

Arttu Pitkänen

KAUKOLÄMPÖSIMULAATIOJÄRJESTELMIEN TARKASTELU JA VERTAILU

Kandidaatin koulutusohjelma
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Henrik Tolvanen

05/2020

TIIVISTELMÄ

Arttu Pitkänen: Kaukolämpösimulaatiojärjestelmien tarkastelu ja vertailu
Analysis and comparison of district heating simulation systems
Kandidaatintyö, 45 sivua
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Kaukolämmön asema suomalaisessa lämmitysjärjestelmässä on ollut merkittävä jo vuosikymmenten ajan. Kaukolämpöverkkoa laajennetaan vuosittain useita satoja kilometrejä, jotta uusia kuluttajia saadaan liitettyä osaksi lämmönjakelujärjestelmää. Uudet verkostolaajennukset vaikuttavat koko kaukolämpöverkon hydromekaaniseen toimintaan, jolloin on tärkeää pystyä varmistamaan kaukolämpöverkon toimivuus kaikissa olosuhteissa. Verkoston olosuhteiden tarkastelemiseen on kehitelty erilaisia simulaatiojärjestelmiä, joilla verkoston tilaa voidaan mallintaa virtuaalisesti.

Tässä tutkimuksessa vertaillaan eri kaukolämpösimulaatiojärjestelmien tuloksia toisiinsa ja vertaileviin laskelmiin. Vertailtavina simulaattoreina tutkimuksessa toimivat Fluidit Oy:n Fluidit Heat, Vitec FuturSoft Oy:n Netsim ja Simulaattori X. Viimeisen simulaattorin kohdalla nimeä ei haluttu julkaista. Helen Oy mahdollisti Simulaattori X:n vertailun tutkimuksessa. Vertailevat laskelmat suoritettiin ilman simulaattoreita Microsoft Excel -ohjelmaa ja X Steam -funktioita apuna käyttäen.

Tutkimus suoritettiin tutkimusmallin avulla, joka luotiin mahdollisimman identtiseksi jokaisella simulaattorilla. Tutkimusmalli sisälsi laitoksen, putkiston ja kuluttajat. Malli oli jaettu kahteen osaan: siirtolinjaan ja jakeluverkkoon. Siirtolinjaosuutta tarkasteltiin sekä simulaattoreilla että vertailevalla laskennalla. Jakeluverkon tarkasteleminen suoritettiin pelkillä simulaattoreilla, sillä verkostolaskenta olisi ollut ilman simulaattoreita todella työlästä. Kaikki simuloinnit suoritettiin staattisina, sillä dynaaminen mallinnus ei ollut mahdollista kaikilla simulaattoreilla.

Tutkimusmallit rakennettiin yritysten mallintajien apua käyttäen, jotta vertailtavat mallit olisivat mahdollisimman samanlaiset. Tähän tavoitteeseen päästiin todella hyvin. Simulaattoreiden ja vertailevan laskennan painehäviöt vastasivat tulosten perusteella varsin tarkasti toisiaan. Suurimmat eroavaisuudet löytyivät laitoksen tuottamasta lämpötehosta ja verkoston lämpöhäviöistä. Netsimin ja Simulaattori X:n tulokset olivat usein lähellä toisiaan, kun taas Fluidit Heat antoi lämpöhäviöiksi pienempiä arvoja. Vertaileva laskenta oli lämpöhäviöiden osalta lähempänä Fluidit Heatin tuloksia. Varmana eroavaisuutena Fluidit Heatin ja Netsimin lämpöhäviöihin löydettiin kitkallisen virtauksen aiheuttama virtauksen lämpiäminen. Yrityksiltä varmistettujen tietojen mukaan Fluidit Heat laskee putkissa muodostuvan lämpötehon, mutta Netsim ei tätä huomioi, sillä Vitec FuturSoft Oy:n mukaan kitkasta aiheutuva lämpöteho ei ole merkittävä. Vertailevassa laskennassa kuitenkin kitkan aiheuttamaksi lämpötehoksi koko verkostossa saatiin 44 kW, joka on noin 6,1 % koko verkossa syntyvistä lämpöhäviöistä.

Avainsanat: Kaukolämpöverkko, mallinnus, simulointi, lämmönsiirto, hydromekaniikka.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KAUKOLÄMPÖVERKON RAKENNE JA KOMPONENTIT	3
2.1	Kaukolämpö ja sen merkitys	3
2.2	Kaukolämpöverkon toiminta.....	4
2.3	Kaukolämpöverkon komponentit.....	5
2.3.1	Kaukolämpöputket	5
2.3.2	Pumput ja venttiilit.....	7
2.3.3	Lämmönvaihtimet.....	8
3.	KAUKOLÄMPÖVERKON MALLINNUS.....	10
3.1	Kaukolämpöverkossa tapahtuvat fysikaaliset ilmiöt	10
3.1.1	Hydromekaaninen laskenta.....	10
3.1.2	Lämmönsiirto	13
3.1.3	Lämmönsiirron lämpöhäviöt	13
3.2	Kaukolämpöverkkomalli.....	16
3.3	Kaukolämpöverkkomallin suunnittelu.....	17
3.3.1	Putket	18
3.3.2	Pumppaamot	18
3.3.3	Laitokset ja kuluttajat	19
4.	TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN JA AINEISTOT	20
4.1	Tutkimuksen eteneminen.....	20
4.2	Tutkimusmallin suunnittelu	21
4.3	Simulaattoreiden valitseminen ja tutkimusmallien rakentaminen.....	23
4.3.1	Fluidit Heat.....	24
4.3.2	Netsim	24
4.3.3	Simulaattori X	24
4.4	Vertaileva laskenta	25
5.	TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY	27
5.1	Laskennan tulokset.....	27
5.2	Tulosten käsittely.....	30
6.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	34
	LÄHTEET	36

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala	$[m^2]$
c_p	veden ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa	$[J/kg\ ^\circ C]$
D	putken sisähalkaisija	$[m]$
D_i	eristeen ulkohalkaisija	$[m]$
D_p	eristeen sisähalkaisija	$[m]$
E	putkien keskipisteiden etäisyys toisistaan	$[m]$
f	Darcy-Weisbachin kitkakerroin	
g	keskimääräinen putoamiskiihtyvyyys	$[m/s^2]$
H	korjattu putken sijaintisyvyys maaperässä	$[m]$
H'	putken todellinen sijaintisyvyys maaperässä	$[m]$
H_p	pumpun nostokorkeus	$[m]$
h_{gs}	maanpinnan lämmönsiirtokerroin	$[W/(m^2\ ^\circ C)]$
h_L	kokonaispainehäviöt putkivirtauksessa	$[m]$
K	kertavastus	
K_1	lämmönsiirtokerroin maaperän ja virtauksen välillä	$[W/m\ ^\circ C]$
K_2	lämmönsiirtokerroin virtauksien välillä	$[W/m\ ^\circ C]$
k_g	maaperän lämpövastus	$[W/m\ ^\circ C]$
k_i	eristeen lämpövastus	$[W/m\ ^\circ C]$
L	pituus	$[m]$
\dot{m}	massavirta	$[kg/s]$
p	paine	$[Pa]$
Q	tilavuusvirta	$[m^3/s]$
Re	Reynoldsin luku, kuvaa virtauksen turbulentsuutta	
R_g	maaperän lämpövastus	$[m^\circ C/W]$
R_i	eristeen ja vaipan lämpövastus	$[m^\circ C/W]$
R_m	putkien keskinäinen lämpövastus	$[m^\circ C/W]$
T_g	maaperän lämpötila	$[^\circ C]$
T_m	virtauksen menopuolen lämpötila	$[^\circ C]$
T_p	virtauksen paluupuolen lämpötila	$[^\circ C]$
V	nesteen keskimääräinen virtausnopeus	$[m/s]$
z	korkeus määritetystä tasosta	$[m]$
β	apusuure maaperän lämpövastuksen määrittämiseen	
ε	putken ekvivalentti karheus	$[mm]$
κ	putken karheus	$[mm]$
ν	veden kinemaattinen viskositeetti	$[m^2/s]$
ρ	veden tiheys	$[kg/m^3]$
Φ	lämpöteho	$[W]$
Φ'_m	virtauksen menopuolen lämpöhäviöt	$[W]$
Φ'_p	virtauksen paluupuolen lämpöhäviöt	$[W]$
CHP	Combined Heat and Power	
mvp	metriä vesipatsasta eli yhden metrin korkuisen vesipatsaan aiheuttama hydrostaattinen paine	
Mpuk	kaksiputkijohto, jossa sekä meno- ja paluujohto	
2Mpuk	yksijohto, jossa erillinen meno- ja paluujohto	

1. JOHDANTO

Kaukolämmön osuus rakennusten lämmityksessä on ollut merkittävä jo 1970-luvulta lähtien, ja sen käyttö on lisääntynyt tähän päivään asti. Kokonaisuudessaan vuonna 2016 Suomessa rakennusten lämmitykseen kului energiaa noin 27 % koko Suomen energiankulutuksesta (Tilastokeskus 2016). Vuonna 2019 Suomessa kaukolämmön tuotanto oli 32,4 TWh kattava 46 % asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä. Kerrostalojen kohdalla vastaava luku oli peräti 95 % (Energiateollisuus ry 2020). Kaukolämpöä tuotetaan Suomessa pääasiassa lämpövoimalaitoksilla ja CHP-voimalaitoksilla (Combined Heat and Power), joissa yhdistetään lämmön- ja sähköntuotanto. Voimalaitoksista saatu lämpöenergia siirretään lämmönsiirtimien kautta kaukolämpöverkkoon, josta se pumpataan lämpöeristettyjä putkia pitkin loppukuluttajille. Kaukolämpöverkkoja on rakennettu Suomessa yli 15 000 km (Energiateollisuus ry 2019). Lämmönkuljettajana prosessissa toimii vesi suuren ominaislämpökapasiteettinsa, ja yleisen käytännöllisyytensä ansiosta. Kokonaisuudessaan prosessi on varsin yksinkertainen ja sillä saadaan siirrettyjä suuria määriä lämpöenergiaa kuluttajille. Varsinkin Suomen kylmän ilmaston seurauksena lämpöenergialle on paljon kysyntää ja tämän takia kaukolämpöverkkoa rakennetaan jatkuvasti lisää. (Koskelainen et al. 2006)

Kaukolämpöverkon suunnittelussa on otettava huomioon monia eri tekijöitä. Yksi suurimmista rajoittavista tekijöistä on yleensä taloudelliset tekijät, jotka ovat suoraan verrannollisia siirtoverkossa syntyvien häviöiden kanssa. Verkkoa suunniteltaessa pyritään lopputulokseen, jossa kaukolämpöverkko on taloudellisesti mahdollisimman kannattava ja samalla toiminnallisesti joustavin kokonaisuus. (Koskelainen et al. 2006) Jotta tähän lopputulokseen päästään, on kaukolämpöverkko mallinnettava tavalla tai toisella ennen rakennusprosessin alkua. Markkinoilta löytyy tähän tarkoitukseen useita ohjelmistoja kuten Fluidit Heat (Fluidit Oy 2020) ja Netsim (Vitec FuturSoft Oy 2020), joilla voi esimerkiksi simuloida kaukolämpöverkossa syntyviä paine- ja lämpöhäviöitä eri parametreilla. Tuloksia on kuitenkin mahdollista laskea monilla eri fysiikan yhtälöillä ja oletuksilla, jolloin tulokset vaihtelevat. Pienilläkin tulosten eroavaisuuksilla voi olla todella suuret seuraukset valmiin siirtoverkon kannalta. Valitettavasti ohjelmien lähdekoodit ovat yleensä salattuja, joten niiden fysikaaliseen laskentaan on vaikea perehtyä.

Kaukolämpösimulaatiojärjestelmien vertailusta löytyy huonosti tutkimuksia ja Suomessa käytettävistä ohjelmistoista ei juuri ollenkaan. Joitakin tutkimuksia aiheesta on tehty,

mutta nämä käsittelevät enemmän kaukolämmön loppukäyttäjän lämmityksen mallintamista, eikä niinkään itse kaukolämpöverkon (Behrang et al. 2016).

Tässä tutkimuksessa vertaillaan kolmen eri kaukolämpösimulaatiojärjestelmän tuloksia tutkimuskaukolämpöverkolla. Tutkimuksessa käytettävät ohjelmistot ovat Vitec FuturSoft Oy:n Netsim (Vitec FuturSoft Oy 2020), Fluidit Oy:n Fluidit Heat (Fluidit Oy 2020) ja Simulaattori X. Viimeisen ohjelmiston kohdalla sen kehittäjät eivät halunneet yhtiön tai ohjelman nimen julkaisemista. Tästä syystä kyseinen ohjelma esiintyy työssä nimellä Simulaattori X. Tutkimusverkko mallinnetaan mahdollisimman identtisesti jokaisella ohjelmalla ja jokaisesta mallista lasketaan tärkeimmät tulokset, joita vertaillaan keskenään. Näitä tuloksia ovat muun muassa lämpö- ja painehäviöt kaukolämpöverkossa. Tulokset lasketaan myös perinteisesti ilman ohjelmistoja hydromekaniikan ja lämmönsiirron yhtälöitä käyttämällä. Tästä syystä jakeluverkko täytyy pitää kohtalaisena yksinkertaisena, jotta tuloksien laskeminen ilman erillisiä ohjelmistoja on mahdollista.

Tämä tutkimus vastaa seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitä ilmiöitä kaukolämpöverkon mallinnuksessa on otettava huomioon?
2. Mitä ohjelmistoja kaukolämpöverkkojen mallinnukseen käytetään?
3. Miten Fluidit Heatin, Netsimin ja Simulaattori X:n laskentatulokset eroavat toisistaan ja tutkijan omista laskentatuloksista?

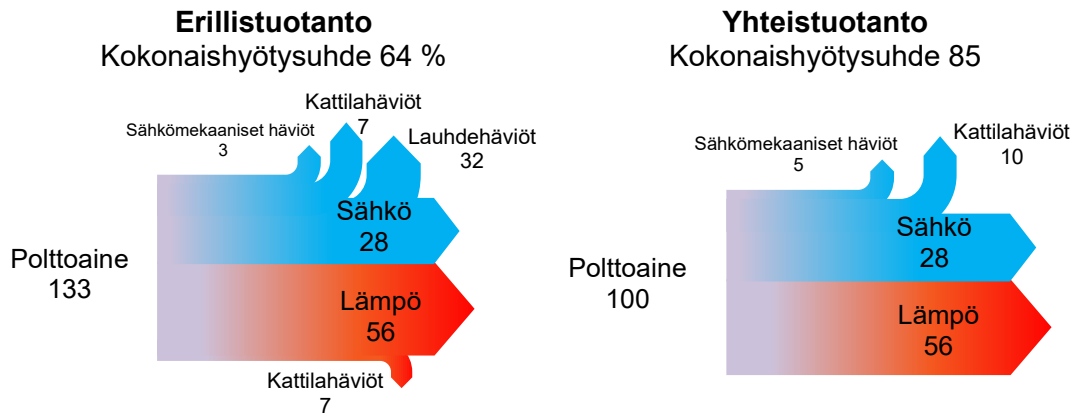
Toisessa luvussa esitellään kaukolämpöä ja kaukolämpöverkon toimintaa yleisellä tasolla. Luvussa käydään läpi kaukolämpöverkon tärkeimpiä komponentteja ja verkostoon liittyviä ilmiöitä. Kolmannessa luvussa keskitytään verkon mallinnukseen ja laskentaan. Laskennassa perehdytään fysiikan ilmiöihin laskennan takana, ja kuinka ne liittyvät toisiinsa. Neljännessä luvussa käydään läpi tutkimusmallin suunnittelu eri ohjelmilla ja vertailevan laskennan toteutus. Kyseisen laskennan tuloksia vertaillaan eri kaukolämpösimulaattoreiden laskentatuloksiin viidennessä luvussa. Viimeisessä luvussa käydään lopuksi yhteenveto ja johtopäätökset koko työstä ja sen tuloksista.

