmän maksaneen itsensä takaisin hieman viidennen vuoden jälkeen.



Kuva 46. Laskennan 2 Muurlan koulun kumulatiivinen reaalin diskontattu kassavirta.

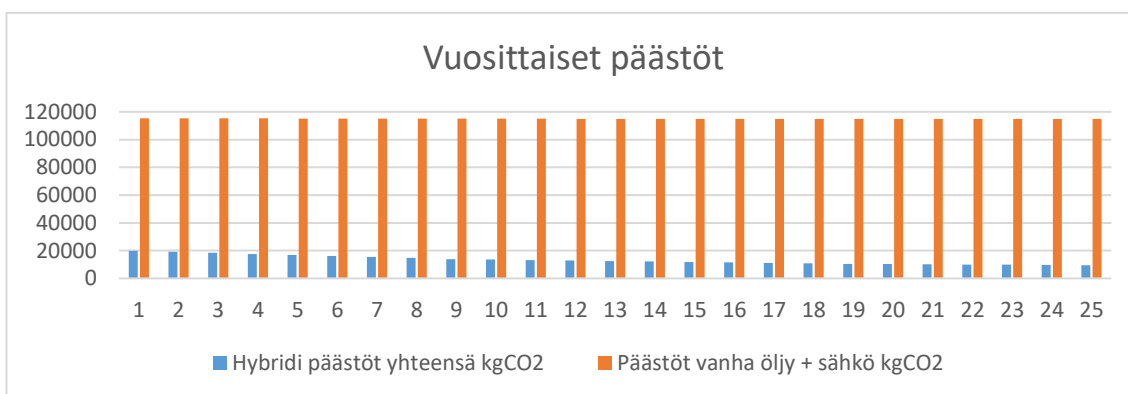
Laskelmat osoittavat hybridijärjestelmään investoimisen tuovan huomattavat vuotuiset säästöt vanhaan järjestelmään verraten sekä investoinnin olevan erittäin kannattava.

## 14 Hiilidioksidipäästöt

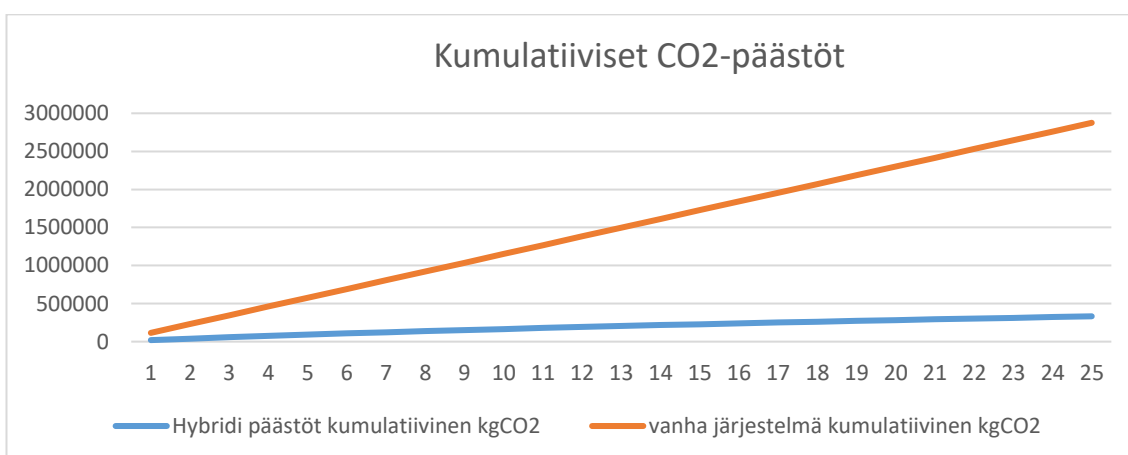
Muurlan koulun hybridilämmitysjärjestelmän hiilidioksidipäästöt on laskettu kuvan 27 kulutustietojen pohjalta 25 vuoden ajanjaksolle, vuodesta 2020 vuoteen 2044. Sähköenergian- ja öljynkulutuksen tuottamat hiilidioksidipäästöjen kertoimet on haettu rakentamisen päästötietokannasta ja esitetty liitteessä 8.

Vanha öljylämmitysjärjestelmä tuottaa pelkällä öljynpoltolla 114 531 kg CO<sub>2</sub> päästöjä vuodessa, kun uusi hybridijärjestelmä puolestaan tuottaa öljynpoltolla vain 3 707 kg CO<sub>2</sub> päästöjä vuodessa. CO<sub>2</sub>-päästölaskentaan lisättäessä sähköenergian käytöstä johtuvat CO<sub>2</sub>-päästöt, ovat vanhan järjestelmän CO<sub>2</sub>-päästöt vuoden 2022 osalta 115 338 kg CO<sub>2</sub> ja uuden hybridijärjestelmän 19 858 kg CO<sub>2</sub>. Eroa muodostuu siis 95 480 kg CO<sub>2</sub>.

