



Juri Smirnov

Saneerauskohteen väliaikaisen lämmitysjärjestelmän suunnittelu ja mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

10.9.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Juri Smirnov
Otsikko:	Saneerauskohteen väliaikaisen lämmitysjärjestelmän suunnittelu ja mitoitus
Sivumäärä:	50 sivua + 4 liitettä
Aika:	10.9.2022
Tutkinto:	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	LVI-suunnittelu
Ohjaaja:	lehtori Pasi Partonen

Insinööriyön tarkoituksena oli esittää saneerauskohteissa yleisesti käytettyjä väliaikaisia lämmitysratkaisuja sekä energiamuotoja ja suunnitella Suomen Kansallisteatterin saneerauskohteeseen nykyajan vaatimukset täyttävä energiatehokas lämmitysjärjestelmä.

Insinööriyössä käydään yksityiskohtaisesti läpi saneerauskohteiden työmaa-aikaisen lämmityksen suunnitteluperiaatteet sekä tutustutaan työmaa-aikaisen lämmityksen tehontarpeen laskentaperusteisiin. Lämpöhäviölaskelman sekä lämmitysjärjestelmien energiankulutus- ja kustannusvertailun perusteella Kansallisteatterin työmaa-aikaiseksi lämmitysjärjestelmäksi on valittu ekologinen vesikertoinen kaukolämpöjärjestelmä. Järjestelmän energiatehokkuuden parantamiseksi on esitetty hankintahinnaltaan edullinen mutta huomattavia säästöjä tuova ratkaisu.

Työn tuloksena syntyi väliaikaisen lämmitysjärjestelmän suunnitteluopas. Työssä on esitetty suunnittelun kaikki vaiheet lähtötietojen hankinnasta toteutukseen.

Avainsanat: LVI, väliaikainen lämmitysjärjestelmä, lämpöhäviö

Abstract

Author: Juri Smirnov
Title: Design and Planning of Temporary Heating System for a Building Site
Number of Pages: 50 pages + 4 appendices
Date: 10 September 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Service Engineering
Specialisation option: HVAC Design
Instructor: Pasi Partonen, Senior Lecturer

The looked into the temporary heating solutions and energy forms commonly used in renovation projects. The primary aim was to design an energy-efficient heating system to meet the modern requirements for the renovation project of the Finnish National Theatre.

The design principles for temporary heating of renovation sites were reviewed in detail, and the calculation criteria for the power demand for onsite heating were introduced. Based on the heat loss calculations and the comparisons of the energy consumption and costs of varied heating systems, an ecological water-based district heating system was chosen as the National Theatre's on-site heating system. In order to improve the energy efficiency of the system, a low-cost solution that offers significant savings was proposed.

The work resulted in an extensive guide to the design of a temporary heating system. The work presented all the stages of planning, from the acquisition of input data to implementation. Thus, it can be used as a guide in similar, demanding projects.

Keywords: HVAC, temporary heating system, heat loss

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta, tavoite ja rajaukset	1
1.2	Suomen Kansallisteatteri	2
2	Rakentamisaikaisen lämmityksen suunnittelun periaatteet	4
2.1	Lämmityksen suunnittelun lähtökohdat	5
2.2	Mitoituslämpötila	7
2.3	Lämmitysmuodot	8
2.3.1	Nestekaasu	8
2.3.2	Polttoöljy	10
2.3.3	Sähkö	11
2.3.4	Kaukolämpö	12
2.3.5	Lämpöpumppu	14
2.4	Lämmitysjärjestelmän toteutus	15
2.5	Lämpötilan valvonta	17
3	Työmaa-aikaisen lämmityksen tehontarpeen laskentaperusteet	19
3.1	Rakenteiden lämmönläpäisykertoimen laskenta	20
3.2	Saneerattavan rakennuksen lämmöntarve	22
3.2.1	Pinta-alat	23
3.2.2	Lämpötilat	23
3.2.3	Kylmäsillat	24
3.2.4	Ilmavuodot	25
3.2.5	Oviaukkojen lämpöhäviöt	27
4	Suomen Kansallisteatterin lämmitystehontarpeen laskenta	30
4.1	Rakennuksen lähtötiedot	30
4.2	Avonaisten ovien lämpöhäviöt	34
5	Laskentatulokset sekä lämmitysjärjestelmän mitoitus	35
6	Lämmitysjärjestelmän valinta	39
7	Lämmitysjärjestelmän asennuskuvaus	41
8	Lämmityslaitteet	43

9	Yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liitteet	

Liite 1. Suomen Kansallisteatterin johtumislämpöhäviölaskelma

Liite 2. Lämmityslaitteiden ja olosuhdemittareiden sijoittelu

Liite 3. Viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssin arvot

Liite 4. Rakennuksen ja rakennusvaipan tyypilliset ilmanvuotoluvut

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta, tavoite ja rajaukset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja mitoita Suomen Kansallisteatterin 1900-luvun puolessa välissä rakennettuun ja rakennusliike SRV Oy:n toimesta saneerattavaan laajennusosaan työmaa-aikainen lämmitysjärjestelmä, joka täyttää asiakkaan sisäilmastolle asettaman +15 C:n lämpötilavaatimuksen.

Hyvin suunnitellulla ja toimivalla työmaalämmityksellä on iso vaikutus työolosuhteisiin sekä rakennustyön laatuun. Rakennusaikainen lämmitys auttaa pysymään aikatauluissa, vähentää rakennusvirheitä ja nostaa työtehoa. Työmaa-aikainen lämmitys kannattaa suunnitella huolella, silläärkevin ja kustannustehokkain kokonaisuus saattaa muodostua usean lämmitysmuodon yhdistelmästä. Tarkoituksenmukainen, muunneltava ja toimiva järjestelmä luo työmaalle haastavimpina vuodenaikoina meneillään olevien työvaiheiden kannalta optimaaliset sekä kriteerit täyttävät ilmasto-olosuhteet.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään vesikiertoisen kaukolämpöjärjestelmän suunnitteluun sekä rakennuksen lämpöhäviölaskelmaan perustuvaan järjestelmän mitoitukseen. Lämmitysratkaisun valinnassa on otettu huomioon, että vuoteen 2035 mennessä Suomi on sitoutunut olemaan täysin hiilineutraali yhteiskunta. [1.] Kaukolämpö on tällöin erinomainen vaihtoehto työmaa-aikaiseksi lämmitysmuodoksi, sillä nykyään yhä useampi energiatoimittaja tarjoaa uusiutuvaa kaukolämpöä. Opinnäytetyössä tehdyn vertailun perusteella kaukolämpö on myös muita työmailla yleisesti käytettyjä energiamuotoja edullisempi.

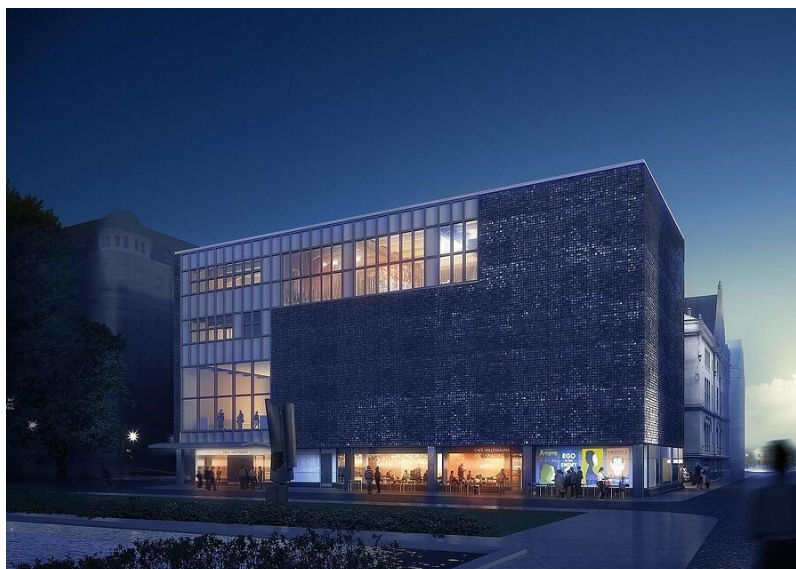
Uutena teknologiana työmaiden lämmityksessä on alettu hyödyntää lämpöpumpputekniikkaa. Lähimmät työmaiden väliaikaiseen lämmitykseen erikoistuneiden ilmavesilämpöpumppujärjestelmien laitetoimittajat sijaitsevat Ruotsissa, enkä lukuisista yrityksistä onnistunut heitä tavoittamaan. Tämän takia jätin lämpöpumpputeknologian käsittelyn opinnäytetyöstä pois.

Opinnäytetyö on tehty palvelemaan Suomen Kansallisteatterin rakennustyömaata, mutta työssä esitettyä periaatteita voidaan soveltaa muun muassa tulevaisissa SRV:n hankkeissa.

Opinnäytetyö tukee työtäni SRV:llä, jossa työskentelen talotekniikan asiantuntijana. Vastuualueeseeni kuuluu muun muassa työmaan olosuhdevalvonta, johon sisältyy työmaa-aikaisen lämmityksen toteutus- ja valvontatehtävät.

1.2 Suomen Kansallisteatteri

Suomalainen Kansallisteatteri perustettiin toukokuussa 1872. Rakennuskokonaisuus käsittää vuonna 1902 valmistuneen teatteritalon (Suuri näyttämö), 1930-luvulla valmistuneen laajennuksen sekä vuonna 1954 valmistuneen Pienen näyttämön rakennuksen [2].



Kuva 1. Pienen näyttämön rakennus [4].

Kansallisteatterissa on kolme näyttämöä. Suuri näyttämö sijaitsee teatterin päärakennuksessa, pieni näyttämö ja Willensauna sijaitsevat taas Kaisaniemen puiston puolella. Kansallisteatterin ohjelmisto esitetään joskus myös muissa tiloissa, kuten lämpiössä, harjoitushuoneissa ja taivassalissa.

Rakennuskokonaisuuden ensimmäinen peruskorjausvaihe toteutettiin vuosina 1999–2002, ja se käsitti pääasiassa vuoden 1902 rakennusvaiheen (Suuren näyttämön vanhan osan). Toisen vaiheen peruskorjauksen suunnittelu ja toteutus oli alun perin tarkoitus viedä läpi heti ensimmäisen vaiheen peruskorjauksen jälkeen. Projekti kuitenkin viivästyi huomattavasti vuodesta 2002. [3.]

Toisen vaiheen Pienen näyttämön rakennuksen peruskorjaus käynnistettiin keuhalla 2020 [3].

Nyt tehtävässä peruskorjauksessa katutasolla sijaitsevan entisen Willensaunan tilalle rakennetaan uusi ravintola, joka toimii myös teatteriesitysten aikana lämpökäytössä.

Suomen Kansallisteatteri sisältyy valtakunnallisesti merkittävään rakennettuun kulttuuriympäristöön. Rakennus peruskorjataan rakennussuojelun periaatteita noudattaen Museoviraston valvonnassa.

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan väliaikaista lämmitysjärjestelmää sekä 50-luvulla rakennettuun ja toisessa peruskorjausvaiheessa saneerattavaan Pienen näyttämön rakennukseen että 30-luvulla rakennettuun laajennukseen.

2 Rakentamisaikaisen lämmityksen suunnittelun periaatteet

Rakennusaikaisella lämmityksellä pyritään saavuttamaan työskentelyn, tilan ja rakenteiden kannalta suunnitelmien mukaiset vaaditut olosuhteet. Lämmitykseen kuuluu oleellisena osana myös tilojen ja pintarakenteiden kuivatus, mikä taas edesauttaa rakennusprosessin etenemistä. Rakennusprojektit voidaan viedä tehokkaasti läpi, jopa vuoden kylmimpinä aikoina. Työmaa valmistuu nopeammin, sillä aikatauluja ei tarvitse säätää sään mukaan ja mukavat työskentelyolosuhteet vaikuttavat merkittävästä työn tehoon ja laatuun.

Hyvin suunnitelluilla lämmitysratkaisuilla saavutetaan oikeat ympäristöolosuhteet, jolloin lämpötila ja suhteellinen kosteus pysyvät tavoitearvoissaan. Estämällä kosteuden aiheuttamat haitat mm. sisätiloissa varastoidut materiaalit ja rakennustarvikkeet, erityisesti puu ja eristemateriaalit, voidaan säilyttää ohjeiden mukaisesti. [5.]

Lämmityksen ja sen suunnittelun merkitys korostuu ympärivuotisessa rakennustoiminnassa. Työmaalla lämmittäminen kuluttaa noin 70 % rakentamisessa käytetystä energiasta. [1.] Tämä on otettava huomioon lämmittimien ja lämmitystapojen valinnoissa. Lämmityksen tarve on erilainen rakentamisen eri vaiheessa. Eri työvaiheet ja niihin liittyvät eri materiaalit asettavat erilaisia vaatimuksia sisälämmön ja kosteuden suhteen. Lämpötilavaihtelut, sateet, vesivuodot lisäävät ilmankosteutta ja täten sisäilman kuivatus ja lämmitystarvetta. Tässä opinnäytetyössä keskitytään rakennuksen peruskorjauksen sisävalmistusvaiheeseen, jolloin rakennuksen ulkokuori on säältä suojassa ja kaikki ulos johtavat aukot ja ovet ovat pääosin kiinni.

Energiasäästösyistä työmaan lämmitys kannattaa aloittaa hyvissä ajoin, mahdollisesti jo ennen lämmityskautta. Tällöin rakenteisiin varastoitunut lämpö pienentää energian tarvetta lämpimällä kaudella. [6.]

2.1 Lämmityksen suunnittelun lähtökohdat

Työmaan lämmityksen alkuvaiheessa sisäilmasto on kostea, lämpötila on useasti alhainen ja epätasaisesta jakautunut. Kylmien pintarakenteiden pinnalle saattaa muodostua kosteutta. Sisävalmistusvaiheen rakennustyöt, erityisesti pintarakennetyöt kuten rappaus, voidaan aloittaa vasta kun sisätila on tarpeeksi lämmin ja pinnoille tiivistynyt vesi on poistettu. [8.]

Ennen rakennuksen lämmittämisen aloittamista on varmistettava, että ylimääräiset kosteuslähteet on poistettu. Veden käyttöä kannattaa muutenkin minimoida kaikissa rakentamisen työvaiheissa kosteuskuorman vähentämiseksi. Ikkunat, ulko-ovet, läpiviennit ja muut mahdolliset aukot on suljettava ja huolella tiivistettävä. Vuotoilman lämmitykseen tarvittava energiamäärä muodostaa merkittävän osan rakennuksen kokonaislämmitystehontarpeesta. Rakennuksen ulkovaipan tiivistämisessä on kuitenkin huomioitava kosteuden poistumisen mahdollisuus. [8.]

Henkilöliikenteelle ja rakennustarvikkeiden haalaukselle tarkoitetut aukot muodostavat myös merkittävän sisäilman jäähtymisen riskin. Lämmön karkaaminen ja kylmän ilman sisään virtaaminen niiden kautta on estettävä esimerkiksi väliaikaisilla tuulikaapeilla, ovi-, ja liuskaverhoilla. Kuvassa 2 on esitetty ratkaisu, jossa kylmän ilman virtausta sisätiloihin on estetty liuskaverholla sekä lisäksi sähköpuhaltimella. Osastoimalla sisätiloja taas estetään ilmavirtojen mukana kulkevan lämmön ja kosteuden tiivistyminen rakennuksen kylmiin osiin.

Rakennuksen lämmittäminen väliaikaisilla lämmittimillä kannattaa aloittaa vasta silloin, kun lämpötilan kohoaminen ja pysyminen rakennuksessa on mahdollista.