2. KAUKOLÄMPÖVERKON RAKENNE JA KOMPONENTIT

2.1 Kaukolämpö ja sen merkitys

Kaukolämmöllä tarkoitetaan lämpöenergiaa, joka siirretään verkostoa pitkin kuluttajille. Suomessa kaukolämpöenergiasta 80 % on CHP-voimalaitoksien höyryprosesseista saatua lämpöenergiaa (Koskelainen et al. 2006). Näissä voimalaitoksissa tuotetaan sähkön lisäksi myös lämpöä esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. Tämä menettelytapa parantaa voimalaitosten hyötysuhdetta, sillä lämpö ei mene tässä tapauksessa hukkaan samalla tavalla kuin lauhdevoimalaitoksessa, jossa turbiinista tuleva höyry on joka tapauksessa lauhdutettava toimivan höyryprosessin aikaansaamiseksi. CHP-voimalaitosten lisäksi kaukolämpöä tuotetaan myös erikseen lämpölaitoksissa (Koskelainen et al. 2006). Kuvassa 1 havainnollistetaan kokonaishyötysuhteen eroja erillistuotannon ja yhteistuotannon välillä. Numerot kuvastavat energiasisältöä, jonka eri prosessit sisältävät. Kummasakin tuotantotavassa syntyy yhtä paljon sähkö ja lämpöä, mutta erillistuotannossa prosessiin on tuotava enemmän energiaa, joka tässä tapauksessa kuvastaa polttoainetta. Erillistuotannossa sähkö ja lämpö tuotetaan toisistaan riippumattomissa voimalaitoksissa. Tällöin erityisesti lauhdehäviöt lauhduttimessa suurentavat huomattavasti häviöiden kokonaismäärää. Yhteistuotannossa lauhdutinhäviöitä ei synny, sillä kaikki höyryn lauhtumisessa vapautuva lämpöenergia siirtyy lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon. Näin yhteistuotannon hyötysuhde saadaan nostettua jopa 85 prosenttiin. (Kara et al. 2004)

Yhteistuotannon etuna ovat myös vähäiset päästöt, jotka voidaan jakaa sekä lämmön- että sähköntuotannon kesken. Näin erillistuotantoon verrattuna poltossa syntyviä hiili- ja rikkidioksidipäästöjä saadaan vähennettyä. Ympäristöystävällisyys onkin yksi kaukolämmön vahvuuksista sen kilpaillessa muita lämmitysmuotoja vastaan. Varsinkin tulevaisuudessa suuret hiilidioksidipäästöjen leikkaukset koituvat kaukolämmön eduksi. (Koskelainen et al. 2006)



Kuva 1. Kuvassa havainnollistetaan lämmön ja sähkön yhteistuotannon tärkeyttä kokonaishyötysuhteen kannalta. Numerot viittaavat prosessin energiasisältöön, jossa vasemmassa reunassa polttoaineen energia on prosessiin tuotu kokonaisenergia. (muokattu lähteestä Kara et al. 2004).

Suomessa kylmän ilmaston takia rakennuksien lämmittämiseen kuluu jopa 27 % Suomen kokonaisenergiakulutuksesta (Tilastokeskus 2016). Tästä syystä on erittäin tärkeää saada voimalaitoksissa hukkaan menevät lauhdutinhäviöt hyödynnettyä rakennusten lämmittämässä ja muissa teollisuuden prosesseissa. Kaukolämpöverkon avulla muuten hukkaan menevä energia saadaan siirrettyä suoraan kuluttajille.

2.2 Kaukolämpöverkon toiminta

Kaukolämpöverkon tarkoitus on siirtää lämpöenergiaa lämmöntuottajan ja -kuluttajan välillä. Siirto tapahtuu virtaavaan veden avulla, joka lämmitetään lämmöntuottajan päässä lämmönvaihtimen avulla. Lämmitetty vesi virtaa kaksiputkijärjestelmän menopuolella kuluttajalle, jossa se jäähtyy lämmönvaihtimessa ja palaa sen jälkeen kaksiputkijärjestelmän paluupuolta pitkin takaisin lämmöntuottajalle. Kaukolämpövesi ei kierrä rakennusten lämmitysjärjestelmissä. Tämän jälkeen vesi lämmitetään uudelleen lämmönvaihtimessa, ja kierto alkaa alusta. Lämmitetyn menopuolen veden lämpötila vaihtelee Suomessa sään mukaan 65–115 °C välillä ja paluupuolen 40–60 °C välillä. (Energiateollisuus ry 2019)

Kaukolämpövesi käsitellään mekaanisten epäpuhtauksien ja hapen poistamiseksi. Näillä toimilla vähennetään putken sisäpuolista korroosiota, joka puolestaan lyhentää putken käyttöikää ja suurentaa putken painehäviöitä. Kaukolämpövesi värjätään käsittelyn yhteydessä vihreäksi, jotta mahdolliset vuodot olisi helpompi havaita. Vihreästä väristään huolimatta kaukolämpövesi ei ole ihmisen terveydelle tai ympäristölle millään tavalla haitallista. (Energiateollisuus ry 2019)

Kaukolämpöputket asennetaan tyypillisesti 0,5–1 metrin syvyyteen maahan niin, että putken päälle kasataan lopputäytössä vähintään 0,4 metriä maa-ainesta (Energiateollisuus ry 2013). Putket kulkevat tyypillisesti katujen ja jalkakäytävien alapuolella hyvin eristetyissä putkissa, mutta suurimmille putkille on rakennettu myös tunneleita, kuten Helsingin Vuosaaresta lähtevälle 1000 mm halkaisijaltaan olevalle putkelle. Vaikka putket ovatkin hyvin eristettyjä, tapahtuu niissä silti lämpöhäviöitä ympäristöön. Suomessa jakeluverkon lämpöhäviöt ovat keskimäärin 8–9 % ja suurempien siirtoverkkoputkien noin 5–8 %. (Energiateollisuus ry 2019; Koskelainen et al. 2006)

Kaukolämpöverkkoja oli rakennettu Suomeen yli 15 000 km vuoden 2018 loppuun mennessä. Verkoston pituus kasvaa keskimäärin 250–500 km vuodessa, mikä johtuu pääasiassa olemassa olevan verkon vahvistuksesta ja uusien kuluttajien liittämistä kaukolämpöverkkoon. Vanhaa verkkoa uusitaan ja korjataan vuosittain noin 50–70 km. Verkosto on varsin kattava, ja varsinkin tiheästi asutut alueet kuuluvat kaukolämpöverkon piiriin. Harvaan asutuille alueille kaukolämpöverkkoja ei ole taloudellisesti kannattavaa rakentaa, sillä verkon rakennuskustannukset yksittäistä asiakasta kohden nousevat tällöin liian korkeiksi. (Energiateollisuus ry 2019; Vainio et al. 2015)

2.3 Kaukolämpöverkon komponentit

Kaukolämpöverkon mallinnuksessa tärkeimmät komponentit ovat lämmönvaihtimet, putket, pumput ja venttiilit. Näiden komponenttien avulla kaukolämpöverkosta voidaan suunnitella toimiva kokonaisuus. Seuraavissa luvuissa näihin komponentteihin tutustutaan tarkemmin.

2.3.1 Kaukolämpöputket

Kaukolämpöverkossa suurimman kokonaisuuden muodostavat putket, joiden avulla lämpöenergia saadaan siirrettyä kuluttajille. Suomessa putkirakenteet voidaan jakaa karkeasti yksiputkirakenteisiin, joista käytetään usein nimitystä 2Mpuk ja kaksiputkirakenteisiin, joista käytetään nimitystä Mpuk. 2Mpuk-putkessa on erilliset meno- ja paluujohdot, jossa teräksinen virtausputki ja polyeteeniulkokuori on vaahdotettu yhteen polyuretaanivaahdolla. Mpuk-putkessa kaksi virtausputkea on saman eristekerroksen sisällä niin, että ulkopuolelta katsottuna putket näyttävät vain yhdeltä putkelta. Nimessä numero viittaa erillisten putkien lukumäärään, pu-pääte viittaa käytettyyn eristemateriaaliin eli tässä tapauksessa polyuretaanivaahtoon ja viimeinen kirjain siihen ovatko putket kiinni eristeessä vai liikkuvatko ne vapaasti. Tässä tapauksessa k-kirjain tarkoittaa, että putket ovat kiinni eristeessä. Taulukkoon 1 on kerätty Suomessa käytettävien putkimateriaalien yleisimpiä lyhenteitä kuten: Mpuk, 2Mpuk, Mpul, 2Mpul, Mpe, Mmv ja 2Mmv. Pääasiassa

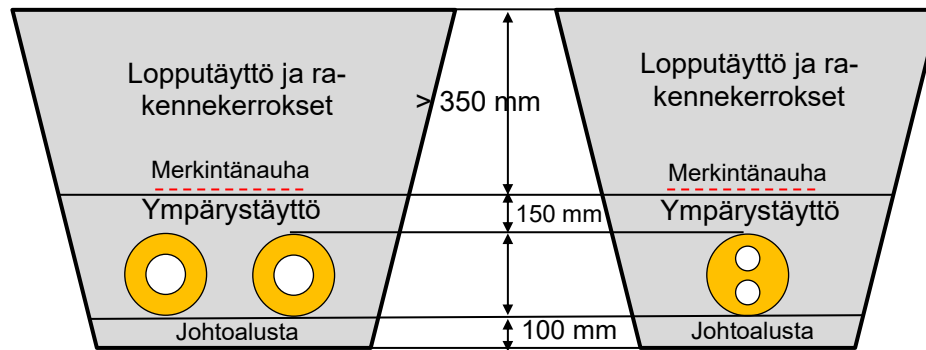
Suomessa käytetään nykyään kiinnivaahdotettuja polyuretaaniputkia. (Energia teollisuus ry 2013; Koskelainen et al. 2006)

Taulukko 1. Taulukkoon on kerätty yleisiä lyhenteitä muovisuojaorirakenneputkille. (muokattu lähteestä Koskelainen et al. 2006).

Muovisuojaarakenteet	
Lyhenne	Selitys
Ulkokuori	
M	Eriste-elementin ulkokuori on yleensä polyeteeniä
Eristemateriaali	
pu	Polyuretaanivaaho
pe	Vaahdotettu polyeteeni
mv	Mineraalivilla
Rakenne	
k	Putket ovat kiinni putken eristyksessä
l	Putket eivät ole kiinni putken eristyksessä

Kaukolämpöputket mitoitetaan Suomessa kestämään 16 baarin paine ja 120 °C:n lämpötila. Putken tulee olla toimintakuntoinen mitoituksellaisissa lämpötilassa vähintään 30 vuotta. Normaalisti lämpötila putkessa on alle 115 °C, jolloin putken tulee kestää yli 50 vuotta jatkuvassa käytössä. Veden lämpötilaan vaikuttaa ympäristön lämpötila, joka on kääntäen verrannollinen rakennusten lämmönkulutukseen. Ulkolämpötilan noustessa rakennusten lämmönkulutus laskee, jolloin kaukolämpövirtauksen nopeutta tai lämpötilaa voidaan laskea. (Koskelainen et al. 2006)

Kaukolämpöputket kaivetaan putkikanaviin, joiden syvyys vaihtelee eristekerroksen ulkohalkaisijan mukaan. Putket asetetaan johtoalustan päälle, ja kanava täytetään tiivistetyllä hiekalla niin, että putken yläpuolelle jää vielä 150 mm:n kerros tiivistettyä hiekkaa. Tähän kohtaan vedetään myös merkintä nauha, joka varoittaa kaukolämpöputkesta. Lopuksi kaivanto täytetään paikallisella maa-aineksella niin, että merkintä nauhaan jää etäisyyttä vähintään 350 mm. Kuvassa 2 vasemmalla puolella yksiputkijohto 2Mpuk ja oikealla puolella kaksijohtoputki Mpuk asennettuna johtokanavaan. (Energia teollisuus ry 2013)



Kuva 2. Kuvassa putkikanavan dimensioita. Vasemmalla puolella 2Mpuk ja oikealla puolella Mpuk. (muokattu lähteestä Koskelainen et al. 2006)

2.3.2 Pumput ja venttiilit

Pumppujen tarkoitus on nostaa veden kokonaisenergiaa nostaen veden painekorkeutta. Paineen korotuksella vesi saadaan virtaamaan kaukolämpöverkossa. Pumppujen pumpukäyrät kertovat pumpun nostokorkeuden tilavuusvirran funktiona, jolloin pumppu pystytään mitoittamaan verkoston kanssa yhteensopivaksi. Pumppuvalmistajat ilmoittavat myös pumpun hyötysuhteen ja akselitehon virtauksen funktiona. Näiden avulla pystytään mitoittamaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella toimiva pumppu kaukolämpöverkoon. (Koskelainen et al. 2006; Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1980)

Kaukolämpöverkossa käytettävät pumput ovat tavanomaisesti keskipakopumppuja. Pumppujen mitoituksessa käytetään usein verkoston kaukaisimman kuluttajan paineroa meno- ja paluuvirtauksen välillä. Kaukaisimmalla kuluttajalla tarkoitetaan sitä kuluttajaa verkossa, jonka virtauksien välinen paine-ero on pienin. Painehäviöistä johtuen tämä kuluttaja on usein maantieteellisesti kauimpana lämmöntuottajasta. Kaukaisimmalle kuluttajalle nyrkkisääntönä pidetään noin yhden baarin paine eroa. (Korhonen 2020) Verkoston pumppauksien suunnitteluun vaikuttaa myös maanpinnan korkeuserot. Verkostoa suunniteltaessa on huomioitava, että vesi ei pääse höyrystymään alhaisilla painetasoilla. Erityisen suuri riski höyrystymiseen on suurien mäkien päällä ja juuri ennen pumppausta, jolloin kavitointiriski on suuri. Kavitoinnilla tarkoitetaan veden höyrystymistä pumpun imupuolella juuri ennen pumppua, jolloin paine alenee pumppauksen seurauksena. Höyryn pumppaus vahingoittaa pumpun lapoja ja huonontaa pumppaustehoa. (Koskelainen et al. 2006)

Venttiileitä käytetään virtauksen rajoittamiseen. Virtaus voidaan sulkea venttiilillä kokonaan tai osittain. Osittainen venttiilin sulkeminen pienentää painetta venttiilin jälkeen, jo-

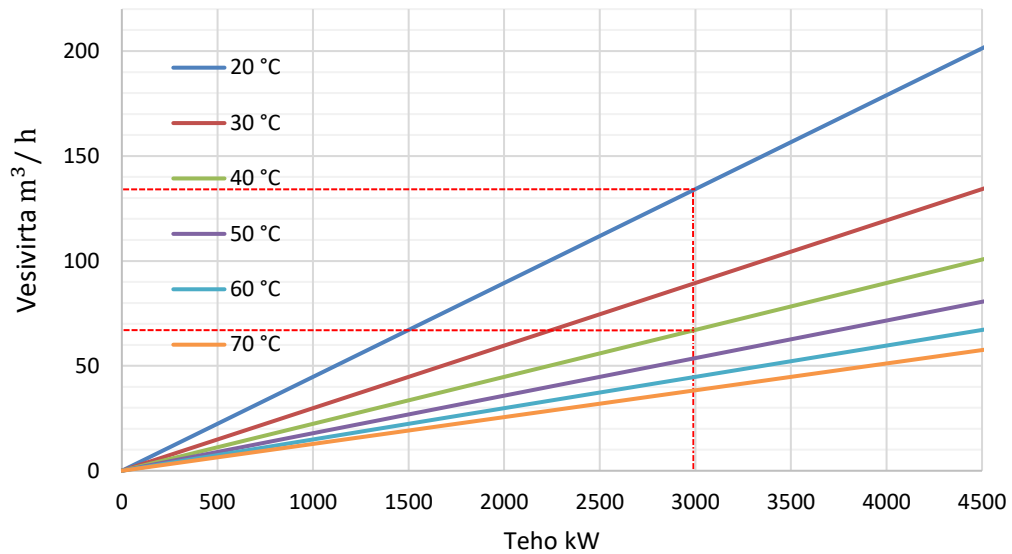
ten se on ikään kuin käänteinen tapahtuma pumppaukselle. Paineen laskemista venttiilillä kutsutaan kuristamiseksi. (Çengel 2006) Venttiilejä käytetään kaukolämpöverkossa erityisesti pumppaamoilla, jossa virtauksia voidaan hetkellisesti rajoittaa esimerkiksi huoltotöiden ajaksi. Venttiileitä tarvitaan myös normaaliin käyttöön liittyvien aluejako- ja säätötoimintojen suorittamiseen. (Koskelainen et al. 2006)

2.3.3 Lämmönvaihtimet

Lämpöenergia siirretään sekä lämmöntuottajalla että lämmönkuluttajalla lämmönvaihtimilla kaukolämpöverkkoon. Näin verkostossa kiertävä vesi ei koskaan päädy kaukolämpöverkon ulkopuolelle. (Koskelainen et al. 2006) Lämmönvaihtimissa kuuma virtaus luovuttaa lämpöenergiaa kylmälle virtaukselle termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti (Çengel 2015). Voimalaitoksissa lämpöenergia siirretään lauhtuvasta höyrystä kaukolämpövedeen lauhtuttimella (Koskelainen et al. 2006). Lämmönkuluttajilla lämpöenergia siirretään rakennuksien lämmitysjärjestelmään vastavirtalämmönsiirtimillä, sillä se siirtää lämpöä tehokkaammin myötavirtalämmönsiirtimeen verrattuna (Çengel 2015). Rakennusten lämmönvaihtimet suunnitellaan niin, että ne siirtävät lämpöenergiaa aina mahdollisimman tehokkaasti ja ne on mitoitettu kuluttajan hetkellisesti suurimman lämpötehtarpeen mukaan (Koskelainen et al. 2006). Kuluttajilta palaavalle vesivirralle voidaan antaa raja-arvot. Esimerkiksi Helen Oy:n kaukolämpöverkossa kuluttajan paluuvesi saa olla suurimmillaan 62 °C kolmitieventtiilikytkenällä. (Helen Oy 2019)

Lämmönvaihtimien jäähtymän suuruus on kääntäen verrannollinen kaukolämpöverkon tilavuusvirtaan vakio siirtoteholla. Ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 3, jossa jäähtymän suuruus on esitetty eri värisillä suorilla, y-akselina veden tilavuusvirtaus ja x-akselina siirretty lämpöteho. Koska tilavuusvirran kasvattaminen suurentaa tarvittavaa pumppaustehoa, halutaan lämmönvaihtimen jäähtymä pitää mahdollisimman suurena. Kuvassa 3000 kW:n lämpötehon siirtäminen vaatii 20 °C:een jäähtymällä noin 132 m³/h:n tilavuusvirran. Kun asteisuus kasvatetaan 40 asteeseen, tarvittava tilavuusvirta on vain 68 m³/h. Kuvaajassa veden lähtölämpötilana on käytetty 100 °C. (Energiateollisuus ry 2014)

Vesivirta tehon ja veden jäähtymän funktiona



Kuva 3. Kuvassa on esitetty vesivirta eri veden jäähtymien ja tehojen funktiona. Lähtölämpötilana vedelle on käytetty 100 °C. (muokattu lähteestä Energiateollisuus ry 2014)

Kuvasta 3 huomataan, että 50 °C suuremmilla jäähtymillä virtaus ei enää laske merkittävästi jäähtymän suurentuessa. Tästä syystä lämmönvaihtimien lämmönsiirto tehokkuuden parantaminen ei ole tietyn pisteen jälkeen enää kannattavaa, sillä suuremmat lämmönvaihtimet maksavat enemmän, ja niistä saatava hyöty ei ole enää merkittävä. Kuluttajien lämmönsiirtimiin kiinnitetään kuitenkin paljon huomiota, sillä kaukolämpöverkon pumppausten tarvitsema sähköteho on merkittävä kustannus siirtoverkon ylläpidossa. (Koskelainen et al. 2006)

3. KAUKOLÄMPÖVERKON MALLINNUS

3.1 Kaukolämpöverkossa tapahtuvat fysikaaliset ilmiöt

Kaukolämpöverkossa tapahtuvat fysikaaliset ilmiöt pohjautuvat termodynamiikkaan ja hydromekaniikkaan. Jotta kaukolämpösimulaattoreiden toimintaa voidaan kriittisesti tarkastella, on tärkeää sisäistää simulaattoreiden fysikaalinen laskenta tulosten takana. Seuraavissa luvuissa on esitelty laskenta, jonka pohjalta tutkimuksessa tehty vertaileva laskenta on suoritettu.

