



SAATTOLÄMMITYSJÄRJESTELMÄN MITOITUS JA TOTEUTUS

Diplomityö

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Kimmo Uusitalo

Tarkastaja(t): Professori Juha Pyrhönen

Apulaisprofessori Janne Nerg

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Kimmo Uusitalo

Saattolämmitysjärjestelmän mitoitus ja toteutus

Diplomityö

2022

68 sivua, 38 kuvaa, 5 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastaja(t): Professori Juha Pyrhönen

Apulaisprofessori Janne Nerg

Avainsanat: saattolämmitysjärjestelmä, teollisuus, mitoitus, asiakasprojekti, laskentatyökalu

Sähkölämmitykset ovat teknologian kehityksen ja käyttäjien tietoisuuden kasvamisen seurauksena alkaneet kiinnostaa yhä laajemmin pohjoismaissa. Erityisesti tuotantolaitokset ovat kiinnostuneet sovelluksien avulla saatavasta datasta ja tuotantolinjojen turvaamisesta yhä paremmin. Silti putkistot rakennetaan kokonaisiksi useimmiten ennen saattolämmityksien ja eristysten asennustyötä.

Tässä työssä selvitetään kolmen putkilinjan saattolämmityshankkeen etenemistä, kun putkilinjat rakennetaan lohkoissa. Työn teoreettisessa osuudessa analysoidaan muiden menetelmien sopivuutta hankkeen tarkoituksessa ja tehdään vertailua vanhan ja uuden teknologian lämmityskaapeleiden välillä.

Työssä esitetään tarkasti keskeisimpien komponenttien ja toimilaitteiden rakenteet, käyttö-tarkoitukset, ominaisuudet sekä oikeat asennustavat toimivan järjestelmän aikaansaamiseksi.

Työn laskennallisessa osuudessa esitetään saattolämmitysjärjestelmän mitoitukseen tarpeelliset teoreettiset yhtälöt ja laskentamenetelmät. Tutkimuksessa selvitettiin lämmityspiirin lämpöhäviöt ja analysoitiin eristevahvuuden vaikutukset saatuihin tuloksiin. Lopuksi verrattiin saatuja arvoja valmistajan rakentaman ohjelman tuloksiin.

Tutkimuksessa saatiin ratkaistua, että lämmitysjärjestelmä on mahdollista rakentaa myös osina, mutta se ei ole kaikissa kohteissa järkevin menettelytapa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Degree Programme in Electrical Engineering

Kimmo Uusitalo

Trace heating system dimensioning and implementation

Master's thesis

2022

68 pages, 38 figures, 5 tables and 6 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen

Associate professor Janne Nerg

Keywords: trace heating, industry, dimensioning, trace heating system, calculation tool

As a result of technological development and increased user awareness, electric heating has begun to attract more interest in the Nordic countries. In particular, production plants are interested in the data obtained with the help of applications and in securing production lines even better. Even so, the pipelines are mostly built whole before the installation work of the heating systems and insulation.

This work investigates the progress of a three-pipeline co-heating project in which the pipelines are built in blocks. In the theoretical part of the work, the suitability of other methods for the purpose of the project is analyzed and a comparison is made between old and new technology heating cables.

The work accurately presents the structures, purposes of use, properties and correct installation methods of the most important components and actuators in order to create a functioning system.

In the calculation part of the work, the necessary formulas and calculation methods for dimensioning the heating system are presented. The study investigated the heat losses of the heating circuit and analyzed the effects of insulation strength on the obtained results. Finally, the obtained values were compared with the results of the program built by the manufacturer.

The research concluded that it is also possible to build the heating system in parts, but it is not the most reasonable procedure in all locations.

KIITOKSET

Opiskelutaipaleeni LUT:ssa alkaa tulla päätökseensä, ja seuraavaksi on aika tuoda opittuja asioita työskentelykentälle. Opiskelu koronapandemian aikana oli antoisaa, ja etäopiskelu tuona aikana mahdollisti itsensä kehittämisen paremmin kuin koskaan ennen.

Kiitokseni tahdon osoittaa kurssikavereille vertaistuesta opiskelujeni aikana, Caverion Industria Oy:n Janne Kymäläiselle ja Jussi Nurmiselle, jotka mahdollistivat tämän opinnäytetyön suorittamisen ja antoivat todella arvokkaita mietteitä sekä mielenkiintoisia näkökulmia diplomityön aiheesta. Lisäksi haluan kiittää Planray Oy:n Toni Piiraista sekä Nvent Raychem Oy:n Eero Laurilaa tuotteisiin ja ohjelmiin liittyvistä neuvoista, ohjaajiani professori Juha Pyrhöstä ja apulaisprofessori Janne Nergiä ohjauksesta ja palautteista diplomityön sisältöä koskevissa kysymyksissä. Erityiskiitokset puolisolleni ja lapsille kärsivällisyydestä ja tuesta koko opiskeluajaltani.

Syyskuussa 2022

Kimmo Uusitalo

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
C	kapasitanssi	[F]
C_1	nesteiden ominaislämpökapasiteetti	[J/(kg K)]
C_2	putken ominaislämpökapasiteetti	[J/(kg K)]
C_3	eristeen ominaislämpökapasiteetti	[J/(kg K)]
f	taajuus	[Hz]
I	virta	[A]
l	pituus	[m]
m	massa	[kg]
P	teho	[W]
Q	lämpöhäviö	[W]
T	lämpötila	[°C, K]
U	jännite	[V]
V	tilavuus	[m ³]
v	nopeus	[m/s]
Z	impedanssi	[Ω]

Kreikkalaiset

\mathcal{E}	emissiivisyys	
λ	lämmönjohtavuus	[W/(m K)]
μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/ms]

ν	kinemaattinen viskositeetti	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ϵ_s	Suhteellinen permittiivisyys	
ρ	tiheys	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Vakiot

c	jännitteenaleneman kerroin 0.95
ϵ_0	Tyhjiön permittiivisyys $8.85 \cdot 10^{-12}$ (F/m)
σ	Stefan-Boltzmannin säteilyvakio $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/(m ² · K ⁴))

Dimensiottomat luvut

H	Terminen aikavakio
L	Karakteristinen pituus
Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku
Re	Reynoldsin luku

Alaindeksit

c_{nd}	lämmönjohtumisen aiheuttama vaikutus
c_{nv}	konvektiovirtauksen aiheuttama vaikutus
h_{mp}	aineeseen sitoutunut sulamislämpö
I_k	Oikosulkuvirta
I_c	Kapasitiivinen vuotovirta
I_{ksb}	Oikosulkuvirta sähkökeskuksella
in	putken sisäpinta

J_{er}	johtumisen aiheuttama vaikutus eristeessä
J_{pe}	johtumisen aiheuttama vaikutus pintapellityksessä
K_{ul}	konvektio pellityksestä ulkoilmaan
Q_{com}	saattokaapelin teho putkimetriä kohden
rad	lämmönsäteilyn aiheuttama vaikutus
sur	ympäröivät pinnat
T_1	putkessa kulkevan nesteen minimilämpötila
T_{beg}	alkulämpötila
T_{cha}	aineen olomuodon lämpötilamuutos
T_{end}	loppulämpötila
T_{env}	ulkoilman lämpötila
tex	putken ulkopinta
tot	yhteissumma (total)
Z_{cab}	kaapelin impedanssi
Z_{Cu}	4mm ² kuparijohtimen impedanssi 5.48Ω/km
Z_{rk}	ryhmäkeskuksen silmukkaimpedanssi
Z_v	impedanssi ennen suojalaitetta
-15	-15 °C lämpötilassa
+15	+15 °C lämpötilassa

Yläindeksit

" tuumakoko (inch)

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (alternating current)
ATEX	Räjähdyksivaarallisia tiloja koskeva lainsäädäntö (Atmosphere explosive)
CR	Muunnetusta polyolefiinista valmistettu ulkovaippa
CT	Fluoripolymeerinen ulkovaippa
d	Eristeen sisähalkaisija (diameter)
D	Eristeen ulkohalkaisija (diameter)
DN	Nimellinen putkikoko (Diameter Nominale)
ID	Tunniste (Identifier)
IP	Kotelointiluokka (ingress protection)
k_1	lämpötilan korjauskerroin
k_2	viereisien virtapiirien korjauskerroin
k_3	eristyksen korjauskerroin
PID	Säädintä kuvaavat termit, Suhde-integroiva-derivoiva (Proportional-Integral-Derivative)
r_1	Seinämän sisäsäde
r_2	Seinämän ulkosäde
RW	kivivilla (rock wool)
T3	Lämpötilaluokitus 3, maksimipintalämpötila 200 °C
T6	Lämpötilaluokitus 6, maksimipintalämpötila 85 °C
TC	Lämpötilasäätö (Temperature control)
TL	Lämpötilarajoitus (Temperature limitation)
TW	Lämpötilaikkuna (Temperature window)
VKE	Kemiallisen veden putkilinja

VLA	Lauhdeveden palautus putkilinja
VRA	Raakavesi putkilinja
z	suojattavan johtimen impedanssi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	13
1.1	Tutkimuksen tausta	15
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	16
1.3	Tutkimuksen menetelmät ja aineisto.....	17
1.4	Tutkimuksen rakenne	17
2	Määritelmiä ja käsitteitä	18
3	Sähkösaattojärjestelmän sisältö	20
3.1	Sähkösaattokaapelointi.....	20
3.1.1	Kaapelityypit.....	21
3.2	Asennusmateriaalit ja niiden vaikutukset.....	23
3.2.1	Saattolämmityskaapeleiden sijoittamistapa	23
3.2.2	Eristysvahvuus ja eristysmateriaalit.....	24
3.2.3	Kaapelijatkokset.....	25
3.2.4	Loppupäätteet.....	27
3.2.5	Kytkenärsiat	28
3.2.6	Suojalaitteet	30
3.2.7	Antureiden asennustapa, sijoittaminen ja mittausajankohdan vaikutus.....	31
3.3	Sähkösaattojärjestelmän toiminnan ohjaus ja säätö	32
3.3.1	BT-300-1P Sähkölämmityssäädin	33
3.3.2	SkyTrace hallintaohjelma	34
3.3.3	PlanControl ohjausjärjestelmä	35
3.3.4	BluePID- ohjausalgoritmi ja Bluetrace laitteen ohjelmointi.....	36
3.4	Dokumentaatio	38
3.4.1	Lämmitinluettelo.....	38
3.4.2	Mittauspöytäkirjat.....	39

3.4.3	Huolto- ja Tarkastuspöytäkirja	40
3.5	Tarkastukset	41
3.5.1	Käyttöönottotarkastus	42
3.5.2	Vastaanottotarkastus	42
3.5.3	Varmennustarkastus.....	43
3.6	Vaihtoehtoisen menetelmän esittely	43
4	Sähkösaattojärjestelmän mitoitusmenetelmät	48
4.1	Olosuhteiden vaikutukset materiaalivalintoihin.....	48
4.1.1	Lämpötilat asennuskohteessa.....	48
4.2	Mitoitus yhtälöiden avulla.....	49
4.2.1	Putken lämpöhäviöt	49
4.2.2	Terminen aikavakio	53
4.2.3	Lämpötilan nostamisen vaatima lämmitysteho.....	53
4.2.4	Muiden materiaalien laskeminen	54
4.2.5	Kaapelityyppi.....	55
4.2.6	Kaapelipituus ja toimintavirta.....	57
4.2.7	Käynnistysvirta	60
4.2.8	Kapasitiivinen vuotovirta.....	61
5	Yhteenveto.....	62
5.1	Tulosten pohdinta.....	62
5.2	Johtopäätökset	63
5.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	63
	Lähteet	64

Liitteet

Liite 1. Eristevahvuuden vaikutukset DN100 ja DN350 putkien lämpöhäviöihin, ilmanlämpötilassa 0 °C ja –10 °C. Nesteenä 20 °C Vesi ja eristemateriaalina kivivilla.

Liite 2. Kuukausien keskilämpötilat Porin Rautatieaseman mittauspisteellä 2017 touko-kuusta alkaen.

Liite 3. Laskentatyökalu TraceCalc Pro 2

Liite 4. Putkilinjojen lämpöhäviöt lämpötilavälillä –40 °C ... +20 °C

Liite 5. Sallitut maksimijohtopituudet syöttökaapeleissa eri ylikuormitussuojilla 5 sekunnin ja 0,4 sekunnin poiskytkentäajalla.

Liite 6. Kuukausien keski-, maksimi- ja minimituulennopeudet Porin Rautatieaseman mitauspisteellä vuonna 2021.

Kuvaluettelo

Kuva 1. Konduktiivisen saattolämmityksen rakennekuva. (Nysveen et al., 2005).....	14
Kuva 2. Induktio saattolämmityksen havainnekuva. (EIProCus Technologies Pvt Ltd., 2022)	14
Kuva 3. Epäsuoran saattolämmityksen asennustavat lämmityskaapelilla (Danfoss Oy, 2022)	15
Kuva 4. Puhtaasti induktiivisen ja kapasitiivisen kuormituksen vaihesiirtoero vaihtovirtapiirissä. (Nieminen, 2022)	18
Kuva 5. Itsesäätyvän kaapelin toimintaperiaate. Vyöhykkeet 1, 2 ja 3 ovat eri lämpötiloissa. (Nvent Raychem, 2022).....	20
Kuva 6. Lämpökaapelin rakenne. Vasemmalla BTV- ja oikealla XTV-kaapeli. (Nvent Raychem, 2022)	22
Kuva 7. Saattolämmityskaapelin asennus venttiilin kohdalla. (Pentair thermal building solutions, 2014-2016)	23
Kuva 8. Lämmityskaapelin asennus vaakasuorassa oleville putkille.....	24
Kuva 9. Eristysvahvuuden vaikutus lämpöhäviöihin, kahdella eri putkikoolla ja ilman lämpötilalla. Neste 20 °C vesi, eristemateriaali kivivilla.....	25
Kuva 10. S-150 Lämpökaapelijatkoksen räjäytyskuva. (Nvent Raychem, 2022).	26
Kuva 11. E-150 Lämpökaapelipääte räjäytyskuva. (Nvent Raychem, 2022).	28
Kuva 12. JBM-100-L-EP liitäntärasia. (Nvent Raychem, 2022).	29
Kuva 13. Saattolämmityspiirin rakenne. (Nvent Raychem, 2016 s. 22).....	30
Kuva 14. Vikavirtasuojakytkimen rakenne. (Sähkö- ja Teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)	31
Kuva 15. Lämpötila-anturin asennustapa putkeen. (Lapp automaatio Oy, 2022)	31
Kuva 16. Pentair Bluetrace BT-300-1P. (Planray Oy, 2022).....	34
Kuva 17. Pentair PlanControl moduuli. (Planray Oy, 2022)	35
Kuva 18. Bluetracen valikkorakenne. (Planray Oy, 2011)	36
Kuva 19. Esimerkki lämmitinluettelosta.....	39
Kuva 20. Esimerkki lämmityspiirien mittauspöytäkirjasta. (Nvent Raychem, 2021)	40
Kuva 21. Esimerkki lämmityspiirien tarkastus- ja huoltotietolomakkeesta. (Nvent Raychem, 2021)	41
Kuva 22. HTV-tuoteperheen kaapelin rakenne. (Nvent Raychem, 2022)	44
Kuva 23. Havainnekuva kaapeleiden tehon heikkenemisestä ajankulun funktiona.	46
Kuva 24. Havainnekuva lämmityskustannusten kasvusta ajan funktiona. Kuvaajassa on esitetty lämmityspiirien uuden kaapelin hankinnasta aiheutunut kustannus, kun kaapelit vaihdetaan aina takuuajan umpeuduttua.	46
Kuva 25. Putkilinjojen lämpöhäviöt normaalissa käyttölämpötilassa lämpötilanmuutoksen funktiona.	52
Kuva 26. Sallitut syöttökaapelien maksimipituudet 5 sekunnin poiskytkentäajalla gG-tyypin ylikuormitussuojilla.	59
Kuva 27. Sallitut syöttökaapelien maksimipituudet 0.4 sekunnin poiskytkentäajalla gG-tyypin ylikuormitussuojilla.	60
Kuva 28. Lämmityksryhmien virran muutos käynnistyshetkestä normaaliin käyttötilaan...	61
Kuva 1. TraceCalc Pro2 aloitusnäky.....	1
Kuva 2. TraceCalc Pro2, toiminnan vuokaavio.	2

Kuva 3. TraceCalc Pro2, saattolämmityslinjan laskentapainike	3
Kuva 4. TraceCalc Pro2, Perustiedot välilehti.	4
Kuva 5. TraceCalc Pro2, Referenssit välilehti.	5
Kuva 6. TraceCalc Pro2, Alueen luokitus välilehti.....	5
Kuva 7. TraceCalc Pro2, Lämmitin valinnat välilehti.	6
Kuva 8. TraceCalc Pro2, Komponentit välilehti.	7
Kuva 9. TraceCalc Pro2, Ohjaukset välilehti.....	7
Kuva 10. TraceCalc Pro2, Laskentatulokset.	8

Taulukkuuettelo

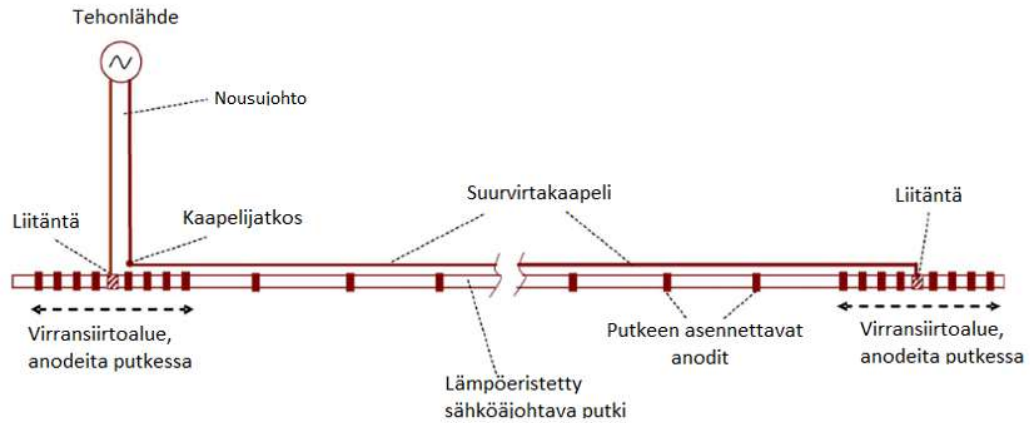
Taulukko 1. Piirin maksimipituudet käytettäessä HTV- tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)	45
Taulukko 2. Kausien keskilämpötilat sekä vuosien minimi- ja maksimilämpötilat asennuskohteessa (°C).	48
Taulukko 3. Yhteenveto saattolämmitysjärjestelmän materiaaleista.	54
Taulukko 4. Piirin maksimipituudet käytettäessä BTV-tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)	55
Taulukko 5. Piirin maksimipituudet käytettäessä XTV-tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)	56

1 Johdanto

Omakohntaisiin kokemuksiin perustuen sähkölämmitysjärjestelmien suosio on kasvanut huomionarvoisesti Etelä-, Länsi- ja Itä-Suomessa 2010- luvulta lähtien. Tästä kertoo myös sähkölämmitysjärjestelmiä tekevien yritysten kasvanut määrä. Teknologian kehittyessä ja käyttäjien tietoisuuden lisääntyessä teollisuuslaitokset haluavat yhä useammin turvata tärkeiden tuotantolinjojen toimintakyvyn estämällä jäätyminen. Tyypillisesti saattokaapeloinnilla turvataan tuotantolinjojen lisäksi myös turvallisuuteen liittyvät vesiputkistot kuten palovesiputkisto ja hätäsuihkuputkisto. Saattolämmitysjärjestelmällä tarkoitetaan lämmitysjärjestelmää, jota käytetään lämmittämään nesteen siirtämiseen tarkoitettua putkistoa tai kourua.

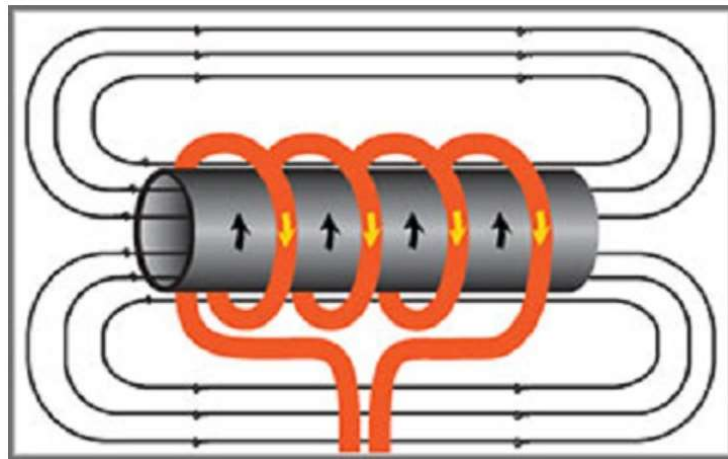
Saattolämmityksien käyttökohteita on useita erilaisia. Teollisuudessa tyypillisimmät syyt saattolämmitykseen investoimiselle ovat putkessa siirtyvän nesteen jäätyminen estäminen ja sen myötä putkilinjojen suojaaminen vaurioilta tai putkessa kulkevan aineen ylläpitolämmitys tietyissä lämpötilarajoissa. Esimerkiksi prosessilinjoissa nesteen lämpötila voi olla tarkasti määritelty tai putkessa kulkevan aineen jähmettymislämpötila voi olla niin korkea, että se vaatii lämmityksen pysyäkseen nestemäisenä. Kiinteistörakennuksissa tyypillisimpiä asennuskohteita ovat viemäriputkistot, sadevesijärjestelmät, sprinklerijärjestelmät ja palovesiputkistot. Maatalouksissa voidaan saattolämmittää myös esimerkiksi eläinten juottojärjestelmät jäätyminen estämiseksi.

Putkistojen lämmityksiin ja sulanapitoon käytettäviä lämmitysmenetelmiä on muutamia erilaisia. Suorat sähkölämmitykset, kuten konduktiivinen lämmitys ja induktiivinen lämmitys tai epäsuora sähkölämmitys lämpenevän vastuskaapelin avulla. Konduktiivista sähkölämmitystä käytetään tyypillisesti yli 50 km pitkien siirtolinjojen lämmityksessä merivedessä. Konduktiivisessa sähkölämmityksessä tarkoituksena on johtaa eristetyllä suurvirtakaapelilla kuten XLPE:llä jännite sähköä johtavan putkilinjan molempiin päihin, jolloin esimerkkitapauksessa merivesi toimii maadoituksena ja putkilinja osana virtapiiriä. Sama voidaan toteuttaa myös maan pinnalla tehtäviin asennuksiin asentamalla maadoitus suoraan maan alle. Putkilinjan koko matkalle pitää asentaa kuluvia anodeita, jotka ovat tyypillisesti alumiinia. Konduktiivisen saattolämmityksen yksinkertaistettu rakennekuva on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Konduktiivisen saattolämmityksen rakennekuva. (Nysveen et al., 2005)

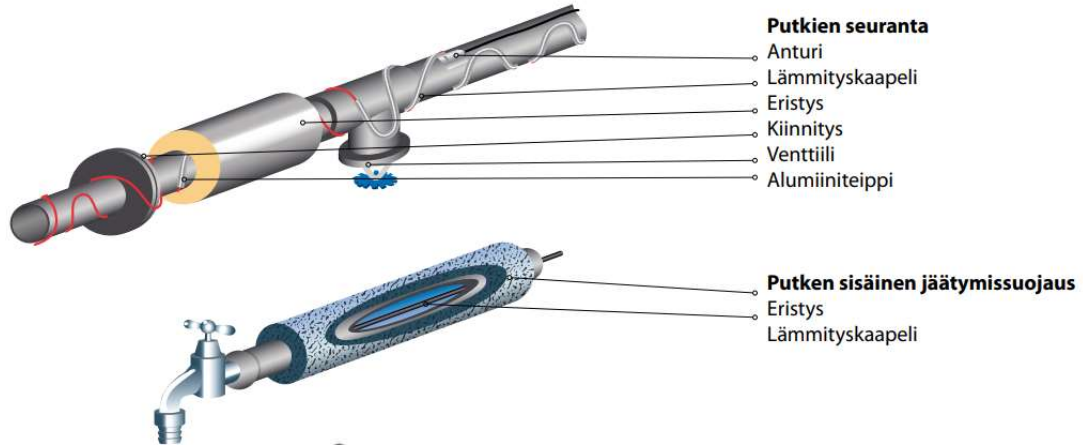
Induktiivinen lämmitys perustuu magneettikentän hyödyntämiseen, eikä näin ollen kosketa putkilinjaan tule. Induktiivisessa saattolämmityksessä sähköä johtavan putkilinjan ympärille rakennetaan kuparikäämi, johon johdetaan virtaa. Tästä muodostuu magneettikenttä putkilinjan ympärille, mikä aiheuttaa magneettiseen materiaaliin, esimerkiksi metalliseen putkeen pyörrevirtoja. Indusoidun magneettikentän vuoksi virtaava virta tuottaa lämpöä materiaalin sisältä päin. Induktio saattolämmityksen havainnekuva esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Induktiosaattolämmityksen havainnekuva. (ElProCus Technologies Pvt Ltd., 2022)

Tässä tutkimuksessa käsitellään epäsuoran sähkölämmitysjärjestelmän toimintaa. Epäsuoralla sähkölämmitysjärjestelmällä tarkoitetaan lämmitystä, missä lämpötila lämmitettävässä kappaleessa itsessään ei suoraan nouse, vaan lämpö johdetaan lämmitettävään kappaleeseen toisesta lämpöä tuottavasta komponentista. Havainnekuva esitetty kuvassa 3. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämmön siirtyminen tapahtuu aina korkeammasta

lämpötilasta matalampaan, jolloin lämmitettävän kappaleen lämpötila myös laskee. Tässä työssä lämpöä tuottava komponentti on itsesäätyvä vastuskaapeli.