Väliaikaisten lämmitysjärjestelmien suunnittelu ja mitoitus perustuvat ilmasto-olosuhteiden tilastotietoihin ja rakennuksen sisäolosuhteiden muutoksiin eri vuodenaikoina. Lämpötilojen vaihtelut varsinkin talvella ovat suuret eri vuosina ja kuukausina. Suunnittelun tueksi esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen sivulta löytyy kattava mittausdata eri vuosien kuukausilämpötiloista ja niiden vaihteluista

paikkakunnittain. Lähtökohtaisesti rakennuksen tarvittavan lämmitystehon määrittelyssä käytetään säävyöhykkeiden mukaisia mitoituslämpötiloja. Näin varmistetaan, että lämmitysjärjestelmä toimii oikein kovimmillakin pakkasilla.

Rakennuksen lämmittämiseen tarvitaan vähemmän energiaa kuin kuivatukseen. Yleissääntönä voidaan pitää, että työmaan lämmittämiseen tarvittava energia on $0,016 \text{ kW/m}^3$ [10]. Tämä on siis ainoastaan suuntaa antava luku. Oikein mitoitettu lämmitysjärjestelmä perustuu kohteesta saatuihin laskennallisiin tuloksiin.



Kuva 2. Liuskaverholla suojattu oviaukko [9].

Lämmitysjärjestelmän valintaa tuleekin tarkastella useammasta näkökulmasta. Järjestelmän tulee olla tehokas, ja sen on toimittava luotettavasti hyvinkin vaihtelevissa ja haastavissa olosuhteissa. Lämmitysjärjestelmän vuokrahinta, energiankulutus, hiilineutraalisuus, aloituskustannukset (asennus ja käyttöönotto) ovat myös tärkeässä osassa, kun valitaan rakentamisaikaista lämmitysjärjestel-

mää. Lämmityslaitteiden valinnassa korostuvat taas niiden tehokkuus, helppokäyttöisyys, siirrettävyys, huolettavuus ja koko. Myös laitteiston siirtämisestä aiheutuvat kustannukset rakennusprojektin edetessä pitää ottaa huomioon.

2.2 Mitoituslämpötila

Ympäristöministeriön vuonna 2007 julkaiseman ohjeen ”Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta” mukaan Suomi on jaettu neljään hallinnollisia rajoja noudattavaan ilmastolliseen vyöhykkeeseen. Vyöhykkeiden kuukausittaiset ulkoilman keskilämpötilat pohjautuvat Helsinki-Vantaan (säävyöhyke I), Jokioisten (säävyöhyke II), Jyväskylä-Luonetjärven (säävyöhyke III) ja Sodankylän (säävyöhyke IV) säähavaintoasemien mittauksiin Ilmatieteen laitoksen testivuodelta 1979. (Kuva 3.) [11.]



Säävyöhyke	Mitoittava ulkoilman lämpötila, °C	Vuoden keskimääräinen ulkoilman lämpötila, °C	Lämmityskauden keskimääräinen ulkoilman lämpötila, °C
I	-26	+5	+1
II	-29	+4	0
III	-32	+2	-1
IV	-38	0	-5

Kuva 3. Säävyöhykkeet sekä mitoittavat ja keskimääräiset lämpötilat [11].

Tässä opinnäytetyössä rakennuksen väliaikaisen lämmityksen tehontarpeen määrittelyssä mitoittavana ulkolämpötilana käytetään säävyöhykkeen 1 mitoituslämpötilaa, joka on -26 °C .

2.3 Lämmitysmuodot

Rakennustyömaan energiamuodon ja lämmityslaitteiden valinta perustuu pitkälti teoreettisiin laskelmiin, jolloin määritellään tarvittava lämmitysteho sekä projektin kustannukset. Aikaisemmilta työmailta saatu kokemus myös vaikuttaa lämmitysratkaisun valintaan. Toimiviksi todettuja ratkaisuja sovellettuina voidaan käyttää myös muillakin työmailla. Ilmastomuutoksen myötä energiamuodon valintaan kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Suomi on sitoutunut luopumaan fossiilisista polttoaineista vuoteen 2035 mennessä [1]. Siten kannattaa jo tässä vaiheessa suosia ympäristöystävällisiä ratkaisuja.

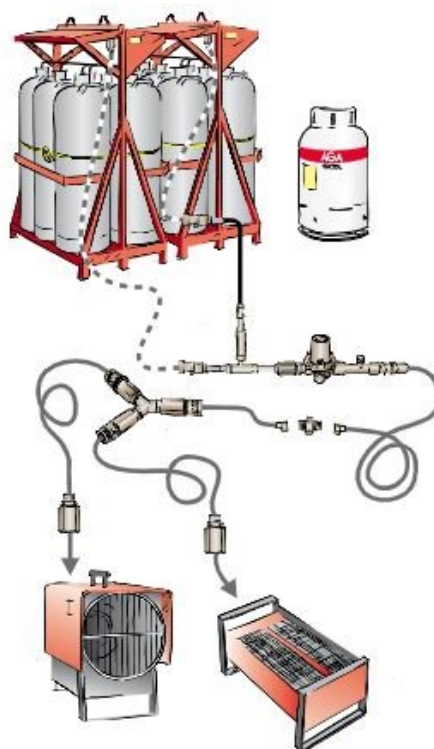
Työmailla yleisesti käytettyjä lämmitysmuotoja ovat nestekaasu, polttoöljy, kaukolämpö ja sähkö. Siirrettävät, työmaille asennettavat, lämpöpumppulaitokset/kontit ovat vasta tulossa Suomen markkinoille. Esimerkiksi Ruotsissa ilma-vesilämpöpumppujen tuottamaa vihreää ja edullista energiaa hyödynnetään jo monella rakennustyömaalla [13.]

2.3.1 Nestekaasu

Nestekaasulämmityksen suurempia etuja ovat sen tehokkuudessa, toimintavarmuudessa, vaivattomuudessa ja turvallisuudessa. Laitteiston asennus työmaalla on nopeaa ja kustannustehokas. Järjestelmä on joustava ja helposti muunneltava, mikä tuo huomattavat edut moniin muihin järjestelmiin verrattuna. Käytettävät letkut ovat kooltaan pieniä, ja niitä on helppo siirtää tai viedä kerrokseen, eikä kaasun jakamiselle korkeussuunnassa ole mitään rajoitteita. [12.]

Nestekaasulämmittimet ovat kevyitä, mikä helpottaa niiden siirtämistä ja asentamista rakennusprosessin edetessä. Esimerkiksi 55 kW:n suorapolttotyyppinen nestekaasulämmitin painaa noin 20 kg, kun vastaava polttoöljylämmitin painaa noin 145 kg. Lämmittimiä on saatavana useita erilaisia, ja niiden teho vaihtelee 10 kW:sta yli 100 kW:iin. Osa lämmittimistä on suorapolttotyyppisiä, jolloin palo-kaasut käytetään lämmitykseen. Toisissa lämmittimissä on käytössä lämmön-

siirrin. Tällöin palokaasut johdetaan pois lämmitettävästä tilasta. Edellä mainittujen lämmittimien lisäksi on käytössä myös nestekaasukäyttöisiä infrapunalämmittimiä, joiden toiminta perustuu lämmön säteilyyn. [10.]



Kuva 4. Nestekaasujärjestelmän rakenne (kaasumainen muoto) [10].

Nestekaasu toimitetaan työmaan tarpeista riippuen pullokaasuina (33 kg tai 184 kg) tai säiliökaasutoimituksina. Toimitetut nestekaasupullot ovat paineistettuja, joten kaasu niissä on nestemäisessä muodossa. Ennen järjestelmään syöttämistä neste on höyrystettävä. Työmailla nestekaasua voidaan käyttää joko kaasumaisessa (kuva 4) tai nestemäisessä muodossa. Nestekaasun käyttäminen nestemäisessä muodossa edellyttää höyrystimen kytkennän suoraan nestesäiliöön tai pulloon. [10.]

Lämmityksessä kilo nestekaasua tuottaa 12,8 kWh energiaa. Kaasun puhtas palaminen mahdollistaa suorapolttosovellusten käytön, ja täten nestekaasun hyötysuhde on hyvin suuri. [12.]

Kaasulämmittäminen on ympäristöystävällinen ja ihmisille turvallinen ratkaisu. Nestekaasun normaalissa palamisessa muodostuu vain hiilidioksidia ja vesihöyryä. Nestekaasukilon palamiseen tarvitaan noin 12 m³ ilmaa. Tämä on otettava huomioon varmistamalla riittävä ilmanvaihto työskentelyalueella. Tämä onkin nestekaasun käyttöä rajoittava tekijä. Riittävän palamisilman saavuttaminen saattaa olla tietyissä tapauksissa hyvin haastavaa. Toinen kaasun käyttöä rajoittava tekijä on sen luvanvaraisuus. Mikäli nestekaasun varastointimäärä työmaalla on yli 200 kg, on haettava viranomaisilta nestekaasun käsittely- ja varastointilupa. [10.]

2.3.2 Polttoöljy

Polttoöljylämmitys on ehkä työmaiden tunnetuin ja käytetyin lämmitysmuoto. Polttoöljy soveltuu hyvin isojen yhtenäisten tilojen lämmitykseen, ja se onkin erinomainen energialähde runkovaiheen lämmitykseen. [15.]

Epäsuorassa lämmityksessä öljylämmitin (esimerkiksi lämpökontti) sijoitetaan ulos, ja se on tarkoitettu tuottamaan välittömästi suuria määriä puhdasta, kuivaa ja savutonta ilmaa. Ilmavirtauksen jakelua voidaan tehostaa käyttämällä joustavia letkuja. Tarvittava imuilmaa otetaan joko lämmitettävästä tilasta tai ulkoa. Lämpökontit (kuva 5) tuodaan työmaalle valmiina yksikkönä, niitä on helppo ottaa käyttöön ja ne tuottavat lämpöä nopeasti, jolloin sopiva tavoitelämpötila saavutetaan nopeasti. [15.]

Suorassa lämmityksessä polttoöljyä käytetään öljylämpöpuhaltimien energianlähteenä. Öljykäyttöisten puhaltimien etuina on niiden helppo asennus ja käyttöönotto. Puhaltimet ovat tehokkaat ja tuottavat lämpöä välittömästi sinne, missä sitä tarvitaan. Polttoöljykäyttöisten lämpöpuhaltimien tehot vaihtelevat 20–400 kW:n välillä. Ratkaisuna puhaltimet ovat kuitenkin kalliit, ja niiden tuottama lämpö rajoittuu alueittain. Monimuotoisissa tiloissa lämmön jakaminen vaatiikin lämmönjakokanavan rakentamista. [16.]



Kuva 5. MEPU HOTBOX620, lämpökontti (620 kW) [15].

2.3.3 Sähkö

Sähkölämmitys on käyttövarma ja helppokäyttöinen lämmitysmuoto, jota käytetään pääsääntöisesti rakennustyömaiden sisätyövaiheissa. Alhaiset perustamiskustannukset, energiatehokkuus, vähäinen ylläpidon määrä ja helppo muunneltavuus lukkiutuvat sähkölämmityksen etuihin. Sähköllä tuotettu lämmitysprosessi ei myöskään tuota epäpuhtauksia ilmaan.

Työmailla käytettäviä sähkötoimisia lämmittimiä ovat muun muassa sähköpuhaltimet ja säteilijät. Lämmittimien tehot vaihtelevat 3–20 kW:n välillä. Ottaen huomioon työmaiden suuren lämmitystehotarpeen sähkökäyttöisten lämmittimien lämmitystehot jäävät usein riittämättömiksi. Tällöin ne soveltuvat hyvin esimerkiksi varalämmitysmuodoksi täydentäen ensisijaista lämmitysratkaisua. Sähkölämmittimet soveltuvat myös mainiosti työmaiden hätälämmitysratkaisuiksi. [20.]

2.3.4 Kaukolämpö

Mikäli rakennus on kaukolämpöverkon alueella, työmaa-aikainen lämmitys voidaan kustannustehokkaasti toteuttaa kaukolämmöllä. Oleellista on, että rakennusliike tunnistaa kaukolämmön vaihtoehdoksi ja on hyvissä ajoin yhteydessä kaukolämpötoimittajaan. Kaukolämmön liittymistehot vaihtelevat työmaan tarpeiden mukaan. [17.]

Kaukolämpö soveltuu erinomaisesti ylläpitolämmitykseen rakennustyömaalla ja pääsääntöisesti sitä käytetään saneerauskohteen sisätyövaiheessa. Kaukolämmön etuihin kuuluu sen toimintavarmuus ja edullisuus, vaikkakin kaukolämpöhinnat ovat olleet viime aikoina nousussa. Myös kaukolämmön ekologisuus saattaa olla ratkaisevassa roolissa, kun suunnitellaan väliaikaista lämmitystä rakennuskohteeseen. Yhä useampi energiatoimittaja mainostaa hiilineutraalia kaukolämpöä, joka on tuotettu ympäristöystävällisillä hukkalämpöön, geotermiseen maalämpöön ja sähköön perustuvilla ratkaisuilla. Käytettäessä kaukolämpöä rakennuksen lämmittämiseen työmaalle ei muodostu haitallisia savukaasuja kuten öljystä tai muista polttoaineista.

Kaukolämmön liittäminen rakennuksen väliaikaiseen vesikierteiseen lämmitysverkostoon voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla. Saneerauskohteissa voidaan käyttää olemassa olevaa, vanhaa lämmönjakokeskusta siten, että sen isoimman lämmönsiirtimen puolelta otetaan haarat lämmityspuhaltimelle. Lämmön siirtämiseen voidaan myös käyttää lämmönjakokeskuksen ilmanvaihtosiirrintä. Lämpö tällöin johdetaan siirtimeltä puhaltimille. Lämmönjakokeskuksen ilmanvaihtosiirrin vaihdetaan uuteen, kun työmaa-aikainen lämmitys muutetaan lopulliseksi lämmitykseksi. Näin varmistetaan, että siirripinnat pysyvät puhtaina. [18.]

Mikäli olemassa olevaa lämmönjakokeskusta ei voida taikka haluta hyödyntää, voidaan kaukolämpö liittää väliaikaiseen, siirrettävään lämmönjakokeskukseen

(kuva 6). Väliaikainen lämmönjakokeskus kannattaa sijoittaa lopulliseen lämmönjakohuoneeseen, jolloin lopullinen kaukolämpöliittymä on valmiina hyvissä ajoin. Toki keskus voidaan sijoittaa myös muuhun soveltuvaan paikkaan.



Kuva 6. Siirrettävä kaukolämpökeskus, EI-Björn 800 kW [19].

Väliaikaisessa kaukolämmöllä toimivassa lämmitysjärjestelmässä lämpöä jaetaan rakennuksessa vesikertoisten kuumavesilämmittimien avulla, joiden teho on tyypillisesti 20–250 kW:n välillä.

Työmaa-aikaisen kaukolämpöjärjestelmän perustamis- ja huoltokustannukset ovat suuret, ja järjestelmän oikea toiminta vaatii jatkuvaa valvontaa ja ylläpitoa. Työmaalla on erityisesti otettava huomioon, että vesikiertoiseen järjestelmään liittyy vesivahinkojen riski.

2.3.5 Lämpöpumppu

Lämpöpumppujen kehityksen myötä myös rakennustyömailla voidaan hyödyntää energia- ja kustannustehokkaasta uusiutuvaa energiaa joko seinälle asennettavien tai siirrettävien rakennusaikaisten lämpöpumppujen avulla. Näiden tehot kuitenkin tahtovat jäädä usein riittämättömiksi työmaiden suurien lämmitystarpeiden vuoksi. Vaihtoehtona pienitehoisille lämpöpumpuille ovat työmailla toimitettavat ilmavesilämpöpumppujärjestelmät (plug in -moduulit) (kuva 7). Tällä hetkellä Suomesta ei ainakaan toistaiseksi ole tällaisia lämpöpumppujärjestelmiä toimittavia yrityksiä. Ruotsissa taas jo useampi yritys on erikoistunut siirrettävien lämpöpumppujärjestelmien kehittämiseen ja valmistukseen [13].