3.1.1 Hydromekaaninen laskenta

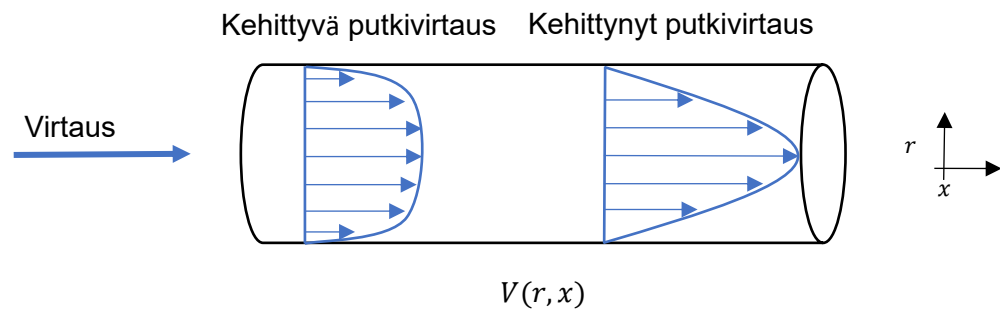
Koska kaukolämpöverkossa lämmönsiirto tapahtuu virtaavan veden avulla, liittyy verkostolaskentaan paljon hydromekaniikan ilmiöitä. Virtaavaa vettä voidaan tarkastella joko avouoma- tai putkivirtauksena. Avouomavirtauksessa virtaus tapahtuu avonaisessa kanavassa tai osittain täydessä umpinaisessa putkessa. Putkivirtauksessa puolestaan virtaus täyttää putken kokonaan. Koska kaukolämpöverkossa virtaus tapahtuu täydessä umpinaisessa putkessa, tarkastellaan jatkossa kaikkia virtauksia putkivirtauksina. (Çengel 2006) Putkivirtauksessa virtaus voi olla laminaaria tai turbulenttia. Laminaarissa virtauksessa ei ole pyörteitä ja virtaus on tasaista ja suoraviivaista. Turbulentti virtaus on paljon yleisempi virtauksen muoto. Siinä virtaus pyörteilee, eikä partikkeleiden liike ole suoraviivaista. Virtauksen laminaarisuutta tai turbulenttisuutta kuvataan Reynoldsin luvulla:

$$Re = \frac{VD}{\nu}, \quad (1)$$

jossa V on virtauksen keskimääräinen nopeus [m/s], D putken hydraulinen halkaisija [m] ja ν fluidin kinemaattinen viskositeetti [m²/s]. Kun Reynoldsin luku ylittää arvon 4000 puhutaan turbulenttisesta virtauksesta. Laminaarin virtauksen Reynoldsin luku alle 2300. Laminaarin ja turbulentin alueen väliin jäävää aluetta kutsutaan siirtymäalueeksi, jossa virtaus voi olla laminaari, turbulenti tai näiden yhdistelmä. (Çengel 2006)

Kun matka putken päästä on riittävän pitkä, muuttuu virtaus täysin kehittyneeksi virtaukseksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että virtauksen nopeusjakauma putkessa ei muutu virtaussuunnassa. Täysin kehittyneen virtauksen kitkerroin f on vakio ja paine alenee lineaarisesti virtaussuunnassa. Kuvassa 4 putkeen saapuva tulppavirtaus muuttuu pidemmälle edetessä täysin kehittyneeksi virtaukseksi, jonka nopeusjakauma pysyy va-

kiona. Virtausnopeus saa suurimman arvonsa r -suunnassa putken keskellä ja pienimmän aivan putken sisäpinnassa, jossa virtausnopeus on putken suhteen nolla. Virtausnopeudelle x -suunnassa käytetään yleisesti keskimääräistä virtausnopeutta V . Tässä tutkimuksessa kaikki virtaukset ovat täysin kehittyneitä, sillä kaukolämpöverkkojen siirtolinjat ovat todella pitkiä verrattuna siihen osaan, jossa virtaus ei ole vielä täysin kehittynyt. Näin ollen kehittymättömän virtauksen vaikutus tuloksiin on marginaalinen. (Çengel 2006)



Kuva 4. Nopeusjakaumat putkivirtauksen alussa ja täysin kehittyneessä virtauksessa. (Çengel 2006)

Virtauslaskennassa tarkastellaan usein virtauksessa siirtynyttä tilavuusvirtaa Q , massa virtaa \dot{m} ja virtausnopeutta V . Suureiden välillä on olemassa verrannollisuuksia, joita kuvataan seuraavilla yhtälöillä:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_2 = V_1 A_1 = V_2 A_2. \quad (3)$$

Yhtälö 2 on jatkuvuusyhtälö, joka kuvaa massavirran pysyvän vakiona virtauksen jokaisessa kohdassa. Mikäli fluidi on kokoon puristumaton eli sen tiheys ρ pysyy vakiona, voidaan jatkuvuusyhtälöä soveltaa myös tilavuusvirran tapauksessa. Verrannollisuus virtausnopeuden V , putken virtauskanavan pinta-alan A ja tilavuusvirran Q saadaan yhtälöstä 3. Massavirran yhteys tilavuusvirtaan saadaan seuraavasti:

$$\dot{m} = \rho Q, \quad (4)$$

jossa ρ on fluidin tiheys [kg/m^3]. (Çengel 2006) Virtauksen mekaanisten energioiden konversioita fluidin tiheyden pysyessä vakiona kuvaa Bernoullin yhtälö:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2. \quad (5)$$

Yhtälössä g on keskimääräinen putoamiskiihtyvyyden $[\text{m}/\text{s}^2]$ ja z korkeus metreinä valitusta nollatasosta. Yksikkönä yhtälössä on [J/kg]. Bernoullin yhtälö koostuu kolmesta komponentista. Ensimmäinen termi $\frac{p_1}{\rho}$ kuvaa virtauksen staattisesta paineesta aiheutuvaa

energiasisältöä, toinen termi $\frac{V_1^2}{2}$ virtauksen liike-energiaa ja kolmas termi gz potentiaalienergiaa. Yhtälö perustuu termodynamiikan ensimmäiseen lakiin, jonka mukaan energia ei voida luoda eikä hävittää. Energia voi tosin muuttua muotoaan esimerkiksi potentiaalienergiasta liike-energiaksi. (Walski et al. 2003) Bernoullin yhtälön ongelma on kitka- ja kertahäviöt, joita se ei huomioi lainkaan. Lisäämällä Bernoullin yhtälöön kitkasta ja kertahäviöistä johtuvat häviöt sekä pumppauksesta aiheutuva paineen korotus, saadaan muodostettua yleinen putkivirtauksen energiayhtälö:

$$H_p + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L. \quad (6)$$

Yhtälössä H_p kuvastaa pumpun nostokorkeutta [m] ja h_L kitkasta aiheutuvia kokonaishäviöitä [m]. Energiayhtälön yksikkö on metriä vesipatsasta [mvp]. Tämä kuvaa hydrostaattista painetta, jonka metrin korkuinen vesipatsas aiheuttaa. Kokonaispainehäviö h_L koostuu kitkan ja kertavastustuksien aiheuttamista painehäviöistä. Kertavastuksia kaukolämpöverkossa ovat esimerkiksi putkien mutkat ja venttiilit. (Walski et al. 2003) Kokonaispainehäviöistä Darcy-Weisbachin yhtälöä käytetään yleisesti Euroopassa. Myös Hazen-Williamsin yhtälöä käytettiin aikaisemmin, mutta sen käyttö on vähentynyt epätarkkojen tuloksien myötä. Darcy-Weisbachin yhtälöstä tilavuusvirta on ratkaistava iteratiivisesti, joka monimutkaistaa laskentaa (Shamir 1973). Darcy-Weisbachin yhtälön avulla painehäviöt putkivirtauksessa ovat:

$$h_L = f \frac{V^2 L}{2g D} + \sum K \frac{V^2}{2g} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2g} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^5}. \quad (7)$$

Yhtälössä L on putkiston kokonaispituus [m], K on yksittäinen kertavastus ja f on kitkakerroin. Kitkakertoimelle on olemassa useita eri yhtälöitä. Näistä yleisimpiä ovat ja Colebrook-Whiten yhtälö, joka sopii sekä sileälle että karhealle turbulentialle putkivirtaukselle:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right) \quad (8)$$

ja Haalandin yhtälö:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log_{10} \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right). \quad (9)$$

Yhtälöissä ε on putken ekvivalentti karheus, joka saadaan yhtälöstä:

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{D}, \quad (10)$$

jossa κ on putken absoluuttinen karheus [mm]. Myös Haaladin yhtälö sopii sileille ja karheille putkille. Haaladin yhtälöstä kitkakertoimen f on yksinkertaisempaa, sillä sitä ei tarvitse iteroida. Virhettä Colebrook-Whiten yhtälöön on suurimmillaan 2 prosenttia. (Walski et al. 2003) Koska Colebrook-Whiten yhtälön ratkaiseminen vaatii iterointia, on yhtälön ratkaisulle kehitetty monenlaisia yksinkertaisempia variaatiota, jotka pyrkivät saamaan lopputulokseen. Näistä Haalandin vuonna 1983 kehittämää ratkaisua käytetään vielä yleisesti, vaikka 2000-luvun jälkeen on saatu useita uusia kilpailijoita yhtälölle. (Asker et al. 2014) Tässä tutkimuksessa käytetään Haalandin yhtälöä kitkakertoimen määrittämiseen.

3.1.2 Lämmönsiirto

Kaukolämpöverkossa siirtynyt lämpöteho voidaan määrittää suhteellisen yksinkertaisesti veden massavirran ja jäähtymän avulla. Sillä paine yksittäisessä putkessa on lähes vakio, voidaan veden ominaislämpökapasiteetti ottaa vakio paineessa. Jos putki on pitkä, määritellään ominaislämpökapasiteetti keskiarvo paineessa putken painehäviöistä johtuen. (Çengel 2006)

Kaukolämpöverkossa siirtyvä lämpöteho [W] saadaan yhtälöstä:

$$\Phi = c_p \dot{m} (T_m - T_p), \quad (11)$$

jossa c_p on veden ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa [$J/kg \text{ } ^\circ C$], \dot{m} on veden massavirta [kg/s], T_m on virtauksen menopuolen lämpötila ja T_p on virtauksen paluupuolen lämpötila. (Çengel 2015)

3.1.3 Lämmönsiirron lämpöhäviöt

Kaukolämpöverkossa tapahtuu lämpöhäviöitä keskimäärin noin 4–20 % riippuen putki-koosta ja eristyksestä. Pienemmissä putkissa häviöt ovat suuremmat johtuen suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykyyn. Lämmön johtuminen on suoraan verrannollinen virtauksen ja ympäristön lämpötilaeroon. Tämän takia putkia eristetään, jotta lämpöhäviöt putkesta ympäristöön olisivat pienemmät. Eristyksessä on otettava huomioon kuitenkin taloudelliset tekijät, joten eristeen paksuutta ei ole kannattavaa kasvattaa kohtuuttomasti. (Koskelainen et al. 2006) Lämmön siirtyminen putkesta ympäristöön tapahtuu johtumalla ja konvektiolla. Virtaavasta vedestä lämpö siirtyy putken sisäpintaan konvektiolla, josta se johtuu putken ja eristeen läpi eristeen ulkopintaan. Tästä lämpö siirtyy konvektiolla maaperään, josta se johtuu maanpintaan. Maanpinnalta lämpö siirtyy pääasiassa konvektiolla ympäröivään ilmaan. (Çengel 2015)

Eristeen ja vaipan lämpövastus pituutta kohden pystytään määrittämään yhtälöstä:

$$R_i = \frac{1}{2\pi k_i} \ln \frac{D_i}{D_p}, \quad (12)$$

jossa k_i on eristeen lämmönjohtavuus [$W/(m \text{ } ^\circ C)$], D_i on eristeen ulkohalkaisija ja D_p on eristeen sisähalkaisija. Kuvassa 5 halkaisijat ovat havainnollistettu. Eristeen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa myös eristeen käyttöikä, virtauksen lämpötila, kosteus ja erilaiset raot saumoissa ja onteloissa. Tässä työssä edellisiä tekijöitä ei erikseen huomioida, ja putket mallinnetaan uusina. Kiinnivaahdotetuille maahan upotetuille kaukolämpöputkille maaperän lämpövastus putken pituutta kohden voidaan määrittää yhtälöstä:

$$R_g = \frac{1}{2\pi k_g} \left(\ln \left(\frac{4H}{D_i} \right) - \frac{\left(\frac{D_i}{2E} \right)^2 \left(\frac{D_i}{2H} \right)^2 + \frac{D_i^2}{4(4H^2 + E^2)}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} \left(\frac{D_i}{2E} \right)^2} \right), \quad (13)$$

jossa k_g on maaperän lämmönjohtavuus [$W/(m \text{ } ^\circ C)$], E on putkien keskipisteiden välinen etäisyys [m] ja H on putkien korjattusvyvyys [m]. Maaperän lämmönjohtavuuteen vaikuttaa maaperän kosteus ja laatu, jolloin arvot vaihtelevat Suomessa keskimäärin välillä 0,5–3,5 [$W/(m \text{ } ^\circ C)$]. Korjatussa syvyydessä maanpinnan lämpövastus lisätään maaperän lämpövastukseen lisäämällä maaperän syvyyttä. Tällöin maanpinnalle ei tarvitse erikseen laskea lämpövastusta. Näin korjatuksi syvyydeksi saadaan

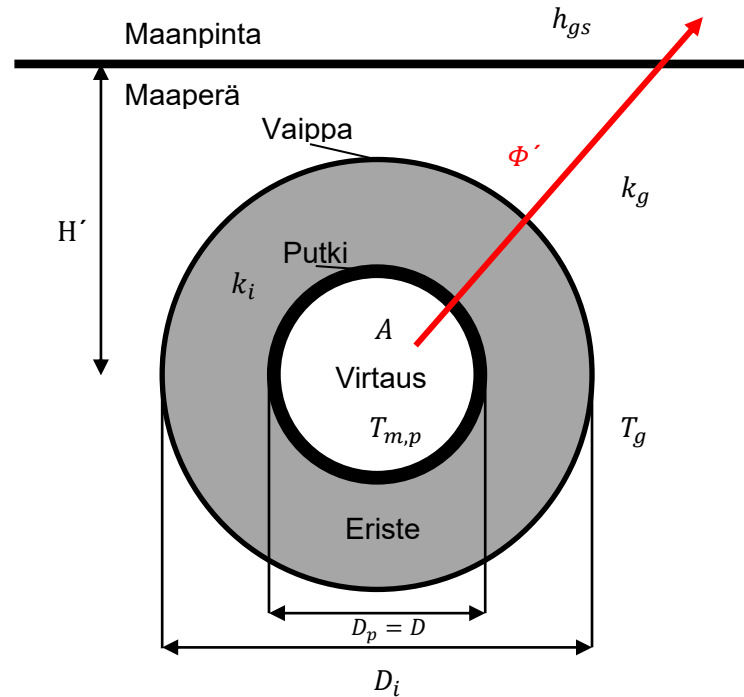
$$H = H' + \frac{k_g}{h_{gs}}, \quad (14)$$

jossa H' on putken todellinen syvyys putken keskipisteestä mitattuna [m] ja h_{gs} on lämmönsiirtokerroin maanpinnalla [$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$]. Lämmönsiirtokerroin saa tyypillisesti arvoja väliltä 12–15 [$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$]. Maaperän lämpövastuksen yhtälössä esiintyy myös apusuure β , joka määritellään seuraavasti:

$$\beta = \frac{k_g}{k_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right). \quad (15)$$