Kuva 3. Epäsuoran saattolämmityksen asennustavat lämmityskaapelilla (Danfoss Oy, 2022)

Epäsuora sähkölämmitys saattolämmityskaapelilla on huomattavasti yleisempää talotekniikassa ja teollisuuden prosessilinjoissa kuin konduktiivinen tai induktiivinen saattolämmitys. Lämmityskaapeli voidaan asentaa putkistoissa sisäpuolelle vapaasti kulkevana tai putken ulkopuolelle kiinnitettynä teipillä tai johdinsiteellä, riippuen käyttötarkoituksesta.

1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä tutkimus on toteutettu toimeksiantona Caverion Industria Oy:lle erään asiakasprojektin yhteydessä. Tutkimuksen tarkoituksena on selkeyttää tulevien saattolämmitysprojektien toteutusta sekä selvittää saattolämmitysjärjestelmien mitoitusta koskevia haasteita ja mahdollisuuksia. Caverion Industria Oy toteuttaa tuotantoprosessien sulanapitoon ja prosessilämmityksiin liittyviä sähkösaatto- ja aluelämmitysjärjestelmiä ja putkieristyksiä vuosien kokemuksella. Palveluihin kuuluvat myös sähkösaattojen määräaikaistarkastukset ja huollot. (Caverion Industria Oy, 2022)

Tässä projektissa tarkasteltiin kolmea eri pituista putkilinjaa, joista jokaisen käyttötarkoitus oli hieman erilainen. Tehtävänä oli mitoittaa jokaiselle putkilinjalle mahdollisimman sopiva saattolämmitysjärjestelmä. Putkilinjassa A (DN100) siirrettiin kemiallista vettä, lämpötilassa 20 °C (myöhemmin kemiallisen veden linja), putkilinjassa B (DN350) siirrettiin raakavettä lämpötilassa 20 °C (myöhemmin raakavesilinja) ja putkilinjassa C (DN80) siirrettiin

lauhdevettä lämpötilassa 85 °C (myöhemmin lauhdevesilinja). Putkilinjat rakennettiin saman projektin yhteydessä ja ne asennettiin putkisillalle ulos. Logistisista haasteista johtuen putket jouduttiin rakentamaan maksimissaan 16 metrin salkoina pajalla ja niihin asennettiin maata-sossa myös saattolämmityskaapelit töiden nopeuttamiseksi. Putket kuljetettiin työkohteeseen, missä ne yhdistettiin toisiinsa ja saattolämmityskaapeleihin asennettiin kaapelijatkokset. Putkilinjojen kokonaispituudet olivat kemiallisella vedellä 79.3 metriä, raakavedellä 28.8 metriä ja lauhdevesilinjalla 76.8 metriä. Teoriassa neljä kaapelijatkosta kahdessa putkilinjassa ja yksi jatkos raakavesilinjassa riittäisivät, mutta koska putki ei ole vain suoraa putkea, todellinen kaapelijatkosten määrä oli yhteensä 22. Lämmitysten haluttiin kytkeytyvän automaattisesti päälle, mikäli putkilinjan lämpötila laskee +5 °C lämpötilaan. Kemiallisen veden ja lauhdevesilinjan eristys toteutettiin 80 mm vahvuisella ja raakavesilinjassa 100 mm vahvuisella kivivillaeristeellä, jonka päälle asennettiin 1 mm vahvuinen pellitys.

Tähän projektiin valittiin markkinoilla tunnettujen valmistajien Nvent Raychemin lämmitysjärjestelmän tuotteet sekä Planray Oy:n ohjausjärjestelmä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena on esittää saattolämmityspiirin toteutus lohkoissa rakennettavaan putkilinjaan sekä tehdä vertailu vanhemman ja uudemman teknologian lämmityskaapeleiden välillä. Lisäksi analysoidaan lämmityskaapelijatkoksien ja ohjelmoinnin vaikutusta lämpöhäviöihin ja lämmitysjärjestelmän hyötyyn teollisuuden putkilinjassa.

Tutkimuksen keskeisiä tutkintakysymyksiä ovat:

- 1. Millaisella menetelmällä voidaan toteuttaa toimiva saattolämmitysjärjestelmä, osissa rakennettavaan putkilinjaan ja mitä materiaaleja siihen vaaditaan?*
- 2. Mikä on lämpökaapelijatkoksien merkitys lämpöhäviöissä?*

3. Miten ohjelmoinnilla voidaan vaikuttaa saattolämmitysjärjestelmän hyötyyn?

Tutkimus tehdään asiakasprojektiin käytännönläheisesti, ja siihen sisältyy huomattava määrä empiiristä tutkimusta kohteessa. Diplomityön puitteissa ei ole tarkoitus kehittää uusia saattolämmitysmenetelmiä tai asennustekniikoita.

Tutkimus on rajattu käsittelemään ainoastaan diplomityössä esiintyvää saattolämmitysprojeکتia tai siihen olennaisesti liittyviä tietoja.

1.3 Tutkimuksen menetelmät ja aineisto

Tutkimuksessa esitetään laskentamenetelmät toimivan sähkösaattojärjestelmän rakentamiseksi sekä esitetään ja perustellaan eri järjestelmän eri komponenttien osat ja tarkoitukset. Tutkimuksessa verrataan myös laskentaohjelman ja yhtälöiden avulla laskettujen arvojen välillä. Muita käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat haut eri tietokantoihin ja yliopistojen julkaisualustoille, lisäksi tutkimukseen on koottu tietoa kirjallisuudesta. Empiriaosuudella käsitellään kohteesta saatua informaatiota koskien lämpöhäviöitä sekä säätö- ja ohjausmenetelmiä.

1.4 Tutkimuksen rakenne

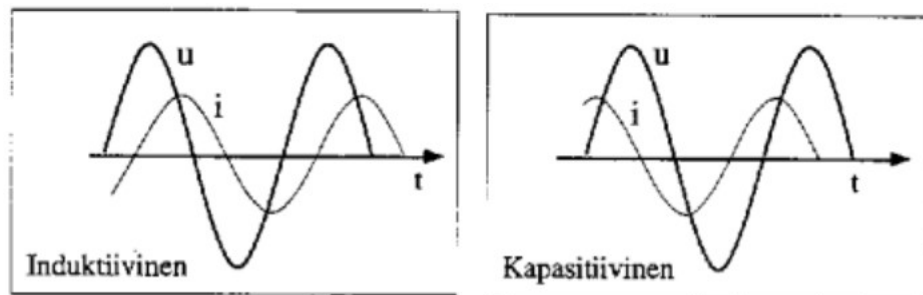
Tutkimus voidaan jakaa kahteen eri osakokonaisuuteen, joista ensimmäinen on laskennallinen osuus ja toinen on teoreettinen käytännön osuus. Tutkimuksen molemmat osuudet pohjautuvat todelliseen asiakasprojektiin ja diplomityön kaikki laskennalliset sekä käytännön esimerkit ovat otantoja projektista. Lopuksi käsitellään projektin aikana tulleita mietteitä, havaintoja ja oivalluksia.

2 Määritelmiä ja käsitteitä

Tekniikan sanastossa tulee tyypillisesti vastaan sanoja, joiden merkitys ei lukijalle tunnu selkeältä. Tässä kappaleessa esitetään tarkemmin työssä esiintyvien käsitteiden ja määritelmien merkitystä. Käsitteiden ja määritelmien mahdollinen muu tarkoitus ja sisältö tuodaan myös ilmi ja selvennetään, jolloin työn lukeminen on mielekkäämpää ja asioiden sisäistäminen helpompaa.

Asennustapa on sähkölaskennassa käytetty määritelmä asennuksen eri tyypeille. Asennustapoja on yhteensä neljä, A, C, D ja E. Asennustapa A tarkoittaa voimansiirtokaapeloinnin uppoasennusta rakenteiden sisälle esimerkiksi putkittamalla. Asennustapa C tarkoittaa voimakaapeloinnin pinta-asennusta esimerkiksi tikashyllylle. Asennustapa D tarkoittaa asennusta maan alle esimerkiksi kouruun ja asennustapa E tarkoittaa vapaasti ilmaan tehtävää asennusta esimerkiksi pylväiden väliin.

Kapasitiivinen vuotovirta tarkoittaa kapasitiivisen kuorman hajakapasitanssien aiheuttamaa loisvirtaa. Puhuttaessa kapasitiivisesta tai induktiivisesta kuormasta tarkoitetaan vaihtovirtapiirissä kuorman luonnetta. Kapasitiivisen kuorman kapasitanssi latautuu ja purkautuu määrääjain sinimuotoisen vaihtovirran avulla. Sinimuotoisin suurein toimittaessa puhtaasti kapasitiivisella kuormituksella virta on 90 sähköastetta jännitettä edellä. Kapasitanssin sisällä olevalla materiaalilla on aina jokin äärellinen sähköjohtavuus. Tämä aiheuttaa vuotovirran kapasitanssin napojen väliin, joten kapasitanssi purkautuu ajan kuluessa itseksensä. Kuva 4 havainnollistaa erilaisten kuormien käyttäytymistä.



Kuva 4. Puhtaasti induktiivisen ja kapasitiivisen kuormituksen vaihesiirtoero vaihtovirtapiirissä. (Nieminen, 2022)

Konvektiivinen lämmönsiirto tarkoittaa lämmön siirtymistä virtaavan aineen mukana. Kuuma aine nousee putkistossa tai huonetilassa nosteen avulla ja kylmempi, tiheämpi aine laskeutuu pohjalle.

Lämmitysjärjestelmän hyötysuhde tarkoittaa lämmitysjärjestelmään käytetyn lämpöenergian ja lämpöhäviöiden välistä suhdetta.

Lämmitysjärjestelmän lämpöhäviö koostuu kahdesta osasta. Lämpöhäviöistä, joita voidaan hyödyntää lämmitettävässä kohteessa, esimerkiksi putkilinjassa tai huonetilassa ja lämpöhäviöistä, jotka haihtuvat suoraan häviöinä esimerkiksi ulkoilmaan hyödyttöminä.

Pakotetussa konvektiossa putkien sisällä oleva aine nimensä mukaisesti pakotetaan liikkeeseen esimerkiksi pumpun avulla täysin tiiviissä ympäristössä, jolloin kuuma aine liikkuu virtauksen mukana.

Sähkölämmitysjärjestelmä pystytään jakamaan neljään eri osa-alueeseen. Saattolämmitykseen, räystäslämmitykseen, sulanapitolämmitykseen ja katto- tai lattialämmitykseen. Saattolämmitystä käytetään tyypillisesti putkien tai viemäreiden ylläpitolämmitykseen tai jäätymissuojaukseen. Räystäslämmitystä käytetään pääosin vain räystäskourujen ja syöksytortvien jäätymissuojaukseen. Sulanapitolämmitystä käytetään tyypillisesti ulkorappusten tai ajoluiskien jäätymissuojaukseen ja kuivanapitoon. Kattolämmitystä käytetään pääosin huonetilan lämmitykseen tai katolle jäävän lumen sulattamiseen ja lattialämmitystä hyödynnetään tyypillisesti mukavuuslämmityksenä tai esimerkiksi pesuhuoneen lattian kuivanapitoon. Kattolämmitys voidaan asentaa rakennuksen sisäkattoon tai ulkokattoon.

Vikavirtasuojakytkimet jaetaan neljään eri kategoriaan. A-tyypin vikavirtasuojat toimii vaihtovirralla ja pulssimaisella tasavirralla. B-tyypin vikavirtasuojat toimii vaihtovirralla, pulssimaisella tasavirralla ja puhtaalla tasavirralla. AC-tyypin vikavirtasuojakytkin toimii ainoastaan vaihtovirralla. Neljäs vikavirtasuojakytkintyyppi on F-tyypin vikavirtasuojat, jota käytetään tyypillisesti suojaamaan taajuusmuuttajilla syötettyjä piirejä. Yleisesti Suomessa käytössä oleva standardisarja SFS 6000 edellyttää A- tai B-tyyppisten vikavirtasuojien käyttöä.

3 Sähkösaattojärjestelmän sisältö

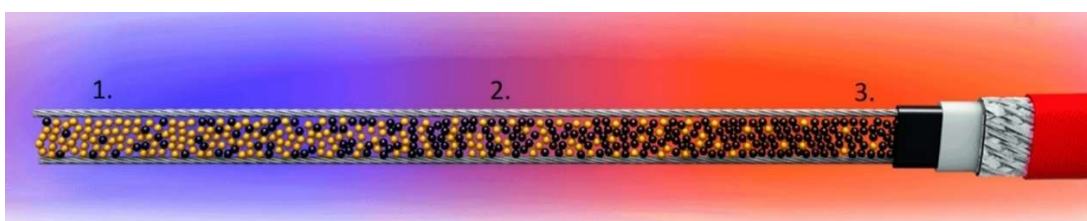
Toimiakseen oikein saattolämmitysjärjestelmä vaatii kaapeleiden lisäksi paljon muitakin komponentteja. Tässä kappaleessa tehdään projektiin liittyviin komponentteihin läpilyönti perusteluineen, esitetään komponenttien teknisiä ominaisuuksia ja toimintaperiaatteita sekä esitetään oikeanlaiset asennustavat. Lopuksi esitetään vaaditut dokumentit ja tarkastukset projektin luovutuskuntoon saattamiseksi sekä esitetään vertailu vaihtoehtoiseen kaapelityyppiin.

3.1 Sähkösaattokaapelointi

Sähkösaattokaapelointi voidaan suorittaa teollisuudessakin usealla erilaisella kaapelilla. Vaihtoehtoina on termostaattiohjattavaa tai itsesäätyvää, kova- tai pehmeälankaista kaapelityyppiä, tarjolla on todella paljon eristevaihtoehtoja erilaisia kemikaaleja ja olosuhteita kestäväksi todella laajalla akselilla eri putkipituuksille sopivia kaapeleita sekä huomattava määrä valmistajia tunnetuista brändeistä, vasta markkinoille päässeisiin uusiin tulokkaisiin. Tässä luvussa tarkastellaan, mitkä kaapelityypit ja komponentit projektiin valittiin, perustellaan valinnat ja kerrotaan myös tuotteiden ominaisuuksista tarkemmin.

Saattolämmityskaapelointi asennetaan putkeen teipin tai johdinsiteen avulla. Tässä projektissa putkilinjat ovat ruostumatonta teräsputkea ja alalämpörajaksi asetetaan +5 °C ja siksi asennukseen on valittava Nvent Raychemin tuotteista GS-54 lasikuituteippi tai johdinside. Saattolämmitettävien putkien ison halkaisijan takia valittiin kiinnitystavaksi GS-54 lasikuituteippi.

Kuva 5. esittää itsesäätyvän saattolämmityskaapelin toimintaperiaatetta.



Kuva 5. Itsesäätyvän kaapelin toimintaperiaate. Vyöhykkeet 1, 2 ja 3 ovat eri lämpötiloissa. (Nvent Raychem, 2022)

Kuvassa on numeroitu eri lämpötilavaiheet havainnoinnin helpottamiseksi. Kohdassa 1. esitetään kaapelin käyttäytymistä kylmässä ympäristössä. Tässä tilanteessa kaapelin polymeerisydän supistuu ja lämpöteho kasvaa, jolloin tämä muodostaa useita sähköreittejä rakenteeseen integroitujen mustilla palloilla merkittyjen hiilihiukkasten läpi. Kohdassa 2. on esitetty tilanne lämpimässä ympäristössä, jolloin kaapeli käyttää kuitenkin hieman tehoa. Kaapelin polymeerisydän on tässä tilanteessa hieman laajentunut, mutta sähköreittejä on vielä jäljellä. Kohdassa 3. kuvataan tilannetta kuumassa ympäristössä. Tässä tilanteessa kaapeli on saavuttanut korkean lämpötilan, eikä kaapeli käytä enää oikeastaan lainkaan tehoa. Kaapelin polymeerisydän on laajentunut maksimikokoonsa ja suurin osa sähköreiteistä on katkennut. (Nvent Raychem, 2022)

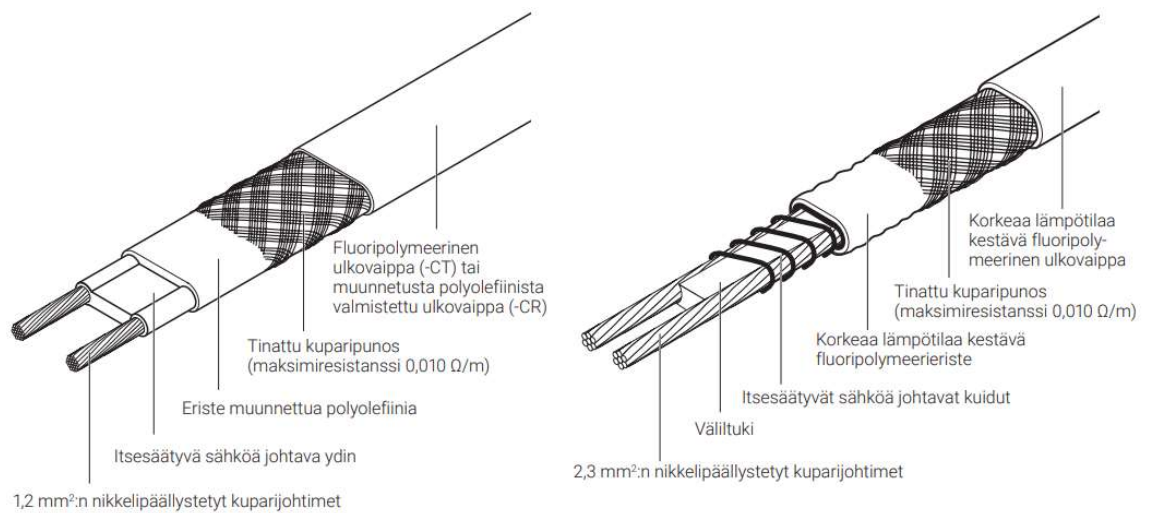
3.1.1 Kaapelityypit

Kaapelityypin (esim. 5BTV2-CT) ensimmäinen numero kuvaa teholuokkaa (esim. 5 vastaa 16 W/m). Seuraava kolmen kirjaimen kirjainyhdistelmä BTV tai XTV kuvaa tuoteperheen nimeä. Kaapelityypin kirjainyhdistelmän jälkeinen numero (2) kertoo kaapelin johdinmäärän ja viimeiset kaksi kirjainta (esim. CT) ilmoittavat kaapelin ulkovaipan materiaalin Nvent Raychemin itsesäätävissä kaapeleissa on käytössä CT ja CR ulkovaippaisia kaapeleita. CT ulkovaippaiset kaapelit ovat fluoripolymeerisiä. Fluoripolymeerinen ulkovaippa antaa hyvän kemikaalisuojan aggressiivisia orgaanisia aineita ja syövyttäviä aineita vastaan. CR-ulkovaippaiset kaapelit valmistetaan muunnetusta polyolefiinista, jota käytetään suojaamaan miedoilta epäorgaanisilta aineita. Viimeinen kirjaimen ja numeron yhdistelmä kertoo kaapelin ATEX lämpötilaluokituksen eikä sitä esitetä nimessä, mikäli sama ATEX lämpötilaluokitus koskee koko tuoteperhettä. Nvent Raychem käyttää nimellisen lähtötehon määrittämiseen 10 °C lämpötilaa, syöttöjännitteellä 230V AC, kun kaapeli on asennettuna eristettyyn teräsputkeen putkipinnalle.

A. 5BTV2-CT ja 10BTV2-CT

BTV-Tuoteperheen kaapeleita valmistetaan neljässä teholuokassa, 3, 5, 8 ja 10. Numerot eivät viittaa suoraan kaapelin tehoon metriä kohti. Kaapelit ovat itsesäätäviä.

Tämän tuoteperheen kaapeleille jatkuva altistuslämpötila on maksimissaan 65 °C ja kaikki tuoteperheen kaapelit ovat lämpötilaluokaltaan T6 hyväksytyjä räjähdysvaarallisiin tiloihin. BTV-saattokaapelit ovat teollisuudessa eniten käytettyjä. Tuoteperheen ominaisuudet täyttävät useimmat perinteiset teollisuuden vaatimukset, eikä niissä ole mitään erikoisominaisuuksia, jolloin hinta pysyy kohtuullisena. 5BTV2-CT kaapelin nimelliseksi lähtötehoksi valmistaja on antanut 16 W/m ja 10BTV2-CT kaapelille 29 W/m. (Nvent Raychem, 2022). Kuva 6. vertailee kahta erityyppistä saattolämmityskaapelia.



Kuva 6. Lämpökaapelin rakenne. Vasemmalla BTV- ja oikealla XTV-kaapeli. (Nvent Raychem, 2022)

B. 4XTV2-CT-T3

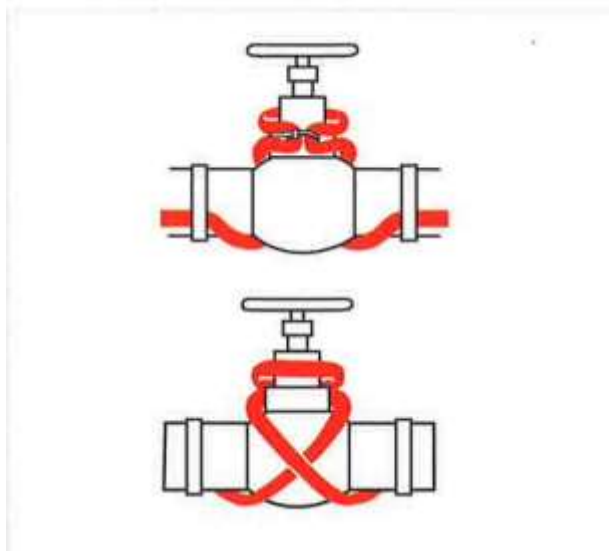
XTV-tuoteperheen kaapelit on tarkoitettu putkien ja säiliöiden prosessilämpötilan ylläpitämiseen ja kohteisiin, joissa edellytetään jatkuvaa altistumista korkealle lämpötilalle. XTV-kaapelit ovat myös itsesäätyviä ja niitä valmistetaan viidessä teholuokassa 4, 8, 12, 15 ja 20. XTV-tuoteperheen kaapelit kestävät altistumisen jatkuvalla 121 °C lämpötilalle. CR-ulkovaippa ei sovellu korkeisiin lämpötiloihin eikä XTV-kaapeleita siksi valmisteta muilla kuin CT-ulkovaipalla. 4XTV2-CT-T3 kaapelityypille valmistaja lupaa 12W/m nimellisen lähtötehon (Nvent Raychem, 2022)

3.2 Asennusmateriaalit ja niiden vaikutukset

Asennusmateriaalien valinta on olennaisessa osassa järjestelmän kokonaisuuden suunnittelussa. Valinnassa on kiinnitettävä huomioitava kohteen kaikkiin olosuhteisiin. Jos lämmitysreitti kulkee esimerkiksi ulkoa läpiviennin kautta rakennuksen sisälle, on otettava huomioon sekä ulkona kohdistuvat tuuli-, lämpötila- ja huollettavuuselementit. Sisätiloissa saataan käsitellä esimerkiksi liuottimia, jolloin koko lämmityspiirin osalta tulee ottaa huomioon myös sisäpuolella kohdattavat olosuhteet tai tehdä erilliset lämmityspiirit molempiin olosuhteisiin. Asennuksien käytännöllisyyteen ja toimivuuteen vaikuttavat taas eri asennusmateriaalien ominaisuudet, esimerkiksi anturin väärä sijoittelu saattaa aiheuttaa koko lämmityspiirin virheellisen toiminnan tai vääränlainen kaapelin asennustapa saattaa johtaa riittämättömään lämmitystehoon putkilinjan eri vaiheissa.

3.2.1 Saattolämmityskaapeleiden sijoittamistapa

Kaapeleiden asennustavalla on suuri merkitys kohteiden lämmityksessä. Kuva 7. esittää saattolämmityskaapelin sijoittamistapaa putkilinjalla olevan venttiilin kohdalla.

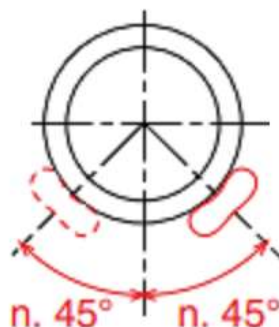


Kuva 7. Saattolämmityskaapelin asennus venttiilin kohdalla. (Pentair thermal building solutions, 2014-2016)

Kaapelia on varattava mitoitusvaiheessa putkilinjan pituutta enemmän. Koska putkeen asennettavien kannakkeiden, venttiilien, toimilaitteiden, laippojen, yhteiden ja muiden liitosten

lämpötilan säilyvyys on varmistettava kaikissa yli 2” (DN50) halkaisijan putkissa Kuva 7. mukaisella asennustavalla. Lämpöhäviö on näissä kohdissa suurempi ja mikäli lämmityskaapeli on asennettu väärin, ei lämmitysteho riitä kompensoimaan lämpöhäviötä liitoskohdissa.

Kuva 8. esittää saattolämmityskaapelin sijoittamista putkeen.