Suomen sähköntuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt vähenevät vuosittain johtuen Suomen ilmastopolitiikan päästövähennystavoitteista, jossa siirrytään kohti vähäpäästöistä ja kestäväää energiantuotantoa panostamalla mm. uusiutuvaan energiaan ja ydinvoimaan. Liitteestä 8 on esitetty arviot Suomen sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen vuosittaisesta kehityksestä, joiden pohjalta hiilidioksidilaskelmat on tehty. Kuvassa 47 on esitetty Muurlan koulun vanhan ja uuden lämmitysjärjestelmien vuotuiset CO<sub>2</sub>- päästöt 25 vuoden ajanjaksolla ja kuvassa 48 kumulatiiviset CO<sub>2</sub>- päästöt samaisella ajanjaksolla.



Kuva 47. Muurlan koulun vanhan ja uuden lämmitysjärjestelmien vuotuiset CO<sub>2</sub>-päästöt.



Kuva 48. Muurlan koulun hybridijärjestelmän ja vanhan lämmitysjärjestelmän kumulatiiviset CO<sub>2</sub>-päästöt.

25 vuoden aikana vanha öljylämmitysjärjestelmä tuottaa 2 875 252 kg CO<sub>2</sub> ja uusi hybridilämmitysjärjestelmä 332 410 kg CO<sub>2</sub>. Hiilidioksidipäästöissä syntyy eroa tuona aikana vanhan öljylämmitysjärjestelmän ja uuden hybridilämmitysjärjestelmän välillä 2 542 842 kg CO<sub>2</sub>. Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki vuodessa on 10 300 kg CO<sub>2</sub>e [Sitra 2018], joten hybridijärjestelmän tuoma CO<sub>2</sub> vähennys vastaa 247 vuoden keskivertosuomalaisen tuottamaa CO<sub>2</sub>-päästöjä. OpenCO<sub>2</sub>-palvelun mukaan 2 542 842 kg CO<sub>2</sub> sitoutuu 2 812,9 puukuutioon. Samaisen palvelun mukaan 2 542 842 kg CO<sub>2</sub> on arvoltaan 236 001,2 euroa EU:n päästökaupassa tai vastaa 17 695 490,6 kilometrin autoilua. Lämmitystapamuutoksella hybridijärjestelmään on siis merkittävä vaikutus CO<sub>2</sub>-päästöihin.

Vuonna 2021 esitelty HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) on uusiutuva lämmitysöljy, joka koostuu täysin uusiutuvista raaka-aineista. Valmistaja käyttää tuotteen valmistuksessa kasviöljyjä sekä erilaisia jäte- ja sivuvirtoja. Muurlan koulun kondenssiöljykattila ja poltin ovat yhteensopivia uusiutuvan lämmitysöljyn kanssa. Mikäli koulussa siirryttäisiin käyttämään uusiutuvaa lämmitysöljyä, olisi öljynpoltoista aiheutuvat vuotuiset 3 707 kg CO<sub>2</sub>-päästöt mahdollista tiputtaa nolnaan, mikä tarkoittaisi 25 vuoden ajanjaksolle 92 675 kg CO<sub>2</sub> vähenemää, jolloin hybridijärjestelmän hiilidioksidipäästöt 25 vuoden aikana olisivat 239 735 kg CO<sub>2</sub>.

## 15 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli todentaa saavutetut taloudelliset säästöt ja päästövähennykset, kun vanha öljylämmitysjärjestelmä korvattiin hybridilämmitysjärjestelmällä. Lisäksi tavoitteena oli kerätä tietoa tulevia hankkeita varten. Muita tavoitteita oli sisäilman viihtyvyyden parantaminen älykkäällä kiinteistöautomaatiolla ja vapaajäähdytyksellä.

Hybridijärjestelmän rakentaminen Muurlan kouluun käynnistyi kesällä 2020 vanhan öljylämmityskattiloiden purulla, ja hybridilämmitysjärjestelmän asennustyöt valmistuivat kokonaisuudessaan syksyllä 2020 niin, että koulun normaali toiminta ei häiriintynyt rakennusvaiheen aikana. Rakennusvaiheen päätyttyä alkoivat järjestelmien oikeiden parametrien ja optimointien hakeminen, tämä kesti



noin vuoden, jotta jokaisen vuodenajan tilanteita vastaavat säädöt saatiin haettua ja optimoitua. Projektin alussa linjattiin tavoitteeksi tuottaa maalämpöjärjestelmällä vähintään 95 % vuoden kokonaislämmitysenergiasta, jolloin öljyn osuudeksi jäisi maksimissaan 5 %. Hybridijärjestelmän rakentaminen onnistui, ja maalämpöjärjestelmällä tuotettiin yli 96 % vuoden kokonaislämmitysenergiasta.

Investoinnin kannattavuutta käsittelevissä laskelmissa todennettiin rahallista säästöä kertyneen yli 42 500 € vuodessa, ja 25 vuoden ajanjaksolle on laskelmien mukaan mahdollista tavoittaa yli 1 000 000 €:n säästöt, kun kuluja verrataan vanhaan öljylämmitysjärjestelmään. Laskelmiin vaikuttaa voimakkaasti öljyn- ja sähköenergian välinen hintaero. Tätä kirjoittaessa varsinkin sähköenergian hinta on vaihdellut voimakkaasti johtuen Venäjän harjoittaman Ukrainaan kohdistuvan hyökkäyssodan johdosta. Pitkántähtäimen ennusteet kuitenkin viittaavat sähkön hinnan edullisuuteen johtuen suurista investoinneista uusiutuvaan energiaan. Toisaalta hiilidioksidipäästöjä ja ilmaston lämpiämistä halutaan hillitä, mikä johtaa öljyn kallistumiseen mm. erilaisten päästökauppojen muodossa.

