

Arttu Pitkänen

# JÄTEVESIVERKOSTOJEN LÄMMÖNSIIRTO- SIMULAATTORIN KEHITYS JA HUKKALÄM- MÖN TALTEENOTON MALLINTAMINEN

Tarkastajat: DI Niko Niemelä ja TkT Henrik Tolvanen  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö

Helmikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Arttu Pitkänen: Jätevesiverkostojen lämmönsiirtosimulaattorin kehitys ja hukkalämmön talteenoton mallintaminen

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Helmikuu 2022

---

Ilmastopromiset ja alati tiukkenevat ilmastotavoitteet ovat ajaneet kuntia investoimaan vähäpäästöisempään energiantuotantoon. Tämä diplomityö on osa yhteistutkimushanketta, jossa tutkittiin lämmön talteenottopotentiaalia jätevesiverkoista. Tässä työssä mallinnettiin jätevesiverkostojen virtaus- ja lämpötekniinen toiminta talteenottopotentiaalain sekä verkoston ja jätevedenpuhdistamon häiriöttömän toiminnan edellytysten analysoimiseksi eri lämmön talteenottoskenaarioiden yhteydessä. Mallien avulla saatiin myös parempi käsitys jätevesiverkostojen nykyisestä toiminnasta. Työssä rakennetut termodynaamiset jätevesiverkostomallit olivat tähän saakka suurimmat maailmassa.

Koska valmiita tutkimukseen soveltuvia ohjelmistoja ei ollut olemassa, työssä kehitettiin uusi tarvittava toiminnallisuus Fluidit Sewer -mallinnussovellukseen. Kehitys aloitettiin oleellisimpien termodynaamisten prosessien valinnalla. Näiden perusteella muodostettiin termodynaaminen simulaattori hydraulisen simulaattorin rinnalle. Herkkyystarkasteluiden perusteella tärkein parametri prosesseissa oli maaperän lämpötila. Työssä kehitettiin erillinen malli maaperän lämpötilan laskemiseksi tietyllä syvyydellä ilman lämpötilahistorian perusteella. Lisäksi työssä tutkittiin yksittäisen virtauskanavan lämmönsiirtokerrointa jäteveden ja ilman välillä sekä lämpötilagradienttia kanavan ympärillä olevassa maaperässä numeerisella virtausmallinnuksella. Lopuksi simulaattori kalibroitiin ja validoitiin (kahdella eri alueella) Helsingissä ja Turussa tehtyjen mittausten perusteella.

Jätevesiverkostomallit rakennettiin simulaattorin kehityksen ja validoinnin jälkeen. Sekä Turusta että Helsingistä saatiin valmiit jätevesiverkostomallit, joihin tehtiin vain termodynaamisen laskennan vaatimat lisäykset ja muutokset. Nämä parametrit sisälsivät muun muassa virtauskanavien lämpöhäviöihin vaikuttavat lämmönsiirtokerroimet eri putkimateriaaleille ja -halkaisijoille.

Mallinnetut skenaariot kuvasivat verkostojen nykyistä toimintaa sekä toimintaa lämmön talteenoton yhteydessä. Mallinnettaviksi kuukausiksi valittiin maaliskuu-, kesä- ja syyskuu. Mallinnustulosten perusteella lämmön talteenotto ei lisännyt verkostojen tukos- tai jäätymisriskiä, ja otollisin aika lämmön talteenotolle on kesäkuusta joulukuuhun, kun maaperän lämpötila on vielä suhteellisen korkea. Tulosten mukaan jätevedenlämpötila voi laskea jätevedenpuhdistamon häiriöttömän toiminnan kannalta liian matalaksi helmikuusta maaliskuussa. Lämmön talteenotto laski mallinuksissa jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaa 10–18 % riippuen tarkasteltavasta kuukaudesta ja verkostosta. Koska käytetyt verkostomallit olivat hyvin suuria, tarkkojen arvojen ilmoittamiseksi tarvittiin enemmän verkostossa tehtyjä lämpötilamittauksia.