Kuva 7. HeatBox Hydro 80 kW, ilmavesilämpöpumppumoduuli [21].

Isoimmat rakennustyömaiden ilmavesilämpöpumppujärjestelmät tarjoavat jopa 1,4 MW:n lämmitystehoja rakennustyömaan lämmitystarpeisiin [22]. Niillä siis voidaan kattaa laajempienkin hankkeiden energiantarpeet. Perinteisten rakennusten lämmitysvaihtoehtoihin verrattuna lämpöpumppujärjestelmien hiilidioksidipäästöt ovat huomattavasti pienimmät ja energiansäästöt suuremmat. Parhaimpien lämpöpumppujärjestelmien hyötysuhde (COP) on 4,5–5 [22]. Tämä

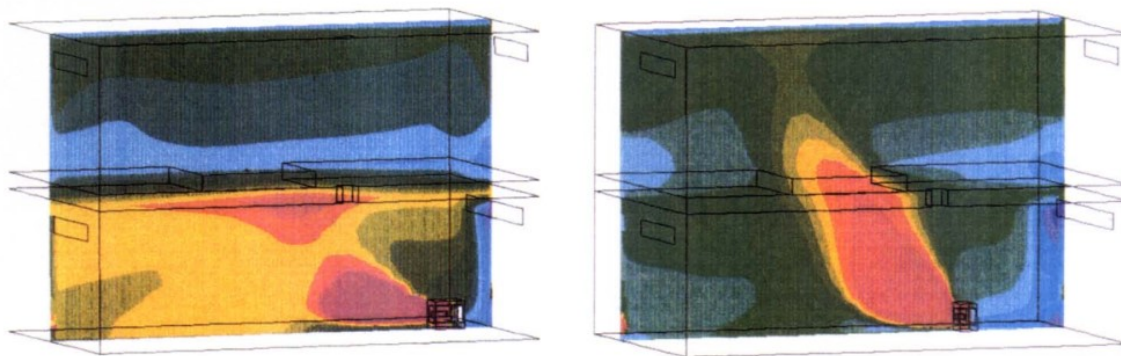
tarkoittaa, että 1 kW:n sähköttoteholla pumput tuottavat melkein 5 kW:n lämpötehon. Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan hyvillä hyötysuhteilla toimivien lämpöpumppulaitoksien tuottama energiasäästö rakennushankkeisessa on ollut noin 50 %. [13.]

2.4 Lämmitysjärjestelmän toteutus

Rakennustyömaan tehokas ja toimiva lämmitys edellyttää tarkkaa ennakkovalmistelua sekä lämmitysjärjestelmän toiminta-ajan tarkkailua ja ylläpitoa. Väliaikaisen lämmityksen suunnittelu lähtee tarvittavien lähtötietojen hankinnasta. Tämän jälkeen on määritettävä kohteen lämmitystarve ja lämmitysmuoto.

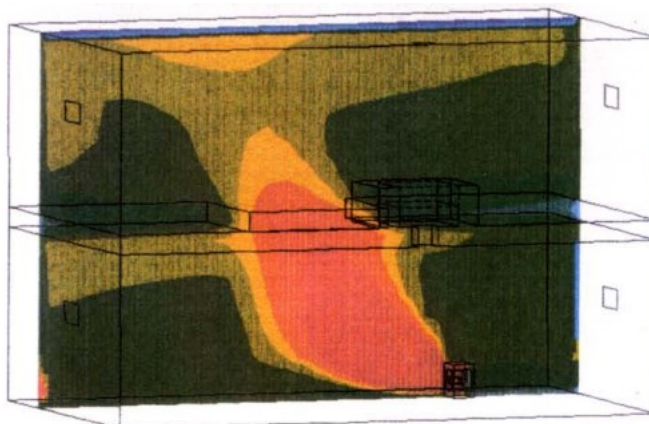
Kun kohteeseen soveltuva lämmitysjärjestelmä on valittu, täytyy tehdä tarvittavat mitoituslaskelmat, määrittää järjestelmän käyttö- ja käyntiaika, valita tiloihin sopivat laitteet ja suunnitella tarvittavien lämpöjohtojen reitit sekä lämmityslaitteiden sijoituspaikat.

Lämmityslaitteiden oikeanlainen sijoittelu ja kohdistus ovat ratkaisevassa osassa työmaan tasaisten lämpötilaolosuhteiden saavuttamisessa. Tasaisten lämpötilakenttien saavuttaminen onkin yksi isoimmista haasteista rakentamiskäytännössä lämmityksessä. Erityisen haasteen muodostaa lämmön tasainen jako eri huonetiloihin vaaka- ja pystysuunnassa. Tasatakseen pystysuunnassa olevia lämpötilaeroja, esimerkiksi kerroksien välillä, lämmitin kannattaa sijoittaa siten, että nouseva lämminilmavirtaus kohdistuu esimerkiksi porraskäytävään [8]. Kuvassa 8 on havainnollistettu lämmittimen sijoituksen vaikutus ilmavirtaukseen kerroksien välillä. Huoneen nurkkaan, etäälle aukosta, sijoitetun lämmittimen lämmitys vaikutus ei ulotu ylempään kerrokseen, kun taas keskelle huonetta sijoitettu ja aukkoa kohti puhaltava lämmitin lämmittää myös yläpuolella olevaa tilaa.



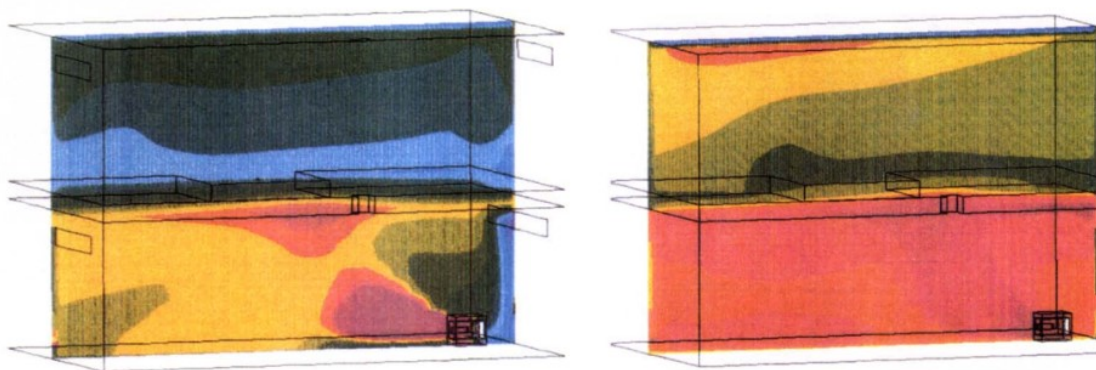
Kuva 8. Lämmittimen (8 kW) sijoituksen ja kohdistuksen vaikutus [8].

Tilojen ja kerroksien välistä tasaista lämpötilan jakautumista voidaan tehostaa myös käyttämällä apupuhaltimia. Tällöin puhaltimet kannattaa sijoittaa siten, ilman imu tapahtuu toisesta tilasta ja puhallus toiseen tilaan [8]. Kuvassa 9 on esitetty tällainen ratkaisu. Lämmin ilmavirtaus kulkeutuu toiseen kerroksen ja apupuhallin tasaa lämpötilaeroja. Kuvasta voidaan myös todeta, että lämmittimen taakse jää kylmä vyöhyke ja mikäli ulkoseinä ei ole tiivistetty, tämän alueen lämpötila laskee lähelle ulkolämpötilaa. Tämä on huomioitava lämmittimien sijoituksen suunnittelussa.



Kuva 9. Apupuhallin tasaa lämpötilaeroja [8].

Tasaisten lämpötilaolosuhteiden luomiseen työmailla, lämmittimien tehojen lisäksi, vaikuttaa lämmittimien oikea sijoitus sekä kohdistus. Käyttämällä useampia pienempiä lämmittimiä saadaan lämmintä ilmaa jaettua tasaisemmin kuin yhdellä suuritehoisella lämmittimellä. Lämmityksen tehoa voidaan parantaa käyttämällä apupuhaltimia. Puhaltimien ilmasuihkujen heittopituudella on merkitystä lämmityksen tehoon sekä siihen, miten lämpö jakaantuu kohteessa. On huomioitava, etteivät sisätiloihin varastoidut rakennusmateriaalit estä ilmavirtojen tasaista leviämistä. Tämän lisäksi rakennuksen on oltava tiivis, eikä ylimääräistä lämmönjohtumista ulkovaipan yli saa tapahtua. Kuvassa 10 on esitetty rakennuksen tiiveyden vaikutus lämpötilan jakautumiseen, kun on käytössä sama 8 kW:n lämmitin. Kuvassa vasemmalla olevassa tapauksessa ikkunoiden ja rungon väliset saumat ovat tiivistämättä. Tilan lämpötila ei nouse yli 10 °C:n. Oikeanpuoleisessa tapauksessa ulkovaippa on kunnolla tiivistetty, ja sisäilman lämpötila on noussut 50 °C:seen. [8.]



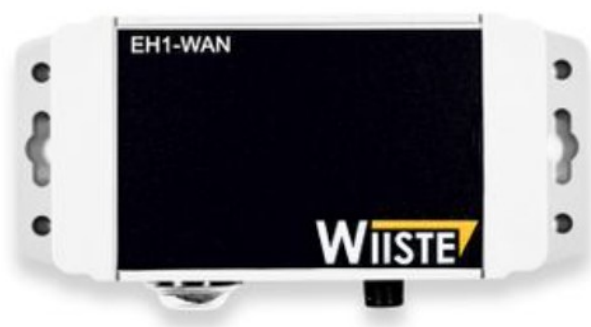
Kuva 10. Rakennuksen ulkovaipan tiiveyden vaikutus lämpötilan jakautumiseen [8].

2.5 Lämpötilan valvonta

Varmistaakseen, että lämmitysjärjestelmä toimii asetettujen ehtojen mukaisesti, lämpötilaa on seurattava jatkuvasti. On huomioitava, että lämmityksen on toimitettava myös työajan ulkopuolisina aikoina. Tämä saattaa edellyttää lämmitysvartiinnin järjestämistä. [23.]

Sisäilman lämpötila on mitattava päivittäin työmaalle asennetuista lämpömittareista tai mittausdatan keräilylaitteista (kuva 11). Mittareiden ja keräilylaitteiden sijoituspaikojen valinnassa on otettava huomioon väliaikaisten olosuhteiden vaikutukset sekä yleisesti toimintaa työmaalla. Esimerkiksi suora auringonpaiste saattaa vääristää mittaustuloksia.

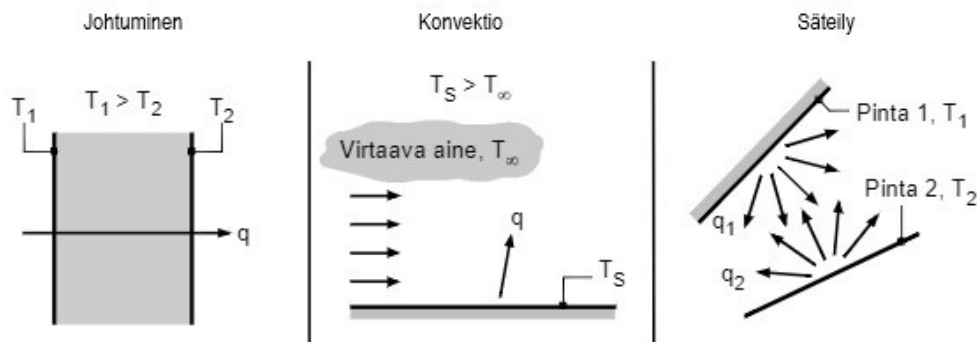
Reaaliaikainen olosuhdeseuranta on tehokkain tapa valvoa rakennustyömaan sisäilmaolosuhteita. Tällöin keräilylaitteiden mittausdata välittyy reaaliaikaisesti järjestelmään, josta se on luettavissa joko puhelimella tai tietokoneella. Järjestelmään asetettujen lämpötilaraja-arvojen ylittyessä tai alittuessa antaa järjestelmä hälytyksen. Näin mahdollisiin lämmitysjärjestelmän ongelmiin päästään puuttumaan välittömästi ja vältetään vahingoilta. Mittausjärjestelmään tallennettu dataa voidaan helposti analysoida ja raportoida eteenpäin. Mittausten seurannan perusteella lämmityksen tehokkuutta voidaan säätää oikeaan suuntaan. Näin lämmitysjärjestelmän laatu ja tehokkuus paranevat.



Kuva 11. Wiiste IoT-olosuhdemittari sisäilman kosteuden ja lämpötilan reaaliaikaiseen valvontaan [24].

3 Työmaa-aikaisen lämmityksen tehontarpeen laskentaperusteet

Lämpöenergia siirtyy kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla (kuva 12).



Kuva 12. Lämmön siirtymismuodot [25].

Rakennuksen rakenteissa tapahtuvista lämmönsiirtymismuodoista keskeisin on kuitenkin lämmönjohtuminen. Johtuminen on ainoa lämmön siirtymismuoto kiinteässä aineessa. Se tapahtuu molekyylien liike-energian siirtymisenä molekyylistä toiseen. Lämpövirran suunta on aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Määräävänä tekijänä lämmönsiirtymisessä on rakennusaineen ominaisuuksista riippuva lämmönjohtavuus, λ ($W/(m \cdot K)$). Tavallisimpien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuudet on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4. [26.]

Rakennuksen rakenteissa johtumalla syntyvä lämpövirtaa voidaan laskea lämmönjohtumisen perusyhtälöllä (Fourierin lämmönjohtumisen laki) [27, s. 57]:

$$\phi = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta d} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (3.1)$$

, jossa Φ on lämpövirta [$W/(mK)$]

λ on materiaalin lämmönjohtavuus [W/(mK)]

A on läpäisevän alueen pinta-ala [m²]

T on lämpötilan muutos [K]

d on matka lämpövirran suunnassa [m]

3.1 Rakenteiden lämmönläpäisykerroimen laskenta

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U -arvo) kuvaa rakennuksen eri rakennusosien lämmöneristyskykyä. Mitä pienempi on rakenteen lämmönläpäisykerroin, sen paremmin se eristää lämpöä. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on W/(m²·K) ja se on kokonaisvastuksen (R_T) käänteisarvo (kaava 3.2), ja kokonaisvastus taas on osavastusten (R_i) summa [28, s. 131].

$$U = \frac{1}{R_T} \left[\frac{W}{(m^2 \cdot K)} \right] \quad (3.2)$$

Lämpövirran ollessa kohtisuorassa rakennekerrosta vastaan, ainekerroksen lämmönvastus R_i lasketaan seuraavalla kaavalla: [28, s. 131]

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \left[m^2 \cdot \frac{K}{W} \right] \quad (3.3)$$

Rakenteen kokonaislämmönvastus muodostuu rakennusosan ainekerroksien lämmönvastuksista, sisä- ja ulkopintojen pintavastuksista sekä mahdollisista rakennusosassa olevista ilmakerroksien lämmönvastuksista. Kokonaislämmönvastus voidaan laskea kaavalla (3.4). [28, s. 131.]

$$R_T = \sum R_i + R_{si} + R_{se} + R_g + R_b \left[m^2 \cdot \frac{K}{W} \right] \quad (3.4)$$

, jossa R_i on ainekerroksen lämmönvastus (m²·K/W)
 R_{se} on rakenteen ulkopuolinen pintavastus (m²·K/W)
 R_{si} on rakenteen sisäpuolinen pintavastus (m²·K/W)
 R_g on mahdollisen ilmaraon lämmönvastus (m²·K/W)

R_b on maan lämmönvastus ($m^2 \cdot K/W$)

Ilmaraon lämmönvastus otetaan huomioon ainoastaan silloin, kun ilmarako on tuulettumaton tai lievästi tuulettuva. Hyvin tuulettuvan ilmaraon lämmönvastusta ei oteta huomioon rakenteen kokonaislämmönvastusta laskettaessa. [28, s. 131.]