25 vuotta kattavalla laskenta-ajalla tarkasteltuna vanha öljylämmitysjärjestelmä tuottaa CO<sub>2</sub>-päästöjä 2 875 252 kg ja uusi hybridilämmitysjärjestelmä 332 410 kg. Hiilidioksidipäästöissä syntyy eroa tuona aikana vanhan öljylämmitysjärjestelmän ja uuden hybridilämmitysjärjestelmän välillä 2 542 842 kg CO<sub>2</sub>, mikä vastaa keskivertosuomalainen tuottamia hiilidioksidipäästöjä 247 vuoden ajalla. Mikäli fossiilinen lämmitysöljy korvattaisiin uusiutuvalla lämmitysöljyllä, jonka laskennassa käytetty CO<sub>2</sub>-arvo on 0, olisi hybridilämmitysjärjestelmän päästöt yhteensä 239 735 kg, ja päästöt koostuisivat vain sähköenergian tuotannon CO<sub>2</sub>-päästöistä. Lämmitystapamuutoksilla on mahdollista saada aikaiseksi merkittäviä ilmastovaikutuksia.

Muurlan koulun vanha Schneider Electric Atmostech -rakennusautomaatiojärjestelmä päivitettiin projektin aikana uuteen Schneider Electric EcoStruxure Building Operation -järjestelmään, jolla voidaan hallita taloteknisiä järjestelmiä älykkäästi mm. sääennustepohjaisella lämmitysjärjestelmien automaattisella

asetusarvokompensoinnilla ja käyttöaikajaksotuksella. Kiinteistöautomaatiojärjestelmä huolehtii, että tilojen sisäilmaolosuhteet pysyvät viihtyisinä kuitenkin tuhlaamatta turhaan energiaa esimerkiksi aikoina, jolloin koulu ei ole käytössä.

Muurlan kouluun toteutettiin energiakentän liuospiiriin kytketty vapaajäähdytys ilmanvaihdon kautta, mikä helpottaa tilojen käyttäjien viihtyvyyttä hellejaksojen vallitessa. Tästä on tullut positiivista palautetta tilojen käyttäjiltä.

Opinnäytetyössä kuvattiin lämmitysjärjestelmän saneerauksen vaiheita, järjestelmän keskeisiä laitteita ja niiden mitoitusperusteita. Lopuksi tarkasteltiin rakennetun hybridijärjestelmän toimivuutta, kannattavuutta ja vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin. Tämän myötä syntyi kattava määrä tietoa hybridilämmitysjärjestelmistä, joita vastaavia hankkeita harkitsevat tahot voivat käyttää hyödykseen harkitessaan ryhtymistä lämmitystapamuutoksiin.

Opinnäytetyö antaa hyvän kuvan hybridijärjestelmien toiminnasta todellisessa toimintaympäristössä todennetuina tuloksina, sillä järjestelmä valmistui syksyllä 2020, ja sen toimintaa ehdittiin seuraamaan noin kaksi vuotta ennen kuin opinnäytetyön kirjallinen osuus valmistui. Tuohon ajanjaksoon sisältyy kiinteistöautomaatiojärjestelmän parametroitinta ja siihen liittyvää optimointia, mikä on yksi järjestelmän toiminnan kannalta keskeisin ja haastavin vaihe, jotta järjestelmän kaikki lämmönlähteet saadaan toimimaan optimaalisesti niin, että energiantuotantokustannuksiltaan edullisin lämmönlähde tuottaa suurimman osan vaaditusta energian määrästä kulloisellakin hetkellä. Ajanjaksoon sisältyy myös erilaisia laiterikkoja ja huoltojaksoja, jolloin järjestelmä ei ole voinut toimia optimaalisesti, ja esitetyt laskelmat sisältävät myös nämä ajanjaksot. Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet voidaan todeta saavutetuiksi.

Muurlan koulun hybridilämmitysjärjestelmää voidaan tulevaisuudessa parantaa muuttamalla lämmönjakelijärjestelmää matalammalle energiatasolle, esimerkiksi kasvattamalla lämmityspattereiden pinta-alaa. Näin tekemällä maalämmön tuottamaa lämmitysenergian osuutta voidaan kasvattaa. Sopivia hetkiä tämän

kaltaisille muutoksille on, kun oleva lämmönjakelujärjestelmä tai sen osa vi-  
kaantuu mm. vuotojen ja korroosion vaikutuksesta, jolloin sen uusiminen koko-  
naisuudessaan tulee kannattavaksi. Muurlan koulun energiankulutusta voidaan  
pienentää mm. lisäeristämällä rakenteita, jolloin rakenteiden läpi johtuvaa ener-  
giaa saadaan pienennettyä. Edellä kuvattuja energiatehokkuuden parannustoi-  
menpiteitä on koulussa jo lähdettykin tekemään.

Opinnäytetyötä kirjoittaessa kunnilla ja kuntien suoraan omistamilla palveluta-  
loilla ja vanhustenasunnoilla on mahdollisuus hakea Asumisen rahoitus- ja ke-  
hittämiskeskus ARA:lta avustusta omistamiensa kiinteistöjen öljylämmityksestä  
kokonaan luopumiseen valtion talousarvion mukaisesti.