Kuva 8. Lämmityskaapelin asennus vaakasuorassa oleville putkille.

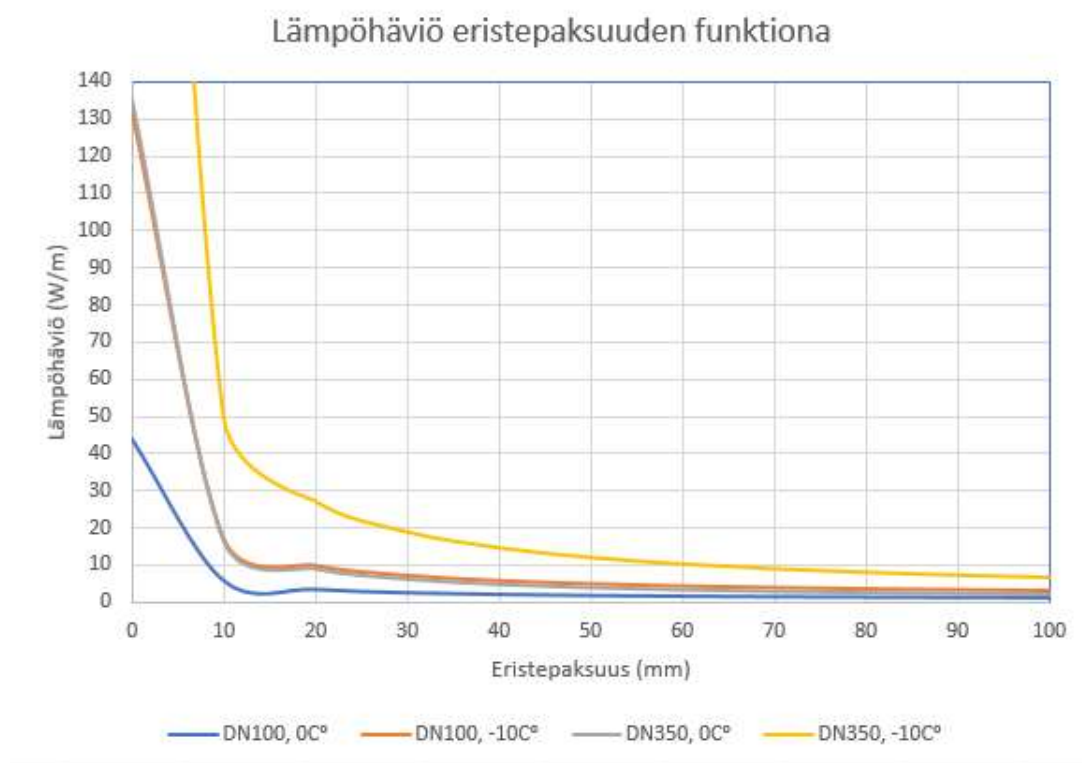
Lämmityskaapeli asennetaan vaakasuorassa olevan putken alapuolelle noin 45° kulman linjassa keskikohdasta, kuvassa esitettynä kiinteällä viivalla. Jos putkeen asennetaan toinen lämmityskaapeli, sen oikea sijoitus putkessa on katkoviivoilla osoitetussa kohdassa, jolloin kaapelit ovat putken keskikohdasta noin 90° kulmassa toisistaan. Sijoitus perustuu lämpimän nesteen nousemiseen ylöspäin, jolloin lämpö jakaantuu koko putkilinjan nesteeseen mahdollisimman tasaisesti.

3.2.2 Eristysvahvuus ja eristysmateriaalit

Yksi olennaisimpia lämpöhäviöihin vaikuttavia asioita on eristys ja sen vahvuus. Liian ohut eristekerros kasvattaa lämpöhäviötä nopeasti, kun taas eristekerroksen kasvattaminen on kannattavaa ja useimmiten myös mahdollista vain tiettyyn pisteeseen asti. Vieressä olevien muiden putkilinjojen takia myös tässä projektissa eristevahvuus jouduttiin valitsemaan mahdollisimman hyvän hyötysuhteen perusteella VKE-100 ja VLA-80 linjoille 80 mm ja VRA-350 linjalle 100 mm vahvuiseksi. Eristevahvuuden laskemiseksi löytyy useiden eri valmistajien laskureita.

Lämmitys- ja käyttövesiputkistojen eristysmateriaalina käytetään tyypillisesti valmiita kivi- villasta valmistettuja ja alumiinilaminaatilla päällystettyjä eristekouruja. Kourut ovat eri

mittaisia ja ne taipuvat putken mutkien mukaisesti, jolloin säästytään ylimääräiseltä leikkaamiselta ja asentaminen on vaivatonta. Eristekourut ovat varustettu teippisulkijalla ja liepeellä, jolloin vesi ei pääse kulkeutumaan jatkoskohdista. Kuva 9. esittää putken lämpöhäviötä eristepaksuuden funktiona.



Kuva 9. Eristysvahvuuden vaikutus lämpöhäviöihin, kahdella eri putkikoolla ja ilman lämpötilalla. Neste 20 °C vesi, eristemateriaali kivivilla.

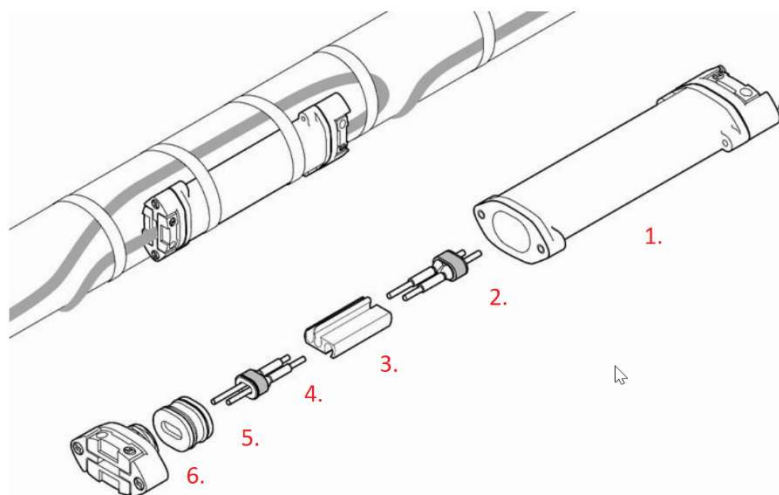
Tarkat laskennalliset lämpöhäviöarvot eri eristepaksuuksilla esitetty liitteessä 1.

3.2.3 Kaapelijatkokset

Lämpökaapelijatkoksia käytetään tyypillisesti kahteen tarkoitukseen. Tilanteessa, jossa lämpökaapeli on vaurioitunut ja siinä on riittävästi pituutta, jotta virtapiiri voidaan korjata jatkoksen avulla tai tilanteessa, jossa lämpökaapeli on mitoitettu väärin eikä se ole riittävän pitkä koko halutun matkan lämmittämiseen. Projektin tapauksessa virtapiiri rakennettiin putkilinjan pituuden vuoksi hyvin epätyypilliseen tapaan rakentamalla lämmityskaapelointi useasta eri osasta. Koska kohteesta tästä ei ollut visuaalista haittaa ja toimintatapa oli esitetty

loppuasiakkaalle, toteutus pystyttiin rakentamaan näin. Tässä tiedostettiin myös vikaantumiskohteiden lisääntyminen jatkoksien lisääntymisen myötä.

Koska saattolämmitys toteutettiin useasta eri moduulista, oli kaapelijatkoksilla olennainen osa. Projektiin valittiin käytettäväksi Nvent Raychemin S-150 kaapelijatkos, joka soveltuu jokaiselle tuoteperheelle. (Kuva 10). S-150 jatkos on tarkoitettu asennettavaksi eristeen alle. S-150 kaapelijatkoksessa ei tarvita lämpökäsittelyä, mikä helpotti ja nopeutti asennusta korkealla putkisillalla. Lisäksi se on uudelleen asennettavissa, joka on huolto- ja kunnossapitotöitä ajatellen tärkeä ominaisuus.



Kuva 10. S-150 Lämpökaapelijatkoksen räjäytyskuva. (Nvent Raychem, 2022).

S-150 Jatkos koostuu kuudesta osasta. Yllä olevassa kuvassa ne on numeroitu selittämisen helpottamiseksi. Numero 1. on päällyssuoja, jonka sisälle lämpöjatkos tehdään. päällyssuojan tarkoitus on suojata jatkosta saamasta suorista mekaanisia iskuja. Päällyssuojan materiaalina käytetään polykarbonaattia, sen hyvän iskun- ja lämmönkestävyyden takia. Polykarbonaatti ei kuitenkaan kestä liuotinkosketusta. Osat numero 2. ja 4. ovat johtimien suojukset, joiden tarkoitus on estää kuorittujen johtimien kontakti toisiinsa kompaktin jatkoksen sisällä. johtimien suojukset ovat samaa polyvinyylidikloridi-muovia mitä käytetään myös kutistejatkoksissa. Osa numero 3. on kaksipaikkainen liitospala, joka muistuttaa ulkoisesti kytkentärimaliitintä. Osa 5. on tiivistekumi, jonka tarkoitus on tiivistää liitoksen pää mahdollisimman tiukasti päällyssuojan sisälle kiristettäessä. Samanlainen tiivistekumi on myös päällyssuojan sisällä. Numero 6. on vedonpoisto kiinteällä jousella, jollainen on myös kiinteästi numeron 1. kappaleessa. Vedonpoiston tarkoitus on pitää jatkos paikallaan, mikäli syystä tai toisesta kaapeliin kohdistuu vetävää voimaa. Vedonpoistopalojen materiaalina käytetään myös

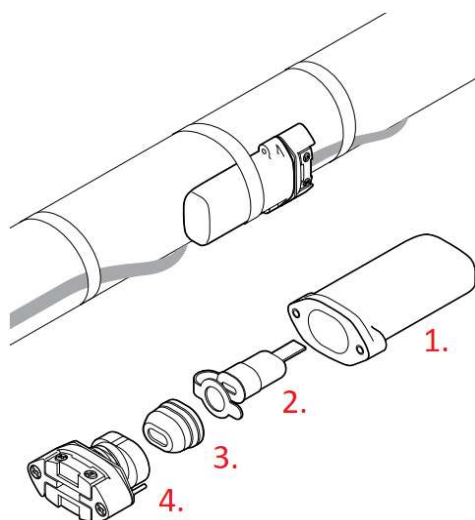
polykarbonaattia. Valmiiksi rakennettu S-150 Jatkos asennetaan lämmönkestävällä teipillä kiinni haluttuun putkilinjaan ja päälle asennetaan eristys. Hyvin rakennetusta jatkoksesta ei aiheudu ylimääräistä lämpöhäviötä. S-150 nimi tulee sanasta Splice (suom. liitos) ja 150 viittaa tuoteperheeseen. Valmistajan antama maksimivirta tuotteelle on 40 A, lämmityspiirien operatiivinen virta projektissa oli siis riittävällä tasolla.

Eristepellin pintaan tulee asentaa lämmityskaapelista kertovat varoitustarrat vähintään 5 metrin välein sekä lisäksi lämmityskaapelien jatkoskohtaan erikseen jatkoksesta kertovat varoitustarrat. Varoitustarrojen asennuksessa kannattaa ottaa huomioon huollettavat venttiilit ja liitokset lisäämällä näiden läheisyyteen myös varoitustarrat.

3.2.4 Loppupäätteet

Eri lämmityskaapeleilla loppupäätteellä on eri tehtävä. Loppupäätteen tarkoitus itsesäätyvän kaapelin virtapiirissä on toimia tulppana ja estää kosteuden tai pölyn kulkeutumista kaapelin sisälle. Itsesäätyvää kaapelia ohjataan säätimelle asetetun tiedon mukaan. Kun taas vastuslankakaapeleissa ennen loppupäätettä lämmityskaapelin sisällä kulkee vain kaksi erillistä vastuslankaa ja vasta vastuslankojen yhdistyessä kaapelin päässä, vastuslankakaapeli voi lämmitä. Päätevastus on ainoa kohta virtapiirissä, jossa vastuslangat koskettavat toisiaan.

Kuten jatkoksissa, myös loppupäätteet toteutettiin 150 tuoteperheen tuotteilla (Kuva 11). loppupäätteen E-150, kirjain E tulee sanasta end seal (suom. päätytiiviste). Koska kyseessä on saman tuoteperheen loppupäätte, se on hyvin samankaltainen rakenteeltaan kuin lämpökaapelijatkos. Tuotteen virrankestoisuus ja osien materiaalit ovat täysin samat, molemmissa tuotteissa operatiivinen lämmönkesto on 150 °C, joten käytännössä ainoaksi eroksi jää tuotteiden välinen kokoero ja jatkoksessa oleva liitin.



Kuva 11. E-150 Lämpökaapelipäätte räjäytyskuva. (Nvent Raychem, 2022).

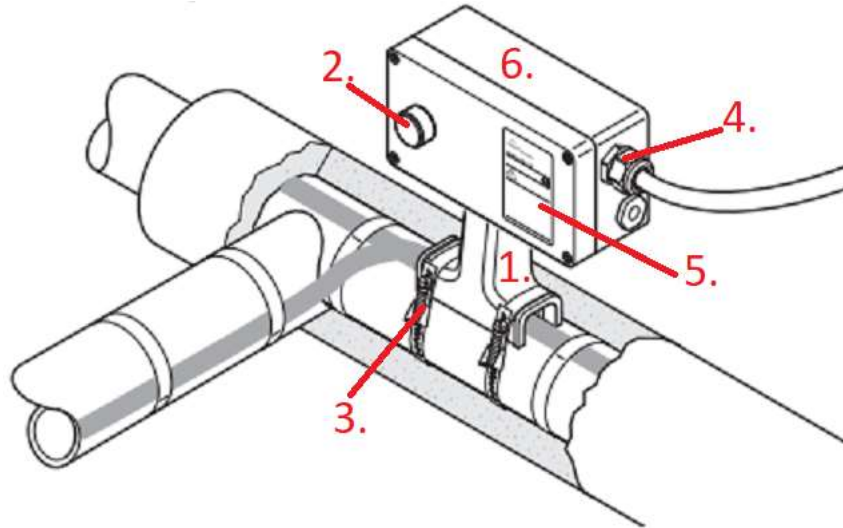
Tässäkin numero 1. on polykarbonaatista valmistettu päällyssuoja, 2. on valmis päätetiiviste, johon päätetään johtimet. 3. on samanlainen tiivistekumi kuten lämpökaapelijatkoksessa ja osa 4. on myös vedonpoisto kiinteällä jousella.

3.2.5 KytKentärasiat

KytKentärasioiden tarkoitus on siirtää virta sähkökaapelista lämmityskaapeliin, eli toiminta-periaate on samanlainen kuin jakorasialla, sillä erotuksella että kytKentärasiasissa on valmiit riviliittimet. Projektin tapauksessa kytKentärasioilla oli myös tehtävä näyttää merkkivalolla lämmityksen toiminnan tila.

Koska projektissa oli jokaiselle putkilinjalle kaksi lämmityskaapelia ja säätimien sijainti putkilinjan keskivaiheilla, oli järkevintä valita usean tulon mahdollistava liitÄntÄrasia. Lisäksi päädyttiin valitsemaan valoindikaattorilla oleva liitÄntÄrasia putkisillan korkeuden takia. ValopÄätteelliset kytKentärasiat sopivat korkeisiin kohteisiin erinomaisesti, jolloin maatasolta on mahdollista tarkistaa lämmityksen käyttötila. Valittu liitÄntÄrasia oli tässä tapauksessa Nvent Raychemin JBM-100-L-EP (Kuva 12), joka mahdollisti maksimissaan kolmen lämmityskaapelin kytkemisen syöttökaapelin lisäksi. Nimen JBM- tulee sanoista junction box multiple-entry (suom. liitinrasia, monituloinen) ja kertoo useammasta liitÄntÄpaikasta, 100 viittaa tuoteperheeseen, L kertoo valopÄätteestä ja tulee sanasta light (suom. valo) ja EP tulee

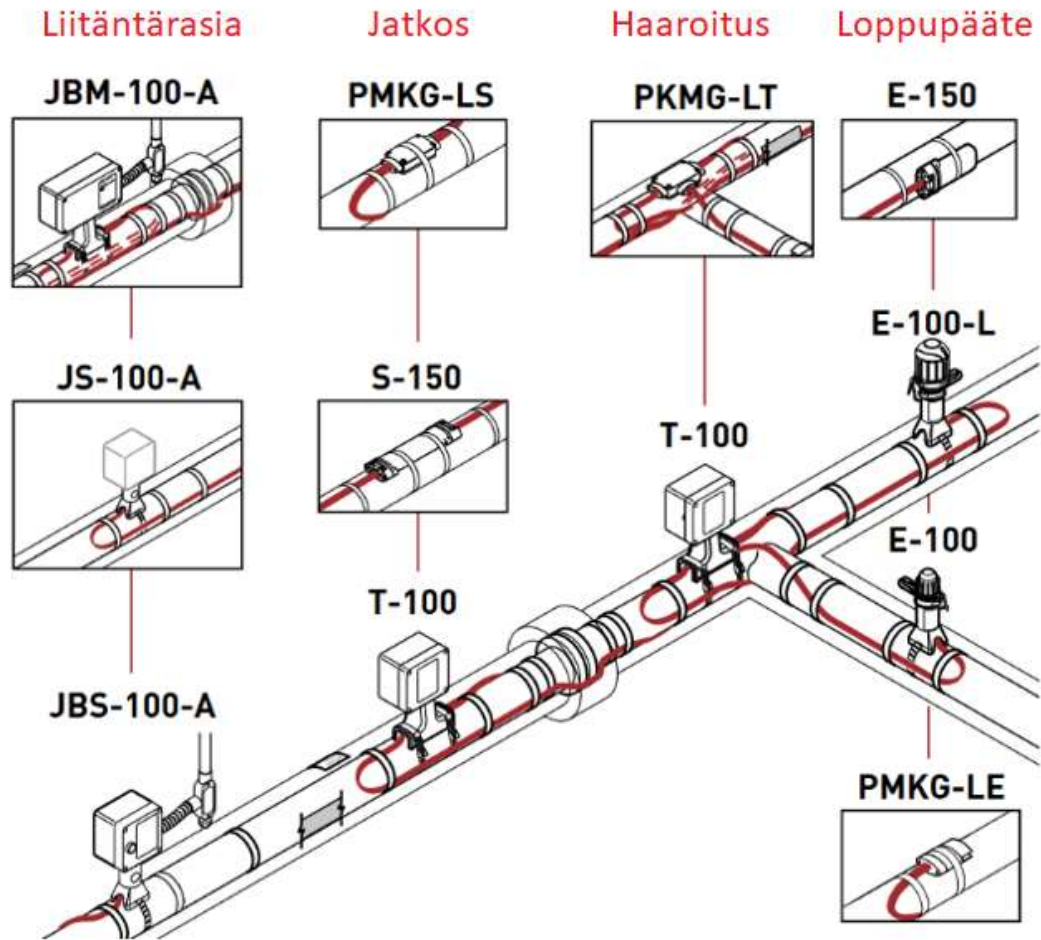
sanoista earth plate (suom. maadoituslevy) ja kertoo kytkentärasiasissa olevasta maadoituslevystä.



Kuva 12. JBM-100-L-EP liitäntärasia. (Nvent Raychem, 2022).

Kuvassa 8. on esitetty JBM-100-L-EP liitäntärasian ulkoiset komponentit. 1. Liitäntärasian varsi, jonka läpi kaapeloidaan lämmityskaapelit liitäntärasiaan, varren tarkoitus on korottaa liitäntärasia eristeiden yläpuolelle 2. Liitäntärasian vihreä merkkivalo, joka indikoi lämmityspiirin käyttötilaa (ON/EI). 3. Liitäntärasian metalliset kiinnitysvanteet, kiinnitysvanteet kiristävät liitäntärasian varren tiukasti lämmitettävään putkeen. 4. Syöttökaapelin läpivientiholkki, liitäntärasiasissa on kaksi M25 kokoista läpivientipaikkaa syöttökaapeleita varten. Holkkitiivisteiden tarkoitus on toimia vedonpoistona syöttökaapelille. 5. Liitäntärasian tyyppikilpi, tyyppikilvessä lukee liitäntärasian tekniset tiedot. 6. Liitäntärasia, jonka sisälle jäävät liittimet kytkentöjä varten sekä maadoituslevy. Liitäntärasia sekä varsi ovat IP66 luokiteltuja ja lasikuitutäytteisestä polymeeristä valmistettuja.

Kuvassa 13. on esitetty saattolämmityspiirin yksinkertaistettu rakenne normaaliolosuhteissa.

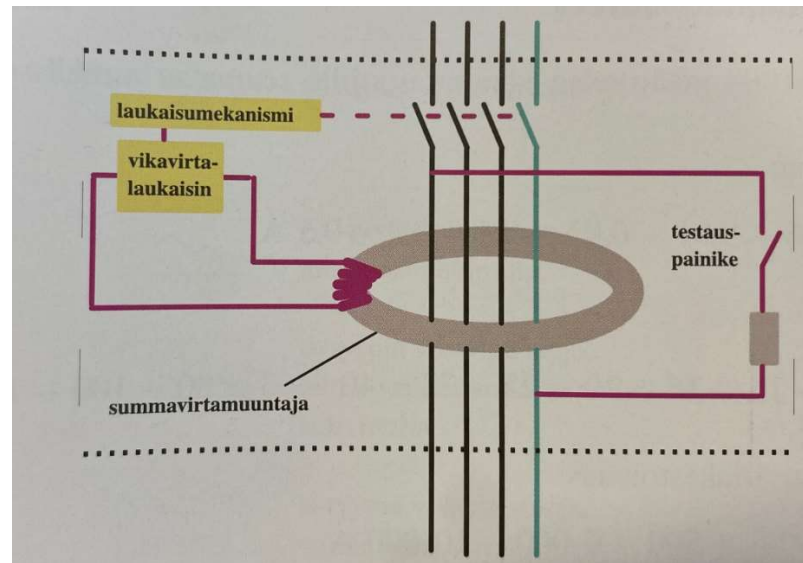


Kuva 13. Saattolämmityspiirin rakenne. (Nvent Raychem, 2016 s. 22).

Jokaiseen rakenteen osaan löytyy huomattava määrä muitakin komponenttivaihtoehtoja, joita kuvassa ei esitetä.

3.2.6 Suojalaitteet

Vikavirtasuojalla tarkoitetaan automaattisesti toimivaa suojalaitetta, jonka toiminta perustuu meno- ja paluujohtimen virtaeron havaitsemiseen. Kuva 14. esittää monivaiheisen vikavirtasuojakytkimen toimintaperiaatetta. Summavirtamuuntaja mittaa vaihe- ja nollajohtimien välisen virtapiirin harhavirtojen summaa. Mikäli summavirta ylittää raja-arvon, vikavirtasuoja avaa virtapiirin. Vikavirtasuojia käytetään perussuojauksen lisäsuojauksena. Suomessa lämmityskaapeleihin liittyvät piirit on aina suojattava 30 mA A- tai B-tyypin vikavirtasuojakytkimellä. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017).



Kuva 14. Vikavirtasuojakytkimen rakenne. (Sähkö- ja Teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)

3.2.7 Antureiden asennustapa, sijoittaminen ja mittausajankohdan vaikutus

Yleisesti putkien saattolämmityksissä käytetään PT-100 tarkkuusluokan lämpötila-antureita (Kuva 15), jotka ovat taipuisia. Näitä on saatavilla useilta eri valmistajilta. Putkien saattolämmityksissä anturit sijoitetaan ja kiinnitetään putkien ulkopintaan eristyksen alle, siten ettei lämmityskaapeli ole suorassa kosketuksessa anturin kanssa. Antureiden mittauselementin halkaisija on tyypillisesti 3 mm tai 6 mm ja pituus yhden metrin tai kaksi metriä. Antureita on saatavilla myös luokiteltuna räjähdysvaarallisiin tiloihin.



Kuva 15. Lämpötila-anturin asennustapa putkeen. (Lapp automaatio Oy, 2022)

Tässä projektissa käytettiin jokaisessa putkilinjassa erillistä PT-100 TD 200 teflonpinnoitettuja antureita, joiden pituus oli kolme metriä. Nimen PT-100 kertoo että, lämpötila-anturi toimii vastusmenetelmällä. Tämä tarkoittaa sitä, että anturissa on platinavastus, jonka resistanssin suuruus on 100 ohmia, kun lämpötila on 0 °C. Resistanssi muuttuu lämpötilan funktiona $0.39 \Omega / 1 \text{ } ^\circ\text{C}$. TD tulee englannin kielen sanoista Temperature detector (suom. lämpötilahavaintin) ja ilmaisee anturin mittaustapaa, eli lämpötilan havainnointia. Mittaus koostuu kahdesta eri johtimesta, jotka ovat toisiinsa yhteydessä. Jos lämpötila eroaa mittauspisteen ja vertailupisteen välillä, tuottaa se jännitteen, jonka avulla säädin saa tiedon lämpötilan muutoksesta. Anturi tekee jatkuvaa mittausta. Lämpötila-antureissa käytetään materiaalina useimmiten platinaa, koska se on erittäin stabiili metalli. (Lapp Automaatio Oy, 2016)

Tyypillisesti anturin asennussijainti on keskellä putken yläpuolella, putkilinjan kylmimmässä kohdassa, jolloin lämmityskaapeleista ei aiheudu säteilylämmöstä johtuvaa vääristymää mittaustulokseen. Lämpötila-anturi tulee pyrkiä sijoittamaan putkilinjassa kohtaan, johon kohdistuu mahdollisimman vähän suoraa auringonpaistetta, jolloin myös vältetään lämmönsäteilyn tuomalta vääristymältä mittaustuloksessa.