Ulkoilmaan rajoittuvien rakennusosien pintavastukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Pintavastukset [26, s. 16].

Sisäpuolinen pintavastus R_{si} , ($m^2 \cdot K$)/W			Ulkopuolinen pintavastus R_{se} , ($m^2 \cdot K$)/W		
Lämpövirran suunta					
vaakasuora	ylöspäin	alaspäin	vaakasuora	ylöspäin	alaspäin
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Maata vasten olevien rakennusosien lämmönläpäisykertoimet lasketaan taulukossa 2 esitetyillä arvoilla. Taulukon 2 arvot voidaan käyttää, jos lattiarakenteen alapinta on enintään 300 mm viereistä maanpintaa ylempänä ja salaojituseroksen alla oleva maakerros on vähintään 1 m paksu. [26, s. 18.]

Taulukko 2. Maan lämmönvastukset [26, s. 19].

Maa-aines	Normaalinen lämmönjohtavuus λ_n W/m K	Maan lämmönvastus R_b m^2K/W			
		Perusmaa alapohjan alla		Perusmuurin viereinen maa	
		reuna-alue	sisä-alue	reuna-alue	sisä-alue
1	2	3	4	5	6
Savi Hiekka ja sora, salaajittettu	1,4	0,8	3,20	0,40	1,60
Hiesu ja hieta Hiekka ja sora, salaajittamaton Moreeni	2,3	0,50	2,00	0,25	1,00
Kallio	3,5	0,30	1,20	0,15	0,60

Perusmaan lämmönvastuksina alapohjan alla käytetään taulukon sarakkeissa 3 ja 4 esitettyjä arvoja. Kellarin seinän ulkopuolisena maan vastuksena käytetään vastaavasti sarakkeissa 5 ja 6 esitettyjä arvoja.

Ryömintätilaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin voidaan määrittää yksinkertaistettuna laskentatapaa käyttäen kertomalla laskettu pelkän lattiarakenteen lämmönläpäisykerroin kertoimella 0,9 [26, s. 32].

3.2 Saneerattavan rakennuksen lämmöntarve

Saneerattavan rakennuksen työmaa-aikainen lämmitystehontarve muodostuu usean tekijän summasta. Kokonaislämmöntarpeeseen vaikuttavat johtumislämpöhäviöiden lisäksi lämmön johtuminen maaperään, vuotoilman vaatima lämmitystehon tarve sekä mahdollisen ilmanvaihdon lämmitystarve (kaava 3.5). Lämmitystehon tarve on määritettävä tilakohtaisesti [27, s. 102]. Lämmitystehontarpeen laskennassa on otettava myös huomioon avonaisten ovien aiheuttamat lämpöhäviöt.

$$\phi_{kok} = \phi_{joh} + \phi_{maa} + \phi_{vuoto} + \phi_{iv} [W] \quad (3.5)$$

Johtumisteho rakenteiden läpi lasketaan kaavalla 3.6

$$\Phi_{joh} = \Phi_{ulkoseinä} + \Phi_{yläpohja} + \Phi_{alapohja} + \Phi_{ikkuna} + \Phi_{ovi} + \Phi_{kylmäsilat} [W] \quad (3.6)$$

Tilan kunkin rakennusosan aiheuttama lämpöhäviö voidaan laskea luvussa 3.1 esitetyllä Fourierin yhtälöllä, jota voidaan yksinkertaistettuna esittää seuraavasti [26, s. 102]:

$$\Phi_j = UA(T_s - T_u) [W] \quad (3.7)$$

, jossa

- U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]
- A on osan pinta-ala [m²]
- T_s on sisälämpötila [K]
- T_u on ulkolämpötila [K]

3.2.1 Pinta-alat

Rakennuksen lämmitystehoja laskennassa vaipan eri rakennusosien pinta-alat määritetään rakennuksen kokonaissisämittojen mukaan. Alapohjan pinta-alan määrittelyssä ei vähennetä mahdollisten aukkojen ja läpivientien aloja. Yläpohjan pinta-ala lasketaan ulkoseinien sisämittojen mukaisesti vähentäen kattoikkunoiden pinta-aloja. Ulkoseinien pinta-alat lasketaan sisämittojen mukaisesti alapohjan lattiapinnasta yläpohjan alapintaan ikkunoiden ja ovien aukkojen pinta-alat vähentäen. Ikkunoiden ja ovien pinta-alat lasketaan karmirakenteen ulkomittojen mukaan. [29, s. 5.]

3.2.2 Lämpötilat

Sisälämpötila T_s määräytyy tilan käyttötarkoituksen ja sille asetettujen vaatimusten mukaan. Ulkolämpötila T_u määräytyy paikkakunnan mitoittavan lämpötilan mukaan (luku 2.3).

Maanvastaisten alapohjien kautta maahan johtuva lämpöenergiaa lasketaan kaavalla 3.7 käyttämällä ulkoilman lämpötilojen sijasta alapohjan alapuolisen maan kuukausittaista keskilämpötilaa. Maan kuukausittainen keskilämpötila lasketaan kaavalla 3.8. [29, s. 20.]

$$T_{maa,kuukausi} = T_{maa,vuosi} + \Delta T_{maa,kuukausi} \quad (3.8)$$

, jossa

$T_{maa,kuukausi}$	on maan kuukausittainen keskilämpötila [°C]
$T_{maa,vuosi}$	on maan vuotuinen keskilämpötila [°C]
$\Delta T_{maa,kuukausi}$	on alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen keskilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero [°C]

Maan ja ulkoilman kuukausittaisten keskilämpötilojen ero saadaan Suomen Rakentamismääräyskokoelman D5 taulukosta 3.5 [29, s. 21].

Maan vuotuinen keskilämpötila lasketaan kaavalla 3.9 [29, s. 30].

$$T_{maa,vuosi} = T_{u,vuosi} + \Delta T_{maa,vuosi} \quad (3.9)$$

, jossa

$T_{maa,vuosi}$	on maan vuotuinen keskilämpötila [°C]
$T_{u,vuosi}$	on ulkoilman vuotuinen keskilämpötila [°C]
$\Delta T_{maa,vuosi}$	on alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero. Käytetään arvoa 5 °C

3.2.3 Kylmäsillat

Kylmäsillat ovat rakenteiden yksittäisiä kohtia, joissa on viereisiä alueita suurempi lämpöhäviö. Kylmäsillojen vaikutuksesta rakenteiden sisäpinnan lämpötila laskee. Siitä voi olla seurauksena lämpöviihtyvyyshaitta tai kosteuden tiivistyminen sisäpinnalle ja sen homevaurio.

Rakennusosien välisten liitosten aiheuttamat kylmäsillat otetaan huomioon liitoskohtien viivamaisen lisäkonduktanssin avulla. Näitä liitoksia ovat ala-, väli- ja yläpohjan liitokset ulkoseinään, ulkoseinien väliset liitokset sekä ikkunoiden, ovien ja huolto- ja tuuletusluukkujen liitokset. [25].

Kylmäsillat lasketaan seuraavalla kaavalla [29, s. 18]:

$$\Phi_{\text{kylmäsilta}} = l_k \psi_k (T_s - T_u) \text{ [W]} \quad (3.10)$$

, jossa

$\Phi_{\text{kylmäsilta}}$	on johtumislämpöteho kylmäsillan läpi [W]
ψ_k	on viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi [W/(mK)]
l_k	on viivamaisen kylmäsillan pituus [m]

Liitteessä 3 on esitetty ohjeavot viivamaisen kylmäsillan aiheuttamalle lisäkonduktanssille.

Olemassa oleville rakennuksille kylmäsillojen vaikutus voidaan arvioida yksinkertaistetusti lisäämällä 10 % ulkovaipan johtumislämpöhäviöön [30].

3.2.4 Ilmavuodot

Rakennuksen ulkovaipan yli vallitsee yleensä paine-ero, joka johtuu lämpötilaeroista, tuulesta tai ilmanvaihdosta. Paine-erot synnyttävät rakenteissa ilmavirtauksia.

Vuotoilman virtaussuunta riippuu rakennuksen sisällä vallitsevasta ilman paineesta ulkoilman nähden. Sisällä vallitsevan ylipaineen johdosta ilman virtaussuunta on sisältä ulospäin, ja alipaine saa taas ilman virtaamaan ulkoa rakennuksen sisälle. Vuotoilman suuruus riippuu muun muassa rakennuksen tiiveydestä, tuulioloista ja korkeudesta. Vuotoilman laskeminen on lämmitystarpeen laskennan epävarmin osa, mutta sillä saattaa olla kuitenkin ratkaiseva merkitys lämmitystehon tarpeessa.

Vuotoilman lämmöntarve määräytyy kaavan 3.11 mukaan. [29, s. 21.]

$$\Phi_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} (T_s - T_u) [W] \quad (3.11)$$

, jossa

$\Phi_{vuotoilma}$	on vuotoilman lämpenemisen lämpötehon tarve [W]
ρ_i	on ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
c_{pi}	on ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/(kg K)
q_v	on vuotoilmavirta [m ³ /s]
T_s	on sisäilman lämpötila [°C]
T_u	on ulkoilman lämpötila [°C]

Vuotoilmavirran (q_v) suuruus riippuu rakennusvaipan sekä rakennuksen ilmanvuotoluvuista (q_{50} ja n_{50}). Rakennuksen ja rakennusvaipan tyypilliset ilmanvuotoluvut on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelmassa D5 (2012). [Liite 4]

Rakennusvaipan ilmavuotoluku (q_{50}) lasketaan kaavalla 3.12 [29, s. 22].

$$q_{50} = \frac{n_{50}}{A_{vaippa}} * V \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right] \quad (3.12)$$

, jossa

n_{50}	on rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa:n paine-erolla [1/h]
V	on rakennuksen tilavuus [m ³]
A_{vaippa}	on rakennusvaipan pinta-ala, mukaan lukien alapohja [m ²]

Ellei rakennuksen ilmanpitävyyttä tunneta, rakennusvaipan (q_{50}) ilmanvuotolukuna voidaan käyttää arvoa 4 m³/(h·m²) [29, s. 22].

Vuotoilmavirta lasketaan kaavalla 3.13 [29, s. 21].

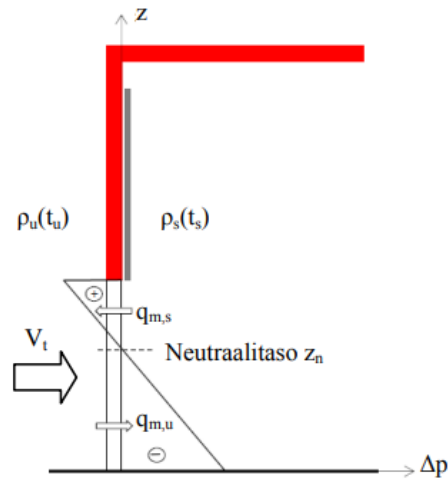
$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaippa} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.13)$$

Kaavassa 3.13 esiintyvä kerroin x riippuu rakennuksen kerroslukumäärästä. Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 mukaan yksikerroksisille rakennuksille se on 35, kaksikerroksisille 24, kolme- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille ja sitä korkeammalle rakennuksille 15. [29, s. 21].

On huomioitava, että maanalaisissa kellaritiloissa ja rakennuksen keskellä olevissa tiloissa ei ilmapuotoja oteta huomioon rakennuksen lämmitystehon tarpeen laskennassa [29, s. 23].

3.2.5 Oviaukkojen lämpöhäviöt

Avoimna pidetyt ovet aiheuttavat huomattavan lämpöhäviön ja tämä on otettava huomioon työmaa-aikaisen lämmitysjärjestelmän tehontarpeen laskennassa. Oviaukosta rakennuksen sisälle ja rakennuksesta ulos virtaavan ilman määrä riippuu oviaukossa vallitsevasta paine-erosta, oviaukon koosta sekä tuuliolosuhteista. Oviaukossa vaikuttava lämpötilaeroista johtuva terminen paine-ero riippuu mm. rakennuksen vaipan tiiveydestä. Ulkovaipan ollessa tiivis neutraalitaso asettuu oviaukon puoliväliin. Neutraalitasolla (NPL) tarkoitetaan sitä etäisyyttä lattiatasosta, jossa ei ole paine-eroa ulkoilman ja sisäilman välillä (kuva 13). Merkittävät rakennuksen ilmapuodot asettavat oven neutraalitason oviaukon puolivälin ja yläreunan väliin. Mikäli neutraalitaso asettuu oven yläpuolelle, oviaukosta virtaa ilmapuotoa koko oviaukon korkeudelta sisälle. Tällaista tilannetta on ehdottomasti vältettävä. [31, s. 22.]



Kuva 13. Oviaukon neutraalitaso [31].

Neutraalitason ollessa oviaukon puolivälissä tai sen yläpuolella, on ulkoilman massavirta aina suurempi kuin sisäilman massavirta. Avoimen oven aiheuttama lämpöhäviö lasketaan aina isoimman massavirran mukaan kaavalla 3.14 [31, s. 23].

$$\Phi_0 = q_{m,max} * c_{pi} * (t_s - t_u) [kW] \quad (3.14)$$

, jossa

Φ_0	on oviaukon lämpöhäviö, kW
q_{mu}	on ulkoilman massavirta oviaukosta sisään [kg/s]
c_{pi}	on ilman ominaislämpökapasiteetti [1 kJ/kg K]
t_s	on sisäilman lämpötila [°C]
t_u	on ulkoilman lämpötila [°C]

Ulkoilman massavirta (q_{mu}) oviaukosta sisälle, kun neutraalitason korkeus oven avoimena ollessa on tiedossa, lasketaan kaavalla 3.15 [31, s. 22].

$$q_{mu} = \frac{2}{3} * C_d * L * z^{1,5} * \sqrt{2 * g * p_u * (p_u - p_s)} [kg/s] \quad (3.15)$$

, jossa

q_{mu}	on ulkoilman massavirta oviaukosta sisään [kg/s]
C_d	on oviaukon suutinkerroin (yleisesti käytetty arvo 0,6–0,7)
L	on oviaukon leveys [m]
z	on neutraalitason korkeus [m]
g	on maanvetovoiman kiihtyvyys [9,81 m/s ²]
ρ_u	on ulkoilman tiheys [kg/m ³]
ρ_s	on sisäilman tiheys [kg/m ³]

Ilman tiheys vaihtelee paineen ja lämpötilan mukaan. Paineen, tiheyden ja lämpötilan välillä on seuraava yhteys [32]:

$$p = \rho * R * T \text{ [Pa]} \quad (3.16)$$

, jossa

p	on ilman paine [Pa]
ρ	on ilman tiheys [kg/m ³]
R	on kaasuvakio [287 J/kg K]
T	on ilman lämpötila Kelvin-asteissa [T]

4 Suomen Kansallisteatterin lämmitystehontarpeen laskenta

4.1 Rakennuksen lähtötiedot

Lasketaan Suomen Kansallisteatterin 50-luvulla rakennetun rakennuksen sekä 30-luvulla rakennetun laajennuksen työmaa-aikaisen lämmityksen tehontarve tiloittain. Rakennus sijaitsee pääkaupunkiseudulla, säävyöhykkeellä 1. Mitoituslämpötila on -26 °C . Väliaikaisen lämmitysjärjestelmän mitoitushetkellä rakennustyöt sekä 50- että 30-luvun rakennuksissa ovat siirtyneet sisätyövaiheeseen, jolloin rakennuksen ulkovaippa on jo kokonaisuudessa saneerattu ja tiivis. Tällöin käytetään uusien rakenteiden U-arvoja.