Kuitenkin täysin toimivan öljylämmitysjärjestelmän korvaaminen kokonaisuudes-  
saan maalämmöllä on usein kohtuuttoman kallista ja usein jopa mahdotonta  
kiinteistön lämmönjakelujärjestelmän korkean mitoituslämpötilatason johdosta.  
Huipputehon tarpeen kattaminen esim. sähkökattilalla saattaa johtaa tietyissä  
tapauksissa korkeisiin investointikustannuksiin ja pitkiin takaisimaksuaikoihin,  
sillä sähköliittymän ja tonttijohdon kokoa saatetaan joutua kasvattamaan. Kuten  
opinnäytetyö osoittaa, on hiilidioksidipäästöjä mahdollista tiputtaa merkittävästi.  
Vaikka öljy on mukana hybridilämmitysjärjestelmässä, oikealla mitoituksella öl-  
jyn osuudeksi tuotetusta kokonaislämmitysenergiasta jää alle 4 prosenttia. Öljy-  
poltin on usein mahdollista muuttaa vähäisin toimenpitein käyttämään uusiutu-  
vaa polttoöljyä, jolloin öljyn laskennalliset CO<sub>2</sub>-päästöt tippuvat nolnaan, ja jär-  
jestelmän kustannukset pysyvät toteutuskelpoisina. Avustusten ehtojen vaati-  
muksia olisikin paikallaan arvioida uudelleen.

## Lähteet

Aittomäki, Antero. 2012. Kylmätekniikka 4. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry.

Asentajan käsikirja F1155. 2023. Verkkoaineisto. NIBE Energy Systems Oy. <<https://www.nibe.fi/assets/documents/9368/231561-1.pdf>>. Luettu 10.12.2023.

Energiatehokkuussopimukset 2022. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/energiatehokkuussopimukset](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiatehokkuussopimukset)>. 19.8.2022. Luettu 14.2.2023.

Gustafsson Ville. 2023. Senior Service Engineer, Schneider Electric. Sähköpostiviesti 22.2.2023.

Harju, Pentti. 2006. Lämmitystekniikan oppikirja. Hamina: Penan tieto-opus.

Helsingin geoenergiapotentiaali. 2019. Verkkoaineisto. <[https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Helsingin\\_ggeoenergiapotentiaal\\_luonnos.pdf](https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Helsingin_ggeoenergiapotentiaal_luonnos.pdf)>. Luettu 27.3.2023.

Huusko Asmo. 2022. Geoenergia. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo. 2013. Energiakaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Helsinki: Ympäristöministeriö. <[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Luettu...

Jäähdytysjärjestelmien Energialaskentaopas. 2011. Verkkoaineisto. <[https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/jaahdytys\\_laskentaopas\\_2012.pdf](https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/jaahdytys_laskentaopas_2012.pdf)>. Luettu 21.7.2023.

Kaappola, Esko. 2020. Lämmönlähteet. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 25.11.2022.

Kaukolämpöverkot. 2021. Energiateollisuus ry. Verkkoaineisto. <<https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/kaukolampoverkot/>>. Luettu 10.12.2023.

Kauppila, Kari. 2021. Tuotantoperustan optimointi. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 19.3.2021.

Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki. 2018. Verkkoaineisto. Sitra. <<https://www.sitra.fi/artikkelit/keskivertosuomalaisen-hiilijalanjalki>>. Luettu 13.9.2023.

Laitinen, Ari. 2011. Impacts of large penetration of heat pumps on the electricity use. VTT Research report. Verkkoaineisto. <<https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2011/VTT-R-03174-11.pdf>>. Luettu 5.11.2023.

Leppäharju, Nina. 2023. EED- kaivomitoitustyökalu. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Espoo. Luento 17.03.2023.

LVI-kalenteri 2023. 2023. Helsinki: Suomen Kalenterit Oy.

Lämmitys kevyellä polttoöljyllä. 2005. RT 52-10857.Rakennustieto.

Lämpöä omasta maasta 2012. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa\\_omasta\\_maasta\\_Maalampopumput.pdf](https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf)>. Luettu 16.3.2023.

Maalämpökaivot Helsingissä, 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-08-20.pdf>>. Luettu 22.2.2023.

Pientalon lämmitys. 2008. Verkkoaineisto. Opetushallitus. <[http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/pientalon\\_lammitys/](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/pientalon_lammitys/)>. Luettu 15.2.2023.

Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. K1/2021. 2021. Energiategollisuus ry.

Salon kaupunki. 2021. Muurlan koulu. Verkkoaineisto. <<https://salo.fi/varhaiskasvatus-ja-koulutus/perusopetus/koulut/muurlan-koulu/>>. 23.11.2021. Luettu 9.2.2023.

Salon kaupunki. 2021b. Salon kaupungin ilmasto- ja ympäristöohjelma 2021–2025. Verkkoaineisto. <<https://salo.fi/wp-content/uploads/2021/07/Salon-ilmasto-ja-ymparistooohjelma-2021-2025-kv-24052021.pdf>>. Luettu 21.8.2023.

Sandberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julakisut Oy.

Teknillinen suositus TS-11. 2016. Helsinki: Lämmitysenergia Yhdistys ry.

Viesmann. Datasheet. Verkkoaineisto. <[https://www.viessmann.ae/content/dam/vi-brands/AE/Brochures/DS-Vitocal%20300-G%20and%20350-G\\_5822552\\_3\\_vdp.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original.media\\_file.download\\_attachment.file/DS-Vitocal%20300-G%20and%20350-G\\_5822552\\_3\\_vdp.pdf](https://www.viessmann.ae/content/dam/vi-brands/AE/Brochures/DS-Vitocal%20300-G%20and%20350-G_5822552_3_vdp.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/DS-Vitocal%20300-G%20and%20350-G_5822552_3_vdp.pdf)>. Luettu 6.8.2023.

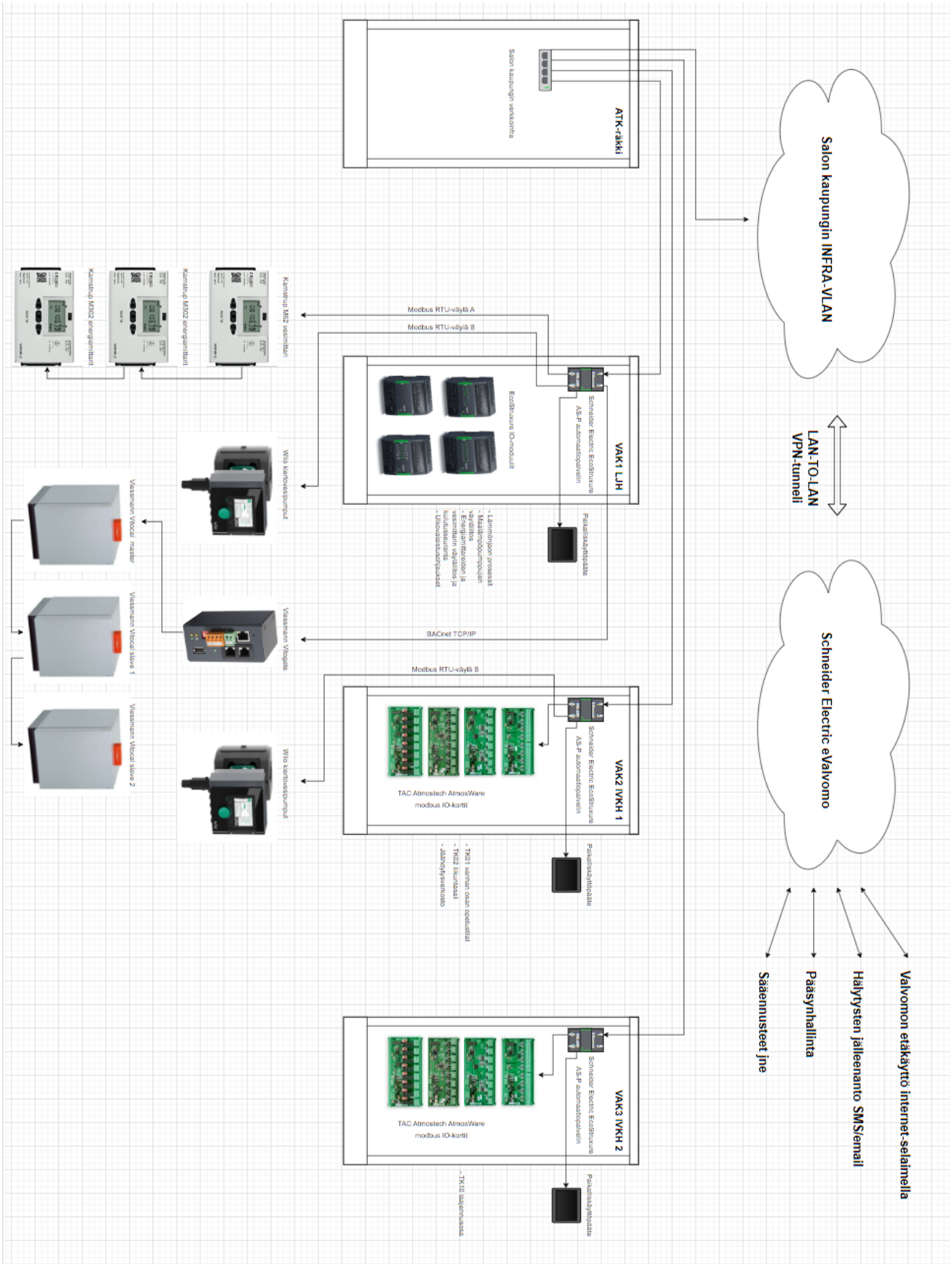
Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2017. Verkkoaineisto. Suomen säädöskokoelma. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>>. Luettu 11.7.2023.

Ympäristöministeriön asetus 1047/2017 rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. 2017. Verkkoaineisto. Suomen säädöskokoelma. <<https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/sk20171047.pdf>>. Luettu 10.4.2023

Öljykömmityksestä luopuminen. 2023. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/oljylammituksesta-luopuminen>>. Luettu 15.2.2023.