Avainsanat: jätevesiverkosto, lämmön talteenotto, mallinnus, verkostomallinnus, lämmönsiirto, lämpöhäviö, hydromekaniikka, avokanavavirtaus, Fluidit sewer, TEMPEST, SWMM-HEAT

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Arttu Pitkänen: Development of the thermodynamic sewer simulator and modeling of heat recovery  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Environmental and Energy Engineering  
February 2022

---

Climate agreements have forced municipalities to invest in low-carbon energy resources to meet the ever-tightening climate targets. This thesis was taking part in a multi-company project where the energy potential of the heat recovery from sewers was investigated. The target was to model the thermal behavior of the entire network under different conditions and to make sure the wastewater treatment processes won't be disturbed. The physical model allowed us to explore different future scenarios where the heat recovery from the sewers was executed and gave us a better understanding of the current network behavior. The developed thermodynamical sewer models were the largest in the world so far.

There weren't existing tools for thermodynamic sewer modeling, so the simulator was developed in co-operation with Fluidit Ltd. The software development started by selecting the most relevant heat transfer processes in the sewers and creating a thermodynamic module which was implemented in existing Fluidit Sewer software. The most fundamental parameter in these processes due to sensitivity analysis was soil temperature. Consequently, the soil temperatures were modeled with a separate calculation tool that formulated monthly soil temperatures at a specific depth based on the ambient air temperature. In addition, the computational fluid dynamics modeling was conducted to inspect the heat transfer coefficient between the wastewater-air interface and the heat gradient around the conduit. Finally, the simulator was calibrated and validated with two different measurements which were conducted in Helsinki and Turku areas.

When the transient simulator was fully tested, the building of the main sewer models was started. Both sewer models covering Helsinki and Turku areas were hydraulically complete, therefore only the parameters which were related to thermal modeling were added. Those parameters included heat transfer coefficients for different conduit materials which affected the heat losses.

The modeled scenarios represented the current behavior of the networks and operation during the heat recovery. The selected operating months were March, June, and September. The simulation results indicated that heat recovery didn't affect the deposition of fats, and there wasn't a risk of freezing. It suggested the most potential months to recover the heat energy were from June to December when soil temperatures were still relatively high. On the other hand, the wastewater temperature can decrease too much in February and March for the wastewater treatment process. The result revealed that the heat recovery can decrease 10-18 % of the wastewater temperature depending on the operating month. However, the models were large, and therefore more measurements should be conducted before the exact numbers can be settled upon.

Keywords: sewer, heat recovery, modeling, network modeling, heat transfer, heat loss, hydromechanics, open channel flow, Fluidit sewer, TEMPEST, SWMM-HEAT

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Kiitän kaikkia niitä lukusia henkilöitä, jotka auttoivat ja tukivat minua tämän diplomityön tekemisen aikana. Erityisen suuret kiitokset työni tarkastajille Niko Niemelälle ja Henrik Tolvaselle neuvoista ja opeista niin tämän työn kuin koko yliopisto-opiskelun aikana. Suuret kiitokset Markus Sunelalle työn ohjauksesta ja avusta sekä Hannes Björnisele projektin vetämisestä ja tuesta. Haluan kiittää myös kaikkia Fluiditin työntekijöitä uskottomasta työyhteisöstä, jossa olen saanut työskennellä opiskeluideni ajan. Tietäjät tietää.

Sain ala-asteella hiljaisuuden aikana puhumisesta rangaistukseksi kirjoittaa 300 sanaa aiheesta *fysiikka ja vesi*. Oli niin hyvä aihe, että päätin kirjoittaa vielä 23 000 sanaa lisää. Nyt kuitenkin riittää, toistaiseksi.