Saneerattava 50-luvun rakennus pitää sisällään 0-kerroksessa sijaitsevan valmistuskeittiön, ravintolan, Live-tilan sekä eteishallin. Toisessa kerroksessa on lämpiö, katsomo sekä näyttämö, joka muodostaa korkean tilan katolle asti. Rakennuksen kolmannessa ja neljännessä kerroksessa sijaitsevat harjoitustilat, ohjaushuone (Tarkkaamo) sekä Taivassali (kuva 14). Rakennuksen alapohja muodostuu sekä tuulettuvasta ryömintätilasta että maanvaraisesta alapohjasta. Lämpöhäviölaskelmassa maanperän lämpötilana käytetään maan vuotuista keskilämpötilaa, 10 °C . Ilmanvaihtokonehuone sijaitsee rakennuksen katolla ja sen seinät on rakennettu PAROC-elementeistä (pelti-villa-pelti). 30-luvun laajennusosassa kerroksien holvit on purettu ja rakennus muodostaa yhtenäisen 19 metriä korkean tilan lattiasta kattoon (kuva 15).

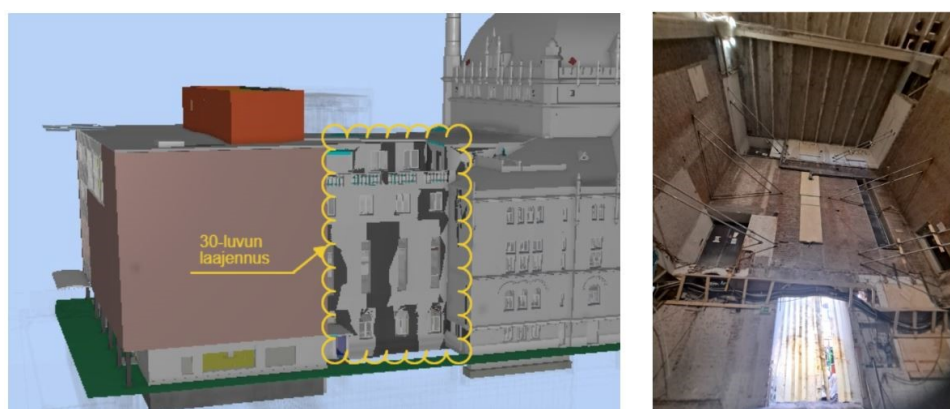
Rakennuksen vuotoilman aiheuttaman lämpöhäviön laskennassa rakennusvaiipan ilmanvuotolukuna käytetään standardi arvoa $4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, sillä rakennuksen tiiveys ei ole erikseen osoitettu tiiveysmittauksella. Vuotoilman vaikutus rakennukseen tapahtuu vain ulkovaipan muodostavassa tiloissa. Ilmavuodon aiheuttama lämpöhäviö lasketaan erikseen tilakohtaisesti kaavalla 3.11. Vuotoilmavirta ($q_{v,\text{vuotoilma}}$) lasketaan kaavalla 3.13, jossa esiintyvä kerroin x on 35–15, riippuen tilan korkeudesta. Alle 5 metriä korkeissa tiloissa kertoimen arvo on 35.

Kerrointa 20 käytetään taas 5–10 metriä korkeissa tiloissa ja tilan korkeuden ylittyessä 10 metriä x-kertoimen arvo on 15.

Rakennus saneerataan uusimpien rakentamismääräyksiä mukaan, muun muassa rakennuksen vaipan U-arvojen osalta. Rakenteiden U-arvot on saatu rakennesuunnitelmista, eikä niitä tällöin lasketa erikseen. Kylmäsiltojen laskennassa liitos- ja nurkkakohtia ei oteta huomioon niiden vähäisen vaikutuksen vuoksi.



Kuva 14. Poikkileikkaus Pienen näyttämön rakennuksesta [9].



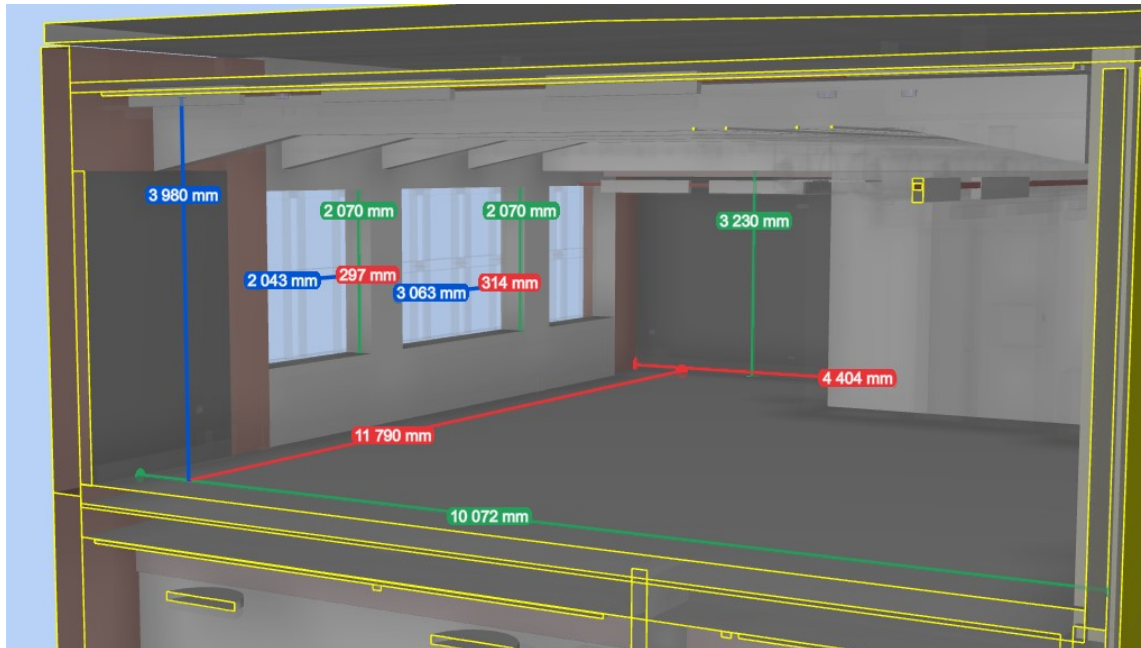
Kuva 15. 30-luvun laajennus [9].

50-luvun rakennuksen kaikki ikkunat pois lukien 0-kerroksen ikkunat on uusittu, jolloin niiden U-arvoksi tuli $0,55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 30-luvun laajennuksessa olemassa olevat ikkunat säilytetään. Säilytettävien vanhojen ikkunoiden U-arvo on $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Vanhat metalliset ulko-ovet on irrotettu kunnostusta varten paikaltaan ja niiden tilalle on asennettu vanerista tehdyt väliaikaiset 30 mm:n paksuiset ovet. Sekavanerin lämmönjohtavuus on $0,14 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [26]. Vaneriovien U-arvo lasketaan kaavoilla 3.2 ja 3.1.

$$R_{\text{vaneriovi}} = \frac{0,03\text{m}}{0,14\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})} = 0,21 \left[\text{m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$U_{\text{vaneriovi}} = \frac{1}{0,21(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}} = 4,76 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Laskennassa tarvittavat mitat on otettu 3D-tietomallin katseluohjelmalla Dalux BIM Viewer (kuva 16).



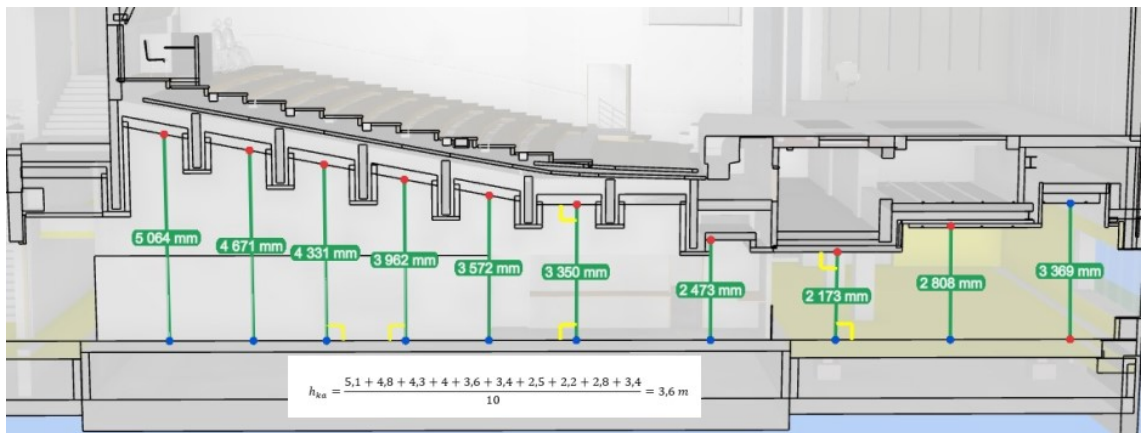
Kuva 16. Dalux BIM Viewer. Tilan ja rakenteiden mittaus [9].

Laskujen selkeyttämiseksi isot yhtenevät alueet on diskretoitu pienimmiksi tilavuuksiksi ja laskettu kullakin alueelle oma tilavuus seuraavalla kaavalla (kaava 4.1).

$$V = A \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (4.1)$$

, jossa V on tilavuus [m³]
 A on pinta-ala [m²]
 h on korkeus [m]

Muodoltaan epäsäännöllisissä tiloissa korkeus (h) on mitattu tietomallista useammasta eri kohdasta. Näiden keskiarvosta on määritetty tilojen keskimääräinen korkeus (h_{ka}) (kuva 17).



Kuva 17. Tilan keskimääräisen korkeuden laskenta (Ravintola, 0-kerros) [9].

Rakennuksen ilmanvaihkokoneet on purettu pois. Ilma rakennuksessa vaihtuu ainoastaan painovoimaisesti. Ilmanvaihdon lämpöhäviötä ei tällöin rakennuksen lämpöhäviölaskelmassa huomioida. Rakennuksen eri tilojen sekä vuotoilman johtumislämpöhäviölaskelmat on esitetty liitteessä 1.

4.2 Avonaisten ovien lämpöhäviöt

Lasketaan rakennuksen sisäilman tiheys tavoitelämpötilassa (+15 °C) sekä ulkoilman tiheys mitoituslämpötilassa (−26 °C). Ilmanpaineen arvona käytetään normaalia ilmanpainetta maan pinnalla, 101 325 Pa.

$$\rho_s = \frac{p}{R * T} = \frac{101325 Pa}{287 \frac{J}{kg K} * (273,15 + 15)K} = 1,225 kg/m^3$$

$$\rho_u = \frac{p}{R * T} = \frac{101325 Pa}{287 \frac{J}{kg K} * (273,15 + (-26))K} = 1,428 kg/m^3$$

Työmaan henkilö- sekä tavaraliikenne 50-luvun Pieni Näyttämö -rakennuksessa tapahtuu 0. krs:n ravintolan sekä eteishallin ovien kautta. 30-luvun laajennuksessa tavaroiden haalausreitti kulkee rakennuksen itäisellä puolella sijaitsevan oven kautta.

Rakennuksen ulkovaipassa ei ole merkittäviä aukkoja tai vuotokohtia. Tällöin oletetaan, että neutraalitaso asettuu oviaukon puoliväliin. Oviaukkojen virtauskertoimena käytetään arvoa 0,6. Lasketaan oviaukkojen ilmavirtaukset sekä lämpöhäviöt (kaavat 3.15 ja 3.14).

Oviaukkojen ilmavirtaukset:

$$\begin{aligned} q_{mu(ravintola)} &= \frac{2}{3} * 0,6 * 2m * (0,5 * 2,8m)^{1,5} * \sqrt{2 * \frac{9,81m}{s^2} * \frac{1,428kg}{m^3} * \left(\frac{1,428kg}{m^3} - \frac{1,225kg}{m^3} \right)} \\ &= 3,2kg/s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{mu(eteishalli)} &= \frac{2}{3} * 0,6 * 2,6m * (0,5 * 2,5m)^{1,5} * \sqrt{2 * \frac{9,81m}{s^2} * \frac{1,428kg}{m^3} * \left(\frac{1,428kg}{m^3} - \frac{1,225kg}{m^3} \right)} \\ &= 3,5kg/s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{mu(30-luku)} &= \frac{2}{3} * 0,6 * 2,5m * (0,5 * 2,6m)^{1,5} * \sqrt{2 * \frac{9,81m}{s^2} * \frac{1,428kg}{m^3} * \left(\frac{1,428kg}{m^3} - \frac{1,225kg}{m^3} \right)} \\ &= 3,5kg/s \end{aligned}$$

Oviaukkojen lämpöhäviöt:

$$\begin{aligned}\Phi_{0,(ravintola)} &= q_{m,max} * c_{pi} * (t_s - t_u) = 3,2 \text{ kg/s} * 1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (15 - (-26))^\circ\text{C} \\ &= 131,2 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{0,(eteishalli)} &= q_{m,max} * c_{pi} * (t_s - t_u) = 3,5 \text{ kg/s} * 1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (15 - (-26))^\circ\text{C} \\ &= 143,5 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{0,(30-luku)} &= q_{m,max} * c_{pi} * (t_s - t_u) = 3,5 \text{ kg/s} * 1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (15 - (-26))^\circ\text{C} \\ &= 143,5 \text{ kW}\end{aligned}$$

5 Laskentatulokset sekä lämmitysjärjestelmän mitoitus

Johtumislämpöhäviölaskelman perusteella Suomen Kansallisteatterin työmaaikaisen lämmityksen tehontarve tiloittain on taulukon 3 mukainen.

Taulukko 3. Johtumislämpöhäviölaskelman tulokset

Tila	Teho [kW]
Ravintola, Live-tila	10,3
Eteishalli	5,9
Lämpö	4,2
Pieni harjoitushuone	2,7
Suuri harjoitushuone	3,3
Taivassali	4,3
Katsomo	1,7
Näyttämö	9,5
Ilmanvaihtokonehuone	5,4
Porraskäytävä	0,1
30-luvun laajennus	23,5

Lämmitettävä pinta-ala	1930	m ²
Rakennustilavuus	12567	m ³
Lämpöhäviöt yhteensä	71	kW
Lämpöhäviöt	5,6	W/m ³
Lämpöhäviöt	36,6	W/m ²

Lämmitysjärjestelmän todelliseen tehon tarpeeseen johtumislämpöhäviöiden lisäksi vaikuttavat taulukossa 4 esitetyt oviaukkojen lämpöhäviöt.

Taulukko 4. Avonaisten ovien lämpöhäviöt

Tila	Teho [kW]
Ravintolan ovi	131,2
Eteishallin ovi	143,5
30-luvun laajennuksen ovi	143,5

Laskentatuloksien perusteella voidaan todeta, että merkittävin osa rakennuksen lämpöhäviöistä johtuu oviaukkojen kautta vaihtuvasta ilmasta. Oviaukkojen lämpöhäviöt vaikuttavat merkittävästi työmaa-aikaisen lämmitysjärjestelmän mitoitukseen. Pelkästään johtumislämpöhäviölaskelman perusteella mitoitettu järjestelmä ei toimi toivotulla tavalla, eivätkä sisäilman lämpötilat pysy tavoitelukemissa.

Ovien kautta ilmavirtauksien mukana tapahtuvaa lämpöhäviötä on pyrittävä minimoimaan. Auki olevan oven lämpöhäviötä voidaan pienentää esimerkiksi asentamalla oven yhteyteen liuskaverho. Liuskaverhot estävät tehokkaasti kylmän ilman virtausta rakennuksen sisälle, sillä ne avautuvat ainoastaan läpikulun vaatimalta osalta. Liuskaverhojen käytöllä parannetaan myös työviihtyvyyttä sekä työmaan pölyhallintaa. Motivan energiakatselmoijan käsikirjan mukaan liuskaverhojen lämpöhäviö on joitakin prosentteja auki olevan oviaukon lämpöhäviöstä [33].