Koska kaukolämpöverkossa meno- ja paluuputki kulkevat samassa kanavassa, siirtyy lämpöä lämpimämmästä menoputkesta kylmempään paluuputkeen termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti. Putkien keskinäisen vaikutuksen lämmönsiirtoon huomioi lämpövastus R_m . (Koskelainen et al. 2006) Se saadaan ratkaistua yhtälöstä:

$$R_m = \frac{1}{4\pi k_g} \left(\ln \left(1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right) \right). \quad (16)$$



Kuva 5. Putken dimensioita ja lämpöhäviöiden laskentaan liittyviä tärkeitä merkintöjä. Punaisella kuvaan on merkitty lämpöhäviöt, jotka johtuvat ja kulkeutuvat virtauksesta ympäristöön. (muokattu lähteestä Koskelainen et al. 2006)

Kun tarvittavat lämpövastukset R_i , R_g ja R_m on määritetty, niiden avulla saadaan ratkaistua lämmönsiirtokertoimet:

$$K_1 = \frac{(R_g + R_i)}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (17)$$

$$K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2}. \quad (18)$$

Lämmönsiirtokerroin K_2 [W/(m °C)] liittyy meno- ja paluupuolen väliseen lämmönsiirtoon ja K_1 [W/(m °C)] virtauksen ja maaperän väliseen lämmönsiirtoon. Lämmönsiirtokertoimien avulla saadaan lopulta määritettyä kaukolämpöverkon meno- ja paluupuolen lämpöhäviöt:

$$\Phi'_m = (K_1 - K_2)(T_m - T_g) + K_2(T_m - T_p) \quad (19)$$

$$\Phi'_p = (K_1 - K_2)(T_p - T_g) - K_2(T_m - T_p). \quad (20)$$

Yhtälöt muodostuvat kahdesta osasta. Ensimmäinen osa kuvastaa lämmönsiirtoa virtauksesta maaperään ja toinen lämmönsiirtoa menopuolen virtauksesta paluupuolen virtaukseen. Tämän takia menopuolella toisen osan etumerkki on positiivinen, sillä se lisää menopuolen lämpöhäviöitä, kun taas paluupuolella se vähentää lämpöhäviöiden määrää. Kuvaan 5 on havainnollistettu lämpöhäviöiden siirtymistä. (Koskelainen et al. 2006)

3.2 Kaukolämpöverkkomalli

Mallinnus tarkoittaa ilmiön tai järjestelmän kuvaamista matemaattisessa muodossa. Mallin avulla ilmiötä tai järjestelmää voidaan simuloida, jolloin niiden käyttäytymistä ja toimintaa voidaan arvioida. Arvioiden perusteella pystytään ennustamaan kyseisen ilmiön tai järjestelmän toimintaa. Nykyään mallintaminen ja simuloiminen toteutetaan käytännössä tietokoneiden avulla, koska laskennan monimutkaisuus koituu liian työlääksi ja vaikeaksi käsin laskettaessa. Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa, myös mallien kompleksisuus ja koko ovat pystyneet kasvamaan. Oleellista simuloinnissa kuitenkin on, että tulokset eivät riipu tietokoneen laskentatarkkuudesta, vaan kuvaavat mallinnettavan ilmiön tai järjestelmän käyttäytymistä. (Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos 2002)

Kaukolämpöverkon mallinnuksessa on kyse verkon luomisesta tietokoneella virtuaalisesti. Verkostomallilla voidaan simuloida kaukolämpöverkon toimintaa ja tutkia verkoston käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Tällöin voidaan esimerkiksi ennaltaehkäistä verkon häiriöitä ja automatisoida verkoston toimintaa. Nykyään ennen uusien kaukolämpölinjojen rakentamista linjat voidaan mallintaa ja simuloida tietokoneilla, jolloin voidaan tehdä lopullinen päätös uuden linjan kannattavuudesta. Hyvällä suunnittelulla vältytään monilta virheiltiltä, joita ilman simulaatiota olisi voinut ilmentyä.

Kaukolämpöverkkomallin simuloiminen voi olla dynaaminen tai staattinen. Dynaamisella simuloinnilla tarkoitetaan ajasta riippuvaa laskentaa ja staattisella ajasta riippumatonta laskentaa (Çengel 2006). Staattisessa simuloinnissa järjestelmän tila lasketaan tietyllä ajanhetkellä, jolloin parametrien arvot pysyvät vakioina. Tuloksena saadaan järjestelmän tila tasapainotilanteessa. Dynaaminen laskenta pohjautuu staattiseen laskentaan, jossa jokaisen iterointikierron laskenta perustuu aina edelliseen iterointikierrokseen. Kierrosten välissä parametrien arvot voivat vaihdella. (Walski et al. 2003)

Dynaamisen mallin etuna on se, että simuloituille muuttujille voidaan antaa arvoja ajan funktiona (Walski et al. 2003). Tällöin esimerkiksi kuluttajan lämmönkulutus voi vaihdella eri vuorokauden aikojen mukaan. Staattisessa mallissa kuluttajalle olisi annettava vakio lämmönkulutus. Dynaamisella kaukolämpömallilla pystytään luomaan virtuaalinen todellisuutta kuvaava malli kaukolämpöverkosta. Dynaamisen mallin huonona puolena voidaan pitää sen kompleksisuutta laskennallisesti. Aikaparametrin huomioiminen laskennassa raskauttaa laskentaa huomattavasti, jolloin tietokoneelta vaadittava laskenta-aika ja -teho nousevat merkittävästi. Nykypäivänä tämä ei enää kuitenkaan nouse suureksi esteeksi tietokoneiden korkean laskentatehon vuoksi. (Schweiger et al. 2017)

Kaukolämpöverkkojen mallinnukseen ja simulointiin löytyy markkinoilta useita eri ohjelmia kuten: Apros (Apros 2020), Fluidit Heat (Fluidit Oy 2020), Netsim (Vitec FuturSoft Oy 2020), OpenModelica (OpenModelica 2020), Termis (Termis 2020) ja ZuluThermo (Politerm 2020). Suomessa on käytetty myös Grades Heating -nimistä simulaattoria, mutta sen käytöstä ollaan luopumassa, eikä kyseiselle simulaattorille löydy enää nettisivuja. Simulaattorin nimi esiintyy kuitenkin vanhoissa tutkimusraporteissa. (Planora Oy 2015; VTT 2015) Simulaattoreiden ominaisuudet vaihtelevat ohjelmittain, mutta jokainen ohjelma sisältää graafisen käyttöliittymän, jonka avulla tarkasteltava kaukolämpöverkko voidaan luoda. Tämä tutkimus keskittyy hydraulisten ja termodynaamisten ilmiöiden tarkasteluun, joten simulaattoreiden erilaisiin ominaisuuksiin ei perehdytä syvemmin.

3.3 Kaukolämpöverkkomallin suunnittelu

Kaukolämpöverkon mallinnuksessa lähdetään liikkeelle lämpötehon tarpeesta ja verkoston ja sen komponenttien maantieteellisistä sijainneista (Koskelainen et al. 2006). Mallinnuksen eteneminen on kuitenkin hyvin tapauskohtaista, sillä mallinnuksesta haluttavat tulokset vaihtelevat tapauksittain. Mallin rakentaminen lähtee harvoin tyhjästä liikkeelle, koska yleensä olemassa olevasta kaukolämpöverkosta on jo olemassa sähköistä dataa, jota voidaan tuoda kaukolämpömalliin (Walski et al. 2003). Data voi olla esimerkiksi kaukolämpöputkien maantieteelliset sijainnit ja niiden dimensiot. Uusia putkilinjoja rakennettaessa näin ei tietenkään voida menetellä, vaan putket on piirrettävä malliin itse. Suurien verkostojen tapauksissa putkia ei piirretä käsin.

Kaukolämpömallin rakentamisessa otetaan huomioon myös erilaiset skenaariot, joissa verkoston toimintaa tullaan tarkastelemaan. Skenaariolla kuvataan mallin ilmiötä loppukäyttäjän näkökulmasta. Skenaarioita voi olla mallissa monia ja niillä voi olla lisäksi vielä aliskenaarioita. Ideaalisessa tilanteessa kaukolämpöverkosta on olemassa vain yksi skenaario, joka reagoi automaattisesti kaikkiin tarkasteltaviin tilanteisiin. (Bai et al. 2002) Erilaisia skenaarioita voivat olla esimerkiksi tilanteet, joissa venttiileillä suljetaan verkoston osia erilleen muusta verkostosta tiettyinä vuodenaikoina. On kuitenkin tilanteita, joissa toimivan automaation rakentaminen kaikkiin tilanteisiin on mahdotonta tai turhan työlästä. Tällöin ratkaisuna voidaan rakentaa kokonaan toinen skenaario edellisen pohjalta ja muuttaa siihen mallin komponenttien parametreja. Edellisen esimerkin tapauksessa olisi uudessa skenaariossa voitu muuttaa putki kokonaan suljetuksi, jolloin vesi ei pääsisi virtaamaan sen läpi. Tällöin venttiilille ei olisi tarvinnut rakentaa automaatiota, sillä putki olisi tässä skenaariossa aina suljettu. Dynaamisella mallilla esimerkkitapauksen venttiilin ohjaus ei olisi kuitenkaan ollut monimutkaista automatisoida.

Kaukolämpöverkkomalli koostuu solmuista (nodes), jotka on yhdistetty toisiinsa linkeillä (links). Solmukohdat voivat olla putkien risteyskohtia, putkimateriaalien tai -koon muutoskohtia, lämmönkuluttajia tai -tuottajia, venttiilejä tai vesivarastoja. Yhteistä kaikille solmukohtille on se, että ne ovat kaikki pistemäisiä komponentteja, joilla ei ole pituutta. Linkit puolestaan yhdistävät kahta solmukohtaa. Linkejä voivat olla putket, pumpput tai venttiilit. Jokaiseen solmuun voi yhdistyä monta linkkiä, ja linkin päissä on oltava aina solmukohtia. (Shamir 1973) Linkillä voi olla pituus kuten putkilla, mutta se ei päde kaikille komponenteille kuten esimerkiksi pumpuille. Kaukolämpösimulaattoreissa löytyy eroja, mitkä komponentit mallinnetaan solmuina ja linkeinä. Esimerkki tämmöisestä komponentista on venttiili. Pääpiirteittäin kaukolämpösimulaattorit noudattavat kuitenkin samoja luokitteluperiaatteita. (Vitec FuturSoft Oy 2017) Jokaiselle solmulle ja linkille voidaan antaa maantieteellinen sijainti, jossa huomioidaan sen korkeus tarkasteltavassa tasossa. Koko kaukolämpöverkko mallinnetaan solmujen ja linkkien avulla (Shamir 1973).

3.3.1 Putket

Putkien mallintamisessa yksittäisiä lyhyitä kaukolämpöputkia ei merkitä malliin, vaan samanlaisista putkista muodostetaan pidempiä linjoja, joiden päissä ovat solmut. Mikäli putkilinja jatkuu samanlaisena pitkiä matkoja ilman siihen liittyviä linkejä, on linjan päiden välille hyvä lisätä myös solmukohtia. Solmukohdista pystytään tarkastelemaan putkilinjan simulointituloksia, jotka voivat vaihdella pitkissä putkilinjoissa linjan sisällä. Solmukohtia voi olla myös turhan paljon, jolloin se hidastaa simuloinnin laskentaa. (Walski et al. 2003)

Kaukolämpöputket voidaan tuoda kaukolämpömalliin suoraan CAD (Computer-aided Design) -piirustuksista, jotka nopeuttavat mallin luontia huomattavasti. Automaattisen putkien lisäämisen kanssa täytyy olla varovainen, sillä putkien tuomisessa voi tapahtua virheitä. Tyypillisiä ongelmia ovat irtonaiset putket, jotka eivät yhdisty mihinkään solmukohtaan. Tämän takia mallin topologia tulee tarkastaa putkien automaattista lisäämistä käytettäessä. (Walski et al. 2003)

3.3.2 Pumppaamot

Kaukolämpömallin pumppauksen kannalta suuri vaikuttava tekijä on kaukaisimman kuluttajan paine-ero, joka pyritään pitämään vähintään noin yhden baarin suuruisena. (Korhonen 2020) Putkien mitoituksen määrittää tarvittava vesivirta, jolla kysytty teho pystytään siirtämään. Tähän vaikuttaa tehon lisäksi meno- ja paluuveden lämpötilaero. Tämän takia verkostot pyritään mallintamaan niin, että lämpötilaero on mahdollisimman

suuri, jotta putkikoot ja virtaukset saataisiin pienemmiksi. Lämpötilaeroon vaikuttaa kuluttajien lämmönsiirtimien lämmönsiirtotehokkuus. Virtauksen on kuitenkin oltava noin 0,5–3,0 m/s, jotta lämpöhäviöt putkistossa eivät kasvaisi liian suuriksi siirron aikana (Korhonen 2020). Virtausnopeudet vaihtelevat kuitenkin putkikoon ja tilanteen mukaan, joten tarkkaa virtausnopeutta ei voida yleisesti määrittää (Korhonen 2020).

Pumppujen valmistajat ilmoittavat pumpuille pumppukäyrät. Pumppukäyrät ilmoittavat pumpun nostokorkeuden virtaavan veden funktiona, jolloin pumpun toimintaa pystytään mallintamaan dynaamisessa mallissa. Pumpausten mallintamisen suurena hyötynä on oikean tehoisen pumppauksen löytäminen. Tällöin pumpuksi voidaan valita juuri sopivan kokoinen pumppu, joka toimii hyvällä hyötysuhteella. Ideaalisessa tilanteessa kaukolämpömallin, jokaisella pumpulla on oma pumppukäyrä. (Walski et al. 2003)

3.3.3 Laitokset ja kuluttajat

Lämmöntuottajina kaukolämpömallissa toimii laitokset (plants) ja lämmönkuluttajina kuluttajat (demands) (Vitec FuturSoft Oy 2017). Tyypillisesti laitoksia löytyy mallista useampia, mutta vain osa niistä säätää verkoston kokonaispainetta. Verkoston paineen säätötapoja on monia, mutta usein suurissa verkoissa käytetään keskipaine-ero-säätöä, jossa laitokselle annetaan vakio paine-ero meno- ja paluupuolen virtauksille (Koskelainen et al. 2006). Esimerkiksi Helsingin kaukolämpöverkossa keskipaine-ero on 65 m (Korhonen 2020). Tyypillisesti laitoksen tuottama lämpöteho riippuu kuluttajien lämpötehon kulutuksesta sekä verkossa tapahtuvista lämpöhäviöistä. Kulutusten muuttuessa laitos reagoi kulutuksen muutoksiin lisäämällä ja vähentämällä verkkoon siirrettävää lämpötehoa. Laitos-komponenteille voidaan antaa myös raja-arvoja, joita se ei saa ylittää tai alittaa. Staattisessa mallissa laitos tuottaa koko ajan vakio tehon kaukolämpöverkkoon. (Koskelainen et al. 2006)

Kuluttajien lämmönkulutus on suoraan verrannollinen ulkolämpötilaan. Tästä syystä kuluttajien tehokäyrät ilmoitetaan ulkolämpötilan funktiona. (Koskelainen et al. 2006) Ideaalisessa tilanteessa jokaiselle kuluttajalle on tilastodataan pohjautuva tehokäyrä, jonka avulla simulaattori osaa laskea lämpötehon kokonaiskulutuksen jokaisella ajanhetkellä. Kuluttajille voidaan antaa jäähtymä tai verkkoon palaavan veden lämpötila riippuen simulaattorista. Jäähtymällä tarkoitetaan kuluttajalla saapuvan ja lähtevän veden lämpötilojen erotusta. Kummatkin asetukset määräävät veden tilavuusvirran kuluttajalle. (Vitec FuturSoft Oy 2017)

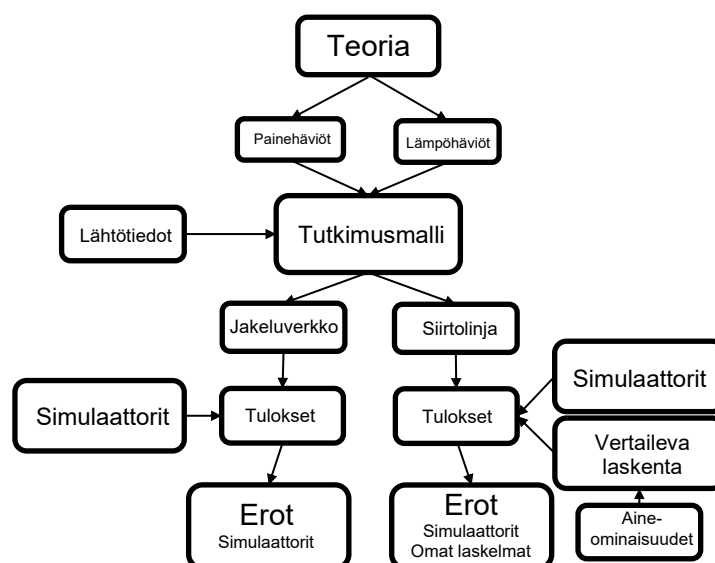
4. TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN JA AINEIS- TOT

4.1 Tutkimuksen eteneminen

Tutkimuksen päätavoite oli selvittää kaukolämpösimulaatiojärjestelmien eroavaisuuksia ja verrata tuloksia tutkijan omiin tuloksiin. Jotta tuloksia voitiin tarkastella ja vertailla keskenään oli tärkeää ymmärtää kaukolämpöverkon toiminta ja siihen liittyvät ilmiöt. Kun tarvittava ymmärrys verkon toiminnasta oli hankittu, päätettiin vertailtavat tulokset, joita tutkimuksessa tutkittaisiin. Päätutkimuskohteiksi valikoituvat verkoston paine- ja lämpöhäviöt.