Tampereella, 22.2.2022

Arttu Pitkänen

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	1
2	JÄTEVESIVERKOSTON TOIMINTA JA FYSIKAALISET ILMIÖT.....	5
	2.1 Toiminta ja rakenne.....	5
	2.2 Hydrodynamiikka.....	11
	2.3 Lämmönsiirto.....	14
3	JÄTEVESIVERKOSTON VIRTAAUKSEN JA LÄMMÖNSIIRRON MALLINNUS ....	22
	3.1 Fysikaalinen mallinnus yleisesti.....	22
	3.2 Jätevesiverkoston mallinnus.....	24
	3.3 Jäteveden numeerinen virtauslaskenta .....	31
4	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTOT .....	36
	4.1 Tutkimuksen eteneminen.....	36
	4.2 Lämmönsiirtoilmiöiden tarkastelu numeerisella virtauslaskennalla .....	38
	4.3 Lämpöhäviökertoimien määrittäminen jätevesiputkille .....	44
	4.4 Maaperän lämpötilan mallintaminen.....	46
	4.5 Helsingin ja Turun jätevesiverkostomallien rakentaminen ja mittaukset.....	51
	4.6 Lämmönsiirtomallin lisääminen Fluidit Sewer -ohjelmaan .....	57
5	TUTKIMUKSEN TULOKSET .....	61
	5.1 Numeerisen virtauslaskennan tulokset.....	61
	5.2 Mallien kalibrointi, herkkyystarkastelu ja validointi .....	65
	5.3 Turun jätevesiverkoston mallinnustulokset.....	70
	5.4 Helsingin jätevesiverkoston mallinnustulokset .....	76
6	MALLINNUSTULOSEN ANALYSOINTI.....	82
	6.1 Lämmön talteenoton vaikutukset Turun jätevesiverkostossa .....	82
	6.2 Lämmön talteenoton vaikutukset Helsingin jätevesiverkostossa .....	83
	6.3 Tulosten vertailu .....	85
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	87
	LÄHTEET .....	92
	LIITE 1: TURUN VERKOSTOMALLI .....	95
	LIITE 2: TURKU MAALISKUU .....	96
	LIITE 3: TURKU KESÄKUU.....	97
	LIITE 4: TURKU SYYSKU.....	98
	LIITE 5: TURUN VERKOSTOMALLIN ASETUKSET.....	99
	LIITE 6: HELSINGIN VERKOSTOMALLI .....	100
	LIITE 7: HELSINKI MAALISKUU .....	101
	LIITE 8: HELSINKI KESÄKU.....	102

LIITE 9: HELSINKI SYYSKUU.....	103
LIITE 10: HELSINGIN VERKOSTOMALLIN ASETUKSET.....	104
LIITE 11: MALLINNETTU MAAPERÄN LÄMPÖTILA.....	105
LIITE 12: PUTKIMATERIAALIT.....	106

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$D$	virtauskanavan halkaisija	[m]
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
$E$	energia	[J]
$e_{gen}$	kappaleessa muodostuva lämpöenergia	[J]
$Fr$	Frouden luku	[-]
$f_b$	lähdetermi vaikuttaville voimille	[N]
$g$	keskimääräinen putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$k$	lämmönjohtavuuskerroin	[W/(mK)]
$L$	karakteristinen pituus	[m]
$L_h$	hydrodynaaminen kehitysmatka	[m]
$L_t$	terminen kehitysmatka	[m]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
$n$	Manningin kitkakerroin	[-]
$Nu$	Nusseltin luku	[-]
$p$	paine	[pa]
$\rho_{ilma}$	ilman märkäpiiri	[m]
$\rho_{vesi}$	veden märkäpiiri	[m]
$Pr$	Prandtin luku	[-]
$Q$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{Q}$	lämpöteho	[W]
$Re$	Reynoldsin luku	[-]
$R_h$	hydraulinen säde	[m]
$r$	virtauskanavan säde	[m]
$S$	kaltevuus	[-]

$S_\alpha$	lähde-termi massavirralle	[kg/s]
$T$	lämpötila	[K]
$t$	aika	[s]
$U$	virtauksen nopeus	[m/s]
$\mathbf{u}$	virtauksen nopeusvektori	[m/s]
$x$	x-koordinaatti	[m]
$y$	y-koordinaatti	[m]
$y_h$	virtauksen syvyys	[m]
$y^+$	diskretoinnin laatu-parametri	[-]
$z$	z-koordinaatti	[m]
$\alpha$	terminen diffusiteetti	[m <sup>2</sup> /s]
$\delta_{maa}$	lämpötilagradientin paksuus maaperässä	[m]
$\eta$	similaarisuusmuuttuja	[-]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[kg/(ms)]
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
EPA	Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto (United States Environmental Protection Agency)	
Fluidit Sewer	hydraulinen jätevesiverkostojen mallinnusohjelma	
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut	
LTO	lämmön talteenotto	
RMSE (RMSD)	virheen neliöllinen keskiarvo (Root-Mean-Square Error/Deviation)	
SWMM	avoimen lähdekoodin hydraulinen laskentamalli (Storm water management Model)	