Seuraavissa laskuissa arvioidaan liuskaverholla varustettujen ovien lämpöhäviön olevan 10 % oviaukon alkuperäisestä lämpöhäviöstä. Arvio perustuu rakennustyömaan hektiseen toimintaan, jolloin ovien kautta tapahtuva henkilöliikenne sekä rakennustarvikkeiden haalaus on vilkasta. Oviaukkojen lämpöhäviöiksi saadaan:

$$\emptyset_{ovi,ravintola} = 131,2kW * 0,1 = 13,1kW$$

$$\Phi_{ovi,eteishalli} = 143,5kW * 0,1 = 14,4kW$$

$$\Phi_{ovi,30-luku} = 143,5kW * 0,1 = 14,4kW$$

Liuskaverhojen käyttö pienentää huomattavasti energiankulutusta. Taulukossa 5 on esitetty liuskaverhojen käytön tuoma säästö, kun lämmitysmuotona käytetään kaukolämpöä. Kaukolämmön keskihintana käytetään lukema 70 €/MWh [34]. Ulkolämpötilana käytetään Helsingin kuukausittaisia keskilämpötiloja [35].

Taulukko 5. Liuskaverhojen käytön tuoma säästö

		Tamm	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Syys	Loka	Marras	Joulu		
Kesk ulkolämpötila	T_u	-3,1	-3,9	-1	3,9	9,7	12,3	6,7	2,5	-0,7	°C	
Ulkoilman tiheys (kg/m ³)	ρ_u	1,31	1,31	1,3	1,27	1,25	1,24	1,26	1,28	1,3	kg/m ³	
Sisäilman tiheys (kg/m ³)	ρ_s	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	kg/m ³	
Ravintolan ovi	Massavirta	q_m	1,93	1,97	1,8	1,47	1	0,71	1,26	1,57	1,78	kg/m ³
	Lämpöhäviö (ei liuskaverhoa)	$\Phi_{oviaukko}$	34,86	37,3	28,75	16,33	5,29	1,92	10,46	19,61	27,92	kW
	Lämpöhäviö liuskaverhon kanssa	$\Phi_{liuskaverho}$	3,49	3,73	2,88	1,63	0,53	0,19	1,05	1,96	2,79	kW
	Energian säästö		4,86	4,7	4,01	2,21	0,74	0,26	1,46	2,65	3,89	MW
	Säästö		340	329	281	154	52	18	102	185	273	€
Eteisen ovi	Massavirta	q_m	2,11	2,16	1,97	1,61	1,1	0,78	1,38	1,72	1,95	kg/m ³
	Lämpöhäviö (ei liuskaverhoa)	$\Phi_{oviaukko}$	24,32	24,4	23,9	21,57	15,85	11,52	19,29	22,44	23,81	kW
	Lämpöhäviö liuskaverhon kanssa	$\Phi_{liuskaverho}$	2,43	2,44	2,39	2,16	1,58	1,15	1,93	2,24	2,38	kW
	Energian säästö		3,39	3,07	3,33	2,91	2,21	1,56	2,69	3,03	3,32	MW
	Säästö		237	215	233	204	155	109	188	212	233	€
30-luvun ovi	Massavirta	q_m	2,15	2,21	2,01	1,65	1,12	0,79	1,41	1,75	1,99	kg/m ³
	Lämpöhäviö (ei liuskaverhoa)	$\Phi_{oviaukko}$	27,07	27,73	25,35	21,14	14,98	10,99	18,43	22,39	25,1	kW
	Lämpöhäviö liuskaverhon kanssa	$\Phi_{liuskaverho}$	2,71	2,77	2,53	2,11	1,5	1,1	1,84	2,24	2,51	kW
	Energian säästö		3,78	3,49	3,54	2,85	2,09	1,48	2,57	3,02	3,5	MW
	Säästö		264	245	248	200	146	104	180	212	245	€
Säästö (€) vuodessa			5 364,00 €									

Liuskaverhoilla varustettujen oviaukkojen lämpöhäviöt lisätään rakennuksen 0-kerroksissa sijaitsevien tilojen johtumislämpöhäviöihin.

$$\Phi_{ravintola} = 10,3kW + 13,1W = 23,4kW$$

$$\Phi_{eteishalli} = 5,9kW + 14,4kW = 20,3kW$$

$$\Phi_{30-luvun laajennus} = 23,5kW + 14,4kW = 37,9kW$$

6 Lämmitysjärjestelmän valinta

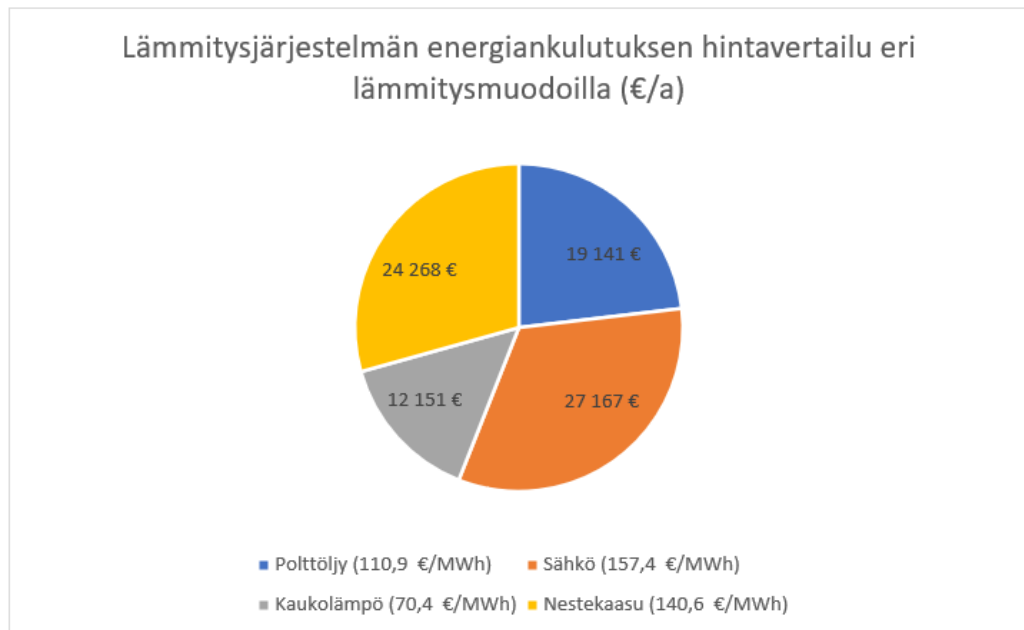
Suomen Kansallisteatterin työmaa-aikaisen lämmitysjärjestelmän valintaan vaikuttavat olennaisesti työmaan sijainti, meneillään olevat rakennustyövaiheet, rakennuksen oman lämmitysjärjestelmän hyödyntäminen, lämmitysmuodon ekologisuus ja edullisuus, järjestelmän säädettävyyden sekä etävalvonnan mahdollisuus. Lämmitysjärjestelmän lämmitystehon on oltava säädettävissä ulkolämpötilan mukaan.

Rakennustyömaa sijaitsee Helen Oy:n kaukolämpöverkon alueella, ja siinä on olemassa oleva kaukolämpöliittymä, joka palvelee 1900-luvun päärakennusta. Rakennustyövaiheet ovat siirtyneet sisätyövaiheeseen, jolloin kaukolämpö soveltuu erinomaisesti lämmitysmuodoksi. Nestekaasuun ja polttoöljyyn, joita käytetään enimmäkseen runkotyövaiheiden lämmittämiseen, verrattuna kaukolämpö on edullinen ja turvallinen lämmönlähde (kuva 19). Kaukolämmön lämmitysprosessi ei tuota ilmaan pakokaasuja eikä sido palamisilmaa. Kaukolämpö voidaan liittää väliaikaiseen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään lämmönjakohuoneessa sijaitsevien olemassa olevien lämmönsiirtimien tai väliaikaisen lämmönjakokeskuksen kautta. Kaukolämpökeskus on myös liitettävissä etävalvontaan, ja järjestelmän teho on automaattikalla säädettävissä ulkolämpötilan säätökäyrän mukaisesti.

Työmaa sijaitsee keskeisellä paikalla Helsingin ydinkeskustassa asuintalojen, toimistojen ja hotellin ympäröimänä. Isoja säiliöitä ja kontteja ei työmaalle tilan puutteen vuoksi voida asentaa. Lämmitysjärjestelmä on asennettava kokonaisuudessaan rakennuksen sisäpuolelle. Täten öljylämpökontit, nestekaasusäiliöt sekä ilmavesilämpöpumppumoduulit eivät työmaalle sovellu.

Kuvassa 18 on esitetty työmaa-aikaisen lämmitysjärjestelmän lasketun energiankulutuksen (172,6 MWh) kustannusvertailu eri lämmitysmuodoilla. Kaukolämmön, sähkön sekä polttoöljyn hinnat on haettu Tilastokeskuksen verkkosivustosta [36]. Nestekaasun hinta on laskettu tarvittavan kilomäärän, kilohinnan sekä yhden nestekaasukilon tuottaman energian (12,8 kWh/kg) mukaan [10].

$$\frac{172600 \text{ kWh}}{12,8 \text{ kWh/kg}} * 1,8 \text{ €/kg} = 24268 \text{ €}$$



Kuva 18. Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen hintavertailu [9].

Vertailun perusteella kaukolämpö on selkeästi edullisin lämmitysmuoto. Öljy- ja nestekaasulämmitykseen verrattuna kaukolämmön asennuskustannukset ovat hieman kalleimmat [12]. Tämä kuitenkin kompensoidaan moninkertaisesti energianhinnassa. Paloturvallisuuden näkökulmasta kaukolämpöjärjestelmä on selkeästi muita järjestelmiä turvallisempi. Toisin kuin esimerkiksi nestekaasupuhaltimet vesikiertolämmittimet eivät aiheuta palovaaraa niiden välittömässä läheisyydessä. Vesikiertolämmittimien asentaminen on myös nopea, niiden siirtäminen työmaalla on vaivatonta ja vuokrahinta on nestekaasu-, öljy- ja sähkölämmittimiä edullisempi (taulukko 7).

Sähkö ei sen korkean hinnan eikä rajallisen tehokapasiteetin vuoksi sovellu Kansallisteatterin työmaan ensisijaisen lämmitysenergian lähteeksi. Varalämmitysjärjestelmänä sitä voidaan käyttää valitun lämmitysjärjestelmän rinnalla esimerkiksi vuoden kylmempinä aikoina.

Taulukko 7. Lämpöpuhaltimien vuokrahintavertailut

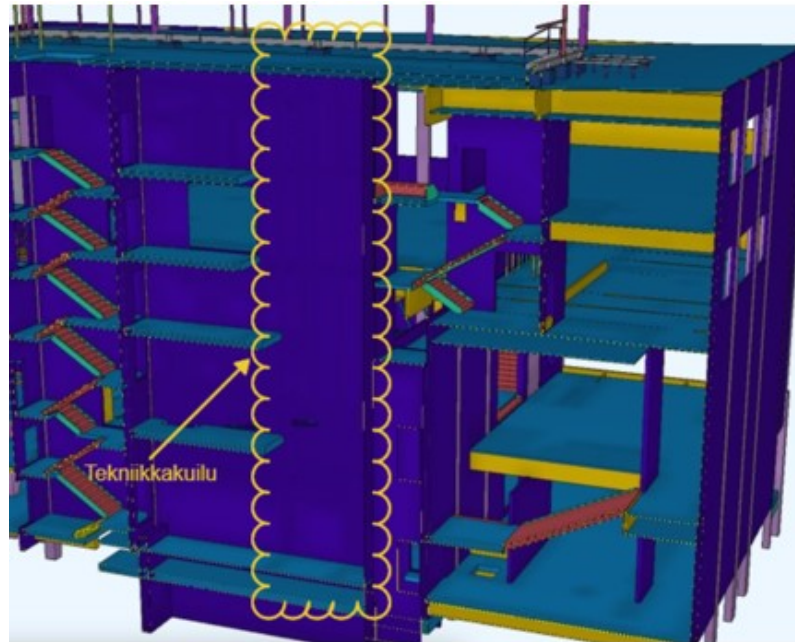
	Teho [kW]	Vuokrahinta € / päivä	
Lämpöpuhallin (vesikiertoinen)	55	8,00 €	Ramrent Oy
Lämpöpuhallin (kaasu)	55	10,00 €	Ramrent Oy
Lämpöpuhallin (öljy)	55	20,00 €	Ramrent Oy
Lämpöpuhallin (sähkö)	40	32,00 €	Cramo Oy

Vertailun perusteella rakentamisaikaiseksi lämmitysjärjestelmäksi valitaan kaukolämpöjärjestelmä. Osan lämmityksestä toteutetaan sähköllä.

7 Lämmitysjärjestelmän asennuskuvaus

Suomen Kansallisteatterin työmaan rakennusaikainen lämmitys toteutetaan vesikiertolämmityksellä. Kaukolämpö liitetään väliaikaiseen siirrettävään kaukolämpökeskukseen, joka sijoitetaan 30-luvun rakennuksen seinälle lämmönjakuhuoneen läheisyyteen. Kytkenät olemassa olevaan kaukolämpöverkkoon tehdään lämmönjakuhuoneessa heti kaukolämpömittarin jälkeen. Järjestelmä varustetaan lämmönsäätöautomaatiikalla, joka säättää lämmitysverkostoon menevän veden lämpötila lämmityksen säätökäyrän mukaisesti. Näin säästetään energiaa, ja rakennuksen yllämmitys minimoituu. Rakennuksen itäiselle ulkoseinälle 2,5 metrin korkeuteen asennetaan ulkolämpötila-anturi, joka liitetään väliaikaiseen kaukolämpökeskukseen. Kaukolämpöjärjestelmä liitetään kaukovalvontaan sekä varustetaan hälytinlaitteistolla, paine-, sähkö ja lämpötila hälytyksillä.

Tilapäiseltä lämmönsiirtimeltä asennetaan runkolinja, ja kuumavesiletkut jatketaan T-haaroilla vesikiertolämmittimille. Linjaston sijainti valitaan siten, ettei se ole meneillä olevien rakennustöiden edessä ja se on tarpeen mukaan muokattavissa. Kerroksien välisissä lämpölinjojen vedoissa hyödynnetään tekniikkakuilua (kuva 20).



Kuva 19. Tekniikkakuilu 30-luvun ja 50-luvun laajennuksien rajapinnassa [9].

Sisäilman lämpötilaa on valvottava reaaliajassa seinälle asennettavilla olosuhdemittareilla. Mittauslaitteiden sijoittelussa on otettava huomioon lämmittimien sijainnit. Lämmittimet ja mittarit on sijoitettava mahdollisimman kauas toisistaan.

Väliaikaisen lämmönsiirtimen kytkentään ja käyttöönottoon liittyy dokumentoituja toimenpiteitä. Ennen laitteiden kytkemistä kaukolämpöverkkoon kaukolämpömyyjältä on saatava lupa. Järjestelmän käyttöönottotarkastuksen voi suorittaa kaukolämpömyyjä itse tai halutessaan antaa osan toiminnosta hyväksytyjen LVI-urakoitsijoiden tehtäväksi. Käyttöönottotarkastuksesta on toimitettava lämmömyyjälle asennusvalvontapöytäkirja. [17, s. 46.]