Putkilinjan reitti tässä projektissa oli pääosin työtasottomalla putkisillalla ja rakennuksen ulkoseinustalla noin kahdeksan metrin korkeudessa, jolloin lämpötilasäätimien anturit oli paras sijoittaa putkilinjan keskivaiheille. Lämpötilasäätimet asennettiin rakennuksen sisäseinälle ja antureita varten tehtiin seinään läpivienti ja lämpötila-antureiden asennus tehtiin heti rakennuksen seinustan ulkopuolelle varjoon. Lämpötila-anturi pyritään asentamaan paikkaan, jossa siihen kohdistuu mahdollisimman vähän olosuhteiden vaikutuksesta vääristymää, esimerkiksi auringosta tai rakennuksesta johtuvaa lämpösäteilyä.

3.3 Sähkösaattojärjestelmän toiminnan ohjaus ja säätö

Tässä projektissa ohjauksen toteutukseen käytettiin Planrayn BlueTrace tuoteperheen BT-300-1P säädintä. Bluetrace tuoteperheen säätimet ovat erityisesti valmistettu sähkölämmityksiä varten ja niiden tyypillisimmät lämmityskohteet ovatkin laattojen-, luiskien ja kuljettimien lämmityksissä, säiliöiden lämmityksissä, katto- ja vesikourujen lämmityksissä sekä putkilinjojen saattolämmityksissä eri materiaaleilla. Bluetrace säätimet sopivat sulanapito- lämmityksiin, prosessilämpötilan ylläpitolämmitykseen ja ulkoilmaan perustuvaan ylläpitolämmitykseen. Bluetrace tuoteperheen lämmityssäätimiä saa 1- ja 3- vaiheisina.

päävirtapiirin virran ollessa alle 50 ampeeria. Tuoteperheen säätimiä on kahdessa eri kokoluokassa, 300-sarja on perinteinen malli ja 400-sarja on 100 mm pidempi kotelomalli, jota käytetään usein räjähdysvaarallisissa tiloissa, jolloin lisätilalle on enemmän tarvetta esimerkiksi turvakontaktorin varten. Planray:llä olisi ollut myös keskukseen asennettava säädinmalli MidiTrace, mutta tässä kohteessa kentälle asennettava malli soveltui paremmin keskuksen etäisen sijainnin takia.

3.3.1 BT-300-1P Sähkölämmityssäädin

Valittu säädin on siis BlueTrace tuoteperheen, 300-sarjaa oleva 1-vaiheinen sähkölämmityssäädin. Jokaiselle saattolämmityspiirille asennettiin oma säädin. Säätimen käyttöjännite on 100-277 V AC, 50-60 Hz taajuudella. Säädin on BlueTrace sarjan toisen sukupolven suojausluokan IP67 säädin, jolla korvattiin ensimmäisen sukupolven suojausluokan IP54 säädin vuonna 2017. Säätimeen on mahdollista kytkeä kaksi lämpötilanmittauksen anturituloa, joiden mittausväli voi olla -50 °C :stä jopa $+600\text{ °C}$:een asti. Laitteen materiaali on alumiini ja toimintakyky säilyy alueilla, missä lämpötila pysyy -40 °C ja $+60\text{ °C}$ välillä. BlueTrace laitteissa on sisäinen käyttöjännitemuuntaja, joten erillisiä muuntajia ei tarvita. Tämä on elektroninen säädin, joka mahdollistaa portaattoman lämpötilasäätelyn.

Kun kesäkaudella lämmityspiirit ovat useimmiten pois käytöstä energiansäästön vuoksi, mahdolliset vauriot jäävät helposti huomaamatta. BlueTrace laitteissa tämä on otettu huomioon BluePID algoritmin avulla automatisoimalla satunnaisia testauksia näille jaksoille, jolloin laite varmistaa, että lämpötilan viiletessä lämmityspiiri toimii halutusti ja mahdolliset vauriot ovat korjattavissa ennakoivasti. BlueTracen (Kuva 16) avulla pystytään sulkemaan jokainen lämmityspiiri erikseen, mikä helpottaa huoltotoimenpiteitä, mikäli tulevaisuudessa halutaan lisätä piirejä.



Kuva 16. Pentair Bluetrace BT-300-1P. (Planray Oy, 2022)

3.3.2 SkyTrace hallintaohjelma

Tähän kohteeseen ei valittu vielä tässä vaiheessa SkyTrace hallintaohjelmaa, minkä takia ohjelman käyttöä ei käsitellä tässä työssä. Ohjelma on mahdollista lisätä järjestelmään kuitenkin jälkikäteen, kun yhteensopivat toimilaitteet ovat jo asennettu. SkyTrace hallintaohjelma on Planrayn ja Caverionin yhteistyössä kehittämä sovellus saattolämmityksien ohjaukseen ja valvontaan. Sovelluksen käyttöjärjestelmänä toimii Linux ja sitä on mahdollista käyttää web-selaimella. SkyTrace koostuu kahdesta eri osasta, SkyTrace Site:stä ja SkyTrace Analytics:istä. SkyTrace Site voidaan asentaa laitoksen verkkoon, kun tiedetään lämmityspiirin tiedot, jonka jälkeen käyttäjä pääsee näkemään lämmitysjärjestelmän tilan sekä muuttamaan lämmityksien asetuksia. SkyTrace Analytics on vuorostaan lisäpalvelu, jonka avulla saadaan online raportteja mm. ennakoivaan kunnossapitoon ja energiatehokkuuteen liittyen. SkyTrace Analytics kerää dataa mittaamalla lämmitysjärjestelmää ja datan perusteella antaa ennakkovaroituksia laitteiden käyttöiästä ja energiatehokkuudesta. Näiden kahden SkyTracen osan avulla pystytään kohdentamaan vikakohde hyvin tarkasti, vähentämään kenttätarkastusten määrää, ajoittamaan kriittisiä huoltotoimenpiteitä helpommin huoltoseisakkeihin ja käyttämään järjestelmää energiatehokkaasti. Järjestelmän avulla on mahdollista tehdä suuria säästöjä lämmitys- ja huoltokustannuksissa. (Planray Oy, 2022)

3.3.3 PlanControl ohjausjärjestelmä

Saattolämmitysten ohjausjärjestelmä on helpoin reitti saavuttaa parhaimmat kustannussäästöt. Säätimien osuus on noin 15 % saattolämmityshankkeen kulurakenteesta. Säätimien oikealla käytöllä saadaan siis pienillä kustannuksilla järjestelmän haltijan käyttökustannuksia paljon pienemmiksi. (Piirainen Toni, 2013)

PlanControl ohjausjärjestelmä on Planrayn luoma ohjausjärjestelmä, jonka avulla voidaan yhdistää useita saattolämmityskeskuskeskuksia samaan verkkoon tai ohjaamaan jopa tuhansia lämmityspiirejä samasta paikasta. Liittämällä PlanControl järjestelmän SkyTraceen on mahdollista etäohjata näitä kaikkia piirejä esimerkiksi valvomosta käsin. Ohjausjärjestelmään on saatavilla kolme käyttöliittymää, valvontaohjelmisto, kosketusnäyttö sekä mobiilikäyttöliittymä. Koska PlanControl on moduulirakenne, järjestelmän laajentaminen ja muuttaminen on mahdollista ilman suuria tilatarpeita. PlanControl (Kuva 17) on hyvin suosittu ohjausjärjestelmä teollisuudessa, missä lämmityspiirejä on paljon. Moduulissa on ATEX- hyväksytty lämpötilanrajoitin. Projektin kohteeseen valittiin Bluetrace säätimet koska käytössä olevien piirien määrä oli vain kolme ja niihin suoritetaan säännöllisiä kenttätarkastuksia. (Planray Oy, 2022)

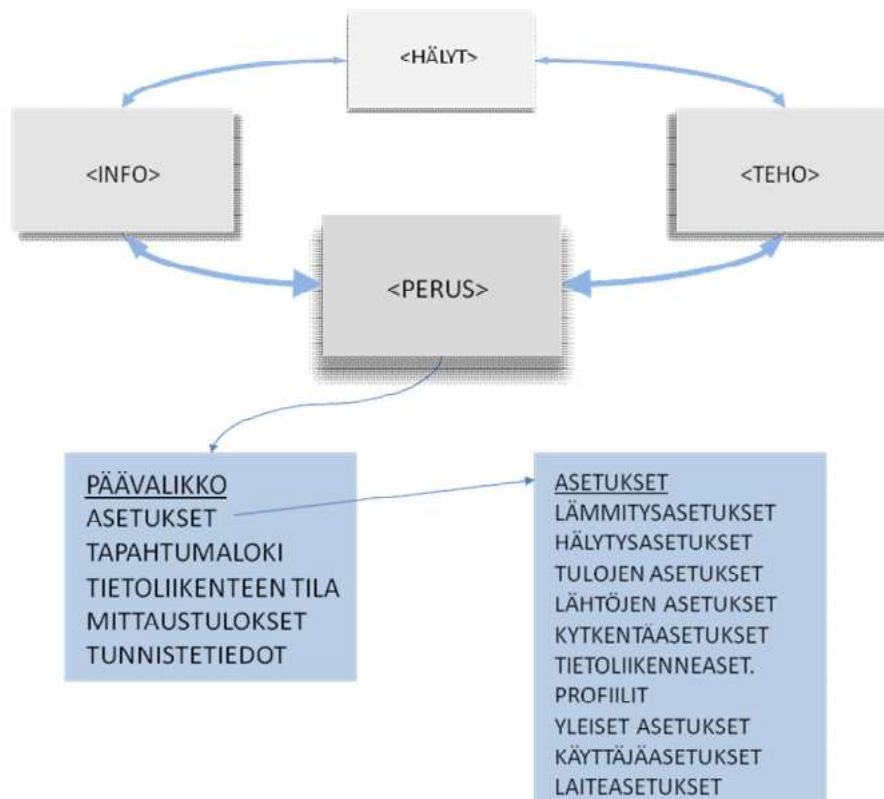


Kuva 17. Pentair PlanControl moduuli. (Planray Oy, 2022)

3.3.4 BluePID- ohjausalgoritmi ja Bluetrace laitteen ohjelmointi

BluePID- ohjausalgoritmi valvoo lämpötilaa tarkasti ja säätelee tehotasoa automaattisesti oikealle tasolle. BluePID- ohjausalgoritmi on erityisesti tarkoitettu ulkolaattojen ja räystäskourujen lämmitykseen, mutta se sopii varsin hyvin myös kohteeseen, jossa lämpötila halutaan pysyvän tietyissä rajoissa. BluePID- säättää tehoa lineaarisesti valitussa lämpötila-alueessa ulkolämpötilan mukaan. Ohjelmoitavat jännitetulot ja ohjelmisto mahdollistavat piirin sammuttamisen tai asetusarvojen muuttamisen.

BlueTrace laitteen valikot ovat jaettu kahteen osaan: näytöt ja valikot. Näyttönäkymiä on neljä kappaletta, jotka ovat Perus, teho, hälytys ja info (Kuva 18). Valikoista pääsee ohjelmoimaan laitteen asetuksia sekä katselemaan mm. tilatietoja, tapahtumalokeja, mittaustuloksia ja tunnistetietoja. Asetukset valikon näkymästä löytyy mm. lämmityksiä, hälytyksiä, tuloasetuksia, lähtöasetuksia, kytkentäasetuksia ja tietoliikenneasetuksia varten valikot.



Kuva 18. Bluetracen valikkorakenne. (Planray Oy, 2011)

BlueTracen asetuksia muuttaessa laite vaatii aina järjestelmänvalvojatason salasanan. Painiketta ASETUS painamalla pystytään siirtymään kaikista näyttönäkymistä valikkonäkymään.

BlueTracen ohjauksien kannalta kaikkein tärkein valikko on lämmitysasetus valikko, josta asetetaan haluttu lämpötila, väliaikaisesti haluttu lämpötila ja käytettävä ohjaustapa, ohjausteho ja säätötapa. Mikäli ohjaustehoa ei määritetä itse, laite laskee suorakytkentätehon kyseisellä hetkellä. Ohjaustapoja on neljä: TC, TC+TL, TW ja TW+TL. TC on ohjaustapa, jolloin laite lämmittää yhden lämpöanturin mukaan kohti yhtä haluttua lämpötilaa. TC+TL on ohjaustapa, jolloin laite lämmittää kahden lämpöanturin mukaan kohti yhtä haluttua lämpötilaa, joista toinen anturi mittaa lämmitettävää kohdetta ja toinen lämmityskaapelin pintalämpötilaa. Toisin kuin kahdessa edellisessä TW ohjaustavassa laitteelle asetetaan ylä- ja alarajat, jonka mukaan lämmitys pysyy päällä näiden rajojen välissä ollessa. Ylärajan lähenyessä laite vähentää lämmitystehoa ja alarajan lähestyessä laite nostaa lämmitystehoa. TW+TL vaihtoehdossa edellisen lisäksi voidaan määrittää erikseen teho ylärajalla tai onko lämmitys päällä, jos lämpötila laskee alarajan alapuolelle.

Hälytysvalikosta kytketään päälle tai pois käytöstä halutut hälytykset, määritetään hälytysrajat ja hälytystoiminnot. Hälytystoimintoja on valittavissa kolme: hälytys pois päältä, hälytyksen ilmetessä ulkoisen ohjausreleen laukaisu tai lämmitystehon muutos hälytyksen ilmetessä. Valittavia hälytyksiä voi olla lämmitettävän kohteen yli- ja alilämpöhälytys, lämmityskaapelin pinnan yli- ja alilämpöhälytys, ylivirtahälytys, vuotovirtahälytys, vikavirtasuojakytkimeltä saatu hälytys, tyristorivikahälytys, joka viittaa tyristorin palamiseen kiinni, kuorma- ja syöttöhäiriöstä kertova hälytys, anturivikahälytys tai yhteysvirhe hälytys.

BlueTracessa on 24 VDC ja 110-277 VAC jännitetulot, joista on tulojen asetuksissa valittavissa, milloin laitteen ei haluta antavan hälytystä tietyllä hetkellä. Esimerkiksi kaikkien hälytysten kannattaa olla pois päältä käyttöönotossa, jolloin turhia hälytyksiä tulisi runsaasti. Tästä valikosta voidaan myös sulkea hälytykset pois tietyiltä lämmityspiireiltä esimerkiksi tilanteissa, joissa tuotantolinja on poissa käytöstä. Tulojen asetuksista voidaan myös määrittää tieto hälytyksen estolle, jos tietyllä lämmityspiirillä on tiedossa tuleva hetkellinen lämpötilan muutos.

Lähtöjen asetuksissa määritellään, mitkä hälytykset halutaan laukaisevan ulkoisen ohjausreleen, jos tieto halutaan esimerkiksi erilliseen hälytyssilmukkaan tai käyttää automaattista poiskytkentää.

KytKentäasetuksissa voidaan määrittää kytkentään liittyviä teknisiä tietoja, esimerkiksi lämmitysteho metriä kohden. Lisäksi tässä valikossa määritellään mm. kytkennän tyyppi, vaiheen ja nollan välinen jännite, lämmityskaapelin tyyppi, kaapelin pituus ja piirien määrä.

Tietoliikenneasetuksissa voidaan määrittää BlueTracen lähettämään tai vastaanottamaan dataa, mikäli piirissä on useampia BlueTrace laitteita ja tarkastella BlueTrace laitteen liikennöinti ID numeroa.

3.4 Dokumentaatio

Dokumentaatio on tärkeä osa jokaista projektia. Tyypillisesti dokumentoinnin laatu peilautuu suoraan projektin kustannuksiin. Jokainen projekti alkaa ja päättyy dokumentteihin, projektin alussa suunnittelija luovuttaa työryhmälle hankkeen työkuvat ja taas hankkeen lopussa työryhmä luovuttaa pöytäkirjat tilaajalle.

3.4.1 Lämmitinluettelo

Lämmitinluettelon tarkoitus on listata kaikki projektiin suunnitellut lämmittimet, helpottaa määrälaskentaa, lisätä työtehokkuutta, vähentää materiaalilauksen virheitä sekä kertoa tärkeimmät tekniset tiedot lämmityspiireistä. Projektissa ei ollut käytettävissä lämmitinluetteloja tai muita sähkösuunnitelmia.

Lähes jokaisella suunnittelutoimistolla on omat pohjansa. Seuraavassa kuvassa on esimerkki eräästä kattavasta lämmitinluettelopohjasta, kuva 19.

Saattolämmityskeskus: Tunnus ja sijainti													
Lähtö	Putken tunnus	Selite	PUTKI							LÄMPÖKAAPELI			
			D (mm)	l _p (mm)	H (mm)	T _{max} (°C)	Ph (W/m)	N _v /N _I (kpl)	Tyyppi	r (Ω/m)	l _k (m)	R (Ω)	N (kpl)

TOIMINTA-ARVOT				TERMOSTAATTI				Projektin nimi		revisio: A	
U (V)	I (A)	P _k (KW)	P _s (W/m)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Saattolämm. isometria	Saattolämm.layout	Piirikaavio	Huom.	Saatto-lupa	Eristys-lupa

Kuva 19. Esimerkki lämmitinluettelosta.

Tässä lämmitinluettelomallissa esitetään putken halkaisija (D), putken pituus (l_p), eristeen paksuus (H), putken maksimilämpötila (T_{max}), putken häviöteho (P_h), venttiilien ja kannakkeiden lukumäärä (N_v/N_I), lämmityskaapelin tyyppi, lämmityskaapelin resistanssi (r), lämmityskaapelin pituus (l_k), kaapelilenkin resistanssi (R), kaapeleiden lukumäärä (N), syöttöjännite (U), virta toimintalämpötilassa (I), teho toimintalämpötilassa (P_k), kaapelin metriteho (p_k), rajoitustermostaatin asetusarvo (T_1), säätötermostaatin asetusarvo (T_2). Lisäksi on sarakkeet myös keskuslähtöä, putken tunnusta, sijaintipiirustuksia, työluhia, muita huomioita ja selitteitä varten.

3.4.2 Mittauspöytäkirjat

Sähköasennuksista täytetään aina mittauspöytäkirja, kun asennetaan uusia kaapelointeja tai muutetaan vanhoja. Mittauspöytäkirja on dokumentti, missä sähköurakoitsija esittää kohteen yksilöintitiedot, mittauslukemat ja mittausajankohdat sekä olennaiset tekniset tiedot kaikista uusista ja muutetuista sähköpiireistä. Mittauslukemista huomataan, jos sähköpiireissä on merkittäviä poikkeamia, jotka viittaisivat vikaan tai häiriöön sähköpiirissä. Mittauspöytäkirja liitetään käyttöönottotarkastuspöytäkirjan liitteeksi, kuva 20. Lisäksi lämmityspiireistä kirjataan oma mittauspöytäkirjansa toiseksi liitteeksi.

MITTAUSPÖYTÄKIRJA

PIIRIN NRO

ASENNUSTIEDOT:									
Johdonsuoja-automaatin numero									
Piirustuksen viitenumero									
Putken eristysresistanssiteti ennen asennusta (ohita tarvittaessa termostaatti).	Lukema								
	Nimikirjaimet Päivämäärä								
Putken eristysresistanssiteti asennuksen jälkeen (ohita tarvittaessa termostaatti).	Lukema								
	Nimikirjaimet Päivämäärä								
Piirin jännite	Paneeli								
	Kytentäpisteet								
Asennus suoritettu ja tiivistetty	Nimikirjaimet								
	Päivämäärä								
Matalien komponenttien paikat on merkitty pellytykseen.	Nimikirjaimet								
	Päivämäärä								

HUOMAUTUKSET JA KOMMENTIT:

Kuva 20. Esimerkki lämmityspiirien mittauspöytäkirjasta. (Nvent Raychem, 2021)

Kuten mittauspöytäkirjoissakin myös lämmityspiirien mittauspöytäkirjoista on useita eri versioita. Sopiva lämmityspiirien mittauspöytäkirjamalli riippuu asennettavasta lämmityskaapelityypistä, asennuskohteesta (putki, lattia, ajoluiska), piiriin liitettävistä komponenteista ja valmistajasta. Perustiedot pysyvät jokaisessa mallissa lähes samana, mutta vaadittujen mittausten määrä asennuksen aikana saattaa vaihdella kahdesta seitsemään. Kuvassa ylempänä on esitetty eräs putkien saattolämmityspiireihin sopiva mittauspöytäkirjamalli.

3.4.3 Huolto- ja Tarkastuspöytäkirja

Asennuksen luovutuksen yhteydessä kohteen asennuksille määritellään kunnossapito-ohjelma. Kunnossapito-ohjelman tarkoitus on varmistaa laitteiden toimintavarmuus, havaita ilmaantuneet viat ja mahdollistaa vikojen korjauksen ajoitus mahdollisimman hyvään ajan-kohtaan. Kunnossapito-ohjelman mukaisen huoltotarkastuksen yhteydessä kirjataan tarkastetuista piireistä tarkastusdokumentti (Kuva 21), josta voidaan tarkastaa, että kaikki vaaditut tarkastustoimenpiteet on suoritettu ja lämmityspiiri toimii edelleen tarkoitettulla tavalla.

Mikäli poikkeamia havaitaan, kirjataan ne myös tarkastusdokumenttiin ja määritellään kohteeseen huoltoajankohta.

TARKASTUS- JA HUOLTOTIETOLOMAKE

HUOLTOTARKASTUKSET:		PIIRIN MFRD				KUUKAUSI				VUOSI			
Ei merkkejä ylikuumentumisesta, kosteudesta korroosiosta tms.	Nimikirjaimet Päivämäärä												
Kytkejärjestelmissä Lämpökaapeli ja holkkiviivisteet tiukat Kytkeäpisteet tiukat Maadoituskytkentä tiukka Eristys hyvässä kunnossa	Nimikirjaimet Päivämäärä												
Termostaatit asennettu oikein ja kapillaarit suojattu	Nimikirjaimet Päivämäärä												
Eristysresistanssitetesti (ohita tarvittaessa termostaatti).	Lukema Nimikirjaimet Päivämäärä												
Piirin jännite	Paneeli Kytkeäpisteet terminals												
Kaikki rasiat ja termostaatit on suljettu tiukasti	Nimikirjaimet Päivämäärä												
Matalien komponenttien paikat on merkitty pellitykseen.	Nimikirjaimet Päivämäärä												

HUOMAUTUKSET JA KOMMENTIT

Kuva 21. Esimerkki lämmityspiirien tarkastus- ja huoltotietolomakkeesta. (Nvent Raychem, 2021)

Tyypillisesti valmistajan takuu velvoittaa kunnossapito-ohjelman noudattamista myös huoltamisen suhteen kohteissa, joissa huoltaminen ei edellytä kohtuutonta vaivaa laitteiston haltijalta.

3.5 Tarkastukset

Tarkastuksilla on tarkoitus varmentua puolueettomasti asennustyön turvallisesta ja tarkoituksenmukaisesta toiminnasta. Lisäksi tarkastuksissa tyypillisesti annetaan työn tilaajalle käytönopastukset ja mahdolliset käyttöohjeet asennettuihin laitteisiin. Molemmat osapuolet hyväksyvät, että asennus on luovutuskuntoinen ja käyttövalmis. Suuremmissa

asennuskokonaisuuksissa tyypillisesti tilataan puolueeton kolmas osapuoli virallisesta tarkastuslaitoksesta todentamaan asennusten turvallinen toimivuus.

3.5.1 Käyttöönottotarkastus

Käyttöönottotarkastuksessa työn tehnyt yritys tarkastaa oman työnsä ennen asiakkaalle tehtävää vastaanottotarkastusta. Käyttöönottotarkastuksessa todetaan, että suunnitelmissa määritellyt asiat ovat toteutettu asennusolosuhteisiin ja käyttötarkoitukseensa sopivilla materiaaleilla, asennukset noudattavat standardeja, määräyksiä ja voimassa olevia lakeja. Maadoitus- sekä häiriösuojavaatimukset toteutuvat. Asennukset toimivat oikein sekä ovat sijoitettuna oikeisiin paikkoihin. Asennukset tulee tarkastaa silmämääräisesti sekä mittaamalla. Käyttöönottopöytäkirjassa tulee esittää myös kohteen yksilöintitiedot ja sähkölaitteiston rakentajan yhteyshenkilöt ja vastuuhenkilöt. Käyttöönottotarkastuksesta kirjataan pöytäkirja, mihin liitetään kaikki mittauspöytäkirjat. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes, 2022)

3.5.2 Vastaanottotarkastus

Vastaanottotarkastuksella tarkoitetaan loppuasiakkaan ja sähköurakoitsijan välistä kohtaamista, jolloin sähköurakoitsija luovuttaa sovitun mukaisen asennuskokonaisuuden työn tilaajalle. Vastaanottotarkastuspäivämäärä voidaan sopia tilauksen yhteydessä tai työn edettyä riittävän pitkälle. Vastaanottotarkastuksessa asennuskokonaisuus tarkastetaan yhdessä, urakoitsija luovuttaa kaikki työhön liittyvät pöytäkirjat ja mahdolliset asennuskokonaisuuteen liittyvät muutoskuvat tilaajalle. Kun on yhdessä todettu asennuksen olevan sovitun mukainen, työn tilaaja tai valvoja allekirjoittaa vastaanottopöytäkirjaan asennuksen hyväksytyksi ja vastaanotetuksi. Vastaanottotarkastuksessa voidaan myös hyväksyä työ poikkeuksilla, jos työ on tilaajan mielestä keskeneräinen joltain osin. Poikkeukset kirjataan vastaanottopöytäkirjaan ja uusintatarkastus suoritetaan, kun havaitut puutteet on korjattu. Mikäli työ on merkittävästi keskeneräinen ei vastaanottotarkastusta yleensä järjestetä tai se kirjataan vastaanottopöytäkirjaan hylätyksi, tämä tilanne on mahdollista tapahtua vain, jos vastaanottotarkastuspäivämäärä on sovittu ennen työn aloittamista.