# 1 JOHDANTO

Suomen hallitus linjasi vuonna 2019 Suomen tavoitteeksi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä sekä olla ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta. Päätös pohjautuu kansainväliseen Pariisin ilmastosopimukseen, jonka allekirjoittaneet ovat sitoutuneet saavuttavansa hiilineutraalisuuden viimeistään vuoteen 2050 mennessä. Ympäristöministeriö on arvioinut Suomen hiilidioksidipäästöjen leikkaustarpeen olevan 35 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttonnia, joka vastaa noin 72 % vuoden 2020 hiilidioksidipäästöistä (Tilastokeskus 2020). Vähennys on valtava ja se tulee vaikuttamaan erityisesti Suomen energiasektorin toimintaan, joka tuottaa suurimman osan hiilidioksidipäästöistä. Tavoitteeseen päästäkseen Suomessa tarvitaan uusia teknologisia ratkaisuja vähäpäästöiseen sähkön- ja lämmön tuotantoon sekä erityisesti olemassa olevan infrastruktuurin kehittämiseen ja optimoimiseen. (Ympäristöministeriö 2020)

Kylmästä ilmastosta johtuen rakennusten lämmittäminen on Suomessa välttämätöntä. Lämpö tuotetaan pääasiassa lämpövoimalaitoksilla ja korkean hyötysuhteen CHP-voimalaitoksilla (Combined Heat and Power), joissa yhdistetään sekä lämmön- että sähköntuotanto. Voimalaitoksilta lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkoston kautta kulluttajille kuten kotitalouksille. Järjestelmä on ollut toimiva, mutta tuotantolaitosten poltto- prosessit tuottavat edelleen vaihtelevia määriä päästöjä ympäristöön riippuen polttoaineesta ja savukaasujen puhdistusprosesseista. Kaupungit ovatkin alkaneet sulkea laitoksia, joissa päästöt ovat liian korkeita. Esimerkiksi Helsingissä sijaitseva Hanasaaren B-voimalan sulkeminen vuonna 2023 vähentää Helsingin kokonaispäästöjä 20 %. Voimalaitoksen sulkemisen yhteydessä Helsingin lämmön tuotannosta poistuu kuitenkin 420 MW lämpötehoa. (Helen 2021) Helsingin lisäksi muutkin kaupungit joutuvat korvaamaan lämmön tuotantoaan ympäristöystävällisimmillä ratkaisuilla päästäkseen hallituksen ilmastotavoitteisiin.

Lämpöpumppujen käyttö energiasektorilla on tuonut markkinoille uusia mahdollisuuksia hyödyntää lämpöenergiaa matalan lämpötilan energialähteistä. Lämpöpumppujen toiminta perustuu kylmäaineen faasimuutokseen, jolloin matalalämpötilaisestakin lähteestä saadaan siirrettyä lämpöenergiaa kylmäaineen ja kompressorin avulla lämmitettävään kohteeseen kuten kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumpun käyttäminen lisää mahdollisten energialähteiden määrää huomattavasti, jolloin esimerkiksi eri prosessien hukkalämpöä voidaan hyödyntää uudelleen. Hukkalämmön hyödyntäminen on erityisen tärkeää, sillä

sen tuottamiseen on käytetty resursseja, jotka menetetään lämpöenergian päätyessä ympäristöön. Hyvänä esimerkkinä hukkalämmön hyödyntämisestä voidaan pitää jätevedenpuhdistamoilla sijaitsevia lämmönvaihtimia, jotka keräävät jätevedestä lämpöenergiaa talteen. Lämpöenergia voidaan käyttää puhdistamon omiin prosesseihin ja lähialueen rakennusten lämmittämiseen. Jäteveteen päätyneet energia on peräisin verkoston alkupäästä kuten kotitalouksista, joissa viemäriin päätyvät vedet on usein lämmitetty ennen niiden käyttöä. Vesi ehtii kuitenkin jäähtyä huomattavasti verkostossa ennen sen päätymistä jätevedenpuhdistamolle.