8 Lämmityslaitteet

Taulukossa 8 on esitetty lämmittimien valinta tiloittain. Kiertovesilämmittimiksi on valittu energiatehokkaat EI Björnin uuden sukupolven TVS-sarjan lämmittimet [37]. Lämmittimien valintaan vaikuttivat lämpötilan säädön mahdollisuus sisäänrakennetun elektronisen termostaatin ansiosta, laaja 360 asteen peittoalue, helppo huollettavuus sekä kevyt rakenne, minkä ansiosta puhaltimet on helppo siirtää ja kuljettaa. Sähkölämpöpuhaltimiksi on valittu portaattomalla lämmitystä ohjaavalla termostaatilla varustetut EI-Björnin VF-sarjan puhaltimet [39]. Sähköpuhaltimet sijoitetaan pienempiin tiloihin sekä katsomoon, joka on käytännössä sama tila näyttämön kanssa. Tällöin näyttämön vesikiertoisen lämmittimen teho yhdessä sähköpuhaltimen kanssa riittää ylläpitämään katsomon lämpötilaa tavoitelukemassa.

Taulukko 8. Lämmittimien valinta tiloittain

Tila	Lämpöhäviö [W]	Lämmittimen tyyppi	Lämmitin	Kokonaislämmitysteho (kW)
Ravintola, Live-tila	23,4	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 30HW EBC	33
Eteishalli	20,3	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 30HW EBC	33
Lämpö	4,2	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
Pieni harjoitus huone	2,4	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
Suuri harjoitus huone	3,3	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
Taivassali	4,2	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
Katsomo	1,7	Sähkö	EI Björn VF31	3
Näyttämö	9,5	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
IVKH	5,4	Vesikiertoinen	EI-Björn, TF 15HW EBC	15
Porraskäytävä	0,1	Sähkö	EI Björn VF31	3
Tarkkaamo	0,2	Sähkö	EI Björn VF31	3
30-luvun laajennus	37,9	Vesikiertoinen	EI Björn, TF 50HW EBC	57

Väliaikaiseksi lämmönjakokeskukseksi valitaan TFUC 200 – siirrettävä kaukolämpökeskus Connect 50–200 kW. Kaukolämpökeskus soveltuu erinomaisesti tilapäiseen käyttöön rakennustyömaalla. Keskuksen lämmitysteho riittää kattamaan työmaan lämmitystehontarpeet kovimmillakin pakkasilla, ja se on yhdistettävissä internetiin etäkäyttöä, hälytyksiä ja valvontaa varten [38].

Lämmönjakokeskuksen, lämmittimien, olosuhdemittareiden sijainti sekä lämpöjohtoreitti suunnitelma on esitetty liitteessä 2.

Taulukossa 9 on vertailtu lämmittimien sekä lämmitysjärjestelmän oheistarvikkeiden (kuumavesiletkut, T-haarat, sulut, ilmakellot) vuokrahintoja eri yrityksille tehtyjen tarjouskyselyiden mukaan. Sähkölämmittimien ostohinta osoittautui niiden kuukausivuokraa halvemmaksi, joten sähkölämmittimet kannattaa ostaa.

Taulukko 9. Lämmittimien vuokra- ja ostohintavertailu

Tuote	Tyyppi	Määrä	Vuokrahinta €/kpl/päivä	Vuorkahinta €/kk	Ostohinta €/kpl
Vesikiertolämmitin	El-Björn, TF 15HW EBC	6	6€ - 13€	1116€ - 2418€	
Vesikiertolämmitin	El-Björn, TF 30HW EBC	2	7€ - 16€	434€ - 992€	
Vesikiertolämmitin	El-Björn, TF 50HW EBC	1	8€ - 23€	248€ - 713€	
Sähkölämmitin	EL-Björn, VF 31	3	4€ - 5€	372€ - 465€	236,9€ - 255,9€
Siirrettävä lämmönjakokeskus	El-Björn, TFUC 200	1	23€ - 42€	713€ - 1302€	
Tarvikkeet				900€ - 1000€	

Edullisin tarjous (ilman sähkölämmittimiä) 3411 €/kk

Lämpötilan reaaliaikaisen seurantaan hankitaan 10 kpl Wiiste EH1 WAN -olosuhdemittareita (215 €/kpl) sekä Wiiste Relia -pilvipalvelu (49 €/kk).

Arvio lämmitysjärjestelmän kokonaiskustannuksesta on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Arvio lämmitysjärjestelmän kokonaiskustannuksesta

Lämmittimien sekä tarvikkeiden vuokraus	3411 €/kk
Wiiste Relia pilvipalvelu	49 €/kk
Lämmitysjärjestelmän asennus (2 asentajaa, 3 päivää, 49e/h)	2352 €
Sähkölämmittimet (3 kpl)	711 €
Olosuhdeanturit (10 kpl)	2150 €
Alkuinvestointi	5213 €
Lämmitysjärjestelmän vuokrahinta	3460 €/kk

9 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella Suomen Kansallisteatterin saneeraus-työmaalle energia- ja kustannustehokas sekä toimintavarma lämmitysjärjestelmä. Suunnittelun lähtökohtana oli järjestelmän optimaalinen mitoittaminen, jolloin lämmitysjärjestelmän tuottama teho vastaisi todellista ulkolämpötilasta riippuvaa lämmitystehontarvetta. Työssä on korostettu rakennuksen lähtötietoihin ja laskelmiin perustuvan mitoituksen tärkeys. Olettamuksiin ja yleissääntöihin pohjautuvat lämmitysratkaisut johtavat herkästi järjestelmien joko ali- tai ylimitoitukseen. Lopputuloksena on epäsuotavat sisäilmasto-olosuhteet sekä energiankulutuksen nousu.

Lämmitysjärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi myös rakennuksen ulkovaipan tiiveys sekä oviaukkojen lämpöhäviöt. Oviaukkojen kautta vaihtuva ilma lisää moninkertaisesti lämmitystehontarvetta. Opinnäytetyössä on tutkittu oviin asennettujen liuskaverhojen vaikutus ovien sekä rakennuksen lämpöhäviöihin ja laskettu niiden tuoma säästö, joka on vuositasolla jopa useampi tuhat euroa. Liuskaverhojen käyttö on edullisin ja helpoin tapa parantaa työskentelyolosuhteita sekä energiatehokkuutta kokonaisuudessa. Lämmitysjärjestelmän tehon mitoituksessa oli otettu huomioon liuskaverhojen tuoma energiansäästö.

Lämmitysjärjestelmän teoreettisen energiankulutuksen mukaan tehdyn kustannusvertailun perusteella kaukolämpö osoittautui muita lämmitysmuotoja halvemmaksi. Vesikiertoisten lämmittimien vuokrahinta myös erottui edukseen. Työmaan lämmittimiksi valikoituivat uuden sukupolven vesikiertoiset puhaltimet, jotka sisäisten termostaattien ansiosta pystyvät ylläpitämään asetustilaa tavoitelukemassa. Vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä on myös paloturvallinen ja ympäristöystävällinen ratkaisu.

Kaukolämpö oli luonteva ratkaisu Suomen Kansallisteatterin lämmitysjärjestelmän valinnaksi jo pelkästään olemassa olevan kaukolämpöliittymän vuoksi.

Myös järjestelmän säädettävyys ja etävalvonnan mahdollisuus vaikuttivat lopulliseen valintaan. Lämpöhäviöltään pienempien tilojen lämmitykseen valittiin sähkölämmittimet, jotka edullisen hankintahinnan vuoksi kannattaa vuokraamisen sijaan ostaa.

Opinnäytetyön lopputuloksena syntyi kattava paketti työmaa-aikaisen lämmitysjärjestelmän suunnitteluperusteista, mitoituksesta sekä toteutuksesta. Työssä on esitetty vaihtoehtoinen lämpöjohtoreitti, lämmittimien sijoitukset sekä projektin arvioitu kustannus tehtyjen tarjouskyselyiden perusteella. Väliaikaisen lämmönjakokeskuksen mitoitusta ei tehty, sillä sen tekee yleensä laitetoimittaja annettujen lähtötietojen perusteella.

Lähteet

- 1 Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. 2022. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/hiilineutraali-suomi2035>>. Luettu 6.2.2022
- 2 Suomen Kansallisteatteri. 2022. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_Kansallisteatteri>. Luettu 7.2.2022
- 3 SRV peruskorjaa Suomen Kansallisteatterin uuden puolen allianssihankkeen. 2021. Verkkoaineisto. Rakennuslehti 8/2021. <<https://www.rakennuslehti.fi/2021/08>>. Luettu 7.2.2022
- 4 The Finnish National Theatre, Helsinki, Finland. 2020. Verkkoaineisto. A-Insinöörit. <<https://www.ains.fi/en/references/suomen-kansallisteatteri-helsinki>>. Luettu 7.2.2022
- 5 Viljanen Matti & Lehtinen Teppo. 1994. Rakennustyön aikaisen lämmityksen suunnitteluperusteet. Luettu 9.2.2022
- 6 Nyt tarkenee – Ramirentiltä valtavat lämmitysjärjestelmät REDiin. 2017. Verkkoaineisto. Ramirent. <<https://www.ramirent.fi/blogi/nyt-tarkenee-ramirentilta-valtavat-lammitysjarjestelmat-rediin>>. Luettu 9.2.2022
- 7 Teriö, Olli & Hämäläinen, Jari. 2015. Rakentamisen energiatehokkuus ja olosuhdehallinta – rakennusfysiikka työmaille. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/10158/Rakentamisen_energiatehokkuus_ja_olosuhdehallinta_-_rakennusfysiikkaa_rakennustyomaille.pdf>. Luettu 13.3.2022
- 8 Rakenteiden lämmitys ja kuivatus. 5/1996. Ratu 07-3032. Rakennustieto oy.
- 9 Omat kuvat
- 10 Rakennustyömaiden nestekaasulämmitys. 2015. Verkkoaineisto. Ramirent Oy. <<https://docplayer.fi/4678051-Rakennustyomaidennestekaasulammitys.html>>. Luettu 13.2.2022
- 11 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5 (Kumottu 1.1.2018). Ympäristöministeriö. Luettu 15.2.2022
- 12 Kaasulämmitys kerrostalotyömaalla. 2018. Verkkoaineisto. Ramirent Oy. <<https://www.ramirent.fi/referenssit/kaasulammitys-kerrostalotyomaalla>>. Luettu 15.2.2022

- 13 Miljövänliga luft/vatten-varmepumpar halverar byggvärmekostnaden. 2020. Verkkoaineisto. Byggindustrin. <<https://www.byggindustrin.se/native/miljovanliga-luft-vatten-varmepumpar-halverar-byggvarmekostnaden/>>. Luettu 17.2.2022
- 14 Rakennustyömaiden väliaikainen lämmitys. 2019. Verkkoaineisto. Ramirent Oy. <<https://www.ramirent.fi/blogi/rakennustyomaiden-valiaikainen-lammitys>>. Luettu 19.2.2022
- 15 MEPU HOTBOX620. 2022. Verkkoaineisto. Ramirent Oy. <<https://www.ramirent.fi/vuokraa/lammitys-kuivaus-ja-polyntorjunta/polttooljylammitys/125080/lampokontti-oljy-epasuora-poltto>>. Luettu 19.2.2022
- 16 Lämmitys parantaa talviaikaisen rakentamisen laatua. 2019. Verkkoaineisto. Polygon Oy. <<https://www.polygongroup.com/fi-FI/uutiset/lammitys-parantaa-talviaikaisen-rakentamisen-laatua/>>. Luettu 19.2.2022
- 17 Rakennusten kaukolämmitys Määräykset ja ohjeet. K1/2020. Verkkoaineisto. Energiateollisuus.< https://energia.fi/files/5423/JulkaistuK1_2020_Energiateollisuus_ry_%28paiv._20201119%29.pdf>. Luettu 19.2.2022
- 18 Rakennuksen työmaa-aikainen lämmitys, rakenteiden kuivaus. 2016. Tiedote K65/2016. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <https://energia.fi/files/934/RakennuksenTyomaa-aikainenLammitys_Tiedote_K65_20160329.pdf>. Luettu 19.2.2022
- 19 TFUC 800. 2022. Verkkoaineisto. El-Björn. <<https://www.elbjorn.com/media/8020/tfuc800-fi.pdf>>. Luettu 20.2.2022
- 20 Sähkölämmitys. 2022. Verkkoaineisto. Ramirent Oy. <<https://www.ramirent.fi/vuokraa/lammitys-kuivaus-ja-polyntorjunta/sahkolammitys>>. Luettu 20.2.2022
- 21 HeatBox Hydro 80 kW. 2022. Verkkoaineisto. Energy Save Holding AB. <<https://energysave.se/products/plug-in-modules/es-heatbox-hydro/>>. Luettu 21.2.2022
- 22 Energy Save. 2022. Verkkoaineisto. <<https://energysave.se/>>. Luettu 21.2.2022
- 23 Olosuhteiden hallinta rakentamisessa. 12/2021. Ratu S-1236. Rakennustieto Oy

- 24 EH1-WAN (IoT). 2022. Verkkoaineisto. Wiiste Oy. <<https://www.wiiste.com/rakennekosteusmittarit>>. Luettu 24.2.2022
- 25 Vinha, Juha. 2010. Lämpö ja lämmön siirtyminen. Verkkoaineisto. <<https://docplayer.fi/3499888-4-lampo-ja-lammon-siirtyminen.html>>. Luettu 25.2.2022
- 26 Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 27 Seppänen, Olli. 2021. Rakennusten lämmitys.Helsinki. Suomen LVI-Liitto Oy.
- 28 Kalema, Timo. Tavalantti, Kirsi. Teikari, Minna. 2003. Rakennusten lämmöntarpeen laskentaohje. Rakennusteollisuus RT ry.
- 29 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö.
- 30 Heikkinen, Lauri. 2020. Energia ja elinkaarilaskenta. Opetusaineisto. Metropolia ammattikorkeakoulu.
- 31 Sandberg, Esa & Valkeapää, Aki. 2014. Ilmalaitoksen suunnittelu. Luku 2. Teollisuus- ja erikoisilmastoinnin suunnittelun periaatteita. Opetusaineisto.
- 32 Ilman tiheys. 2022. Verkkoaineisto. Aerodynamiikka. <<https://www.aerodynamiikka.fi/index.php/lentajan-lupakirja/ilman-ominaisuudet/10-ilman-tiheys>>. Luettu 2.4.2022
- 33 Aranto, Niina. 2010. Teollisuuden ja yhdyskuntien energiatehokkuus selvitykset, auditoinnit 2008–2010. Verkkoaineisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/64163/isbn%209789522149923.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Luettu 18.4.2022
- 34 Kaukolämmön hinnat. 2022. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/hinnat#:~:text=Kaukol%C3%A4mm%C3%B6n%20kev%C3%A4tkauden%202022%20hinta%20on,%E2%80%9330.9.2022.>>>. Luettu 20.4.2022
- 35 Kuukausitilastot. 2022. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>>. Luettu 19.4.2022

- 36 Lämmitysenergian kuluttajahintoja 12/2021. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://stat.fi/til/ehi/2021/04/ehi_2021_04_2022-03-10_tau_002_fi.html>. Luettu 29.4.2022
- 37 TVS Rakennuslämmittimet. 2022. Verkkoaineisto. EL-Björn. <<https://www.elbjorn.com/fi-fi/lampo/tvs-kuivaus-ja-lammitysjarjestelma/>>. Luettu 2.5.2022
- 38 TFUC 200 Connect - Siirrettävä kaukolämpökeskus Connect 50–200 kW. 2022. Verkkoaineisto. EL-Björn. <<https://www.elbjorn.com/fi-fi/lampo/valiaikaiset-lammonvaihtimet/eb15721-siirrettava-kaukolampokeskus-connect-50-200-kw/>>. Luettu 3.5.2022
- 39 VF-sarjan lämpöpuhaltimet. 2022. Verkkoaineisto. EL-Björn. <https://www.elbjorn.com/fi-fi/lampo/lampopuhaltimet/kannettava/e8726304_I%C3%A4mmiilmapuhallin/>. Luettu 3.5.2022