3.5.3 Varmennustarkastus

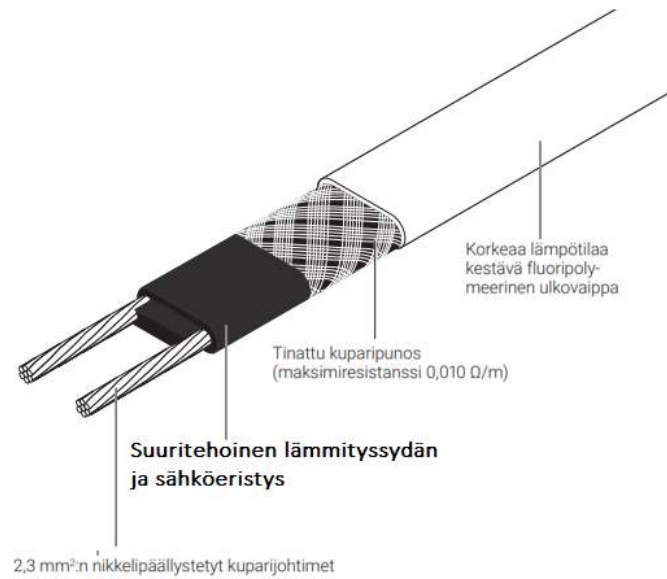
Varmennustarkastus on riippumattoman kolmannen osapuolen tekemä sähkölaiteistotarkastus. Varmennustarkastuksen saa suorittaa ainoastaan tarkastuslaitos tai virallisesti valtuutettu tarkastaja. Varmennustarkastus on suoritettava kolmen kuukauden kuluessa laitteiston käyttöönotosta. Varmennustarkastukset pitää tehdä yleensä yli 35 A sähkölaitteistoille. Tyypillisesti varmennustarkastuksia tehdään teollisuudessa, liiketiloissa, kerrostaloissa tai maatalouden rakennuksissa tehtävissä merkittävässä muutostöissä. Varmennustarkastuksesta kirjataan tarkastustodistus sekä tarkastaja liittää sähkölaiteistoon tarkastustarran.

Tämän projektin laajuutta ei katsottu merkittäväksi muutostyöksi, eikä varmennustarkastusta tässä projektissa tarvittu. (Finlex, 1434/2016 valtioneuvoston asetus sähkölaiteistoista), (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes, 2022).

3.6 Vaihtoehtoisen menetelmän esittely

Projektin aikana Nvent Raychem toi markkinoille uuden HTV-kaapelityypin, joka on esitetty kuvassa 21, mutta koska projekti oli edennyt jo materiaalien tilausvaiheen ohitse, ei kaapelityyppejä voitu tässä vaiheessa enää muuttaa. Tässä osiossa esitetään, miten uuden kaapelityypin valitseminen olisi vaikuttanut projektiin.

HTV-tuoteperheen kaapeleissa on paljon yhtäläisyyksiä XTV-tuoteperheen kaapeleiden kanssa, mutta ydintä (esitettyä tummennettuna kuvassa 22.) on saatu kehitettyä siten, että kaapelit kestävät entistä kauemmin yhä kuumempia lämpötiloja.



Kuva 22. HTV-tuoteperheen kaapelin rakenne. (Nvent Raychem, 2022)

HTV-tuoteperheen kaapeleille valmistaja lupaakin entisen 20 vuoden käyttöiän sijaan yli 30 vuoden käyttöiän, lisäksi uuden ytimen rakenteen ansiosta sen lämpötehoksi valmistaja lupaa vielä 10 vuoden jälkeen 95 % uuden kaapelin lämpötehosta.

HTV-tuoteperheen kaapeleita on saatavilla seitsemässä eri teholuokassa 3, 5, 8, 10, 12, 15, 20. Jatkuvan lämpötilan kesto kaapelille on 205 °C ja hetkellinen lämpötilakesto 260 °C. Tuoteperheen kaapelit ovat T2 ja T3 ATEX- luokiteltuja, riippuen teholuokasta.

4XTV- ja 5BTV- tyyppisten kaapeleiden korvaamiseen käytetään 5HTV-tyypin kaapelia, joka on teholuokaltaan HTV-sarjasta parhaiten soveltuva kaapeli samoille putkilinjoille. 10BTV- tyyppin kaapelin korvaamiseen käytetään 8HTV-tyyppistä kaapelia, koska sen lämmitysteho on sopivin raakavesilinjan lämmitystarpeisiin. Tässä vertailussa käytetään 60 vuoden aikasykliä ja skenaariota, jolloin kaapelit vaihdetaan joka kerta valmistajan lupaaman käyttöiän täytyessä. Taulukko 1. on esitetty myös työn putkilinjojen saattotehovaatimukset.

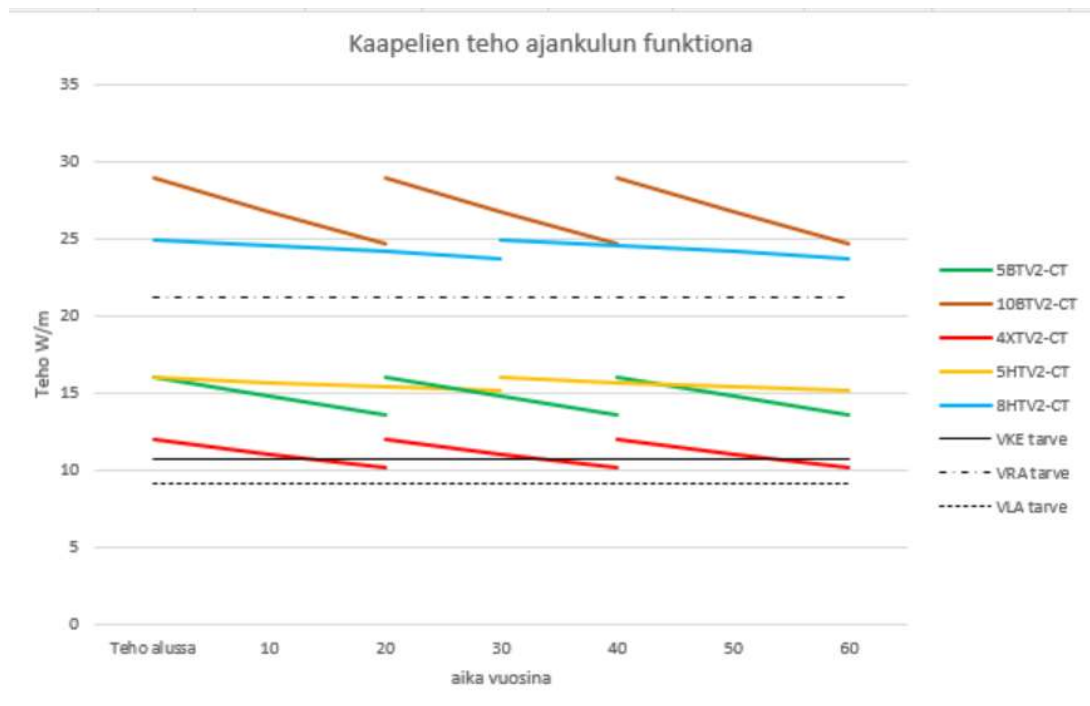
Taulukko 1. Piirin maksimipituudet käytettäessä HTV- tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)

Tuotenumero	Nimellisteho W/m +10C	Katso osa
20HTV2-CT	64	A
15HTV2-CT	48	B
12HTV2-CT	38	C
10HTV2-CT	32	D
8HTV2-CT	25	E
5HTV2-CT	16	F
3HTV2-CT	9	G

Piirin maksimipituudet C-tyyppin johdonsuojakatkaisijoilla perustuen standardiin EN 60898:

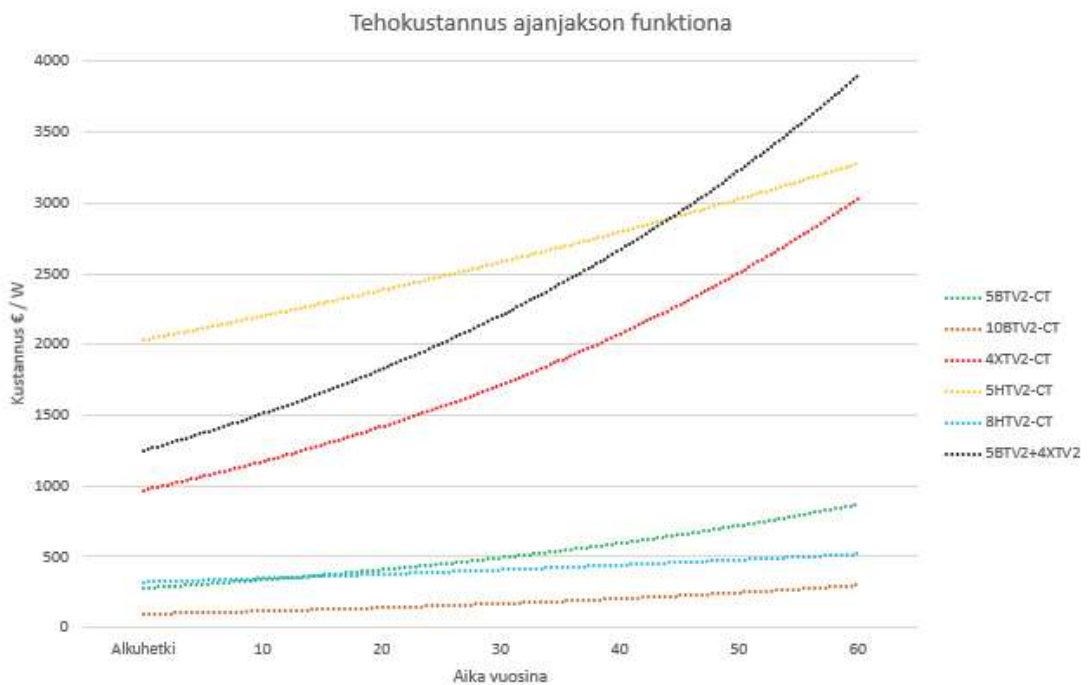
	Käynnistys lämpötila	Sulakekoko / Lämmityskaapelin maksimipituus piirissä (m)				
		16 A	20 A	25 A	32 A	40 A
3HTV2-CT	10°C	197	246	293	293	293
	0°C	189	237	293	293	293
	-20°C	168	210	262	293	293
	-40°C	155	193	241	293	293
5HTV2-CT	10°C	146	183	224	224	224
	0°C	138	172	215	224	224
	-20°C	126	158	197	224	224
	-40°C	116	145	181	224	224
8HTV2-CT	10°C	106	132	165	173	173
	0°C	100	125	157	173	173
	-20°C	92	115	143	173	173
	-40°C	84	105	132	169	173
10HTV2-CT	10°C	90	112	140	152	152
	0°C	86	108	135	152	152
	-20°C	79	99	123	152	152
	-40°C	72	91	113	145	152
12HTV2-CT	10°C	78	97	121	138	138
	0°C	74	93	116	138	138
	-20°C	67	84	105	134	138
	-40°C	62	77	97	124	138
15HTV2-CT	10°C	61	76	95	119	119
	0°C	58	72	90	115	119
	-20°C	53	66	82	105	119
	-40°C	48	60	75	96	113
20HTV2-CT	10°C	46	58	72	92	99
	0°C	44	55	69	88	95
	-20°C	40	50	63	81	88
	-40°C	37	46	58	74	82

Kuvasta 23. havaitaan, että laskennallisesti 4XTV2-CT kaapelin teho laskee 32 vuoden käytön jälkeen alle lauhdevesiputkiston lämmitysvaatumuksen, 10BTV2-CT kaapelin teho 36 vuoden käytön jälkeen alle raakavesiputkiston lämmitysvaatumuksen sekä 5BTV2-CT kaapelin teho 44 vuoden käytön jälkeen alle kemiallisen veden lämmitysvaatumuksen. Ne tulisi jopa parhaassa skenaariossa vaihtaa viimeistään silloin.



Kuva 23. Havainnekuva kaapelien tehon heikkenemisestä ajankulun funktiona.

Kuvasta 24. nähdään HTV- tuoteperheen kannattavuus pitkän aikavälin tähtämellä.



Kuva 24. Havainnekuva lämmityskustannusten kasvusta ajan funktiona. Kuvaajassa on esitetty lämmityspiirien uuden kaapelin hankinnasta aiheutunut kustannus, kun kaapelit vaihdetaan aina takuuajan umpeuduttua.

Siitä huolimatta, ettei havainnekuvassa ole otettu huomioon kaapeleiden vaihtotyön kustannuksia, pystytään näkemään HTV-kaapeleiden kannattavuus suuremmilla kaapelimäärillä hyvin selkeästi. Erityisesti HTV-kaapeli on suunniteltu korvaamaan korkeamman lämpötilakestoisuuden kaapeleita kuten XTV-kaapeleita tai vastaavia. Tässä vertailussa 5HTV-kaapelilla on korvattu määrällisesti 4XTV ja 5BTV kaapelit, jolloin kuvaajan käyrä on hieman loivempi verrattuna ainoastaan 4XTV-kaapelin muodostamaan kustannusten kasvukäyrään. Projektissa jokaista saattolämmitystyyppiä asennetaan yksi kaapeli käyttöön ja toinen kaapeli varalle. Jolloin BTV- ja XTV-kaapeleissa otetaan varakaapeli käyttöön 20 vuoden käyttöiässä ja molempien kaapeleiden vaihto tehdään 40 vuoden käyttöiässä. Koska laskennallisesti 60 vuoden kohdalla tulisi jälleen vaihtaa varakaapeliin, on tässä kuvaajassa laskettu 60 vuoden käyttöiässä näiden kaapelityyppien kohdalla yhden saattokaapelin vaihto. HTV-kaapeleilla otetaan varakaapeli käyttöön 30 vuoden käyttöiässä ja molemmat kaapelit vaihdetaan 60 vuoden kohdalla. Materiaalien hinta on tässä kuvaajassa otettu huomioon sähkötukku Soneparin tämänhetkisillä hinnoilla ja se vaikuttaa kustannuskäyrään kohottavasti vaihtovuosina. Työn kirjoitushetkellä kaapelien metrihinnat olivat seuraavat 5BTV2-CT 26.78 €, 10BTV2-CT 33.23 €, 4XTV2-CT 63.59 €, 5HTV2-CT 86.9 €, 8HTV2-CT 90.26 €.

4 Sähkösaattojärjestelmän mitoitusmenetelmät

Saattolämmitysjärjestelmän mitoitukseen vaikuttavat monet eri asiat, tässä kappaleessa käsitellään lämmityskaapelin mitoitusta, järjestelmää syöttävän kaapelin mitoitusta sekä projektin laajuutta. Saattolämmitysjärjestelmät ovat aina yksilökohtaisia kohteittain, eikä vastaavan järjestelmän mitoituksesta toiseen kohteeseen saada välttämättä samoja arvoja.

4.1 Olosuhteiden vaikutukset materiaalivalintoihin

4.1.1 Lämpötilat asennuskohteessa

Tässä laskennassa on käytetty ilman maksimilämpötilana 30 °C ja minimilämpötilana –40 °C. Kun tarkastellaan viimeisen viiden vuoden lämpötilatoteutumia asennuskohteessa, voidaan havaita, että käytetyt arvot ovat myös toteumaan verratessa oikeansuuruisia. Vaikka maksimilämpötila nousee satunnaisina päivinä yli 30:een °C:een, ei sillä ole vaikutusta lämpöpölvöön, koska putken käyttölämpötila tällä putkilinjalla on 20 °C. Sen sijaan minimilämpötilassa on hieman varaa kovemmille pakkaslukemille. (Ilmatieteenlaitos, 2022)

Taulukko 2. Kausien keskilämpötilat sekä vuosien minimi- ja maksimilämpötilat asennuskohteessa (°C).

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kevät		4,8	5,366667	4,633333	4,7	2,3
Kesä	14,66667	17,63333	16,43333	16,66667	17,8	
Syysy	6,233333	7,5	5,466667	8,6	10,96667	
Talvi	-3,3	-2,56667	1,566667	-3,13333	-3,56667	
Minimilämpötila		-21,2	-20,9	-10,4	-24,4	-18,0
Maksimilämpötila	25,6	33,1	33,1	30,2	31,5	

Tarkemmat kuukausien keskilämpötilat esitetty liitteessä 2.

4.2 Mitoitus yhtälöiden avulla

Liitteessä 3. on TraceCalc Pro 2 laskentaohjelman avulla saadut lämpöhäviöt, kaapelityypit, linjan pituus ja toimintavirrat. Tässä osiossa esitetään teoreettisten yhtälöiden avulla lasketut tulokset.

4.2.1 Putken lämpöhäviöt

Riippuen putken sisä-, ja ulkohalkaisijoista r_{in} ja r_{ex} johtumisen lämpövastus R_{cnd} määritellään materiaalin lämmönjohtavuudesta λ riippuen sylinterimäisen kappaleen seinämän jokaiselle kerrokselle yhtälöllä.

$$R_{cnd} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ex}}{r_{in}}\right)}{2\pi\lambda} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (1)$$

Konvektion lämpövastus R_{cnv} määritellään yhtälöllä.

$$R_{cnv} = \frac{1}{h_{cnv}\cdot A} \quad [(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (2)$$

missä h_{cnv} on pinnan lämmönsiirtokerroin, joka on putkivirtauksessa tässä kohteessa 1500-2000 W/(m²·K) luokkaa. Eri nesteillä ja virtausnopeuksilla arvot voivat olla tästä poikkeavia.

Prandtin luku Pr kuvaa momentti- ja liikemäärärajakerrosten suhteellista paksuutta.

$$Pr = \frac{\mu C_1}{\lambda} \quad (3)$$

missä μ on nesteen dynaaminen viskositeetti, C_1 nesteen ominaislämpökapasiteetti ja λ on lämmönjohtavuus. Veden viskositeetti on tyypillisesti 1.002×10^{-3} kg/(m·s), veden ominaislämpökapasiteettina käytetään 4200 J/kg celsiusastetta kohden ja lämmönjohtavuus 0.6 W/m celsiusastetta kohden, jolloin Prandtin luvuksi tulee 7.014 silloin, kun veden lämpötila pysyy 20 °C lämpötilassa.

Seuraavaksi lasketaan virtauksen kinemaattinen viskositeetti ν alla olevalla yhtälöllä.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

missä μ on virtauksen väliaineen viskositeetti ja ρ on virtauksen väliaineen tiheys. Tästä saadaan kinemaattiseksi viskositeetiksi $1e^{-6}$.

Reynoldsin luku Re kuvaa virtauksen tyyppiä, ja se on määritelty seuraavasti.

$$Re = \frac{v_s L}{\nu} \quad (5)$$

missä v_s on virtauksen nopeus, L on karakteristinen pituus = 351.4 mm ja ν on väliaineen kinemaattinen viskositeetti. Reynoldsin luvuksi saadaan näin ollen 870.34. Yleisesti putki- virtauksessa Reynoldsin lukua tulkitaan siten että alle 2300 kuvaa laminaarista virtausta, 2300-4000 kuvaa siirtymävaihetta, jolloin virtaus voi olla joko laminaarinen tai turbulenti- nen ja mikäli Reynoldsin luvun arvo on yli 4000, on virtaus silloin turbulenti- nen. Seuraa- vaksi lasketaan pakotettu konvektio raakavesilinjan putkessa.

Täysin laminaarisessa virtauksessa lämmönsiirtokerroin Nu_{vra} saadaan käyttämällä Gnielins- kin korrelaatiota, missä D_{vra} on raakavesilinjan ulkohalkaisija. Raakaveden kitkakertoimena voidaan käyttää arvoa $\zeta = 0,06$, putken seinämän karheuden takia. (Mills 1999, s. 274)

$$Nu_{vra} = 7.54 + \frac{0.03 \left(\frac{D_{vra}}{L}\right) Re_{vra} Pr}{1 + 0.016 \left[\left(\frac{D_{vra}}{L}\right) Re_{vra} Pr\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (6)$$

Yhtälöllä (6) saamme Nusseltin luvuksi 350.94. Nusseltin luku kuvaa kappaleen pinnan läm- pötilagradientin suhdetta koko järjestelmän keskimääräiseen lämpötilagradienttiin. Lämmi- tysmatkan keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin h_s saadaan yhtälöllä (7).

$$h_s = \lambda \frac{\frac{0.03 \left(\frac{D_{vra}}{L}\right) Re_{vra} Pr}{1 + 0.016 \left[\left(\frac{D_{vra}}{L}\right) Re_{vra} Pr\right]^{\frac{2}{3}}}}{D_{vra}} \quad (7)$$

Turbulenttisen virtauksen laskennassa käytetään yhtälöiden (6) ja (7) sijaan yhtälöitä (8) ja (9). (Mills 1999, s. 270)

$$Nu_{vra} = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) (Re_{vra} - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\xi}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (8)$$

$$h_s = \frac{\lambda \left(\frac{\xi}{8}\right) (4 Re_{vra} - 1000) Pr}{D_{vra} \left[1 + 12.7 \left(\frac{\xi}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)\right]} \quad (9)$$

Säteilyn lämpövastus R_{rad} määritetään yhtälöllä.

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{h_{\text{rad}}} \quad (10)$$

Pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin h_{rad} on laskettavissa yhtälöllä.

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot \frac{T_{\text{tex}}^4 - T_{\text{env}}^4}{T_{\text{tex}} - T_{\text{env}}} \quad (11)$$

Galvanoidun teräksen emissiviteetti-arvo on 293.15 Kelvinin lämpötilassa $\varepsilon_t = 0.28$ ja voimakkaasti hapettuneena $\varepsilon_t = 0.64$. (Mikaél A. Bramson, 1968)

Eristetylle putkelle voidaan laskea kokonaislämpövastus R_{tot} yhtälöllä

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_{\text{in}}}{2\pi r_1} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\ln\left(\frac{r^{(k+1)}}{r_k}\right)}{2\pi\lambda_k} + \frac{R_{\text{tex}}}{2\pi r_n} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (12)$$

Lämpövirta Q saadaan laskettua, kun tiedetään ulkoilman lämpötila ja putkessa virtaavan nesteen minimi lämpötila.

$$Q = \frac{T_1 - T_{\text{env}}}{R_{\text{tot}}} \quad [\text{W}] \quad (13)$$

Lasketaan seuraavaksi raakavesilinjan lämpöhäviöt.

Johtuminen R_{Joh} $355.6 \times 2.6\text{mm}$ (DN350) galvanoidussa teräspankussa, teräksen lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 20-80 W/(m·K) riippuen valmistustavasta ja seossuhteesta. Käytetään tässä laskennassa arvoa 50 W/(m·K) ja yhtälöä (14).

$$R_{\text{Joh}} = \frac{\ln\left(\frac{0.1778}{0.1752}\right)}{2\pi \cdot 50} = 4.68 \cdot 10^{-5} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (14)$$

Konvektio R_{kon} raakaveden ja putkenseinämän välillä ulkoilmassa saadaan yhtälöllä (15).

$$R_{\text{kon}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.0876} = 1.21 \cdot 10^{-3} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (15)$$

Johtuminen R_{Jer} 100 mm kivivillaeristeessä, joka on päällystetty yhden millin pellityksellä R_{Jpe} , arvioidaan seuraavassa. Kivivillaeristeen lämmönjohtavuus on 0.033 W/(m·K), pellin lämmönjohtavuutena käytetään arvoa 60 W/(m·K). Yhtälöistä (16) ja (17) saadaan.

$$R_{\text{Jer}} = \frac{\ln\left(\frac{0.2778}{0.1778}\right)}{2\pi \cdot 0.033} = 2.15 \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (16)$$

$$R_{\text{Jpe}} = \frac{\ln\left(\frac{0.2788}{0.2778}\right)}{2\pi \cdot 60} = 9.53 \cdot 10^{-6} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (17)$$

Lasketaan vielä konvektio R_{Kul} eristyspellistä ulkoilmaan yhtälöllä (18). (Ympäristöministeriö, 2011, s. 54.)

$$R_{\text{Kul}} = \frac{1}{25} = 2.28 \cdot 10^{-2} \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \quad (18)$$

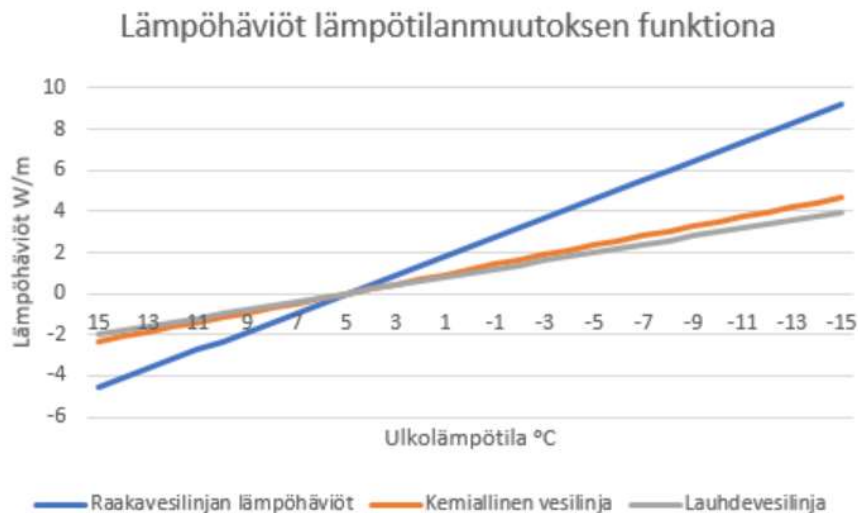
Kun summataan kaikki, tulee kokonaislämpövastukseksi R_{tot} .