Öljylämmitys. 2022. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/oljylammitus](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/oljylammitus)>. 23.3.2022. Luettu 15.2.2023.

Liite 1. Muurlan koulun rakennusautomaatio kaavio.



## Liite 2. Muurlan koulun maalämpö laiteluettelo

Muurlan koulu

Maalämpö laiteluettelo:

Vitocal 300-G BW 301.A45

Vitocal 300-G BW 301.A45

Vitocal 300-G BW 301.A45

Vitocell 340-M SVKC 950L

Vitoradial 300-T 157 kW

Weishaupt oil burner WL20/2-C Z

Viessmann GENO-neutra V NO-12

Vitotrans 100 PWT 30bar

Vitocell 100-B CVBB 950L

Vitocell 100-B CVBB 950L

Akva pro 500 fer



## Liite 3. Maalämpöpumppu Vitocal 300-G 301.A45 tekniset tiedot

### Liuos-/vesilämpöpumppujen tekniset tiedot

Tyyppi BW/BWS		301.A21	301.A29	301.A45
<b>Tehotiedot</b> normin EN 14511 mukaan (B0/W35, lämpötilaero 5 K)				
Nimellislämpöteho	kW	21,2	28,8	42,8
Kylmäteho	kW	17,0	23,3	34,2
Sähköteho	kW	4,48	5,96	9,28
Teholuku $\epsilon$ (COP)		4,73	4,83	4,60
<b>Liuos (ensiöpiiri)</b>				
Tilavuus	l	6,5	8,5	11,5
Vähimmäistilavuusvirta	l/h	3300	4200	6500
Läpivirtausvastus (minimitilavuusvirralla)	mbar	70	95	154
	kPa	7	9,5	15,4
Menoveden maksimilämpötila (liuospiirin nesteen sisäntulo)	°C	25	25	25
Menoveden minimilämpötila (liuospiirin nesteen sisäntulo)	°C	-10	-10	-10
<b>Lämmitysvesi (toisiopiiri)</b>				
Tilavuus	l	6,5	8,5	11,5
Vähimmäistilavuusvirta	l/h	3740	5050	7360
Läpivirtausvastus nimellistilavuusvirralla	mbar	120	130	210
	kPa	12	13	21
Vähimmäistilavuusvirta	l/h	1900	2550	3700
Läpivirtausvastus (minimitilavuusvirralla)	mbar	38	38	65
	kPa	3,8	3,8	6,5
Menoveden maksimilämpötila	°C	60	60	60
<b>Lämpöpumpun sähköarvot</b>				
Nimellisjännite kompressorin	V	3/PE 400 V/50 Hz		
Nimellisvirta kompressorin	A	16	22	34
Cos $\phi$		0,8	0,8	0,8
Kompressorin käynnistysvirta (käynnistysvirran rajoittimella)	A	< 30	41	47
Kompressorin käynnistysvirta roottorin ollessa juutunut	A	95	118	174
Kompressorin suojaus	A	1 x C16A 3-napainen	1 x C25A 3-napainen	1 x C40A 3-napainen
<b>Suojausluokka</b>				
<b>Ohjauskeskuksen sähköarvot</b>				
Nimellisjännite ohjauskeskus/elektronikka	V	1/N/PE 230 V/50 Hz 1 x B16A		
Ohjauskeskuksen/elektronikan suojaus		T 6,3 A/250 V		
Ohjauskeskuksen/elektronikan sulake	A			
Ohjauskeskuksen/lämpöpumpun 1. tehon, elektronikan sähkötehon maksimikulutus (tyyppi BW 301.A)	W	25	25	25
Ohjauskeskuksen/lämpöpumpun 2. tehon, elektronikan sähkötehon maksimikulutus (tyyppi BWS 301.A)	W	20	20	20
Ohjauskeskuksen/elektronikan 1. ja 2. tehon sähkötehon kulutus	W	45	45	45
Kotelointiluokka		IP20	IP20	IP20
<b>Kylmäainepiiri</b>				
Kylmäaine		R410A	R410A	R410A
- Täyttö määrä	kg	4,7	6,2	7,7
- Kasviuonepotentiaali (GWP)		2088	2088	2088
- CO <sub>2</sub> -ekvivalentti	t	9,8	13,0	16,1
Sallittu käyttöpainne korkeapainepuoli	bar	43	43	43
	MPa	4,3	4,3	4,3
Sallittu käyttöpainne matalapainepuoli	bar	28	28	28
	MPa	2,8	2,8	2,8
Kompressorin tyyppi		Täyshermeettinen scroll		
Oljy kompressorissa	l	2,65	3,25	3,38
Oljymäärä kompressorissa			Emkarate RL32 3MAF	
<b>Sallittu käyttöpainne</b>				
Ensiöpiiri	bar	3	3	3
	MPa	0,3	0,3	0,3
Toisiopiiri	bar	3	3	3
	MPa	0,3	0,3	0,3
<b>Mitat</b>				
Kokonaispituus	mm	1085	1085	1085
Kokonaisleveys	mm	780	780	780
Kokonaiskorkeus ilman käyttöyksikköä	mm	1074	1074	1074
Kokonaiskorkeus (käyttöyksikkö aukikäännettynä, vain tyyppi BW 301.A)	mm	1267	1267	1267