Kun tutkimuskohteet oli selvitetty, aloitettiin vertailun toteuttamisen suunnittelu. Vertailu päätettiin suorittaa tutkimusmallin avulla. Tutkimusmallin suunnittelussa käytettiin apuna oikeita kaukolämpöverkon ohjearvoja ja parametreja. Mallin laskennan helpottamiseksi se jaettiin jakeluverkko- ja siirtolinjaosuteen. Jakeluverkko-osuutta tarkasteltiin pelkäämään kaukolämpösimulaattoreilla vertailevan laskennan yksinkertaistamiseksi ja siirtolinjaosuutta simulaattoreilla sekä vertailevalla laskennalla. Omissa laskelmissa käytettiin lähtötietojen lisäksi myös aineomaisuuksia, jotta tarvittavat tulokset pystyttiin laskemaan.

Tulosten selvittämisen jälkeen simulaattoreiden tuloksia vertailtiin keskenään ja pohdittiin syitä kyseisiin eroihin. Lisäksi tuloksia vertailtiin omiin vertailulaskelmiin ja pohdittiin niiden luotettavuutta. Tutkimuksen etenemistä hahmotetaan visuaalisesti kuvassa 6.

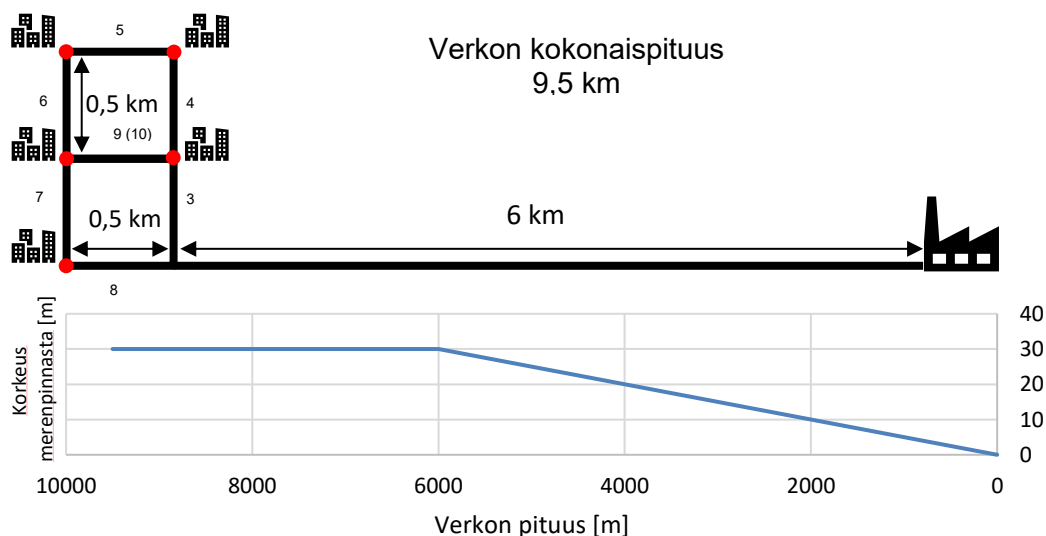


Kuva 6. Kuvassa esitetty visuaalisesti tutkimuksen etenemistä.

4.2 Tutkimusmallin suunnittelu

Kaukolämpösimulaatio-ohjelmien vertailu suoritettiin tutkimusmallin avulla, joka luotiin mahdollisimman identtiseksi jokaisella ohjelmalla. Malli suunniteltiin niin, että se olisi mahdollista rakentaa samanlaiseksi kaikilla ohjelmilla, ja tuloksia pystyttäisiin vertaamaan keskenään. Näin ollen malli pidettiin yksinkertaisena, mutta kuitenkin hydromekaanisesti täysin realistisena verkkona, jossa verkon komponenttien toiminnot vastasivat oikean kaukolämpöverkon komponentteja. Malli rakennettiin erikseen jokaisella ohjelmalla, eikä sitä kopioitu millään tavalla ohjelmasta toiseen.

Kaukolämpöverkot koostuvat usein suorasta siirtolinjaosuudesta voimalaitokselta ja haaroittuneesta jakeluverkko-osuudesta. Tämän takia myös tutkimusmalli sisältää sekä suoran 6 km:n putkiosuuden että verkoston siirtolinjan päässä, jossa on kaksi silmukkaa. Silmukan yhden sivun pituus on 500 m. Toinen syy tähän rakenteeseen on verkostolaskennan vaikeus käsin laskettaessa. Tässä tutkimuksessa käsin laskettava osuus kattaa verkon suoran siirtolinjan. Tällä osuudella pystytään kuitenkin hyvin vertaamaan paine- ja lämpöhäviöitä. Verkosto-osuuden tuloksia vertaillaan vain eri simulaattoreiden välillä. Tutkimusverkko esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kuvassa tutkimusverkon dimensioita ja kuluttajien sijainnit merkittynä punaisilla pisteillä ylhäältä kuvattuna. Lisäksi kuvassa verkon sivuprofiili merenpinnasta mitattuna. Putket on numeroitu tarkastelun helpottamiseksi. Kuvan mittasuhteet eivät ole mittakaavassa.

Tutkimusverkon siirtolinjan alkupää on maantieteellisesti merenpinnan tasolla ja sen loppupää 30 m:n korkeudella merenpinnasta. Samoin koko verkosto-osuus on 30 metrin korkeudella merenpinnasta mukaan lukien kulutuspaikat. Näin tutkimusverkostoon saatiin todellisuutta vastaavia korkeuseroja. Tutkimusmallin profiili on esitetty kuvassa 7.

Verkostomallin geometrisen suunnittelun jälkeen malli pyrittiin samaan vastaamaan hydraulisesti mahdollisimman tarkasti oikeaa kaukolämpöverkkoa. Voimalaitokselta lähtevän virtauksen lämpötila valittiin vastaamaan normaalia verkoston lämpötilaa talvella, kun maaperän lämpötila on 5 °C metrin syvyydellä maaperässä (Energia teollisuus ry 2013; Koskelainen et al. 2006). Maaperän lämpötila valittiin Suomen keskimääräisen maaperän lämpötilan mukaan (Geologian tutkimuskeskus 2008; Koskelainen et al. 2006). Paluueden lämpötila määräytyi Helenin käyttämän noin 40 °C:een jäähtymän mukaan, jolloin paluueden lämpötila kuluttajilta on 60 °C (Helen Oy 2019). Mitoituslämpötilat on esitetty taulukossa 2.

Tutkimusmallissa haluttiin käyttää putkikooltaan sellaista kaukolämpöputkea, jossa putken dimensiot vastaisivat keskikokoisen 2Mpuk-siirto johdon dimensioita. Putkeksi valittiin 2Mpuk 300/450. (Energiateollisuus ry 2016) Tästä syystä kulutettu lämpöteho piti mitoittaa, niin että yhtälöiden 11, 4 ja 3 mukaisesti virtausnopeus putkistossa olisi paine- ja lämpöhäviöiden kannalta optimaalinen. Helen Oy:ltä saamien virtausnopeuden mitoitussarvojen ja tutkijan aikaisempien kaukolämpömallinnusprojektien pohjalta virtausnopeudeksi valittiin noin 1,2 m/s. (Korhonen 2020) Tällöin kokonaiskulutuksen olisi oltava 15 000 kW yhtälöiden 11, 4 ja 3 mukaisesti. Kulutus jaettiin viiden kuluttajan kesken, jolloin yksittäisen kuluttajan lämpötehoksi saatiin 3000 kW. Taulukossa 2 on esitetty kaikki lähtötiedot, joiden perusteella tulokset on laskettu.

Tutkimusmallin suunnittelu erosi tavillisesta kaukolämpömallin suunnittelusta, sillä verkoston koko aiheutti tietyt raja-arvot eri parametreille. Koska verkosto oli hyvin pieni, tehtiin yksittäisestä kulutuksesta huomattavasti normaalia kulutusta suurempi. Tässä tapauksessa mallissa oleva yksi kulutus piste vastaisi noin 30:tä kerrostaloa, joiden lämmitettävä tilavuus olisi noin 5200 m³. Yhteensä kokonaiskulutus vastaisi siis 150 kerrostalon lämmönkulutusta. (Energiateollisuus ry 2014)

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty tutkimusmallin lähtöarvoja.

Kuvaus	Arvo	Yksikkö
Kokonaislämmönkulutus rakennuksissa	15000	kW
Menoveden lämpötila	100	°C
Paluueden lämpötila	60	°C
Maaperän lämpötila	5	°C
Siirtolinjan pituus	6000	m
Kokonaispituus	9500	m
Putken sisähalkaisija	0,3127	m
Putken ulkohalkaisija	0,3239	m
Putken asennussyvyys	0,725	m
Putkien etäisyys toisistaan	0,76	m
Putken ekvivalentti karheus	0,1	mm
Eristeen ulkohalkaisija	0,450	m
Polyuretaanin lämmönjohtavuus	0,03	W/(m°C)
Keskipaine-ero	65	m
Maaperän lämmönjohtavuus	2	W/(m °C)
Maanpinnan lämmönsiirtokerroin	13,5	W/(m ² °C)
Putken lämmönsiirtokerroin	0,553	W/mK
Veden ominaislämpökapasiteetti	4,196	kJ/(kg°C)
Veden kinemaattinen viskositeetti	3,648E-07	m ² /s
Veden tiheys keskiarvo lämpötilassa	971,8	kg/m ³

4.3 Simulaattoreiden valitseminen ja tutkimusmallien rakentaminen

Tutkimuksessa haluttiin vertailla Suomessa käytettäviä eri kaukolämpösimulaatiojärjestelmien tuloksia. Koska ohjelmat ovat lähinnä yritysten käytössä, lähestyttiin tutkimuksessa kaukolämpösimulaatiojärjestelmiä valmistavia yrityksiä ja heidän tuotteitaan käyttäviä yrityksiä. Lopulta ohjelmistoiksi valikoituivat Suomalaisen Fluidit Oy -nimisen yrityksen kaukolämpösimulaattori Fluidit Heat, Ruotsalaisen Vitec FuturSoft Oy -nimisen yrityksen simulaattori Netsim ja kolmanneksi ohjelmistoksi Helen Oy:n käyttämä Simulaattori X. Viimeisen simulaattorin nimeä ei haluttu julkaista tutkimuksessa.

Tutkimusmalli rakennettiin jokaisella kaukolämpösimulaatio-ohjelmistoilla erikseen samanlaiseksi. Jotta mallin rakentaminen samanlaiseksi eri ohjelmistoilla olisi ollut mahdollista, ei tutkimusverkolla ollut tiettyä maantieteellistä sijaintia. Näin ollen maanpinnanmuodot eivät ole vaikuttaneet mallista saataviin tuloksiin. Tutkimusmallissa ei ollut ajasta riippuvia komponentteja, joten simulaatiot suoritettiin staattisesti. Mikäli simulaattorissa ei ollut mahdollisuutta erikseen valita staattista laskentaa, nostettiin simuloinnin laskenta-aikaa niin paljon, että tulokset eivät enää riippuneet ajasta. Seuraavissa luvuissa on esitelty kyseisiä ohjelmia ja mallien rakentamisprosesseja.

4.3.1 Fluidit Heat

Fluidit Heat -simulaattori valikoitui tutkimuskohteeksi Fluidit Oy:n pyynnöstä. Tutkimusmallin suunnittelua tehtiin yhteistyössä yrityksen kanssa ja heidän toiveensa tutkittavista tuloksista pyrittiin huomioimaan mahdollisimman kattavasti. Tutkimusmallin lopullinen versio suunniteltiin yhdessä heidän kanssaan.

Fluidit Oy tarjosi Fluidit Heat -kaukolämpösimulaatio-ohjelmansa käytettäväksi koko tutkimuksen ajaksi. Tutkimusmallin rakentaminen suoritettiin yrityksen mallintajien avustuksella, jotta tutkimusmallin asetukset saatiin mahdollisimman tarkasti halutunlaisiksi. Yhteistyö heidän kanssaan sujui saumattomasti. Fluidit Heat -simulaattoria käyttää Suomessa muun muassa Elomatic Oy (Sunela 2020).

4.3.2 Netsim

Netsim päätyi tutkimukseen siitä saatavan opiskelijalisenssin myötä (Vitec FuturSoft Oy 2020). Opiskelijaversio simulaattorista oli täysin maksuton ja sitä pystyi hakemaan teknillisten yliopistojen opiskelijat. Kaukolämpösimulaattorin opiskelijaversiota ei ollut rajoitettu, mutta sen käyttö vaati etäyhteyden Vitec FuturSoft Oy:n palvelimiin. Ohjelmaa ei ollut mahdollista ladata itselleen.

Tutkimusmallin rakentaminen tapahtui muihin ohjelmiin verrattuna itsenäisemmin, sillä mahdollisuutta Vitec FuturSoft Oy:n mallintajien tapaamiseen ei ollut. Kaukolämpösimulaattoriin käyttöön oli kuitenkin olemassa varsin kattava dokumentti (Vitec FuturSoft Oy 2017). Ongelmatilanteissa yrityksen mallintajat auttoivat kuitenkin todella avuliaasti etäyhteyden avulla, joten tutkimusmalli saatiin rakennettua luotettavasti samanlaisiksi muiden tutkittavien mallien kanssa. Fortum Oyj on muun muassa käyttänyt Netsim-simulaattoria Tukholman kaukolämpöverkon optimointiin (ÅF-Consult Oy 2015).

4.3.3 Simulaattori X

Kolmas tutkittava simulaattori saatiin tutkimukseen Helen Oy:n avustuksella. Helen Oy ei itse tuota omia kaukolämpösimulaattoreitaan, vaan hankkii mallinnusohjelmat muilta yrityksiltä. Heidän avustuksellaan tutkimukseen saatiin kolmas kaukolämpösimulaattori, jota käytetään Helen Oy:n kaukolämpöverkon simulointiin.

Tutkimusmallin rakentaminen suoritettiin Helen Oy:n toimistolla heidän mallintajansa avustuksella. Mallin rakentaminen sujui tehokkaasti ammattilaisen avustuksella, eikä Simulaattori X:n opetteluun tarvinnut tästä syystä käyttää aikaa juuri ollenkaan. Koska Simulaattori oli käytössä vain yrityksen toimitiloissa, kerättiin tutkimusmallin tulokset kuva-kaappauksina, jotta niitä voitiin myöhemmin analysoida.

4.4 Vertaileva laskenta

Koska kaukolämpösimulaatiojärjestelmien sisäiseen laskentaan ei ollut mahdollista pe- rehtyä, suoritettiin tutkimuksessa vertaileva laskenta. Vertaileva laskenta suoritettiin tut- kimusverkon siirtolinjaosuudelle. Laskennassa hyödynnettiin teorialukujen laskukaavoja ja niiden lisäksi aineominaisuuksia. Aineominaisuudet saatiin tutkimukseen alan kirjalli- suudesta ja X Steam -funktioilla (Excel Engineering 2020; Çengel 2015; Koskelainen et al. 2006). Lähtöarvoina vertailevassa laskennassa käytettiin taulukon 2 arvoja. Lisäksi laskennassa käytettiin apuna Microsoftin Excel-ohjelmaa.