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= 4.68 \cdot 10^{-5} + 1.21 \cdot 10^{-3} + 2.15 + 9.53 \cdot 10^{-6} + 2.28 \cdot 10^{-2} \\ &= 2.18 \quad [(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}] \end{aligned} \quad (19)$$

Lasketaan lämpöhäviö Q_{-40} tilanteissa, joissa ulkolämpötila on $-40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{-40} = \frac{5 - (-40)}{2.18} = 20.64 \text{ W/m} \quad (20)$$

Projektin putkilinjojen lämpöhäviöt välillä $-15 - +15 \text{ }^\circ\text{C}$ esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Putkilinjojen lämpöhäviöt normaalissa käyttölämpötilassa lämpötilanmuutoksen funktiona.

Tarkat putkilinjojen laskennalliset lämpöhäviöt esitetty liitteessä 4.

Laskentaohjelman ja käsin laskennan tuloksissa on 0.56 W/m eroa, joka vastaa 2.64 %. Tätä voidaan pitää virhemarginaalin sisällä, tuloksia voidaan siis pitää todenmukaisina ja luotettavina.

4.2.2 Terminen aikavakio

Terminen aikavakio saadaan laskettua jakamalla aineeseen, putkeen ja eristeisiin sitoutuneen kokonaisenergian astetta kohden lämpöhäviöllä jokaista lämpötilaeron celsius astetta ja putkimetriä kohden. Termistä aikavakiota H voidaan hyödyntää esimerkiksi lämmityksen vaatiman lämmitystehon laskemiseen.

$$H = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2 + 0.5 m_3 C_3}{Q}$$

missä m_1 on nesteen massa, C_1 on nesteen ominaislämpö, m_2 on putkimateriaalin massa, C_2 putken ominaislämpö, m_3 on eristemateriaalin massa, C_3 on eristemateriaalin ominaislämpö ja Q on lämpöhäviö putkimetriä ja celsiusastetta kohden. (SFS-EN 60079-30-2, 2020 s.17-18)

4.2.3 Lämpötilan nostamisen vaatima lämmitysteho

Lämmityslinjoissa tulee joskus tarvetta nostaa putken lämpötilaa hetkellisesti korkeammaksi, esimerkiksi teollisuuslaitoksissa tehdään joskus putkistojen höyrypesua. Tässä kappaleessa lasketaan lämpötilan nostamisesta aiheutuva lämmitystehon nousu t .

$$t = H \ln \left\{ \frac{Q_{\text{com}} - Q(T_{\text{beg}} - T_{\text{env}})}{Q_{\text{com}} - Q(T_{\text{end}} - T_{\text{env}})} \right\} + \frac{\rho V h_{\text{mp}}}{Q_{\text{com}} - U(T_{\text{cha}} - T_{\text{env}})}$$

missä H on terminen aikavakio, Q_{com} on saattokaapelin teho putkimetriä kohden, Q on putken lämpöhäviö metriä kohden, T_{beg} on putken alkulämpötila celsius asteina, T_{end} on putken haluttu loppulämpötila celsius asteina, T_{env} on ympäristön lämpötila celsius asteina, ρ on putkessa olevan aineen tiheys, V on putken sisäinen tilavuus metriä kohden, h_{mp} on putkessa olevaan aineeseen sitoutunut sulamislämpö ja T_{cha} on putkessa olevan aineen olomuodon lämpötilamuutos celsius asteina. (SFS-EN 60079-30-2, 2020 s.17)

4.2.4 Muiden materiaalien laskeminen

Koska putkilinjoja oli tässä projektissa kolme ja jokaiseen putkilinjaan asennettiin varalle toinen sähkölämmityskaapeli, tarve oli 6 loppupäätteelle. Jokaiselle putkilinjalle oma lämmityssäädin sekä lämpötila-anturi, molempia 3 kappaletta. Jokaista lämmityskaapelia varten yksi syöttökytkentärasia, 6 kappaletta. Putkilinjat haluttiin rakentaa pajalla valmiiksi neljässä lohossa niiden pituuden vuoksi, jolloin jokaista lohkoa varten on laskettava kaksi lämmityskaapelijatkosta jokaista kaapelia kohden. On otettava huomioon, että viimeisen lohkon loppupäähän asennetaan loppupääte, sekä ensimmäisen putkilinjan alkupäähän syöttökytkentärasia, 18 kappaletta. Varoitustarrat 5 metrin välein, koska pajalla rakennetut lohkot tehdään 20 metrin pituisina, ei liitoskohtia tarvitse erikseen ottaa huomioon varoitustarrojen määrässä. Putkilinjojen yhteispituus on 184.9 metriä, saadaan summaksi 37. Kun tähän lisätään vielä jatkoksista ilmoittavat varoitustarrat, tarve on 55:lle varoitustarralle. Kaapelien mitoituksessa varataan yksi lisämetri kaapelia jokaista laippaa, toimilaitetta ja kannaketta kohden. Kannakkeita on raakavesilinjassa 4, kemiallisen vedenlinjassa ja lauhdevesilinjassa molemmissa 19. Koska kaikki putkilinjat saattolämmitetään kahdella kaapelilla, lämpöhäviöiden perusteella valitut kaapelit tulee laskea kaksinkertaisina. Raakavesilinjan pituus 28.9 metriä, tähän lisätään 4 metriä kannakkeille, saadaan yhden kaapelin mitaksi 33 m. Tarvitaan siis raakavesilinjan saattolämmitykseen 66 m 10BTV2-CT kaapelia. Kemiallisen veden linjalle yhtä kaapelia varten 99 metriä, 79.3 metriä putkilinjoille ja 19 metriä kannakkeille, yhteensä 198 metriä 5BTV2-CT kaapelia. Lauhdevesilinjaa varten 76.8 metriä ja 19 metriä kannakkeille, saadaan 192 metriä 4XTV2-CT-T3 kaapelia. Kiinnitykseen varataan kaksi metriä lasikuituteippiä jokaista putkilinjametriä kohden, yhteensä 370 metriä GS-54 teippiä. Yhden teippirullan pituus on 16 metriä, jolloin saadaan 24 rullaa teippiä. Taulukko 3. kokoaa tarvikkemäärät.

Taulukko 3. Yhteenveto saattolämmitysjärjestelmän materiaaleista.

BT-300-1P lämmityssäätimiä	3 kappaletta
JBM-100-L-EP merkkivalollisia kytkentärasioita	3 kappaletta
MONI-PT-100 lämpötila-antureita	3 kappaletta
S-150 lämmityskaapelijatkoksia	18 kappaletta
E-150 lämmityskaapelipäätteitä	6 kappaletta
Saattolämmityksen varoitustarroja	55 kappaletta

GS-54 lasikuituteippiä	24 rullaa
5BTV2-CT lämmityskaapelia	198 metriä
10BTV2-CT lämmityskaapelia	66 metriä
4XTV2-CT-T3 lämmityskaapelia	192 metriä

4.2.5 Kaapelityyppi

Laskentaohjelman mukaan lämmitykseen tulisi valita 8BTV2-CT tyyppinen kaapeli. Ohjelma ehdottaa tätä kaapeliksi laskennallisen 21.2 W/m tehohäviön perusteella, 8BTV2-CT kaapelin nimellinen lähtöteho on 10 °C lämpötilassa 25 W/m, jonka siis pitäisi riittää. Myös käsin laskiessa tuloksella 20.64 W/m päädyttäisiin samaan kaapelityyppiin. Ohjelma antaa kaapelin laskennalliseksi pituudeksi 44.9 metriä, putken pituuden ollessa 28.8 metriä, jolloin voidaan pitää ohjelman antamaa metrimäärää todenmukaisena. Piirissä on käytössä C-tyyppin 20 A johdonsuojakatkaisijat, jolloin voidaan taulukosta 4. tarkistaa maksimipituuden olevan 125 metriä, kuten ohjelma meille myös ilmoitti. Projektissa voisi siis ihan yhtä hyvin käyttää 8BTV2-CT kaapelia, mutta kylmempien kelien varalta työhön on valittu raakavesilinjaan yhtä kokoluokkaa isompi eli 10BTV2-CT kaapeli, jonka maksimipituus 85 metriä riittää.

Taulukko 4. Piirin maksimipituudet käytettäessä BTV-tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)

	3BTV2-CR 3BTV2-CT	5BTV2-CR 5BTV2-CT	8BTV2-CR 8BTV2-CT	10BTV2-CR 10BTV2-CT
Nimellinen lähtöteho (W/m 10 °C:ssa)	9	16	25	29

PIIRIN MAKSIMIPITUUS STANDARDIN EN 60898 MUKAAN, KUN KÄYTÖSSÄ C-TYYPPIN JOHDONSUOJAKATKAISIMET

Sähkösuojauksen arvo	Käynnistyslämpötila	Lämpökaapelin maksimipituus piiriä kohden (m)			
16 A	-20 °C	155	110	70	45
	+10 °C	200	160	110	65
20 A	-20 °C	195	140	90	55
	+10 °C	200	160	125	85
25 A	-20 °C	200	160	110	70
	+10 °C	200	160	125	105
32 A	-20 °C	200	160	125	90
	+10 °C	200	160	125	110

Yllä esitetyt luvut on tarkoitettu ainoastaan piirin pituuden arvioimiseen. Käytä tarkkojen tietojen selville saamiseen nVent TraceCalc-ohjelmistoa tai käänny paikallisen nVent -edustajan puoleen. nVent vaatii turvallisuuden takaamiseksi ja tulipalovaaran estämiseksi, että käytössä on 30 mA:n vikavirtasuojakytkin. Mikäli vuotovirta on laitteiston rakenteesta johtuen tätä suurempi, säädettävien laitteiden suositeltava laukaisutaso on 30 mA yli lämpökaapelin sisäisen kapasitatiivisen vuotovirran, jonka on määrittänyt lämpökaapelin valmistaja, tai vaihtoehtoisesti seuraava yleinen käytettävissä oleva ei-säädettävän laitteen laukaisutaso, mutta korkeintaan 300 mA. Kaikista turvallisuusnäkökohdista on oltava todisteet.

Kemiallisen veden lämpötilahäviöksi saatiin ohjelmalla 15.1 W/m ja kaapelin laskennalliseksi pituudeksi 108.4 metriä. Putken pituus on 79.3 metriä, joten metrilukemaa voidaan pitää realistisena. Tämä piiri on varustettu 16 ampeerin C-tyypin johdonsuojakatkaisijalla. Ohjelma tarjoaa käytettäväksi kaapeliksi myös tähän 8BTV2-CT kaapelia, mutta koska linjan maksimipituus on vain reilun metrin päässä laskennallisesta pituudesta, valittiin varmuuden vuoksi yhtä kokoluokkaa pienempi kaapeli 5BTV2-CT, jolloin teho vieläkin riittää lämmittämään putkea ja putken maksimipituutta saadaan kasvatettua hieman kauemmaksi laskennallisesta pituudesta. Tässäkin kohtaa olisi voinut valita yhtä hyvin kumman tahansa kaapelityypin. Käsin laskettaessa päädyttiin myös 5BTV2-CT kaapeliin lämpöhäviön jäädessä 10.6 W/m.

Lauhdevesi putkilinjassa on myös C-tyypin 16 A johdonsuojakatkaisija ja putken pituus 76.8 metriä. TraceCalc ohjelma laskee linjan tehohäviöksi 9.2 W/m ja todellisen kaapelimäärän olevan 120 metriä. Vastaava lukema käsin laskiessa on 9.0 W/m. Koska putkilinjan käyttölämpötila on 85 °C, BTV- tuoteperheen kaapelit eivät sovellu linjaan ja siksi linjaan valitaan XTV- tuoteperheen kaapelit. Tässäkin putkilinjassa sekä laskentaohjelma että käsin laskenta tuottavat lopputulokseksi saman kaapelityypin. Valinta kohdistuu 4XTV2-CT-T3 kaapeliin (Taulukko 5).

Taulukko 5. Piirin maksimipituudet käytettäessä XTV-tuoteperheen lämmityskaapeleita. (Nvent Raychem, 2022)

	4XTV2-CT-T3	8XTV2-CT-T3	12XTV2-CT-T3	15XTV2-CT-T3	20XTV2-CT-T2
Nimellinen lähtöteho (W/m 10 °C:ssa)	12	25	38	47	63

PIIRIN MAKSIMIPITUUS STANDARDIN EN 60898 MUKAAN, KUN KÄYTTÖSSÄ C-TYYPIN SUOJAKATKAISIMET

Sähkösuojauksen arvo	Käynnistyslämpötila	Lämpökaapelin maksimipituus piiriä kohden (m)				
16 A	-20 °C	145	90	65	55	40
	+10 °C	170	105	75	60	45
25 A	-20 °C	225	145	105	85	65
	+10 °C	245	165	120	95	70
32 A	-20 °C	245	175	135	105	80
	+10 °C	245	175	140	125	90
40 A	-20 °C	245	175	140	135	110
	+10 °C	245	175	140	135	110

Yllä esitetyt luvut on tarkoitettu ainoastaan piirin pituuden arvioimiseen. Käytä tarkkojen tietojen selville saamiseen nVent RAYCHEM TraceCalc-ohjelmistoa tai käännä paikallisen nVent -edustajan puoleen. nVent vaatii turvallisuuden takaamiseksi ja tulipalovaaran estämiseksi, että käytössä on 30 mA:n vikavirtasuojajytkin. Mikäli vuotovirta on laitteiston rakenteesta johtuen tätä suurempi, säädettävien laitteiden suositeltava laukaisutaso on 30 mA yli lämpökaapelin sisäisen kapasitatiivisen vuotovirran, jonka on määrittänyt lämpökaapelin valmistaja, tai vaihtoehtoisesti seuraava yleinen käytettävissä oleva ei-säädettävän laitteen laukaisutaso, mutta korkeintaan 300 mA. Kaikista turvallisuusnäkökohdista on oltava todisteet.

4.2.6 Kaapelipituus ja toimintavirta

Raakavesiputken tehontarpeen laskettiin olevan 20.64 W/m. Lämmityskaapelin pituus on 33 m, on kokonaistehontarve tällä lämmityskaapelilla 681 W. Koska molempia lämmityskaapeleita on tarkoitus syöttää samalta sähkölähdöltä lasketaan tilanne, jossa molemmat kaapelit lämmittäisivät -40 celsiusasteen lämpötilassa. Aloitetaan laskemalla Ohmin lain mukaan ylikuormitussuojan koko ja kaapelilta vaadittava kuormitettavuus. Piirin operatiivinen tehontarve on siis 1362 W. Kaapelin ollessa 10BTV- tyyppiä nimellisteho lämmityskaapelimetriä kohden on 29 W ja kokonaisteho silloin 1914 W.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1914 \text{ W}}{219 \text{ V}} = 8.74 \text{ A} \quad (21)$$

Yhtälön (21) mukaisesti saamme operatiiviseksi virraksi 8.74 A, jolloin teoriassa ylikuormitussuojana riittäisi 10 A gG-tyypin sulake mutta 10BTV2-CT lämmityskaapelin valmistajan ohjeiden mukaisesti on valittava vähintään 16 A gG-tyypin ylikuormitussuoja, jotta valmistajan vaatimukset täyttyvät. Kun ylikuormitussuoja on 16 A, perusvaatimus kaapelille on 18 A kuormitettavuus. (Sähkö- ja Teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)

Korjauskertoimet:

$$k_1 = \text{lämpötila } +30 = 0.94$$

$$k_2 = \text{viereiset kaapelit 8 kpl} = 0.72$$

$$k_3 = \text{lämpöeriste läpivientien kohdalla 100 mm} = 0.81 \quad (22)$$

missä k_1 korjauskerroin on PVC-vaippaisen kaapelin lämpötilakerroin, kun ympäristön lämpötila on +30 °C ja k_2 korjauskerroin on kaapelin lämpötila kerroin, kun yhdessä kerroksessa vaakasuuntaisella tikashyllyllä on 8 muuta monijohdinkaapelia syöttökaapelin lisäksi. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)

$$\text{kokonaiskorjauskerroin} = k_1 \times k_2 \times k_3 \quad (23)$$

Yhtälöllä (23) saadaan korjauskertoimeksi 0.55.

$$\text{Kaapelilta vaadittu kuormitettavuus} = \frac{\text{Kuormitettavuus}}{\text{kokonaiskorjauskerroin}} = \frac{18 \text{ A}}{0.55} \quad (24)$$

Kaapelilta vaaditaan yhtälön (24) mukaisesti korjauskertoimien lisäämisen jälkeen 32.8 A kuormitettavuutta. Pinta-asennuksena asennettaviin kaapeleihin käytetään laskelmissa

asennustapaa C. Suomessa yleisimmin käytetyt syöttökaapelityypit ovat MCMK, MARM ja MLJRM. (Sähkötieto ry, 2007)

Käytettäväksi kaapeliksi on valittava C asennustavan mukaan vähintään 4 mm² kuparikaapeli. Jolloin johdon kuormitettavuus on maksimissaan 34 A. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)

Suomessa lämmityspiiriltä vaaditaan 5 sekunnin poiskytkentäaika. 16 A gG- ylikuormitus-suoja vaatii 65 A oikosulkuvirran toimiakseen 5 sekunnissa. Keskuksella oikosulkuvirta on 180 A, josta saadaan silmukkaimpedanssiksi Z_v ryhmäkeskukselle.

$$Z_v = \frac{(cU)}{(\sqrt{3}I_{ksb})} \quad (25)$$

Yhtälöllä (25) saadaan $Z_v = 1.22 \Omega$. Sallittu johtopituus l saadaan (Sähkötieto ry, 2007)

$$l = \frac{\left[\frac{(cU)}{((\sqrt{3}I_k) - Z_v)} \right]}{(2z)} \quad (26)$$

missä I_k on pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta ampeereina, I_{ksb} on oikosulkuvirta sähkökeskuksella, c on kerroin ($c = 0.95$), joka ottaa huomioon jännitteenaleneman liittimissä, johdoissa, sulakkeissa ja kytkimissä, U on pääjännite voltteina, Z_v on impedanssi ennen suojalaitetta ja z on suojattavan johtimen ominaisimpedanssi Ω/km . 4 mm² kuparin impedanssina käytetään arvoa $Z_{Cu} = 5.480 \Omega/\text{km}$. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2017)

Syöttökaapelin maksimipituudeksi saadaan 197 m jotta poiskytkennän ehdot toteutuvat 5 sekunnissa ja 70 metriä, jotta ehdot täyttyvät 0.4 sekunnissa.

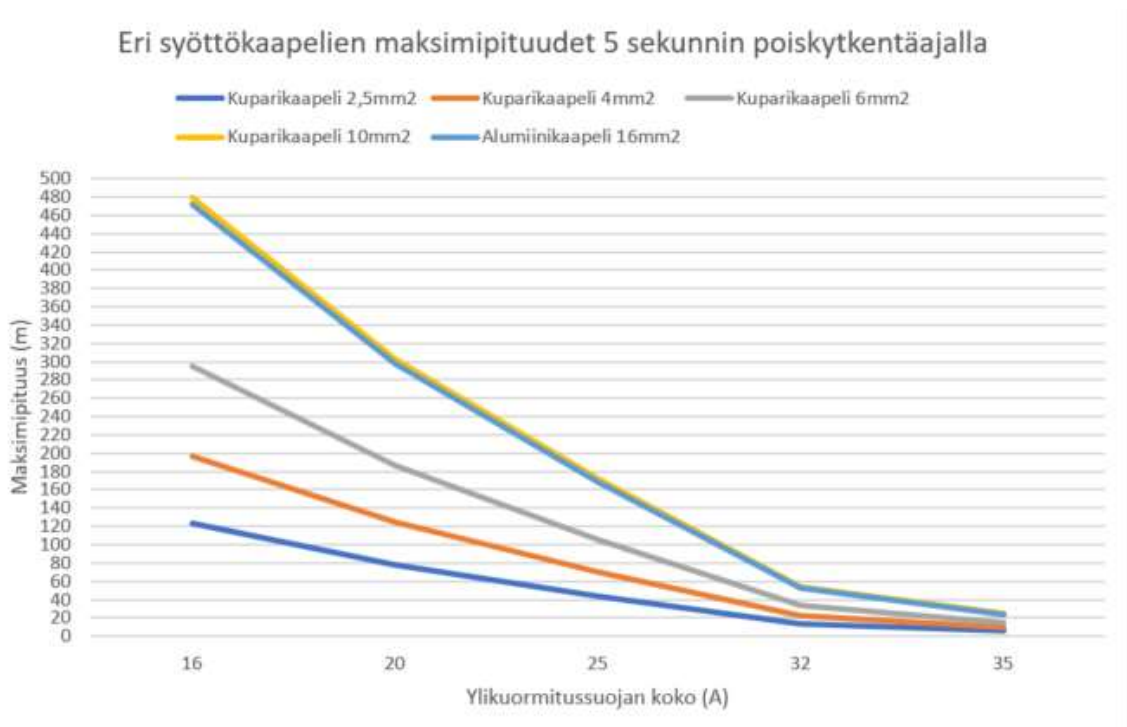
Mikäli valittaisiin 20 A gG- ylivirtasuoja ja vaihdettaisiin kaapeliksi 6 mm² kuparikaapeli, tulisi yhtälöä (26) käyttäen syöttökaapelin maksimipituudeksi tulisi 186 metriä, jotta poiskytkennän ehdot toteutuvat viidessä sekunnissa. Kaapelin impedanssi Z_{cab} on

$$Z_{cab} = 2 \times l \times Z_{Cu} \quad (27)$$

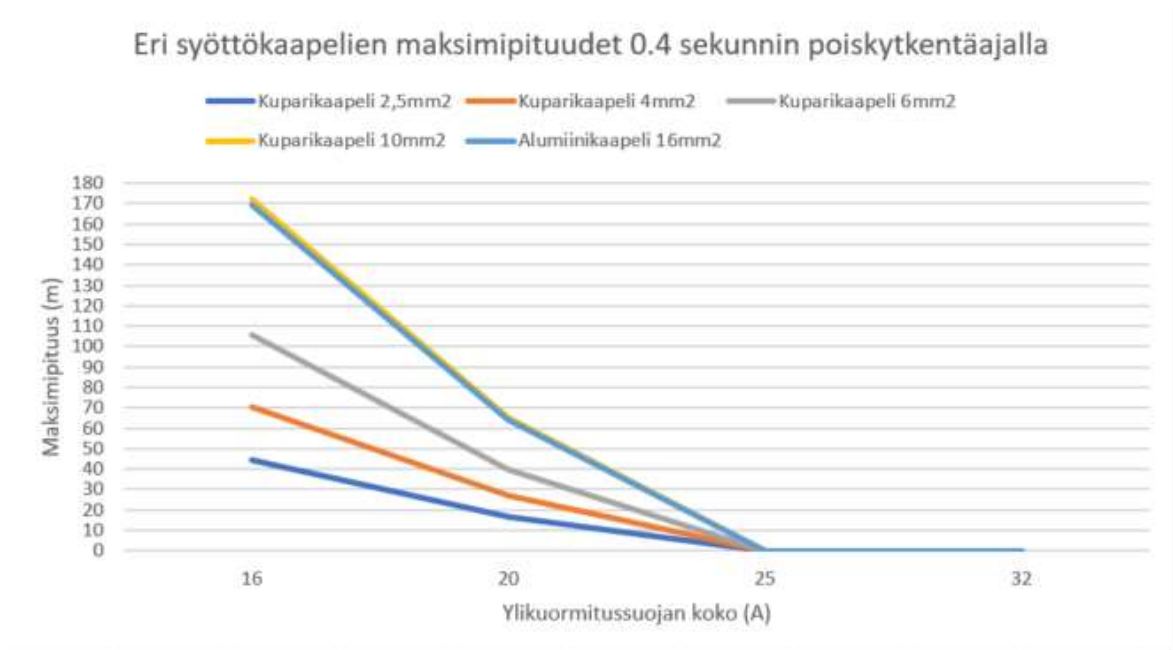
Maksimipituisen syöttökaapelin loppupään impedanssi saadaan lisäämällä yhtälön (27) tulos ryhmäkeskuksen silmukkaimpedanssiin. Yhtälössä (27) l on kaapelin maksimipituus ja Z_{Cu} on kaapelin impedanssi Ω/km . jolloin saadaan kaapelin impedanssiksi 2.155Ω ja loppupään impedanssiksi $Z_{cab} + Z_{rk} = 3.372 \Omega$. Oikosulkuvirta I_k on

$$I_k = \frac{219 V}{3.372 \Omega} \quad (28)$$

Jolloin vastaava oikosulkuvirta syöttökaapelin loppupäässä yhtälön (28) mukaan on 65 A. Kun 16 A gG- ylikuormitussuoja vaatii toimiakseen viidessä sekunnissa 65 A oikosulkuvirran, voidaan todeta suojauksen toimivan 4 mm² kuparikaapelin maksimipituudessa tarkoitetulla tavalla. Mikäli valittaisiin 20 A ylikuormitussuoja ja 6 mm² kuparikaapeli, tulisi loppupään impedanssiksi 2.578 Ω ja oikosulkuvirraksi 85 A. Kun 20 A ylikuormitussuoja vaatii toimiakseen 85 A oikosulkuvirran, nähdään että myös tämä ratkaisu toimii tarkoitetulla tavalla. Syöttökaapelien maksimipituudet esitetty kuvissa 26 ja 27.