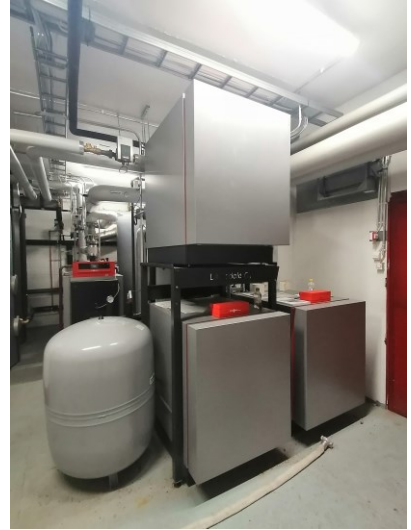
### Tekniset tiedot Vitocal 300-G (jatkoa)

Tyyppi BW/BWS		301.A21	301.A29	301.A45
<b>Paino</b>				
Lämpöpumppu 1. teho (tyyppi BW 301.A)	kg	245	272	298
Lämpöpumppu 2. teho (tyyppi BWS 301.A)	kg	240	267	293
<b>Liitännät (ulkokierre)</b>				
Menovesi/paluuvesi ensiöpiiri	G	2	2	2
Menovesi/paluuvesi toisiopiiri	G	2	2	2
<b>Ääniteho</b> (mittaus nojautuen normiin EN 12102/ EN ISO 9614-2)				
Arvotettu äänen kokonaistehotaso kun B0 <sup>±3</sup> /W35 <sup>±5</sup> K				
- Nimellislämpöteholla	dB(A)	42	48	46
<b>Energiatohokkuusluokka</b> EU-asetuksen nro 813/2013 mukaan				
Lämmitys, keskimääräiset ilmasto-olosuhteet				
- Matalalämpösovellus (W35)		A++	A++	A++
- Keskilämpösovellus (W55)		A++	A++	A++
<b>Lämmityksen tehotiedot</b> EU-asetuksen nro 813/2013 mukaan (keskimääräiset ilmasto-olosuhteet)				
Matalan lämpötilan sovellus (W35)				
- Energiatohokkuus $\eta_s$	%	201	211	199
- Nimellislämpöteho $P_{rated}$	kW	24	33	49
- Kausikohtainen tehokkuus (SCOP)		5,23	5,48	5,18
Keskilämpötilan sovellus (W55)				
- Energiatohokkuus $\eta_s$	%	140	138	138
- Nimellislämpöteho $P_{rated}$	kW	22	30	45
- Kausikohtainen tehokkuus (SCOP)		3,70	3,65	3,65

## Liite 4. Kuvia projektin vaiheista







## Liite 5. Jäähdytyspatterin alkuperäinen mitoitus TK01 luokkatilat



<b>Flexomix</b>	<i>Tekniset tiedot</i>	1 (1)
<b>Projekti</b>	Muurlan Koulu, Salo	
<b>Ilmastointikone</b>	TK-1 JP	
<b>Koko</b>	300 2,40 m <sup>3</sup> /s	



Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksipuhallus ja lisäpainehäviö huomioiden.

### SFPv-LUKU (SFPv)

Laskelma	Ilmastointikone
	Ecodesign 2018-Ei hyväksytty

### MITAT JA PAINOT

Leveys	1 616	mm
Korkeus	843	mm
Pituus	520	mm
Paino	166	kg

### CASING MODEL, EN1886

AA-50

### PERUSTIEDOT

		<i>Tuloilma</i>	
Alkutiedot	Ilmamäärä	2,40	m <sup>3</sup> /s
	Kanavapaine	250	Pa
	Ulkoisen painehäviön jakautuminen		
	Ulkoilma/Tuloilma Poistoilma/Jäteilma	(50/200)	Pa
Laskelma	Otsapintanopeus	2,1	m/s
	Pisaraerottimen painehäviö	12	Pa
	Jäähdytyspatteri, vesi (kuiva patteri)	185	Pa

### JÄÄHDYTYS-PATTERI, VESI

Alkutiedot	Ilman lämpötila sisään	27,0	°C
	Suhteellinen kosteus sisään	50	%
	Lämpötila ulos (toivottu)	15,0	°C
	Tulevan nesteen lämpötila	7,0	°C
	Toivottu lähtevän nesteen lämpötila	12,0	°C
	Pakkasenkestävyys	30	%
	Jäätymissuoja	Etanoli	
Laskelma	Lämpötila ulos	15,0	°C
	Suhteellinen kosteus ulos	92	%
	Otsapintanopeus	2,8	m/s
	Lähtevän nesteen lämpötila	13,0	°C
	Nestevirta	1,90	l/s
	Nesteen nopeus	1,1	m/s
	Painehäviö, neste	27,1	kPa
	Tehovaihtoehto	06	
	Ehdotettu jäähdytysteho	45,6	kW
	Kondensoituminen	17,0	l/h
	Putkiliitännän kätisyys	Huolto puoli	
	Reititys	Pitkä	
	Lamellijako	2,0	mm
	Putkiliitäntä	50	
	Sisätilavuus	26	l

## Liite 6. Jäähdytyspatterin alkuperäinen mitoitus TK02 liikuntasali



Flexomix	Tekniset tiedot	1 (1)
Projekti	Muurlan Koulu, Salo	
Ilmastointikone	TK-2 JP	
Koko	360 2,60 m <sup>3</sup> /s	



Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksipuhallus ja lisäpainehäviö huomioiden.