Laskennassa lähdettiin liikkeelle lämpöhäviöiden määrittämisestä, sillä ne olivat riippumat- tomia muista tuloksista. Eristeen ja vaipan lämmönvastus R_i ratkaistiin yhtälön 12 mu- kaisesti, missä käytettiin polyuretaanin lämmönjohtavuuden arvoa $0,03 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ (Koskelainen et al. 2006). Lämpövastukseksi R_i saatiin $1,74 \text{ (m}^\circ\text{C)}/\text{W}$. Maaperänläm- pövastus ratkaistiin yhtälöllä 13. Tähän yhtälöön tarvittiin korjattu syvyys H , joka ratkaisi- tiin yhtälöllä 12. Putken asennussyvyudeksi valittiin $0,73 \text{ m}$, sillä se oli pienin energiate- ollisuus ry:n hyväksymä asennussyvyys (Energia teollisuus ry 2013). Maan lämmönjoh- tavuudeksi valittiin $2,0 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ja lämmönsiirtokertoimeksi $13,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$ kirjallisuu- den perusteella (Koskelainen et al. 2006). Korjatuksi syvyudeksi ratkaistiin $0,87 \text{ m}$. Yh- tälön 13 ratkaisemiseksi tarvittiin myös apusuure β , joka ratkaistiin yhtälön 15 avulla. Apusuureen arvoksi saatiin $21,92$. Korjatun syvyyden H ja apusuuren β avulla pystyttiin ratkaisemaan maaperänlämpövastus R_g , jonka arvoksi saatiin $0,16 \text{ (m}^\circ\text{C)}/\text{W}$. Vii- meiseksi ratkaistiin vielä kolmas lämpövastus R_m , joka huomioi putkien keskinäisen vai- kutuksen lämpöhäviöihin yhtälön 16 mukaisesti. Lämpövastuksen R_m arvoksi saatiin $0,073 \text{ (m}^\circ\text{C)}/\text{W}$. Lämpövastuksien avulla lämmönsiirtokertoimen K_1 arvoksi ratkaistiin $0,52 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ja lämmönsiirtokertoimen K_2 arvoksi $0,020 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ yhtälöiden 17 ja 18 mukaisesti. Lopulta lämmönsiirtokertoimien avulla saatiin ratkaistua virtauksen meno- ja paluupuolella syntyvät lämpöhäviöt pituusyksikköä kohden yhtälöillä 19 ja 20. Yhtälöissä menopuolen virtauksen lämpötilaksi valittiin $100 \text{ }^\circ\text{C}$, paluupuolen lämpötilaksi $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ja maaperän lämpötilaksi $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Menopuolen lämpöhäviöiksi ϕ'_m saatiin $48,74 \text{ W}/\text{m}$ ja pa- luupuolen lämpöhäviöiksi ϕ'_p $26,95 \text{ W}/\text{m}$. Kaikki laskennassa käytetyt alkuarvot löytyvät taulukosta 2. Verkostossa syntyvät lämpöhäviöt lisättiin lämmön kokonaiskulutukseen.

Lämpöhäviöiden määrittämisen jälkeen laskettiin energiataseen avulla voimalaitokselta tarvittava lämpöteho. Lämpöteho saatiin rakennuksissa tarvittavan lämpötehon ja ver- koston kokonaislämpöhäviöiden summa, josta vähennettiin verkostossa kitkan muodos- tava lämpöteho. Ensimmäisellä iterointikierröksellä kitkan aiheuttama lämpöteho oli nolla. Kuluttajat määräisivät verkostossa tarvittavan massavirran. Massavirta ratkaistiin

yhtälön 11 avulla, missä menopuolen lämpötila oli ensimmäisellä iterointikierröksellä 100 °C ennen kuluttajia ja 60 °C kuluttajien jälkeen. Lämpötehona yhtälössä oli voimailtokselta saapuva lämpöteho, josta vähennettiin menovirtauksessa muodostuvat lämpöhäviöt ja lisättiin kitkasta aiheutuva lämpöteho.

Tilavuusvirta saatiin ratkaistua yhtälöllä 4 ja virtausnopeus yhtälöllä 3. Virtausnopeuden, veden aineominaisuuksien ja putken sisähalkaisijan avulla ratkaistiin yhtälön 1 avulla virtauksen Reynoldsin luku. Sitä hyväksi käyttäen saatiin kitkakertoimen f arvo Haalandin yhtälöllä 9, jossa putken ekvivalentti karheus oli 0,1 mm. Tämän jälkeen putkien painehäviöt saatiin yhtälön 7 avulla, jossa kertahäviöt oletettiin nolllaksi.

Painehäviöiden määrittämisen jälkeen putkistossa tapahtuva lämpötehon muodostuminen verkostossa kitkallisen virtauksen seurauksena laskettiin Bernoullin yhtälön 5 ensimmäistä termiä käyttäen, joka kuvaa staattisesta paineesta johtuvaa energiasisältöä. Syntynyt lämpöteho saatiin kertomalla termi virtauksen massavirralla. Kyseinen lämpöteho pystyttiin seuraavalla iterointikierröksellä vähentämään tuotantolaitoksen tuottamasta lämpötehosta. Ennen seuraavaa iterointikierrösta laskettiin vielä jäähtymä virtauksen menopuolella ennen kuluttajia yhtälöllä 11 ja vähennettiin se seuraavalla iterointikierröksellä menopuolen lämpötilasta. Jäähtymän lisääminen pienensi meno- ja paluuvirtauksen lämpötilaeroa kuluttajilla, joka kasvatti tarvittavaa massavirtaa verkostossa. Paluuvirtaukselle lämpötilan muutosta ei tehty, sillä kuluttajien palauttaman veden lämpötila oli aina vakio 60 °C. Iterointia jatkettiin 5 kierrosta, minkä jälkeen kitkateho saavutti vakio arvonsa, eikä muuttanut enää tuotantolaitokselta tarvittavaa lämpötehoa (liite 3). Tutkimuksessa tarkasteltavat suureet on listattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Tutkimuksessa vertailtavat suureet käsin laskennassa ja simulaattoreilla.

Tarkasteltava kohde	Käsin laskenta	Simulaattorit
Lämpötehon tuotanto:	X	X
Siirtolinja:		
Massavirta	X	X
Lämpöhäviöt	X	X
Painehäviöt	X	X
Menovirtauksen loppulämpötila	X	X
Verkosto:		
painehäviöt		X
lämpöhäviöt	X	X
massavirta		X
Kaukaisin kuluttaja:		
Virtauksien lämpötilat		X
Virtauksien paineet		X

5. TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

5.1 Laskennan tulokset

Koska simulaattoreiden ja vertailevan laskennan tuloksia muodostui paljon, on niitä kerätty viidennen luvun lisäksi myös liitteisiin. Viidenteen lukuun kerättiin tuloksista oleellimmat, mutta liitteistä löytyy yksityiskohtaisemmin komponenttien simulointitulokset Fluidit Heatille ja Netsimille. Vertailevan laskennan tulokset löytyvät liitteestä 3.

Yleisesti ottaen mallien rakentaminen samanlaisiksi yritysten mallintajien avustuksella onnistui hyvin. Ainoana erona oli Netsimin laitoskomponentin paineensäätö, joka suoritettiin hieman poiketen muista malleista. Painetaso verkossa vastasi kuitenkin muita malleja. Simulaattoreiden käyttökokemusten vertailu puolueettomasti oli hieman hankalaa, sillä Fluidit Heat oli tutkijalle jo ennalta tuttu, kun taas Netsimin kohdalla simulaattorin käyttö piti opetella alusta. Simulaattori X:n kohdalla mallin rakentaminen suoritettiin Helen Oy:n mallintajan kanssa yhdessä, joten mallintaminen onnistui sujuvasti. Yleisesti voisi kuitenkin mainita, että perustoiminnot kaikilla simulaattoreilla ovat samat, mutta niiden käyttäminen vaatii paljon totuttelua. Seuraavissa luvuissa esitellään ja vertaillaan eri simulaattoreiden simulointituloksia.

Siirtolinjan tarkastelu suoritettiin sekä käsin että simulaattoreilla. Tuloksiin vaikutti paljon laitoksen tuottama lämpöteho, jolle Netsim ja Simulaattori X saivat lähes samat lämpötehot noin 15780 kW. Fluidit Heat ja vertaileva laskenta tuottivat laitoksen tehoksi noin 100 kW pienemmän lämpötehon, joka vaikutti merkittävästi virtauksen massavirtaan. Massavirrat saivat arvoja 91,43–92,60 kg/s riippuen simulaattorista. Netsimin ja Simulaattori X:n välillä eroa oli vain 0,1 %, mutta Netsimin ja Fluidit Heatin välillä 1,2 %. Vertailevan laskennan tulos massavirralla menovirtauksessa oli 93,11 kg/s. Massavirrat ja tehot on esitetty taulukossa 7.

Siirtolinjan painehäviöt olivat lähellä toisiaan simulaattorista riippumatta. Suurimmat painehäviöt menovirtauksessa olivat Fluidit Heatillä 23,1 m, ja Netsimillä sekä Simulaattori X:llä saman suuruiset 22,1 m. Vertaileva laskenta tuotti tulokseksi 24 m, joka eroaa keskimäärin 6,3 % simulaattoreiden tuloksista. Vertaillaessa painehäviöitä kilometrin matkalla saatiin kaikille simulaattoreille sama tulos 0,38 bar/km. Vertailevalle laskennalle vastaava tulos oli 0,39 bar/km. Painehäviöiden kohdalla eroavaisuuksia siirtolinjan kohdalla oli todella vähän simulaattoreilla.

Lämpöhäviöiden kohdalla simulaattoreista Fluidit Heat erottui taas Netsimin ja Simulaattori X:n tuloksista. Kahdelle viimeiselle kokonaislämpöhäviöt siirtolinjassa olivat 495 kW

eli 82,5 W/m ja Fluidit Heatille 460 kW eli metriä kohden 76,67 W/m. Vertaileva laskenta antoi tulokseksi 454 kW.

Vaikka lämpöhäviöt olivat Netsimille ja Simulaattori X:lle samat, oli menovirtauksen jäähtymässä kuitenkin eroavaisuuksia. Netsimin virtaus jäähtyi 0,88 °C ja Simulaattori X:n virtaus 0,80 °C. Fluidit Heatin virtaus jäähtyi lämpöhäviöiden perusteella oletetusti vähiten 0,76 °C. Vertailtavassa laskennassa jäähtymälle saatiin arvoksi 0,69 °C.

Jakeluverkon osalta tuloksia tarkasteltiin vain simulaattoreiden välillä, sillä tulokset vaativat verkostolaskentaa. Tarkasteltavana oli verkoston paine- ja lämpöhäviöt sekä paluuvirtauksen massavirta. Lisäksi verkostossa tarkasteltiin lähemmin kaukaisimman kuluttajan painetta ja lämpötilaa menovirtauksessa. Taulukossa 4 on esitetty verkoston tuloksia. Putkien numerointi ja järjestys on esitetty luvun 4.2 kuvassa 7. Liitteessä 1 putki 10 vastaa taulukon putkea 9.

Taulukko 4. Jakeluverkon putkien tuloksia.

	Painehäviöt [bar/km]			Lämpöhäviöt menovirtaus [W/m]			Massavirta paluuvirtaus [kg/s]		
	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X
Putki 3	0,11	0,11	0,11	52,76	52,00	53,42	48,65	49,45	49,23
Putki 4	0,02	0,02	0,02	53,18	51,90	53,29	20,05	20,64	20,32
Putki 5	0,00	0,00	0,00	52,22	50,96	52,22	1,78	2,15	1,84
Putki 6	0,01	0,01	0,01	52,98	51,68	53,05	16,78	16,70	16,40
Putki 7	0,03	0,03	0,03	53,14	51,90	53,29	24,63	24,78	24,93
Putki 8	0,09	0,09	0,09	52,92	52,00	53,40	42,81	43,15	43,27
Putki 9	0,01	0,00	0,01	53,22	51,82	53,21	10,43	10,45	10,57

Tuloksista nähdään, että painehäviöt jakeluverkossa kilometriä kohden ovat kahden desimaalin tarkkuudella lähes yhtä suuret yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Painehäviöt ovat yleisesti myös todella pieniä, joten vertailevassa laskennassa tehty yksinkertaistus ei aiheuta suurta virhettä.

Painehäviöt ovat suoraan verrannollisia virtausnopeuteen ja massavirtaan. Näin ollen myös massavirrat ovat kohtuullisen lähellä toisiaan simulaattoreiden välillä. Suurin ero massavirroissa on Fluidit Heatin ja Netsimin välillä putkessa 3, jossa eroa massavirroilla on noin 0,8 kg/s. Putkessa 3 on toisaalta myös suurin massavirta, sillä se on toinen putkista, johon siirtolinja yhdistyy. Suhteessa massavirtaan suurin eroavaisuus massavirroissa löytyy putkesta 5, jossa Fluidit Heatin ja Netsimin ero on 0,37 kg/s. Huomattavaa tuloksissa on myös se, että putkessa 5 massavirta on reilusti pienin, eikä sen kautta tapahdu merkittävää virtausta.

Suurin eroavaisuus lämpöhäviöiden kohdalla löytyy niin ikään putkesta 3 Simulaattori X:n ja Netsimin välillä. Ero on 1,42 W/m, mutta se ole merkittävästi suurempi muiden putkien lämpöhäviöiden eroihin verrattuna. Keskiarvo simulaattoreiden lämpöhäviöiden eroavaisuuksille putkissa on 0,92 W/m.

Simulaattorit säätävät verkoston painetason kaukaisimman kuluttajan ja keskipaine-eron mukaan. Paine-ero meno- ja paluuvirtauksella oli asetettu arvoon 10 m, joka toteutuu jokaisella simulaattorilla. Erona painetason säätöön oli Netsimin mallissa keskipaine-ero, jota laitoskomponentille ei voinut antaa. Tästä syystä Netsimin malliin asetettiin lähtöpaine Fluidit Heatin ja Simulaattori X:n lähtöpaineiden mukaisesti 94 m. Kaukaisimman kuluttajan meno- ja paluupaineiden arvoja vertaamalla huomataan taulukosta 5, että pienet painehäviöiden erot simulaattoreilla näkyvät myös kaukaisimman kuluttajan painetassossa. Meno- ja paluuvirtauksien paineissa ei ole merkittäviä eroja. Sen sijaan lämpötilaero meno- ja paluuvirtauksien välillä vaihtelee Fluidit Heatin ja kahden muun simulaattorin välillä. Lämpötilaero on verrannollinen verkoston massavirtaan. Eron aiheuttaa paluuvirtauksien lämpötilat, jotka ovat 60 °C Netsimillä ja Simulaattori X:llä. Koska 60 °C oli asetettu kuluttajien paluuvirtauksen lämpötilaksi tämä tarkoittaisi sitä, että paluuvirtauksessa ei olisi tapahtunut häviöitä ennen kaukaisinta kuluttajaa ollenkaan. Kaukaisimman kuluttajan tarkasteltavat tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kaukaisimman kuluttajan tulokset.

Kaukaisin kuluttaja	Yksikkö	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X
Paluuvirtauksen paine	m	29,78	31,22	30,80
Paluuvirtauksen lämpötila	°C	59,51	60,00	60,00
Menovirtauksen paine	m	39,78	41,22	40,80
Menovirtauksen lämpötila	m	98,09	97,99	98,00
Paine-ero	m	10,00	10,00	10,00
Lämpötilaero	°C	38,58	37,99	38,00

Laitoksen tuloksia on esitetty taulukossa 6, jossa tummennetut arvot ovat asetusarvoja. Koska Netsimillä keskipainetta ei pystytty asettamaan suoraan, on sille annettu menovirtauksen lähtöpaineeksi 94 m. Laitoksen paineissa ei ole juurikaan eroa simulaattoreiden välillä. Paluuvirtauksen lämpötiloissa oli eroa suurimmillaan 0,39 °C. Tämä vastaa 92 kg/s massavirralla noin 150 kW lämpötehoa paluuvirtauksessa.

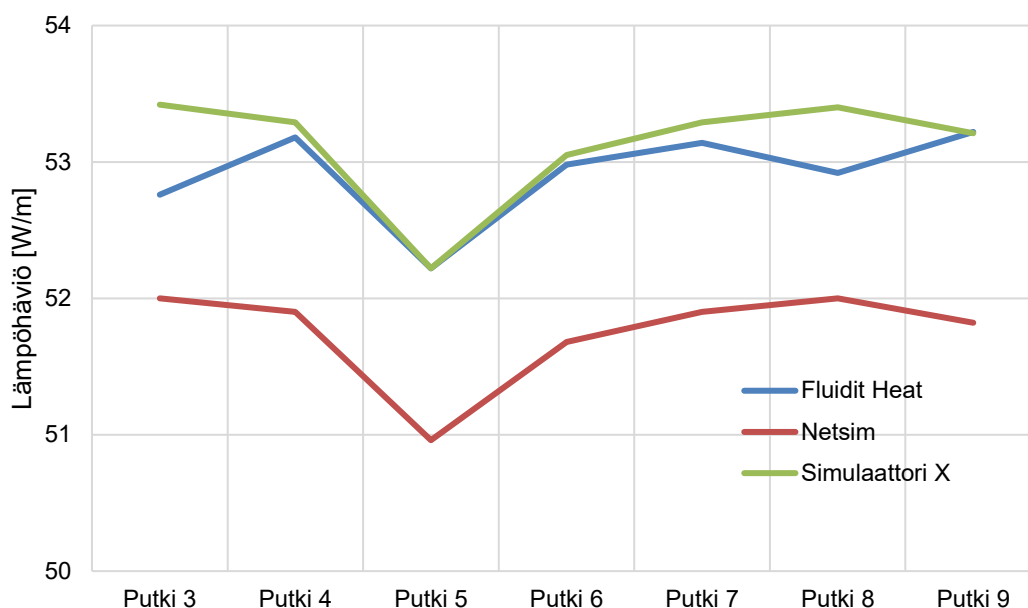
Taulukko 6. Laitoksen tulokset. Tummennetut arvot ovat asetusarvoja.