Kuva 26. Sallitut syöttökaapelien maksimipituudet 5 sekunnin poiskytkentäajalla gG- tyy-
pin ylikuormitussuojilla.



Kuva 27. Sallitut syöttökaapeli maksimipituudet 0.4 sekunnin poiskytkentäajalla gG-tyypin ylikuormitussuojilla.

Kuvissa 26. ja 27. esitetyt maksimipituudet ovat laskennallisia sallittuja syöttökaapelipituuksia projektin syöttökeskuksen ja kaapelireitin perusteella. Kuvissa ei ole otettu huomioon kaapeleiden tai ylikuormitussuojien kuormitettavuusvaatimuksia.

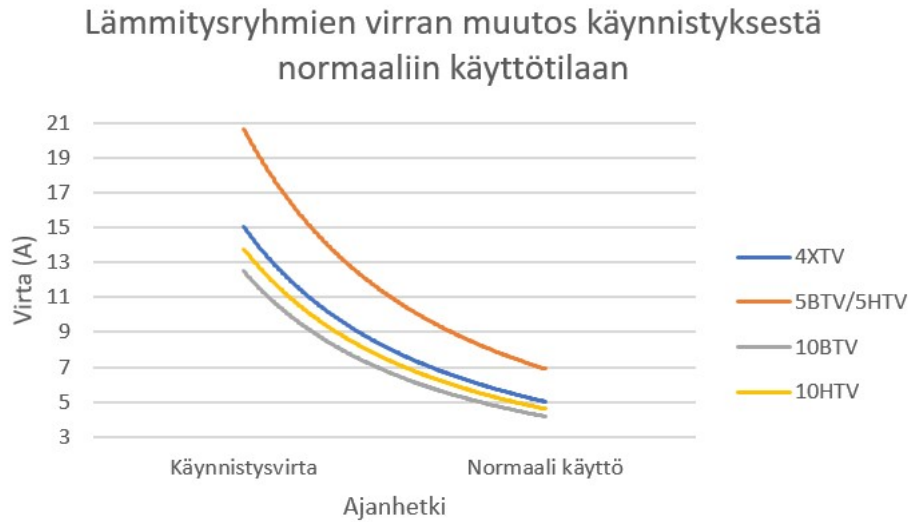
Tarkat laskennalliset maksimipituudet eri syöttökaapeleilla esitetty liitteessä 5.

4.2.7 Käynnistysvirta

Lämmityskaapelin resistanssi on pienimmillään kylmässä ympäristössä. Tästä johtuen itsesäätävän lämmityskaapelin päälle kytkentä vaiheessa syntyy 2-3ertainen virtapiikki nimellisvirtaan verrattuna. (Ensto, Sulanapitojärjestelmät, 2022).

Nimellinen käynnistysvirta BTV-kaapeleille saadaan laskettua Taulukon 4. arvoilla ja XTV-kaapeleille Taulukon 5. arvoilla, käyttämällä sähkötehon yhtälöä (21). Taulukoissa nimellisteho on ilmoitettu metriä kohden, jolloin nimellistehossa pitää huomioida koko piirin pituus.

Lämmitysryhmien virran muutos käynnistyshetkestä käyttötilaan esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Lämmitysryhmien virran muutos käynnistyshetkestä normaaliin käyttötilaan.

Näin saadaan virraksi lauhdevesilinjalle 5.01 A, kemialliselle vedelle 6.89 A ja raakavedelle 4.16 A. Koska käynnistysvirta saattaa olla 2-3 -kertainen, otamme huomioon tässä vaiheessa pahimman mukaan kolminkertaisena, jolloin hetkellinen käynnistysvirta lauhdevesilinjalla on 15.03 A, kemiallisella vedellä 20.66 A ja raakavedellä 12.48 A.

4.2.8 Kapasitiivinen vuotovirta

Lämpökaapelista voidaan laskea kapasitiivinen vuotovirta I_c yhtälöllä (29). Normaalipituissa lämmityskaapelipiireissä kapasitiivinen vuotovirta on yleensä korkeintaan muutaman milliampeerin luokkaa, vaikka syöttökaapeli otettaisiin huomioon.

$$I_c = \frac{4\pi^2 f \varepsilon_0 \varepsilon_s 1U}{\ln \frac{D}{d}} \quad (29)$$

Jossa f on taajuus, ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, ε_s on eristeen suhteellinen permittiivisyys, U on vaipan ja johtimen välinen keskimääräinen jännite, d on eristeen sisähalkaisija (mm) ja D on eristeen ulkohalkaisija millimetreinä. Projektin tapauksessa kapasitiiviseksi vuotovirraksi jäi 8 μ A.

5 Yhteenveto

Tutkimus vastasi sille asetettuja tavoitteita siinä määrin, että hanke saatiin toteutettua tarkoituksenmukaisesti. Tutkimuksen aikana saatiin arvokasta dataa lämmitysjärjestelmän toteutuksesta osissa sekä lämmitysjärjestelmän lämpöhäviöistä. Tulevaisuudessa tämän tyyppisen asennusmenetelmän hyödyntäminen on mahdollista laajemminkin. Lämmitysjärjestelmien lämpöhäviöitä on tutkittu runsaasti aiemminkin ja tämä tutkimus vastasi aiempia tutkimuksia tältä osin. Tutkimus oli rajattu käsittelemään lämmitysjärjestelmiä ainoastaan hankkeen laajuudessa.

5.1 Tulosten pohdinta

Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että on asennus- ja huoltokustannusten myötä taloudellisempaa korvata XTV-tyyppiset kaapelit HTV-tyyppisillä kaapeleilla pitkällä aikavälillä. Toistaiseksi BTV-lämmityskaapeleiden reilusti edullisempi metrihinta ei puolla näiden korvaamista vastaavilla HTV-kaapeleilla taloudellisin perustein. Ympäristöystävällisyys ja vaivattomuus näkökulmien kannalta HTV-lämmityskaapelointi voidaan todeta perustelluksi, mikäli asennuskohde on erittäin haastavassa tai tuotannon kannalta merkittävässä paikassa. Tuloksien perusteella voidaan todeta lämmityskaapeleiden liian optimistisella suunnittelulla olevan merkittävä vaikutus kustannuksiin, mikäli asennus on hankalasti huollettavassa tai vaihdettavassa kohteessa. Lämmityskaapelijatkoksilla ei ole vaikutusta lämpöhäviöihin, mutta säätimien valinnalla ja oikealla ohjelmoinnilla saadaan tehtyä merkittäviä säästöjä kustannuksiin.

Liitántärsioiden sijoittelulla ja oikeisiin lisävarusteisiin sijoittamalla saadaan kasvatettua huomattavasti järjestelmän käyttömukavuutta sekä vikojen havainnointia hankalissa kohteissa. Mikäli järjestelmään sisältyy paljon vikaantuvia komponentteja, on erityisen tärkeää lisätä järjestelmään myös toimintakykyä indikoivia toimilaitteita.

5.2 Johtopäätökset

Saattolämmitysjärjestelmän lämmönsiirtokäyttötymisen tuntemus on olennaista taloudellisen ja teknisesti toimivan järjestelmän suunnittelulle ja toteutukselle. Saattolämmitysjärjestelmän kasvattaminen tai muuttaminen jälkikäteen on yleensä erittäin haastavaa, jolloin asennusvaiheessa on tärkeää tunnistaa asennustyöhön liittyvät riskit sekä järjestelmän toimintaperiaatteet. Useimmiten myös parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi on ajateltava pitkäjänteisesti sekä ymmärrettävä että saattolämmitysjärjestelmällä tavoitellaan pitkän aikavälin hyötyä, suurimmat kustannukset vuositasolla muodostuvat kuitenkin pääosin asennus-, huolto ja ylläpitotöiden kuluista. Nykyisin myös ajatellaan paljon ympäristöystävällisyyttä, jonka parantaminen muodostuu helpoiten suunnittelemalla järjestelmän käyttöikä mahdollisimman pitkälle aikavälille. Sähkösaattoprojektin toteutuksessa on selkeä työjärjestys, jolloin hyvä kommunikaatio putkiasentajien, sähköasentajien ja eristeasentajien välillä on erityisen tärkeää aikataulutavoitteiden saavuttamiseksi ja hävikkimateriaalien minimoimiseksi.

5.3 Jatkotutkimusehdotukset

Sopiva jatkotutkimusaihe tälle diplomityölle olisi analysoida myös konduktiivisen ja induktiivisen lämmityksen lämpöhäviöiden kannalta ja tehdä vertailua eri lämmitysmuotojen välillä. Konduktiivisen ja induktiivisen lämmityksen sopivuutta erilaisiin kohteisiin olisi myös syytä tutkia tarkemmin. Nykyaikana sähkön hinta on korkealla ja lämmitykseen kuluvan energian määrä suuri, jolloin kustannukset ovat merkityksellisiä jopa alan suuremmille toimijoille. Lisäksi sähkölämmitysjärjestelmiä kehitetään suurella tehokkuudella, jolloin on mahdollista saada entistä parempia tutkimustuloksia jo muutaman vuoden kuluessa.

Lähteet

Nvent Raychem, 2021. XTV- Itsesäätyvä lämpökaapeli, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 13.3.2022] 3 s. Saatavissa: <https://raychem.nvent.com/sites/g/files/hdkjer246/files/acquiadam/2021-07/RAYCHEM-DS-EU1382-XTV-FI.pdf>

Nvent Raychem, 2021. BTV- Itsesäätyvä lämpökaapeli, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 13.3.2022] 3 s. Saatavissa: <https://raychem.nvent.com/sites/g/files/hdkjer246/files/acquiadam/2021-07/RAYCHEM-DS-EU1380-BTV-FI.pdf>

Nvent Raychem, 2022. HTV- Itsesäätyvä lämpökaapeli, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022] 4 s. Saatavissa: <https://raychem.nvent.com/sites/g/files/hdkjer246/files/acquiadam/2022-03/RAYCHEM-DS-H86869-HTV-EN.pdf>

Pentair thermal building solutions, 2004-2016. Raychem lämpökaapelit. putkien sulanapitojärjestelmä. Itsesäätyvien lämpökaapeleiden yleiset asennusohjeet.

Ympäristöministeriö. Lämmitysjärjestelmät ja lämmin käyttövesi - laskentaohje. 15.9.2011. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.3.2022] 133 s. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/no-name/%7BCA99FFCB-627B-48C8-8EB0-607F36B178A5%7D/30751>.

Mikaél A. Bramson: Infrared Radiation, A Handbook for Applications, Plenum press, N.Y (1968)

Taloon.com. Lämmönjohtavuus [verkkojulkaisu]. [viitattu 18.3.2022]. Saatavissa: <https://www.taloon.com/rakentajan-tietopankki/termisto/lammonjohtavuus>

Infradex Oy, 2003. Emissiivisyystaulukot. [verkkodokumentti]. [viitattu 18.3.2022] 18 s. Saatavissa: <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/emissiivisyys.pdf>

Ilmatieteenlaitos. Sää ja meri, havaintojen lataus. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.5.2022]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

Planray Oy (2022), BT-300-1P Tekniset tiedot, Tuote-esite [verkkodokumentti]. [viitattu 20.5.2022] 3 s. Saatavissa: <https://bluetrace.mycashflow.fi/files/BlueTrace%20Tekniset%20Tiedot/BT-300-1P%20TEKNISET%20TIEDOT%20r1.6.pdf>

Lapp automaatio Oy (2022), Saattolämpötila-anturi. [verkkojulkaisu]. [viitattu 25.5.2022]. Saatavissa: <https://www.epicsensors.fi/tuotteet/lampotila-anturit/23-saattolampotila-anturi/>

Lapp automaatio Oy, 2016. Miten pt100-anturi toimii. [verkkojulkaisu]. [viitattu 1.8.2022]. Saatavissa: [Miten Pt100-anturi toimii? | EPIC® SENSORS \(epicsensors.fi\)](https://www.epicsensors.fi/tila-anturi-toimii/)

Planray Oy (2022), SkyTrace – Trace heating software. [verkkojulkaisu]. [viitattu 1.8.2022]. Saatavissa: <https://en.planray.com/page/13/skytrace>

Suomen Standardoimisliitto SFS. Helsinki SFS. SFS-EN 60079-30-2. Räjähdyksvaaralliset tilat. Osa 30-2 Sähkösaatot. Soveltamisohjeita suunnitteluun, asentamiseen ja kunnossapitoon 2. painos. 2017.

Mills, A.F. (1999). Basic heat and mass transfer, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), 1000 p.

Planray Oy (2022), PlanControl – Trace heating control system. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.8.2022]. Saatavissa: <https://en.planray.com/page/14/plancontrol---trace-heating-control-system>

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, Sähköinfo Oy, D1-2017 käsikirja rakennusten sähköasennuksista 25. painos 2017.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes (2022). Sähköasennusten käyttöönottovaiheen tarkastukset. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.8.2022]. Saatavissa: [Sähköasennusten käyttöönottovaiheen tarkastukset | Turvallisuus- ja kemikaalivirasto \(Tukes\)](https://www.tukes.fi/tila-anturi-toimii/)

1434/2016 Valtioneuvoston asetus sähkölaitteistoista, Finlex. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.8.2022]. Saatavissa: [Valtioneuvoston asetus sähkölaitteistoista 1434/2016 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX ®](https://www.finlex.fi/asiat/sahkolaitteistoista-1434-2016)

Nvent Raychem, 2021. Itsesäätyvät ja itserajoittuvat lämpökaapelijärjestelmät - Asennus- ja huolto-opas. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.8.2022]. Saatavissa: <https://origin->

[raychem.nvent.com/sites/g/files/hdkjer246/files/acquiadam/2021-01/RAYCHEM-IM-DOC71-SelfRegHeatingCable-FI.pdf](https://www.raychem.nvent.com/sites/g/files/hdkjer246/files/acquiadam/2021-01/RAYCHEM-IM-DOC71-SelfRegHeatingCable-FI.pdf)

Nvent Raychem, 2022. S-150 matalaprofiilinen jatkospakkaus, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 10.8.2022] 3 s. Saatavissa: <https://www.nvent.com/fi-fi/raychem/products/low-profile-splice-kit-0>

Nvent Raychem, 2022. E-150 matalaprofiilinen päätetiivistesarja, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 10.8.2022] 3 s. Saatavissa: <https://www.nvent.com/fi-fi/raychem/products/low-profile-end-seal-kit-0>

Nvent Raychem, 2022. usean sisääntulon virta- /T-liitäntä polymeerisellä liitäntärasialla, Tuote esite [verkkodokumentti]. [viitattu 10.8.2022] 3 s. Saatavissa: <https://www.nvent.com/fi-fi/raychem/products/multiple-entry-powertee-connection-polymer-junction-box-0>

Caverion Industria Oy, 2022, Sähkösaatto ja saattolämmitys varmistavat teollisuuslaitoksesi toiminnan. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.8.2022]. Saatavissa: <https://www.caverion.fi/katalogi/palvelut/sahkosaatto/>

Promaint ry, Toni Piirainen, 2013, Viisi periaatetta kustannussäästöihin teollisuuden sähkölämmityksissä. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2022]. Saatavissa: <https://promaint-lehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Viisi-periaatetta-kustannussaaostoihin-teollisuuden-sahkolammityksissa/>

Nvent Raychem 2022, Itsesäätely teknologia [verkkojulkaisu]. [viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: <https://www.traceheating-cables.co.uk/self-regulating-technology.html>

Sähkötieto ry, Sähköinfo Oy, ST-ohjeisto 11, Teollisuuden lämpökaapelit, suunnittelu ja asennus, 2007. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/SAH_LAMPO_ja_VALO/L%C3%A4mmitystekniikka-s-16/ST-ohjeisto-11_Teollisuuden%20%C3%A4mmityskaapelit.pdf

Ensto Finland Oy (2022), Sulanapitojärjestelmät. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: <https://www.sahkonumerot.fi/0430163/id/2298/doc/brochure/>

Nvent Raychem (2016), Installation and Maintenance Manual for Self-Regulating and Power-Limiting Heating Cable Systems. [verkkodokumentti]. [viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: <https://www.manualslib.com/manual/1487421/Nvent-Raychem-Btv.html#manual>

A. Nysveen, H. Kulbotten, Lervik, A. H. Bomes and M. Hoyer-Hansen, "Direct electrical heating of subsea pipelines - technology development and operating experience," *Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2005, pp. 177-187, doi: 10.1109/PCICON.2005.1524553. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1524553?arnumber=1524553>

ElProCus Technologies Pvt Ltd. (2022), Induction Heating Principle and It's Applications. [verkkojulkaisu]. [viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: <https://www.elprocus.com/induction-heating-principle-and-its-applications/>

Planray Oy, BlueTrace käyttöohje 2011, [verkkodokumentti]. [viitattu 22.8.2022]. Saatavissa: BlueTrace kayttohje v1.4.pdf (mycashflow.fi)

Nieminen, AJ. 2022. Vaihe-ero ja resonanssi. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.9.2022]. Saatavissa: <http://www.kotiposti.net/ajnieminen/sa18.pdf>

Danfoss Oy, Putken jäätymis-suojaus, 2022 . [verkkodokumentti]. [viitattu 28.9.2022]. Saatavissa: https://devi.danfoss.com/media/2581/fi_dev_i_am_pipes_vgluf117_lores.pdf

Liite 1. Eristevahvuuden vaikutukset DN100 ja DN350 putkien lämpöhäviöihin, ilmanlämpötilassa 0 °C ja -10 °C. Nesteenä 20 °C Vesi ja eristemateriaalina kivivilla.

Eristevahvuus	Lämpöhäviö W/m		Lämpöhäviö W/m	
	DN100, 0C°	DN100, -10C°	DN350, 0C°	DN350, -10C°
0	44,05826	132,1747708	135,5817	406,7451876
10	5,713622	17,14086733	16,72852	50,18554724
20	3,262285	9,78685599	9,1341	27,40229982
30	2,368286	7,104859151	6,379767	19,13930184
40	1,902764	5,708290607	4,955331	14,86599408
50	1,615889	4,847667955	4,08415	12,25244892
60	1,420612	4,261835346	3,49582	10,48746053
70	1,278623	3,835868716	3,071496	9,214486854
80	1,170415	3,51124524	2,750751	8,252252325
90	1,084999	3,25499799	2,499611	7,498833499
100	1,015708	3,047123504	2,297506	6,892518405

Liite 2. Kuukausien keskilämpötilat Porin Rautatieaseman mittauspisteellä 2017 touko-
kuusta alkaen.

Vuosi	Kuukausi	Keskilämpötila C°
2017	5	8,2
2017	6	13,2
2017	7	15,7
2017	8	15,1
2017	9	11
2017	10	4,8
2017	11	2,9
2017	12	0,5
2018	1	-2,7
2018	2	-7,7
2018	3	-4,4
2018	4	4,3
2018	5	14,5
2018	6	14,1
2018	7	21,2
2018	8	17,6
2018	9	13,1
2018	10	6,4
2018	11	3
2018	12	-1,4
2019	1	-5,4
2019	2	-0,9
2019	3	-0,2
2019	4	6,4
2019	5	9,9
2019	6	16,3
2019	7	16,8
2019	8	16,2
2019	9	10,8
2019	10	4,5
2019	11	1,1
2019	12	1,6

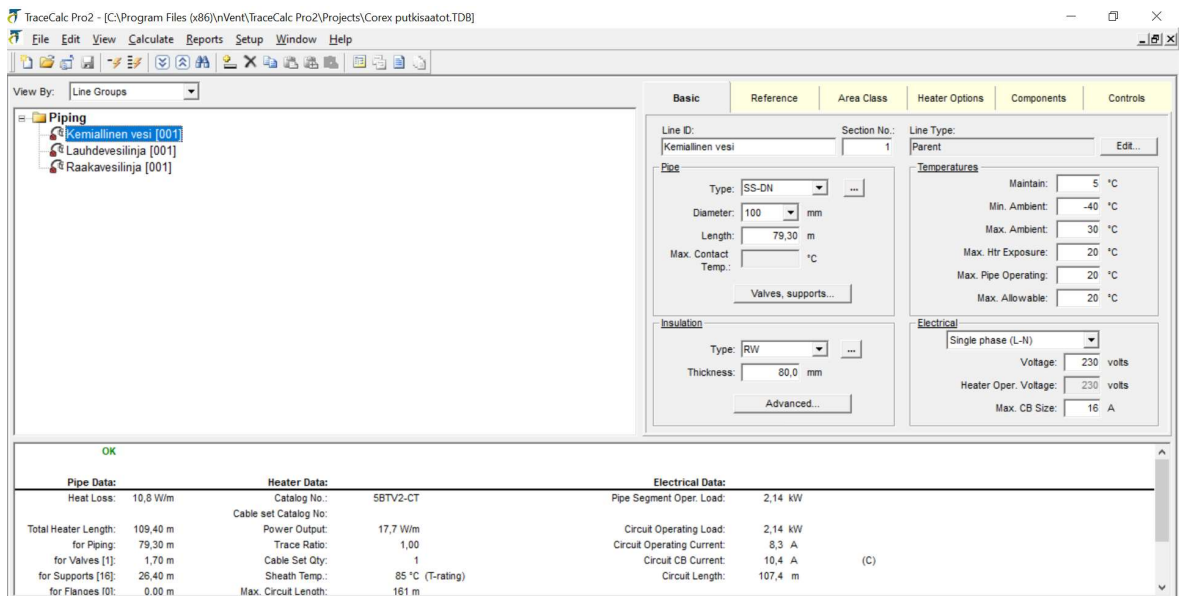
Vuosi	Kuukausi	Keskilämpötila C°
2020	1	2,6
2020	2	0,5
2020	3	1,4
2020	4	4,2
2020	5	8,3
2020	6	18,4
2020	7	15,4
2020	8	16,2
2020	9	12,8
2020	10	7,9
2020	11	5,1
2020	12	1,2
2021	1	-4,1
2021	2	-6,5
2021	3	0,3
2021	4	4
2021	5	9,8
2021	6	18,2
2021	7	19,9
2021	8	15,3
2021	9	9,7
2021	10	8,1
2021	11	1,4
2021	12	-5,7
2022	1	-2,8
2022	2	-2,2
2022	3	1,1
2022	4	3,5

Liite 3. Laskentatyökalu TraceCalc Pro 2

Nvent Raychem suosittelee käyttämään mitoituksessa apuna omaa TraceCalc Pro 2 laskentatyökaluaan. Koska projektiin oli jo valittu Nvent Raychemin tuotteet, myös ohjelma sopii hyvin käytettäväksi tässä työssä.

Laskentaohjelman käyttö

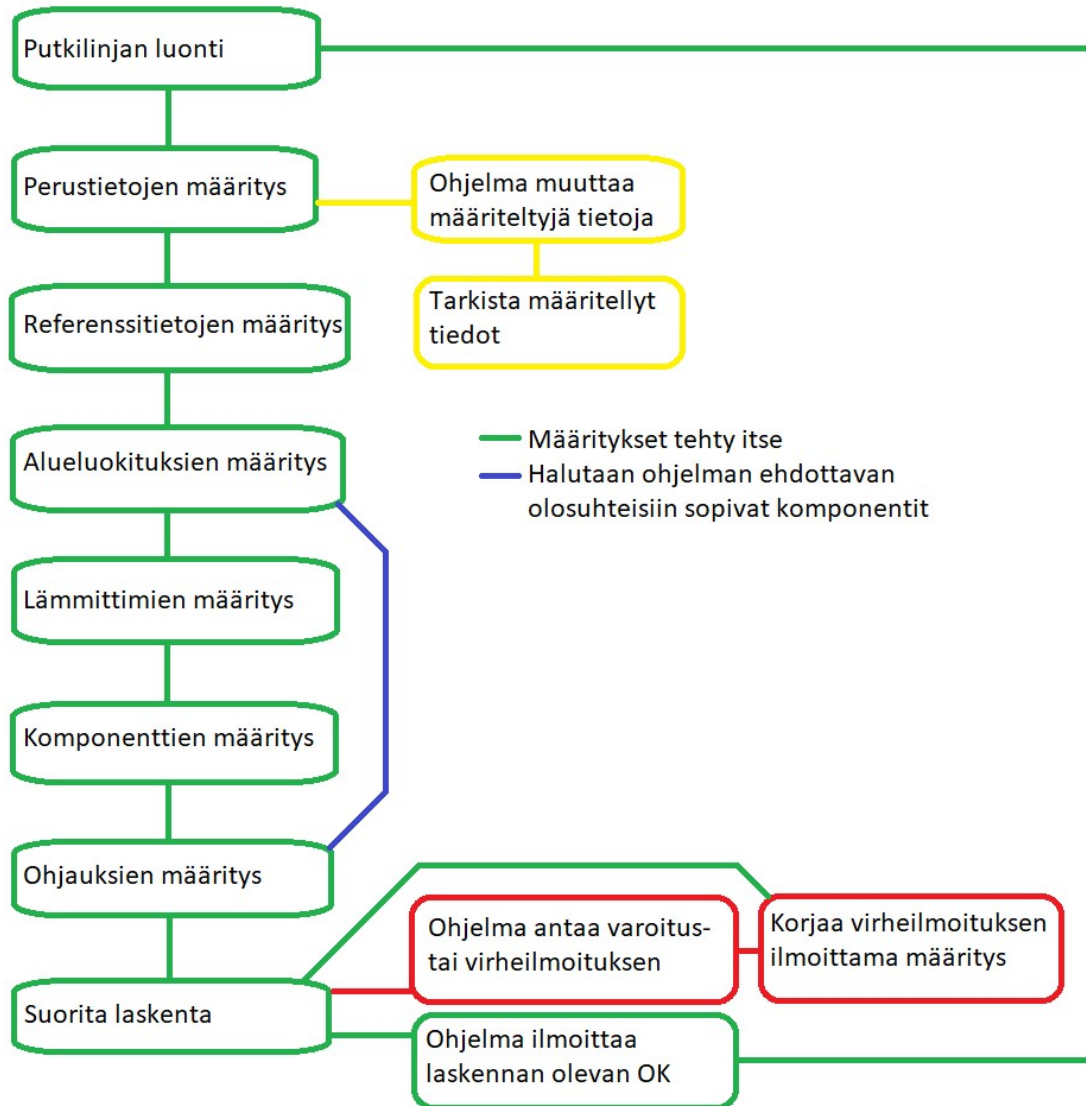
Kun sovellus käynnistetään, avautuu Kuvan 1. mukainen aloitusnäkö.