### SFPv-LUKU (SFPv)

Laskelma Ilmastointikone  
Ecodesign 2018-Ei hyväksyty

### MITAT JA PAINOT

Leveys	1 616	mm
Korkeus	1 030	mm
Pituus	520	mm
Paino	168	kg

### CASING MODEL, EN1886

AA-50

### PERUSTIEDOT

		Tuloilma	
Alkutiedot	Ilmamäärä	2,60	m <sup>3</sup> /s
	Kanavapaine	250	Pa
	Ulkoisen painehäviön jakautuminen		
	Ulkoilma/Tuloilma Poistoilma/Jäteilma	(50/200)	Pa
Laskelma	Otsapintanopeus	1,8	m/s
	Jäähdytyspatteri, vesi (kuiva patteri)	98	Pa

### JÄÄHDYTYS-PATTERI, VESI

Alkutiedot	Ilman lämpötila sisään	27,0	°C
	Suhteellinen kosteus sisään	50	%
	Lämpötila ulos (toivottu)	15,0	°C
	Tulevan nesteen lämpötila	7,0	°C
	Pakkasenkestävyys	30	%
	Jäätymissuojat	Etanoli	
Laskelma	Lämpötila ulos	15,0	°C
	Suhteellinen kosteus ulos	91	%
	Otsapintanopeus	2,4	m/s
	Lähtevän nesteen lämpötila	11,3	°C
	Nestevirta	2,94	l/s
	Nesteen nopeus	1,5	m/s
	Painehäviö, neste	38,6	kPa
	Tehovaihtoehto	04	
	Ehdotettu jäähdytysteho	50,1	kW
	Kondensoituminen	19,6	l/h
	Putkiliitännän kätisyys	Huoltoapuoli	
	Reititys	Pitkä	
	Lamellijako	2,0	mm
	Putkiliitäntä	50	
	Sisätilavuus	23	l

## Liite 7. TK01 jäähdytyspatteri pahin mitoitustilanne



Flexomix

Tekniset tiedot

1 (1)



Project name Projekti1  
Name of AHU KOULU PROJEKTI  
Koko 300 2,40 m³/s

Tämän koneen sähkötehokkuusluku (SFPv) on laskettu puhtailla suodattimilla, roottorin puhtaaksipuhallus ja lisäpainehäviö huomioiden.

## SFPv-LUKU (SFPv)

Laskelma Ilmastointikone  
Ecodesign 2018-Ei hyväksytty

## MITAT JA PAINOT

Leveys	1 616	mm
Korkeus	843	mm
Pituus	520	mm
Paino	166	kg

## Mitoitusulkolämpötila, talvi

-26,0 °C

## CASING MODEL, EN1886

AA-50

## PERUSTIEDOT

		<i>Tuloilma</i>	
Alkutiedot	Ilmamäärä	2,40	m³/s
	Kanavapaine	250	Pa
Ulkoisen painehäviön jakautuminen			
Ulkoilma/Tuloilma		(50/200)	Pa
Poistoilma/Jäteilma			
Laskelma	Otsapintanopeus	2,1	m/s
	Pisaraerottimen painehäviö	12	Pa
	Jäähdytyspatteri, vesi (kuiva patteri)	186	Pa

## JÄÄHDYTYS-PATTERI, VESI

Alkutiedot	Ilman lämpötila sisään	30,9	°C
	Suhteellinen kosteus sisään	42	%
Lämpötila ulos (toivottu)			
Laskelma	Tulevan nesteen lämpötila	10,6	°C
	Lämpötila ulos	15,0	°C
	Suhteellinen kosteus ulos	92	%
	Otsapintanopeus	2,8	m/s
	Lähtevän nesteen lämpötila	16,9	°C
	Nestevirta	2,33	l/s
	Nesteen nopeus	1,3	m/s
	Painehäviö, neste	30,9	kPa
	Tehovaihtoehto	06	
	Ehdotettu jäähdytysteho	61,4	kW
	Kondensoituminen	24,2	l/h
Putkiliitännän kätsisyys			
		Huoltopuoli	
		Pitkä	
		2,0	mm
		50	
		25	l

## Liite 8. Rakentamisen päästötietokannan CO<sub>2</sub>- päästökertoimet

co2data.fi/

Energiamuoto	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120
Sähkö	153	89	59	45	34	22	15	10	7	5	3
Kaukolämpö	147	114	82	54	29	21	15	11	8	6	4
Fossiliset polttoaineet	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306
Biopolttoaineet	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Uusiutuva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	g CO <sub>2</sub> /kWh
	Sähkö
2020	153
2021	146,6
2022	140,2
2023	133,8
2024	127,4
2025	121
2026	114,6
2027	108,2
2028	101,8
2029	95,4
2030	89
2031	86
2032	83
2033	80
2034	77
2035	74
2036	71
2037	68
2038	65
2039	62
2040	59
2041	57,6
2042	56,2
2043	54,8
2044	53,4
2045	52
2046	50,6
2047	49,2
2048	47,8
2049	46,4
2050	45
2051	43,9
2052	42,8
2053	41,7
2054	40,6