Laitos	Yksikkö	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X
Keskipaine-ero	m	65,00	65,36	65,00
Paine-ero kaukaisin kuluttaja	m	10,00	10,00	10,00
Lämpöteho	kW	15675,0	15780,0	15784,0
Paluuvirtauksen paine	m	36,00	36,71	36,40
Paluuvirtauksen lämpötila	°C	58,94	59,33	59,30
Menovirtauksen paine	m	94,10	94,00	93,60
Menovirtauksen lämpötila	°C	100,00	100,00	100,00
Paine-ero	m	58,10	57,29	57,20
Lämpötilaero	°C	41,06	40,67	40,70

5.2 Tulosten käsittely

Simulaattoreiden painehäviöt verkostossa vastaavat toisiaan niin hyvin, että jokainen simulaattori käyttää laskennassaan todennäköisesti Darcy-Weisbachin ja Colebrook-Whiten yhtälöitä. Lämpöhäviöiden laskennassa eroavaisuuksia kuitenkin löytyy. Syinä eroavaisuuksiin Fluidit Heatin ja Netsimin välillä on kitkallisesta virtauksesta aiheutuva lämpiäminen, jonka Fluidit Heat huomioi mutta Netsim ei (Dyrlind 2020; Sunela 2020). Dyrlindin mukaa Netsim ei huomioi suoraan kitkan vaikutusta lämmöntuotannossa, sillä se ei ole verkoston kannalta merkittävä. Kitkan aiheuttaman lämpötehon voi kuitenkin lisätä malliin lämpöhäviökerrointa säätämällä, mutta tällöin kyseinen lämpöteho pitää määrittää mittauksilla. Meno- ja paluuvirtauksien välinen lämmönsiirto huomioidaan myös lämpöhäviökertoimella. (Dyrlind 2020) Vertailevassa laskennassa kitkasta aiheutuva lämpöteho oli noin 44 kW koko verkostossa eli noin 6,1 % koko verkoston lämpöhäviöistä (liite 1). Simulaattori X:lle kitkan vaikutusta ei pystytty varmistamaan, mutta sen lämpöhäviöiden suuruus on todella lähellä Netsimin tulosta. Lämpöhäviöiden erot vaikuttavat suoraan myös laitoksen tuottaman lämpötehon eroihin ja sitä kautta kaikkiin simuloituihin tuloksiin. Painehäviöissä erot näkyvät vähiten.

Meno- ja paluuvirtauksien keskinäinen lämmönsiirto vaikuttaa myös lämmönsiirron häviöihin. Fluidit Heat ja Netsim eivät lämmönsiirtoa virtausten välillä automaattisesti huomio. Simulaattori X huomioi siirtyvän lämpötehon erillisellä lämpöhäviökertoimella, joka putkille oli annettu (Helen Oy 2019). Siirtynyt lämpö menovirtauksesta paluuvirtaukseen ei suoranaisesti mene hukkaan, sillä paluuvirtaukseen tullut lämpö vähentää laitokselta tarvittavaa lämpötehoa. Näin menovirtauksesta paluuvirtaukseen siirtynyt lämpöteho päätyy lopulta takaisin menovirtaukseen. Siirtynyt lämpöteho on kuitenkin pois kuluttajille siirtyvästä virtauksesta, jolloin menovirtauksen lämpötila alenee ja tarvittava massavirta kasvaa. Turku Energian verkko-ominaisuuspäällikön Jani Uitin mukaan mikään yleisesti käytettävistä kaukolämpösimulaattoreista ei huomioisi putkien välistä lämmönsiirtoa.



Kuva 8. Kuvaajassa jakeluverkon putkien menovirtauksen lämpöhäviöt eri simulaattoreille.

Kuvassa 8. on esitetty jakeluverkon putkien lämpöhäviöt menovirtauksessa. Kuvasta huomataan, että Netsimin ja Simulaattori X:n kuvaajat ovat muodoltaan hyvin yhteneväiset. Simulaattori X:n lämpöhäviöt ovat jokaisessa putkessa noin 0,027 kertaa suuremmat verrattuna Netsimiin. Vaikuttaisi siltä, että Simulaattori X:n ja Netsimin lämmönsiirronlaskennassa erona olisi vain kerroin, joka kasvattaisi Simulaattori X:n tuloksia Netsimiin nähden. Helen Oy:ltä saamien tietojen mukaan Simulaattori X:llä olisi lämmönsiirtokerroin, joka huomioisi menovirtauksesta siirtyvän lämpötehon paluuvirtaukseen. Tämä selittäisi erot Netsimin ja Simulaattori X:n välillä. Fluidit Heatin kuvaaja eroaa muista erityisesti putkien 3 ja 8 kohdalla. Putken 3 kohdalla myös massavirran suuruudessa oli eroavaisuutta kahteen muuhun simulaattoriin.

Uitin mukaan Netsim ja Simulaattori X on kehitetty samaan laskentaohjelmaan perustuen. Simulaattoreita on tämän jälkeen kehitetty eteenpäin, mutta laskentapohja on edelleen sama. Netsimin ja Simulaattori X:n simulaatioiden tulokset tukevat tätä teoriaa. Simulaattoreiden käyttöliittymät toimivat ja näyttävät kuitenkin todella erilaisilta, joten tieto oli yllättävä.

Vertailevassa laskennassa omat haasteensa toi siirtolinjan päässä sijaitseva verkosto. Koska tutkimuksessa ei menty verkostolaskentaan syvemmälle, jouduttiin verkoston osalta tekemään yksinkertaistuksia, vaikka laskennan tulokset keskittyivätkin vain siirtolinjaan. Näitä yksinkertaistuksia olivat verkoston virtauksen lämpötilat, massavirrat ja painehäviöt.

Lämpöhäviöiden laskennassa tarvittavat meno- ja paluuvirtauksen lämpötilat pidettiin vakioina koko tutkimusmallissa. Näin putkille saatiin vakio lämpöhäviöt metriä kohden meno- ja paluuvirtaukselle. Todellisuudessa lämpöhäviöt ja kitkallisesta virtauksesta aiheutuva lämpöteho vaikuttavat virtauksien lämpötiloihin ja sitä kautta myös syntyviin lämpöhäviöihin. Muutaman asteen lämpötilan muutoksella on noin 1–2 prosenttiyksikön vaikutus lämpöhäviöihin tutkimusmallissa.

Massavirran laskennassa tutkimusmallin massavirran määrää kuluttajien lämmönvaihtimet, joiden on saatava vakio lämpöteho 3000 kW ja palautettava vesi 60 °C:een lämpötilassa. Vaikka vertailevassa laskennassa ei tarkasteltu verkoston massavirtoja, vaikuttaa verkosto siirtolinjan massavirtaan. Jokaiselle kuluttajalle menovirtaus saapuu todellisuudessa hieman eri lämpötilassa lämpöhäviöistä ja kitkasta johtuen. Näin ollen massavirrat tulisi laskea erikseen jokaiselle kuluttajalle ja niiden summa olisi siirtolinjassa virtaava massavirta. Vertailevassa laskennassa siirtolinjan massavirta laskettiin ikään kuin siirtolinjaa olisi jatkettu 0,9 kilometrin verran pidemmälle kompensoimaan jakeluverkon keskimääräisiä lämpöhäviöitä. 0,9 km saatiin keskiarvona virtauksen kulkemalle matkalle jakeluverkossa siirtolinjan päästä kuluttajalle. Tämän kuvitellun linjan päässä olisi yksi kuluttaja, joka olisi kaikkien kuluttajien lämmönkulutuksen summa. Näin siirtolinjan massavirta saatiin selvitettyä ilman verkostolaskentaa. Massavirta aiheutti vertailevassa laskennassa eniten virhettä. Se erosi simulaattoreiden massavirroista keskimäärin 0,92 kg/s eli noin 1 %. Pienellä massavirran muutoksella on kuitenkin suuri vaikutus virtauksessa siirtyvään lämpötehoon.

Jakeluverkon painehäviöt on oletettu tutkimusmallissa olemattomiksi, sillä putkikoko on vakio koko tutkimusmallissa. Verkostossa virtaus jakaantuu useaan putkeen, jolloin painehäviöt putoavat merkittävästi. Simulaattoreiden tuloksia tarkastellessa oletusta voidaan pitää hyväksyttävänä, sillä meno- ja paluuvirtauksen painehäviöiden summa on alle 3 m.

Koska lämpöhäviöiden arvot vaihtelivat simulaattoreiden välillä siirtolinjassa, tehtiin lämpöhäviöille vielä tarkentava laskenta. Tarkentavassa laskennassa simulaattoreiden tuloksia hyväksi käyttäen laskettiin siirtolinjan lämpöhäviöt yhtälön 11 avulla. Lämpötila-erona yhtälössä oli virtauksen alku- ja loppulämpötila. Ominaislämpönä käytettiin simulaattoreiden käyttämää vakio arvoa 4190 kJ/kgK (Sunela 2020; Vitec FuturSoft Oy 2017). Tarkentavassa laskennassa määritellään, kuinka paljon veden täytyy luovuttaa lämpötehoa, jotta se voi jäähtyä simulaattoreiden ilmoittaman jäähtymän. Tuloksista havaitaan, että Simulaattori X:llä lämpöhäviöt ovat noin 30 kW suuremmat verrattuna virtauksesta poistuvaan todelliseen lämpötehoon. Fluidit Heatillä vastaava erotus on noin 11 kW ja Netsimillä noin 2 kW.

Taulukko 7. Taulukossa esitetty tarkentavan laskennan lähtöarvot ja tulokset.

	Yksikkö	Fluidit Heat	Netsim	Simulaattori X
Laitos				
Lämpötila menovirtaus	°C	100	100	100
Lämpötila paluuvirtaus	°C	99,24	99,12	99,2
Solmu ennen verkostoa				
Lämpötila menovirtaus	°C	59,35	59,73	59,7
Lämpötila paluuvirtaus	°C	58,94	59,33	59,3
Massavirta menovirtaus	kg/s	91,43	92,60	92,50
Massavirta paluuvirtaus	kg/s	91,47	92,60	92,50
Lämpöhäviöt				
Simulaattoreiden tulokset	kW	458,9	494,7	494,8
Tarkentava laskenta	kW	448,29	496,63	465,09

Huomattavaa lämpöhäviöiden eroavaisuuksissa on se, että Netsim ilmoittaa häviöidensä olevan hieman pienemmät verrattuna tarkentavaan tulokseen. Fluidit Heat ja Simulaattori X puolestaan ilmoittavat todellisuutta suuremmat lämpöhäviöt. Lämpöhäviöille ei ollut asetettu erillisiä kertoimia missään simuloinnissa. Varsinkin Simulaattori X:n kohdalla vaikuttaa siltä, että lämpöhäviöiden laskennassa on virhettä, joka ei johdu laskennan tarkkuudesta.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa kerrostalojen lämmitys perustuu pitkälti kaukolämpöön. Tekniikkana kaukolämmitys ei ole uusi, mutta silti se on käytännöllinen tapa hoitaa rakennusten lämmitys vielä tänäkin päivänä. Kaukolämmön merkitys on myös voimalaitoksien kokonaishyöty-suhteiden parantamisen kannalta todella merkittävä. Erillisessä sähköntuotannossa syntyvät lauhdehäviöt voidaan kaukolämmön avulla hyödyntää rakennusten lämmittämisessä, eikä lämpöenergiaa mene tällöin hukkaan. Kaukolämpöverkkoja rakennetaan vuosittain useita satoja kilometrejä, jotta uusia kuluttajia saataisiin osaksi lämmönjakelujärjestelmää. Verkoston laajentaminen vaikuttaa koko kaukolämpöverkon hydromekaaniseen toimintaan, jolloin on tärkeää pystyä ennakoimaan verkoston tulevat muutokset. Markkinoilta löytyy tähän tarkoitukseen monia kaukolämpösimulaattoreita kuten: Apros, Fluidit Heat, Grades Heating, Netsim, OpenModelica, Termis ja ZuluThermo. Valitettavasti ohjelmien lähdekoodit ovat yleensä salattuja, joten niiden fysikaaliseen laskentaan on vaikea perehtyä.

Tässä tutkimuksessa vertailtiin eri kaukolämpösimulaatiojärjestelmiä toisiinsa niiden simulaatiotulosten perusteella. Simulaattoreina tutkimuksessa toimivat: Fluidit Heat, Netsim ja Simulaattori X. Viimeisen simulaattorin kohdalla nimeä ei haluttu julkaista. Lisäksi tutkimuksessa suoritettiin vertaileva laskenta ilman simulaattoreita Microsoft Excel -ohjelmaa ja X Steam -funktioita apuna käyttäen. Tuloksia vertailtiin tutkimusmallin avulla, joka mallinnettiin erikseen jokaisella simulaattorilla. Malli koostui kahdesta osuudesta: siirtolinjasta ja jakeluverkosta. Siirtolinjaosuutta tarkasteltiin sekä simulaattoreilla että vertailevalla laskennalla. Jakeluverkko-osuutta tarkasteltiin vain simulaattoreilla, sillä verkostolaskenta olisi ollut ilman simulaattoreita todella työlästä. Kaikki simuloinnit toteutettiin staattisina simuloineina.

Tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan laitokselta vaadittavaa lämpötehoa, putkiston lämpö- ja painehäviöitä, massavirtaa, virtauksen lämpötiloja ja kitkallisesta virtauksesta aiheutuvaa lämpötehoa. Vertailevassa laskennassa painehäviöt määritettiin Darcy-Weisbachin ja Haalandin yhtälöitä käyttäen. Lämpöhäviöt määritettiin Energiateollisuus ry:n Kaukolämmön käsikirjan yhtälöillä, joilla myös meno- ja paluuvirtauksien välinen lämmönsiirto huomioitiin.

Yleisesti simulaattoreiden painehäviöt eivät vaihdelleet kovin paljoa, joten on oletettavaa, että kaikki simulaattorit ratkaisevat painehäviöt Darcy-Weisbachin ja Colebrook-Whiten yhtälöitä hyväksi käyttäen. Vertailevan laskennan painehäviö erosi siirtolinjalla

keskimäärin 6,3 % simulaattoreiden tuloksista. Epätarkkuutta vertailevaan laskentaan toi massavirran laskeminen, jossa jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia jakeluverkon osalta.

Lämpöhäviöiden osalta simulaattoreista alkoi löytymään eroavaisuuksia. Netsimin ja Simulaattori X:n tulokset olivat usein lähellä toisiaan, mutta Fluidit Heatin tulos oli varsinkin siirtolinjaosuudella huomattavasti muita pienempi. Vertailevan laskennan tulos oli vain hieman Fluidit Heatin tulosta suurempi. Vertailevassa laskennassa epätarkkuutta tuova massavirta ei vaikuttanut lämpöhäviöiden tulokseen. Simulaattoreiden siirtolinjojen lämpöhäviöille suoritettiin erikseen vielä tarkentavat laskennat, joissa simulaattoreiden omia tuloksia hyödyntämällä laskettiin paljonko virtauksen olisi luovutettava lämpötehoa, jotta simulaattoreiden ilmoittavat jäähtymät voisivat olla mahdollisia. Tässä vertailussa Netsim ja Fluidit Heat pärjäsivät hyvin, mutta Simulaattori X:llä epätarkkuutta oli enemmän.

Selitys lämpöhäviöiden eroavaisuuksille löytyi simulaattoreiden kyvystä huomioida kitkan aiheuttama lämpötehon muodostuminen putkissa. Kitkasta syntyvä lämpöteho vastasi noin 6 % lämpöhäviöiden suuruudesta verkossa. Simulaattoreista ainoastaan Fluidit Heat huomioi kitkan vaikutuksen. Vertaileva laskenta otti kitkan huomioon (liite 3). Lämpöhäviöiden suuruus vaikutti laitokselta vaadittuun lämpötehoon ja sitä kautta kaikkiin tarkasteltaviin tuloksiin. Näin ollen lämpöhäviöiden erot aiheuttivat eroa myös muissa tuloksissa.

Netsimin ja Simulaattori X:n laskentatuloksien yhtäläisyydet selvisivät Turun Energian verkko-ominaisuuspäällikkö Jani Uitin haastattelun jälkeen. Uitti kertoi Netsimin ja Simulaattori X:n laskennan perustuvan samaan laskentaohjelmaan, josta kumpaakin simulaattoria on kehitetty eteenpäin. Tutkimuksen tulokset tukevat näitä väitteitä. Simulaattoreiden kehittäjiltä saamien tietojen mukaan Fluidit Heat ja Netsim eivät huomioi meno- ja paluuvirtauksen välistä lämmönsiirtoa. Helen Oy:n tietojen mukaan Simulaattori X kuitenkin huomioisi erillisen lämpöhäviökertoimen avulla paluuvirtaukseen siirtyvän lämpötehon.

Koska vertailevassa laskennassa siirtoverkko aiheutti virhettä varsinkin massavirran laskennassa, tultiin tutkimuksessa siihen tulokseen, että siirtolinja olisi hyvä erottaa kokonaan muusta verkosta mahdollisissa jatkotutkimuksissa. Tällöin myös siirtoverkko-osuutta voitaisiin laajentaa, ja tutkia kahta erillistä mallia, joista toinen sisältäisi vain siirtolinjan ja toinen jakeluverkon. Jakeluverkon voisi myös suunnitella oikean kaukolämpöverkon pohjalta, jolloin tutkimuksen tuloksia voisi vertailla mittaustuloksiin.