Kuva 29. TraceCalc Pro2 aloitusnäkö.

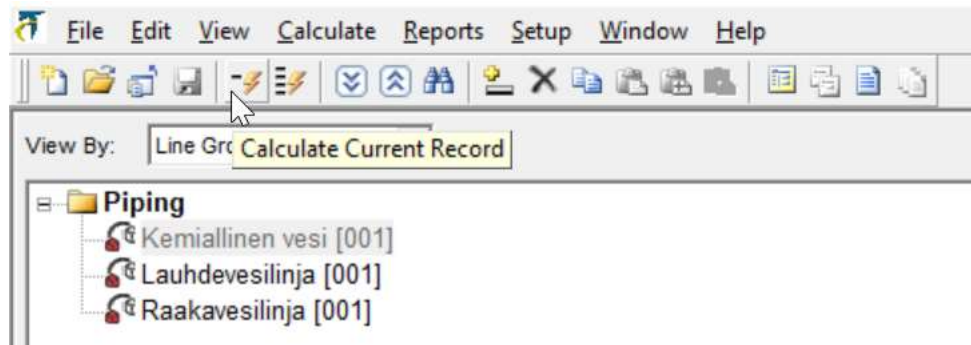
Keskellä vasemmalla on listaus kaikista muodostetuista putkilinjoista, näiden välillä pystytään siirtymään ilman rajoituksia. Jokaista putkilinjaa kohden on määriteltävä tiettyjä tietoja laskennan suorittamiseksi. Tietoja pystytään asettamaan keskeltä oikealta, josta löytyvät

omat ikkunansa perustietoja, olosuhteita, alueen luokituksia, lämmityslaitteita, syöttö- ja päätekomponentteja ja ohjaustapoja varten. Kuvassa 2. on esitetty vuokaavio toiminnasta.



Kuva 30. TraceCalc Pro2, toiminnan vuokaavio.

Kun pyydetyt tiedot on asetettu välilehdille, ylhäällä olevasta kuvakerivistöstä pystytään tekemään laskenta Kuvan 3. mukaisesti joko yhdelle putkilinjalle kerrallaan tai kaikille tehdyille putkilinjoille samanaikaisesti.



Kuva 31. TraceCalc Pro2, saattolämmityslinjan laskentapainike

Tämän jälkeen aloitusnäkymän alareunaan ilmestyy joko OK tai virheilmoitus ja selite mikä annettu tieto on virheellinen. Kun ohjelma hyväksyy määritellyt tiedot, alapuolelle tulevat laskennan tulokset. Ohjelma ilmoittaa tehohäviön, laskennallisen lämmityskaapelimäärän eriteltyinä koko matkalta, putkilinjojen osuudelta, venttiilien osuudelta, kannakkeiden osuudelta sekä laippojen osuudelta.

Mikäli ohjelmaa ei ole pakotettu käyttämään tiettyä kaapelityyppiä, ohjelma ehdottaa mielestään sopivinta kaapelia järjestelmään annettujen tietojen perusteella ja ilmoittaa kaapelia koskevat tiedot.

Ohjelma laskee samalla myös piirin operatiivisen virran ja tehon sekä oikosulkuvirran.

Laskentaohjelman tietojen määrittäminen

Perustiedot välilehden alle (Kuva 4) asetetaan lämmitettävän putken halkaisija, materiaali sekä pituus. Eristysmateriaali ja eristeen paksuus. Lisäksi on tärkeä asettaa lämpötilatiedoista vähintäänkin putken maksimi käyttölämpötila sekä ilman minimi ja maksimilämpötilat, tässä kohdassa pystyy myös asettamaan mahdollisia muita rajoituksia putken lämpötilakäytölle. Välilehdellä kysytään myös käyttöjännite, sulakkeen koko sekä kytkentätapa. Teollisuudessa on tapana tehdä joskus höyrypuhdistuksia tietyille putkilinjoille, jolloin putken lämpötila saattaa nousta höyryn lämmöstä normaalia reilusti korkeammaksi. Jos tämäntyyppisiä tai vastaavia toimintoja on tiedossa, ne tulisi asettaa perustiedot välilehdellä oleviin kohtiin.

Basic	Reference	Area Class	Heater Options	Components	Controls
Line ID: Raakavesilinja		Section No.: 1		Line Type: Parent Edit...	
Pipe Type: SS-DN ... Diameter: 350 mm Length: 28,80 m Max. Contact Temp.: °C Valves, supports...			Temperatures Maintain: 5 °C Min. Ambient: -40 °C Max. Ambient: 30 °C Max. Htr Exposure: 20 °C Max. Pipe Operating: 20 °C Max. Allowable: 20 °C		
Insulation Type: RW ... Thickness: 100,0 mm Advanced...			Electrical Single phase (L-N) ... Voltage: 230 volts Heater Oper. Voltage: 230 volts Max. CB Size: 20 A		

Kuva 32. TraceCalc Pro2, Perustiedot välilehti.

Referenssit välilehdellä (Kuva 5) voidaan ilmoittaa putkessa siirrettävä neste, onko putki sisä- vai ulkotiloissa, arvioitu tuulen nopeus, saattolämmityksen käynnistymislämpötila sekä kuinka paljon halutaan ohjelman ”ylimitoittavan” kaapelia. Tyypillisesti varmuuskertoimenä pidetään vähintään 10 % ja tuulen nopeudeksi ohjelma antaa oletuksena 8.9 m/s. Koska asennuskohteessa tuulen nopeus oli vuonna 2021 keskimäärin 2.9 m/s, on se tähän laskentaan asetettu myös vertailuarvoksi. Alhaalla tässä välilehdessä on paikka mahdollisille muistiinpanoille. Välilehdille voi jättää tyhjäksi kohdat, joista ei ole tietoa, jolloin ohjelma pyrkii ottamaan huomioon nämä kohdat ensisijaisesti mahdollisimman neutraalilla tavalla. Mikäli ohjelma ei pysty ratkaisemaan tyhjäksi jätettyä kohtaa, antaa se laskentavaiheessa virheilmoituksen.

Tarkemmat kuukausien tuulennopeustiedot on esitetty liitteessä 6.

The screenshot shows the 'Reference' tab in the TraceCalc Pro2 software. It is divided into two main sections: 'Reference' and 'Location'.
 In the 'Reference' section, there are dropdown menus for 'Area' (set to 'Area #1') and 'Fluid', both with ellipsis buttons. Below them is a text field for 'Drawing No.' and a 'Project Settings...' button.
 In the 'Location' section, there are radio buttons for 'Indoor' and 'Outdoor' (which is selected). Below these are input fields for 'Wind Speed' (2.9 m/s), 'Chemical Expos.' (Organics), 'Startup Temp.' (5 °C), and 'Heat Loss Safety Factor' (0 %).
 At the bottom of the window is a 'Comment:' label followed by a large empty text area.

Kuva 33. TraceCalc Pro2, Referenssit välilehti.

Seuraavalla välilehdellä ohjelma pyytää ilmoittamaan Standardin, jonka mukaan työ tehdään, tähän ei voi valita muita vaihtoehtoja kuin CENELEC, mikä on myös Euroopassa käytettävä standardi. Lisäksi ohjelma kysyy mahdollisen räjähdysvaarallisuusluokituksen alueelle. Tämä vaikuttaa ohjelman tarjoamaan kaapeliin kohteelle. Välilehdellä pystyy myös asettamaan lämpötilarajoituksia kaapelille. Alueen luokitus välilehti esitetty kuvassa 6.

The screenshot shows the 'Area Class' tab in the TraceCalc Pro2 software. At the top, 'Standards Body' is set to 'CENELEC'.
 The 'Area Classification' section contains several checkboxes: 'Non-hazardous' (checked), 'Zone 1', 'Zone 2', 'Zone 21', and 'Zone 22'.
 The 'Design Parameters' section has two radio buttons: 'Specify equipment T-rating' and 'Specify auto-ignition temperature'. Below them is a 'T-Rating' dropdown menu.
 The 'Sheath temperature calculation options' section includes checkboxes for 'Allow stabilized design' and 'Use control limited design'. Below these is a 'Control Limited Setpoint' input field with a unit of °C.

Kuva 34. TraceCalc Pro2, Alueen luokitus välilehti.

Lämmitin välilehdellä (Kuva 7) ohjelma kysyy kaapelin kategoriaan sekä kaapelin kiinnitystapaa. Lisäksi tällä välilehdellä on mahdollista pakottaa ohjelma valitsemaan jokin tietty

kaapelityyppi, kaapelin eristemateriaali tai tuoteperhe, mutta mikäli halutaan ohjelman tarjoavan suositeltua kaapelia, pitää nämä kohdat jättää tyhjäksi.

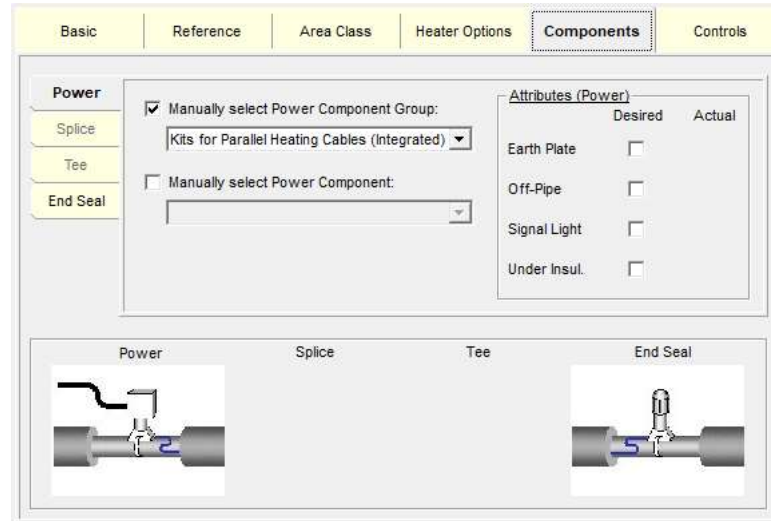
The screenshot shows the 'Heater Options' tab in the TraceCalc Pro2 software. The interface is organized into several sections:

- Heater Category Selection:**
 - Category: Parallel Heating Cables (dropdown)
 - Conductors: (dropdown)
- Design Options:**
 - Manual Select Attachment
 - GS-54 (dropdown)
 - Allow Spiraling
 - Force Trace Ratio
 - Settings... (button)
- Heater Selection:**
 - Manual Select:
 - Family: (dropdown)
 - Heater: (dropdown)
 - Dielectric: (dropdown)
 - Jacket Material: (dropdown)
 - Ground Path: (dropdown)
 - Cold Leads... (button)

Kuva 35. TraceCalc Pro2, Lämmitin valinnat välilehti.

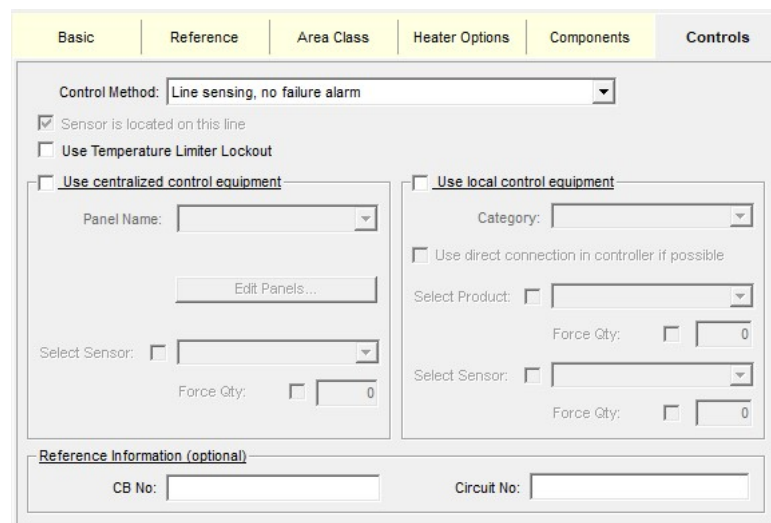
Koska ohjelma pyrkii myös laskemaan kuluvan materiaalin määrän, kysyy se seuraavalla välilehdellä järjestelmään haluttavia komponentteja. Tällä välilehdellä valitaan syöttö- ja päätetapa, sekä mahdolliset jatkostarvikkeet. Tällä välilehdellä voi myös valita eristyksen alle asennettavan kaapelin, merkkivalolliset komponentit, siirtymät putkesta tai maadoituslevyn käytön. Valintojen edetessä ohjelma sulkee pois vaihtoehtoja, jotka eivät sovellu jo

valmiiksi valittujen ominaisuuksien kanssa yhdessä. Komponentit välilehti esitetty kuvassa 8.



Kuva 36. TraceCalc Pro2, Komponentit välilehti.

Viimeisellä välilehdellä ohjelma kysyy vielä lämmityksen ohjaustapaa, johon on mahdollista valita ohjaustavat hälytyksellä tai ilman, sekä miten virheitä halutaan havaittavan. Välilehdellä on myös mahdollista määrittää tarkempia tietoja ohjauksesta. Ohjauksen välilehti kuvassa 9.



Kuva 37. TraceCalc Pro2, Ohjaukset välilehti.

Kun kaikki tiedot on asetettu välilehdille ja laskenta suoritettu hyväksytysti, voimme nähdä tuloksista (Kuva 10), että ohjelma ehdottaa käytettäväksi kaapeliksi 8BTV2-CT kaapelia ja ilmoittaa tehohäviöksi 21.0 W/m. Laskennassa on käytetty varmuuskertoimena 0 %, koska

halusimme tarkkoja arvoja, mutta itse asennukseen on suositeltavaa ottaa huomioon vähintään aikaisemmin mainittu varmuuskerroin, kuten myös tässä projektissa tehtiin ja valittiin asennettavaksi 10BTV2-CT kaapeli. Ohjelma kertoo mitattuun linjaan kuluvan kokonaisuudessaan 40.3 metriä lämmityskaapelia. Tämä koostuu määritellyn putkilinjan matkalle asennettavasta 28.8 metrin kaapelimäärästä. Koska venttiileiden, tukien ja laippojen määrää ei ole määritelty, ohjelma arvioi venttiileihin kuluvan 1.24 metriä kaapelia ja tukikannakkeille 8.24 metriä kaapelia. Tämä johtuu siitä, että ohjelma päättelee putkilinjan tarvitsevan toimiakseen ainakin päihin venttiilit ja määritellylle putkilinjan matkalle pitää asentaa säännöllisin välein kannakkeita kannattelemaan putkilinjaa ilmassa, nämä tulee myös kiertää lämmityskaapelilla. Ohjelma varaa kaksi metriä kaapelia myös liitoksia varten automaattisesti.

Keskimmäisessä rivissä ohjelma kertaa annetuista tiedoista asennettavan lukumäärän, putken nimelliset maksimi ja minimilämpötilat sekä ilmoittaa lämmityskaapelin tehontuoton olevan 28.0 W/m, piirin maksimipituuden olevan 125 m tällä kaapelityypillä ja lämpötilan pystyvän nousemaan maksimissaan 48:aan °C:een ilman ohjauksia.

Oikeanpuoleisimmassa rivissä ohjelma on laskenut putken operatiivisen kuormituksen olevan 1.18 kW tällä putkilinjalla, operatiivisen virran olevan 4.7 A, oikosulkuvirraksi 6.0 ampeeria, C-typin johdonsuojakatkaisijalla, piirin pituuden ilman liitoksiin huomioitua kahden metrin kaapelia sekä päivämäärän, jolloin kyseinen laskenta on suoritettu.

OK					
Pipe Data:		Heater Data:		Electrical Data:	
Heat Loss:	21,0 W/m	Catalog No.:	8BTV2-CT	Pipe Segment Oper. Load:	1,18 kW
Total Heater Length:	40,30 m	Cable set Catalog No.:		Circuit Operating Load:	1,18 kW
for Piping:	28,80 m	Power Output:	28,0 W/m	Circuit Operating Current:	4,7 A
for Valves [1]:	1,24 m	Trace Ratio:	1,00	Circuit CB Current:	6,0 A (C)
for Supports [4]:	8,24 m	Cable Set Qty:	1	Circuit Length:	38,3 m
for Flanges [0]:	0,00 m	Sheath Temp.:	85 °C (T-rating)	Revised:	27.5.2022
for Drains/Vents [0]:	0,00 m	Max. Circuit Length:	125 m		
for Misc.:	0,00 m	Min. Controlled Pipe:	5 °C (nominal)		
for Terminations:	2,00 m	Max. Controlled Pipe:	5 °C (nominal)		
		Uncontrolled Pipe:	48 °C (maximum)		
		Contact Temp.:	N/A °C		

Kuva 38. TraceCalc Pro2, Laskentatulokset.

Liite 4. Putkiliinjojen lämpöhäviöt lämpötilavälillä -40 °C ... +20 °C

	VRA	VKE	VLA
Lämpötila °C	Lämpöhäviö W/m		
-40	20,67755522	10,53373572	8,961589752
-39	20,21805399	10,2996527	8,762443313
-38	19,75855276	10,06556969	8,563296874
-37	19,29905153	9,831486672	8,364150435
-36	18,83955031	9,597403656	8,165003997
-35	18,38004908	9,36332064	7,965857558
-34	17,92054785	9,129237624	7,766711119
-33	17,46104663	8,895154608	7,56756468
-32	17,0015454	8,661071592	7,368418241
-31	16,54204417	8,426988576	7,169271802
-30	16,08254295	8,19290556	6,970125363
-29	15,62304172	7,958822544	6,770978924
-28	15,16354049	7,724739528	6,571832485
-27	14,70403926	7,490656512	6,372686046
-26	14,24453804	7,256573496	6,173539607
-25	13,78503681	7,02249048	5,974393168
-24	13,32553558	6,788407464	5,775246729
-23	12,86603436	6,554324448	5,57610029
-22	12,40653313	6,320241432	5,376953851
-21	11,9470319	6,086158416	5,177807412
-20	11,48753068	5,8520754	4,978660973
-19	11,02802945	5,617992384	4,779514535
-18	10,56852822	5,383909368	4,580368096
-17	10,10902699	5,149826352	4,381221657
-16	9,649525767	4,915743336	4,182075218
-15	9,19002454	4,68166032	3,982928779
-14	8,730523313	4,447577304	3,78378234
-13	8,271022086	4,213494288	3,584635901
-12	7,811520859	3,979411272	3,385489462
-11	7,352019632	3,745328256	3,186343023
-10	6,892518405	3,51124524	2,987196584

	VRA	VKE	VLA
Lämpötila °C	Lämpöhäviö W/m		
-9	6,433017178	3,277162224	2,788050145
-8	5,973515951	3,043079208	2,588903706
-7	5,514014724	2,808996192	2,389757267
-6	5,054513497	2,574913176	2,190610828
-5	4,59501227	2,34083016	1,991464389
-4	4,135511043	2,106747144	1,79231795
-3	3,676009816	1,872664128	1,593171512
-2	3,216508589	1,638581112	1,394025073
-1	2,757007362	1,404498096	1,194878634
0	2,297506135	1,17041508	0,995732195
1	1,838004908	0,936332064	0,796585756
2	1,378503681	0,702249048	0,597439317
3	0,919002454	0,468166032	0,398292878
4	0,459501227	0,234083016	0,199146439
5	0	0	0
6	-0,459501227	-0,234083016	-0,19914644
7	-0,919002454	-0,468166032	-0,39829288
8	-1,378503681	-0,702249048	-0,59743932
9	-1,838004908	-0,936332064	-0,79658576
10	-2,297506135	-1,17041508	-0,99573219
11	-2,757007362	-1,404498096	-1,19487863
12	-3,216508589	-1,638581112	-1,39402507
13	-3,676009816	-1,872664128	-1,59317151
14	-4,135511043	-2,106747144	-1,79231795
15	-4,59501227	-2,34083016	-1,99146439
16	-5,054513497	-2,574913176	-2,19061083
17	-5,514014724	-2,808996192	-2,38975727
18	-5,973515951	-3,043079208	-2,58890371
19	-6,433017178	-3,277162224	-2,78805015
20	-6,892518405	-3,51124524	-2,98719658

Liite 5. Sallitut maksimijohtopituudet syöttökaapeleissa eri ylikuormitussuojilla 5 sekunnin ja 0,4 sekunnin poiskytkentäajalla.

	5 Sekunnin poiskytkentäajalla				0,4 Sekunnin poiskytkentäajalla			
	Johtimien poikkipinta-ala	maksimipituus (m)	Impedanssi kaapelin päässä (Ω)	Oikosulkuvirta(A)	maksimipituus (m)	Impedanssi kaapelin päässä (Ω)	Oikosulkuvirta(A)	
16A Gg-sulake	2,5mm ²	122,8779075	3,371945163	64,94767542	44,15523079	1,991149415	109,9867234	
	4mm ²	196,6494979	3,371945163	64,94767542	70,66448432	1,991149415	109,9867234	
	6mm ²	294,4369531	3,371945163	64,94767542	105,8036541	1,991149415	109,9867234	
	10mm ²	479,8037615	3,371945163	64,94767542	172,4137908	1,991149415	109,9867234	
	16mm ² +10mm ²	471,4082451	3,371945163	64,94767542	169,3969265	1,991149415	109,9867234	
20A Gg-sulake	2,5mm ²	77,59950519	2,577761988	84,95741695	16,70786077	1,509722545	145,0597666	
	4mm ²	124,1875293	2,577761988	84,95741695	26,73867499	1,509722545	145,0597666	
	6mm ²	185,9419838	2,577761988	84,95741695	40,03495599	1,509722545	145,0597666	
	10mm ²	303,0043012	2,577761988	84,95741695	65,23950977	1,509722545	145,0597666	
	16mm ² +10mm ²	297,7023887	2,577761988	84,95741695	64,09796104	1,509722545	145,0597666	
25A Gg-sulake	2,5mm ²	44,15523079	1,991149415	109,9867234	-0,065532025	1,215517235	180,1702137	
	4mm ²	70,66448432	1,991149415	109,9867234	-0,104875156	1,215517235	180,1702137	
	6mm ²	105,8036541	1,991149415	109,9867234	-0,15702619	1,215517235	180,1702137	
	10mm ²	172,4137908	1,991149415	109,9867234	-0,255884174	1,215517235	180,1702137	
	16mm ² +10mm ²	169,3969265	1,991149415	109,9867234	-0,251406761	1,215517235	180,1702137	
32A Gg-sulake	2,5mm ²	13,832422	1,459287349	150,0732534	-23,22878874	0,809233712	270,6263922	
	4mm ²	22,13692354	1,459287349	150,0732534	-37,17453964	0,809233712	270,6263922	
	6mm ²	33,14490191	1,459287349	150,0732534	-55,66023968	0,809233712	270,6263922	
	10mm ²	54,01172795	1,459287349	150,0732534	-90,70190438	0,809233712	270,6263922	
	16mm ² +10mm ²	53,06664085	1,459287349	150,0732534	-89,11481944	0,809233712	270,6263922	
35A Gg-sulake	2,5mm ²	6,251719807	1,326321832	165,1182954	-	-	-	
	4mm ²	10,00503334	1,326321832	165,1182954	-	-	-	
	6mm ²	14,98021385	1,326321832	165,1182954	-	-	-	
	10mm ²	24,41121225	1,326321832	165,1182954	-	-	-	
	16mm ² +10mm ²	23,98406942	1,326321832	165,1182954	-	-	-	

Liite 6. Kuukausien keski-, maksimi- ja minimituulennopeudet Porin Rautatieaseman mitauspisteellä vuonna 2021.

	Vuoden keskiarvo 2,918 m/s		
Kuukausi	Tuulen keskinopeus (m/s)	Tuulen Max. Nopeus (m/s)	Tuulen Min. Nopeus (m/s)
Tammikuu	3,454	10,8	0,0
Helmikuu	3,188	9,7	0,0
Maaliskuu	2,862	12,0	0,0
Huhtikuu	2,915	9,9	0,0
Toukokuu	2,842	7,6	0,0
Kesäkuu	2,599	8,5	0,0
Heinäkuu	2,651	7,5	0,0
Elokuu	2,561	8,2	0,0
Syyskuu	2,764	9,6	0,0
Lokakuu	3,756	10,1	0,0
Marraskuu	2,731	8,8	0,0
Joulukuu	2,694	7,3	0,0