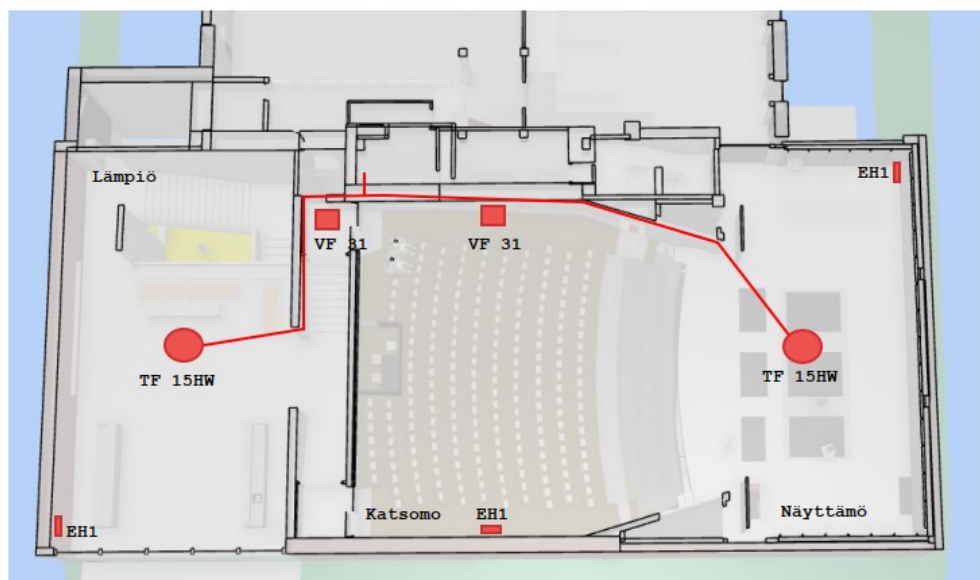
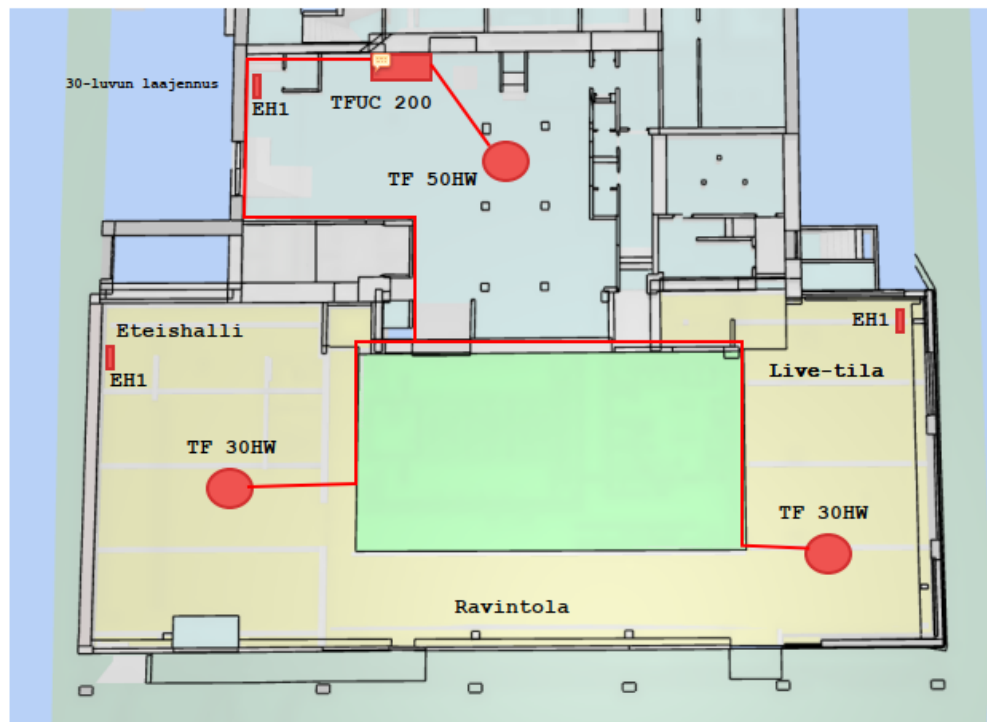
Liite 1. Suomen Kansallisteatterin johtumislämpöhäviölaskelma

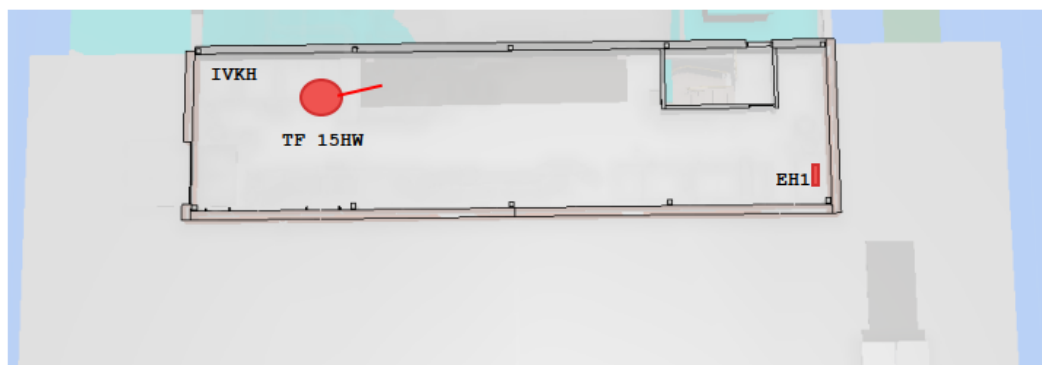
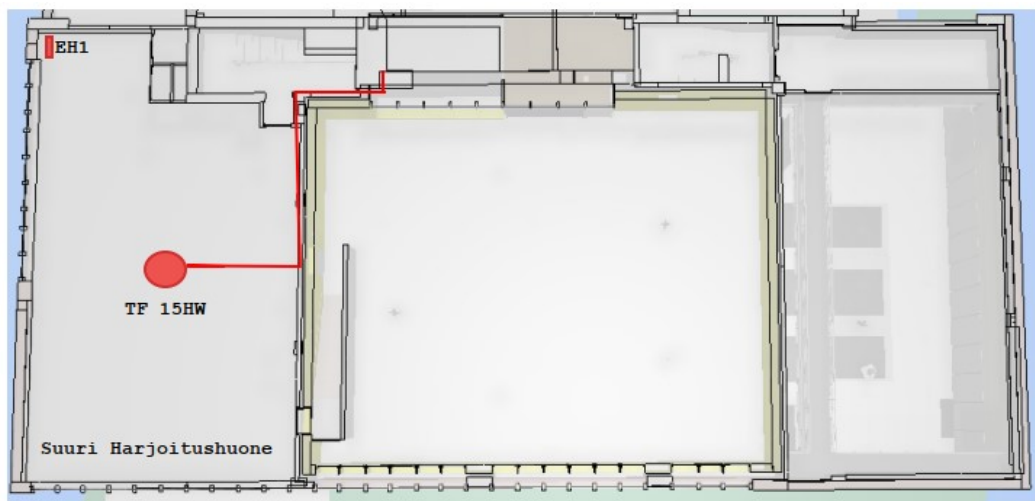
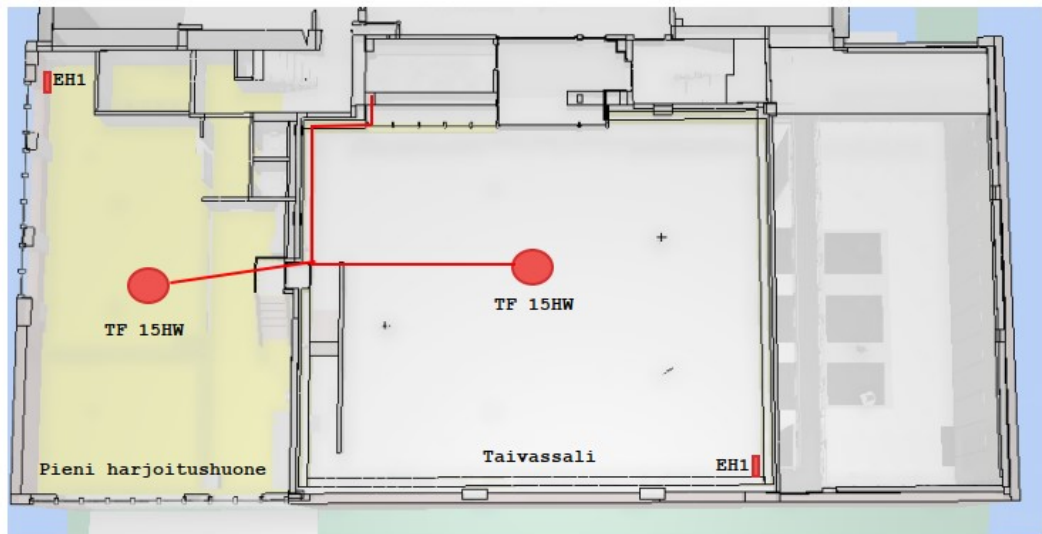
Tila	A [m ²]	V [m ³]	T _s [°C]	Rakenne	U [W/(m ² K)]	A [m ²]	I _k [m]	T _u [°C]	Teho [W]
Eteishalli									5872
	141	564	15	Seinä US1	0,60	51,8		-26	1274
				Seinä US2	0,26	14,1		-26	151
				Alapohja AP1	0,17	141		-26	983
				Ikkunat I1	2,70	15,7		-26	1738
				Ovet	4,76	6,8		-26	1327
				Kylmäsillat			25	-26	41
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	229,4		0,0072835	358
Lämpö									4214
	167	985,3	15	Seinä US1	0,60	101,5		-26	2497
				Seinä US2	0,26	0		-26	0
				Alapohja AP	0,17	167		-26	0
				Ikkunat I2	0,55	51,8		-26	1168
				Ovet				-26	0
				Kylmäsillat			30	-26	49
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	320,3		0,0101683	500
Pieni harjoitushuone									2365
	144	532,8	15	Seinä US1	0,60	47,4		-26	1167
				Seinä US2	0,26	9,4		-26	101
				Alapohja AP	0,17	144		-26	0
				Ikkunat I2	0,55	30,3		-26	683
				Ovet				-26	0
				Kylmäsillat			32,7	-26	54
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	231,1		0,0073376	361
Suuri harjoitushuone									3297
	163	635,7	15	Seinä US1	0,60	51,3		-26	1262
				Seinä US2	0,26	21		-26	224
				Yläpohja YP1	0,09	152,6		-26	563
				Ikkunat I2	0,55	33,7		-26	761
				Ovet				-26	0
				Kylmäsillat			40,5	-26	66
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	269,1		0,0085422	420

Tila	A [m ²]	V [m ³]	T _s [°C]	Rakenne	U [W/(m ² K)]	A [m ²]	l _k [m]	T _u [°C]	Teho [W]
Taivassali									4238
	258	1702,8	15	Seinä US1	0,60	0,0		-26	0
				Seinä US2	0,26	56,9		-26	607
				Yläpohja YP2	0,16	192,8		-26	1265
				Ikkunat I2	0,55	57,2		-26	1290
				Ovet				-26	0
				Kylmäsiillat			36,6	-26	60
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaiipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	372,1		0,020673	1017
Tarkkaamo									163
	38,5	115,5	15	Seinä US1	0,60	0,0		-26	0
				Seinä US2	0,26	8,4		-26	90
				Yläpohja YP	0,16	38,5		-26	0
				Ikkunat I2	0,55	0,0		-26	0
				Ovet				-26	0
				Kylmäsiillat			0	-26	0
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaiipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	46,9		0,0014889	73
Katsomo									1698
	228,9	1602,3	15	Seinä US1	0,60	0,0		-26	0
				Seinä US2	0,26	109,7		-26	1169
				Yläpohja YP	0,16	228,9		-26	0
				Ikkunat I2	0,55	0,0		-26	0
				Ovet				-26	0
				Kylmäsiillat			0	-26	0
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaiipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	338,6		0,0107492	529
Näyttämö									9487
	141	1988,1	15	Seinä US1	0,60	241,9		-26	5951
				Seinä US2	0,26	115,2		-26	1228
				Yläpohja YP2	0,16	118,3		-26	492
				Ikkunat I2	0,55	0,0		-26	0
				Ovet				-26	0
				Kylmäsiillat			0	-26	0
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaiipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	498,1		0,0368978	1815

Tila	A [m ²]	V [m ³]	T _s [°C]	Rakenne	U [W/(m ² K)]	A [m ²]	l _k [m]	T _u [°C]	Teho [W]
IVKH									5374
	141,5	622,6	15	Seinä US3	0,16	274,6		-26	1801
				Yläpohja YP3	0,16	141,5		-26	928
				Ovet	4,76	5,6		-26	1093
				Kylmäsiilat			9	-26	15
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	421,7		0,031237	1537
Porraskäytävä									118
	31	93	15	Seinä US2	0,26	5,7		-26	60
				Yläpohja YP	0,16	31		-26	0
				Ovet	4,76	0		-26	0
				Kylmäsiilat			0	-26	0
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	36,7		0,0011641	57
30-luvun laajennus									23472
	120,7	2305,4	15	Seinä US4	0,85	368,5		-26	12843
				Alapohja AP2	0,36	120,7		10	217
				Yläpohja YP4	0,60	120,7		-26	1883
				Ikkunat I1	2,70	39,4		-26	4357
				Ovet	4,76	10,4		-26	2030
				Kylmäsiilat			108	-26	177
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	539,0		0,0399252	1964
Ravintola, Live-tila									10263
	355	1420	15	Seinä US1	0,60	73		-26	1796
				Seinä US2	0,26	52		-26	554
				Alapohja AP1	0,17	355		10	302
				Ikkunat I1	2,70	55,7		-26	6166
				Ovet	4,76	2,6		-26	507
				Kylmäsiilat			61,6	-26	101
				Vuotoilma	q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	A _{vaipa} [m ²]		q _{vuotoIV} [m ³ /s]	Φ [W]
					4	535,7		0,0170063	837

Liite 2. Lämmityslaitteiden ja olosuhdemittareiden sijoittelu





Liite 3. Viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssin arvot

Liitos	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)					
	Ulkoseinän runkomateriaali					
	betoni	kevyt- betoni	kevyt- sora- betoni	tiili	puu	hirsi
ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
ikkuna- ja oviliitos, lämmöneristeen kohdalla ^{*)}	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ikkuna- ja oviliitos muussa tapauksessa	0,15	0,07	0,10	0,10	0,07	0,07

^{*)} Karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

Ylä- väli- ja alapohjan liitos ulkoseinään

Ulkoseinän runkomateri- aali	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)									
	Yläpohjan runkomateriaali			Välipohjan runkomate- riaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni maan- vast.	betoni ryöm. tila	kevyt- betoni ryöm. tila	puu ryöm. tila
betoni	0,08		0,04	0,00			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,10	0,00		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,00			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,00	0,11			0,09

Liite 4. Rakennuksen ja rakennusvaipan tyypilliset ilmanvuotoluvut

<i>Taulukko 4.3. Tyypillisiä vaipan ilmanvuotolukuja (n_{50}) erilaisille rakennuksille riippuen rakentamis- ja toteutustavasta.</i>		
Tavoiteilmanpitävyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset n_{50} -luvut, l/h
Hyvä ilmanpitävyys	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa (erillistarkastus)	Pientalo 1 ... 3 Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 0,5 ... 1,5
Keskimääräinen ilmanpitävyys	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 3 ... 5 Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,5 ... 3,0
Heikko ilmanpitävyys	Ilmanpitävyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 5 ... 10 Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 3 ... 7