LÄHTEET

Apros for District Heating Network Modelling and Analysis, Apros, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.4.2020): http://www.apros.fi/en/industries/district_heating

Asker M., Turgut O. E. & Coban T. M., 2014. A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drop in pipes. Bitlis Eren Univ J Sci & Technol.

Bai Xiaoying, Tsai Wei-Tek, Paul Ray, Feng, Ke, Yu Lian, 2002. Scenario-Based Modeling And Its Applications. Computer Society.

Behrang T., Parham A. M., Arash B. & Fariborz H., 2016. Frontiers in build environment, verkkosivu. Saatavissa (2.2.2020): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2016.00022/full>

Cengel Y. A. & C. J. M., 2006. Fluid mechanics : fundamentals and applications. McGraw-Hill Higher Education.

Cengel Y. A. & G. A., 2015. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. McGraw-Hill Education.

Dyrlind Johan, kaukolämpökonsultti, Vitec FuturSoft Oy. Haastattelu 27.4.2020

Energiateollisuus ry, 2020. Energiavuosi 2019 Kaukolämpö, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.3.2020): https://energia.fi/files/4405/Energiavuosi2019_Kaukolampo_TILASTOKUVAT_20200120.pdf

Energiateollisuus ry, 2019. Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.3): <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Energiateollisuus ry, 2016. Kiinnivaahdotetut kaukolämpöjohdot, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.4.2020): https://energia.fi/files/593/SuositusL1_2016_Kiinnivaahdotetut_kaukolampojohdot.pdf

Energiateollisuus ry, 2014. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.4.2020): https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf

Energia teollisuus ry, 2013. Kaukolämpöjohtojen suunnittelu- ja rakentamishjeet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2020): https://energia.fi/files/2353/SuositusL11_2013_KI-johtojen_suunnittelu-_ja_rakentamishjeet_paivitetty_20180130.pdf

Excel Engineering, X Steam - Properties for water and steam. (Steamtables), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.4.2020): <http://xsteam.sourceforge.net/>

Fluidit Oy, Fluidit Heat, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.4.2020): <https://www.fluidit.com/products/fluidit-heat/>

Geologian tutkimuskeskus, 2008. Maa- ja kalliolämmön mahdollisuuksista. Geologian tutkimuskeskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2020)
<https://docplayer.fi/1209323-Maa-ja-kalliolammon-mahdollisuuksista-kallio-j-blomqvist-r-engstrom-j-tiensuu-k-valpola-s-breilin-o.html>

Helen Oy, 2019. Kaukolämmön ja -jähdetyksen suunnittelu- ja urakointiohjeita Helen 05/2019, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2020): <https://www.helen.fi/globalassets/lampo/ammattilaiset/kaukolampo/kaukol%C3%A4mm%C3%B6n-suunnittelu--ja-urakointiohjeita-helen.pdf>

Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, 1980. Pumpputekniikka - nesteiden pumppaus. Insinööritieto Oy.

Kara M., Mattila L., Viinikainen S., Ohlström M., Lahnalammi-Vesivalo M., Hongisto M., Ruska M., Savolainen I., Syri S., Vuori S., Hämäläinen J., Kurkela E., Kytö M., Laurikko J., Mäkinen T., Peltola E., Rosenberg R., Sipilä K., Helynen S., 2004. Energia Suomessa: tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. VTT Technical Research Centre of Finland.

Korhonen Tero, projektipäällikkö, Helen Oy. Haastattelu 1.4.2020.

Koskelainen L., Nuorkivi A., Saarela L. & Sipilä K., 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry.

OpenModelica, 2020. OpenModelica, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.4.2020): <https://www.openmodelica.org/>

Planora Oy, 2015. Turun kaukolämpöverkoston laskenta, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.4.2020): <http://planora.fi/product-category/ouman/page/3/?orderby=date>

Politerm, ZuluThermo, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.4.2020): <https://www.politerm.com/en/products/thermo/zuluthermo/>

Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2002. Mallinnus ja simulointi. Painohäme.

Schweiger Gerald, Larsson Per-Ola, Magnusson Fredrik, Lauenburg Patrick, Velut Stephane, 2017. District heating and cooling systems e Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization. Elsevier.

Shamir Uri. 1973, Water Distribution Systems Analysis, IBM.

Sunela Markus, Teknologiajohtaja, Fluidit Oy. Haastattelu 1.3.2020.

Termis: TERMIS Simulation Modes, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.4.2020): <http://igss.schneider-electric.com/products/termis/Product-Information/termis-simulation-modes.aspx>

Tilastokeskus: Energian kokonaiskulutus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.4.2020): https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2017/html/suom0000.htm

Uitti Jani, verkosto-ominaisuuspäällikkö, Turku Energia. Haastattelu 29.4.2020.

Vainio Terttu, Lindroos Tomi, Pursiheimo Esa, Vesanen Teemu, Sipilä Kari, Airaksinen Miimu, Rehunen Antti - Tehokas CHP, kaukolämpö ja -jäähdytys 2010 – 2025, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.3.2020):
https://energia.fi/files/412/Raportti_Kaukolampo_ja_CHP_VTT_20151218.pdf

Vitec FuturSoft Oy, Netsim for students, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2020):
<https://www.vitecsoftware.com/en/product-areas/energy/products/netsim-grid-simulation/for-students/>

Vitec FuturSoft Oy, Doc-To-Help Standard Template, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2020): <http://doc.energy.vitec.net/ManualData/ve/en/netsim/pdf/NetSim.pdf>

VTT, The building level substation – the innovation of district heating system, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.4.2020):
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2015/T231.pdf>

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S. & Koelle, E., 2003. Advanced Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press.

Yhteenveto kaukolämpöalan tutkimustuloksista 2012-2015 Energiateollisuus ry:lle, ÅF-Consult Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2020):
https://energia.fi/files/428/Kaukolampoalan_kansainvaliset_tutkimukset_2012-2015_loppuraportti_AF-Consult.pdf

=====
 = Geometry =
 =====

No.	PIPE NAME	LENGTH		--- LEVEL ---		--- NODE ---		AMBIENT TEMPERATURE C
		Supply m	Return m	1 m	2 m	1	2	
1	P10	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 5	Node 2	5.0
2	P3	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 1	Node 2	5.0
3	P4	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 2	Node 3	5.0
4	P5	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 3	Node 4	5.0
*	5 P6	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 4	Node 5	5.0
*	6 P7	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 5	Node 6	5.0
7	P8	500.0	500.0	30.00	30.00	Node 6	Node 1	5.0
8	S.linja	6000.0	6000.0	0.00	30.00	Plant	Node 1	5.0

=====
 = Physical Pipe Data =
 =====

No.	PIPE Name	----- SUPPLY -----				----- RETURN -----			
		Diam. mm	Ch W/m/C	Rough. mm	Sgl.loss -	Diam. mm	Ch W/m/C	Rough. mm	Sgl.loss -
1	P10	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
2	P3	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
3	P4	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
4	P5	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
5	P6	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
6	P7	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
7	P8	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0
8	S.linja	312.7	0.55	0.100	0.0	312.7	0.55	0.100	0.0

=====
 = Node Data =
 =====

NO.	NODE NAME	----- PRESSURE -----			----- TEMPERATURE -----				POWER kW	FLOW kg/s	BY-PASS mm
		Supply kPa	Return kPa	Diff. kPa	Supply C	Tmin C	Ret. C	dT C			
1	Node 1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
2	Node 2	-	-	-	-	-	60.0	-	-	3000.0	-
3	Node 3	-	-	-	-	-	60.0	-	-	3000.0	-
4	Node 4	-	-	98.1	-	-	60.0	-	-	3000.0	-
5	Node 5	-	-	-	-	-	60.0	-	-	3000.0	-
6	Node 6	-	-	-	-	-	60.0	-	-	3000.0	-
7	Plant	921.9	-	-	100.0	-	-	-	100.0	-	-

 RESULTS OF SIMULATION

 =====
 = Process Data, Pipes, Supply =
 =====

NO.	NAME	FLOW	VEL.	DIAM	PRESSURE		TEMPERATURE		FRIC.	HEAT	COND.
		kg/s	m/s	mm	1	2	1	2	LOSS	LOSS	FLOW
					kPa	kPa	°C	°C	Pa/m	kw	Kg/s
1	P10	-10.48	-0.14	312.7	404.9	405.2	98.4	99.0	-0.58	25.910	0.0000
2	P3	49.34	0.67	312.7	410.8	405.2	99.1	99.0	11.10	26.000	0.0000
3	P4	20.50	0.28	312.7	405.2	404.2	99.0	98.7	2.05	25.950	0.0000
4	P5	2.01	0.03	312.7	404.2	404.2	98.7	95.7	0.03	25.480	0.0000
5	P6	-16.84	-0.23	312.7	404.2	404.9	98.3	98.6	-1.41	25.840	0.0000
6	P7	-24.90	-0.34	312.7	405.0	406.5	98.7	99.0	-2.97	25.950	0.0000
7	P8	-43.27	-0.59	312.7	406.5	410.8	99.0	99.1	-8.60	26.000	0.0000
8	S.linja	92.60	1.25	312.7	921.9	410.8	100.0	99.1	38.01	341.010	0.0000

 =====
 = Process Data, Pipes, Return =
 =====

NO.	NAME	FLOW	VEL.	DIAM	PRESSURE		TEMPERATURE		FRIC.	HEAT	COND.
		kg/s	m/s	mm	1	2	1	2	LOSS	LOSS	FLOW
					kPa	kPa	°C	°C	Pa/m	kw	Kg/s
1	P10	10.45	0.14	312.7	305.3	305.0	59.9	59.6	0.61	15.130	0.0000
2	P3	-49.45	-0.66	312.7	299.4	305.0	59.7	59.8	-11.33	15.130	0.0000
3	P4	-20.64	-0.27	312.7	305.0	306.1	59.7	59.8	-2.16	15.140	0.0000
4	P5	-2.15	-0.03	312.7	306.1	306.1	58.3	60.0	-0.04	14.980	0.0000
5	P6	16.70	0.22	312.7	306.1	305.3	60.0	59.8	1.45	15.180	0.0000
6	P7	24.78	0.33	312.7	305.2	303.7	59.9	59.8	3.05	15.160	0.0000
7	P8	43.15	0.57	312.7	303.7	299.4	59.9	59.8	8.72	15.160	0.0000
8	S.linja	-92.60	-1.23	312.7	360.1	299.4	59.3	59.7	-38.09	153.670	0.0000

=====
 = Detailed Pipe End Results =
 =====

NO.	NAME	PIPE END PRESSURE CHANGE			
		Supply		Return	
		1 kPa	2 kPa	1 kPa	2 kPa
5	P6	0.04	0.00	-0.07	0.00
6	P7	0.05	0.00	-0.09	0.00

=====
 = Node Results =
 =====

NO	ID	FLOW kg/s	FLOW Bypass kg/s	-- PRESSURE --		dP kPa	TEMPERATURE		POWER WCS kW
				Supply kPa	Return kPa		Supply øC	Return øC	
1	Node 1	0.00	0.00	410.8	299.4	111.4	99.1	59.7	0.0 W
2	Node 2	18.36	0.00	405.2	305.0	100.2	99.0	60.0	3000.0 W
3	Node 3	18.50	0.00	404.2	306.1	98.1	98.7	60.0	3000.0 W
4	Node 4	18.84	0.00	404.2	306.1	98.1	98.0	60.0	3000.0 W
5	Node 5	18.54	0.00	404.9	305.3	99.6	98.6	60.0	3000.0 W
6	Node 6	18.37	0.00	406.5	303.7	102.7	99.0	60.0	3000.0 W
7	Plant	-92.60	0.00	921.9	360.1	561.8	100.0	59.3	-15779.7 W

=====
 = Critical Route =
 =====

NODE-ID	dP kP	-- PRESSURE --		- TEMPERATURE -		LEVEL m
		Supply kP	Return kP	Supply C	Return C	
Plant	561.8	921.9	360.1	100.0	59.3	0.0
Node 1	111.4	410.8	299.4	99.1	59.7	30.0
Node 2	100.2	405.2	305.0	99.0	59.8	30.0
Node 3	98.1	404.2	306.1	98.7	59.8	30.0
Node 4	98.1	404.2	306.1	98.0	60.0	30.0

LIITE 2: FLUIDIT HEATIN SIMULOINTI TULOKSET

Name	Start Node	End Node	Length	Material
S.linja	Plant	Junction-14	6000	2Mpuk300/450
Pipe-3	Junction-14	Junction-15	500	2Mpuk300/450
Pipe-4	Junction-15	Junction-18	500	2Mpuk300/450
Pipe-5	Junction-18	Junction-19	500	2Mpuk300/450
Pipe-6	Junction-19	Junction-16	500	2Mpuk300/450
Pipe-7	Junction-16	Junction-17	500	2Mpuk300/450
Pipe-8	Junction-17	Junction-14	500	2Mpuk300/450
Pipe-9	Junction-15	Junction-16	500	2Mpuk300/450

Name	Heat Transfer Coefficient	Diameter	Roughness	Power Transferred
S.linja	0,553	312,7	0,10	15392,03
Pipe-3	0,553	312,7	0,10	7993,59
Pipe-4	0,553	312,7	0,10	3221,75
Pipe-5	0,553	312,7	0,10	185,89
Pipe-6	0,553	312,7	0,10	2802,76
Pipe-7	0,553	312,7	0,10	4135,57
Pipe-8	0,553	312,7	0,10	7160,21
Pipe-9	0,553	312,7	0,10	1687,16

Name	Ret. Hydraulic Power	Ret. Mass Flow	Ret. Temperature	Ret. Unit Head loss	Ret. Velocity
S.linja	20696,52	91,454	59,190	0,377	1,210
Pipe-3	269,91	48,646	59,380	0,111	0,644
Pipe-4	20,57	20,042	59,401	0,021	0,265
Pipe-5	0,02	1,785	58,682	0,000	0,024
Pipe-6	12,33	16,774	59,512	0,015	0,220
Pipe-7	37,28	24,628	59,449	0,030	0,326
Pipe-8	185,73	42,804	59,470	0,087	0,566
Pipe-9	3,17	10,431	59,447	0,006	0,138

Name	Sup. Hydraulic Power	Sup. Mass Flow	Sup. Temperature	Sup. Unit Head loss	Sup. Velocity
S.linja	21115,247	91,413	99,599	0,385	1,237
Pipe-3	271,143	48,579	99,237	0,112	0,657
Pipe-4	20,106	19,986	99,111	0,020	0,270
Pipe-5	0,019	1,732	97,330	0,000	0,023
Pipe-6	12,171	16,820	98,746	0,014	0,227
Pipe-7	37,129	24,673	99,094	0,030	0,334
Pipe-8	187,173	42,838	99,237	0,087	0,579
Pipe-9	3,055	10,418	99,111	0,006	0,141

Name	Ret. Heat loss	Sup. Heat loss
S.linja	159,14	299,77
Pipe-3	14,78	26,38
Pipe-4	15,03	26,59
Pipe-5	14,86	26,11
Pipe-6	15,01	26,49
Pipe-7	15,03	26,57
Pipe-8	14,89	26,46
Pipe-9	15,06	26,61

Name	Z-Coordinate (Elevation)	Average Demand	Daily Demand	Valve Diameter	Delivered Power
Junction-14	30	0	0	200	0
Junction-19	30	3000	72000	200	3000

Junction-14	Elevation	Power	Pressure Difference	Temperature Difference
Junction-19	30	0	1,107	39,893
	30	3000	0,975	38,580

Junction-14	Ret. Pressure	Ret. Temperature
Junction-19	2,856	59,345
	2,921	59,512

Junction-14	Sup. Pressure	Sup. Temperature
Junction-19	3,962	99,237
	3,896	98,092

LIITE 3 VERTAILEVAN LASKENNAN TULOKSET

		1. kierros	2. kierros	3. kierros	4. kierros	5. kierros
Laitoksen teho	kW	15719,00	15676,89	15675,02	15675,25	15675,25
Massavirta menovirtaus	kg/s	91,92	93,27	93,11	93,11	93,11
Virtausnopeus	m/s	1,24	1,26	1,25	1,25	1,25
Tilavuusvirta	m ³ /s	0,0946	0,0960	0,0958	0,0958	0,0958
Re		1,06E+06	1,08E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06
Kitkakerroin		1,57E-02	1,57E-02	1,57E-02	1,57E-02	1,57E-02
Painehäviö siirtolinja	m	23,36	24,04	23,96	23,96	23,96
Lämpöteho kitka siirtolinja	kW	42,1	44,0	43,8	43,8	43,8
Lämpötilaero menovirtaus	°C	0,76	0,69	0,69	0,69	0,69

Ri	1,744	K1	0,525
Rg	0,164	K2	0,020
Rm	0,073	K1-K2	0,505

Menovirtauksen lämpöhäviöt	48,74	W/m
Paluuvirtauksen lämpöhäviöt	26,95	W/m

Siirtolinja

Menovirtaus	kW	292,42
Paluuvirtaus	kW	161,68
Yhteensä	kW	454,11

Koko verkko

Menovirtaus	kW	463,01
Paluuvirtaus	kW	256,00
Yhteensä	kW	719,00