Kaupunkien viemäriverkostot voivat olla satojen kilometrien mittaisia, jolloin vedellä kestää kauan kulkeutua jätevedenpuhdistamolle. Jäteveden lämpötila ja siitä talteen saatava lämpöenergia ovat verrannollisia jäteveden verkostossa viettämään aikaan. Helsingissä sijaitsevan Viikinmäen jätevedenpuhdistamon keskivirtaama on noin 280 000 m<sup>3</sup>/vrk (HSY 2017). Mikäli virtaus jäähtyy yhden asteen tarkoittaa tämä noin 13,6 MW jatkuvaa lämpötehon menetystä ympäristöön. Näin ollen pienillä virtauksen lämpötilaeroilla on suuri vaikutus virtauksen sisältämään lämpöenergiaan, joka voidaan hyödyntää uudelleen rakennusten lämmittämisessä. Tästä syystä lämmön talteenottoaminen on termodynamiikan kannalta kannattavinta jäteveden syöttöpisteiden läheisyydessä. Taloudellisesti lämmönvaihtimien ja lämpöpumppujen asentaminen jokaiselle rakennukselle erikseen on kuitenkin kallista. Lämmönvaihtimet tulisikin käytännössä asettaa paikkoihin, joissa virtaus olisi mahdollisimman suuri ja se olisi jäähtynyt mahdollisimman vähän. Kokonaisen kaupungin jätevesiverkoston yksityiskohtaiset virtaus- ja lämpötilamittaukset eri olosuhteissa on käytännössä mahdotonta toteuttaa. Ongelmaa voidaan kuitenkin lähestyä matemaattisen mallinnuksen avulla.

Mallinnuksella tarkoitetaan ilmiön tai järjestelmän toiminnan kuvaamista matemaattisessa muodossa. Sen avulla voidaan tarkastella tilanteita, joita ei ole tapahtunut aikaisemmin, esimerkiksi lämmön talteenoton vaikutusta jätevesiverkostossa. Lämpöpumppujen vaikutusta on tärkeä arvioida ennen niiden asentamista, jotta jäteveden lämpötila ei laske liian alhaiseksi ennen jätevedenpuhdistamoa. Liian alhainen lämpötila vaikeuttaa typen poistoa jätevedenpuhdistamolla (Dürrenmatt & Wanner 2014). Mahdollisimman kustannustehokkaan hukkalämmön talteenoton toteuttaminen viemäriverkostosta vaatii lähes poikkeuksetta mallinnusta ennen laitteistojen mitoittamista, hankintaa ja käyttöä.

Hukkalämmön talteenoton jätevesiverkostomallinnuksia ei olla tehty aikaisemmin Suomessa, mutta tutkimuksia on tehty muualla. Mallinnuksia on tehty erityisesti Sveitsissä, jossa jäteveden lämpöenergiaa hyödynnetään rakennusten lämmittämisessä. Myös muissa Pohjoismaissa kuten Norjassa hyödynnetään jätevedestä saatavaa energiaa.

(Dürrenmatt & Wanner 2014) Ensimmäinen jäteveden lämpötilan laskemiseen kehitetty ohjelma TEMPEST kehitettiin vuonna 2008. Ohjelmalla pystyttiin laskemaan suoran jätevesiputken lämpötilaa. Ohjelma on raskas ja se ottaa huomioon useita lämmönsiirron ilmiöitä, jotka eivät ole kokonaisuuden kannalta merkityksellisiä. TEMPEST-ohjelman suurimmaksi ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että sillä pystyy tutkimaan vain yksittäisiä putkilinjoja. Durrematin ja Wannerin kehittämästä ohjelmasta on jalostettu yksinkertaisempia versioita, joissa on pyritty vähentämään raskaiden osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemista laskennan nopeuttamiseksi. Elías-Maxil et al. (2017) työryhmänsä kanssa poisti yhtälöistä kokonaan veden ja ilman väliseen konvektiiviseen lämmönsiirtoon liittyvät yhtälöt ja saivat lähes yhtä tarkkoja tuloksia alkuperäisen TEMPEST-ohjelman kanssa. Myös kokonaan uusia ohjelmia jätevesiverkoston mallinnukseen on kehitetty, mutta ne eivät ole julkisesti saatavilla (Abdel-Aal et al. 2018).

Tämän diplomityön tarkoituksena on kehittää jätevesiverkoston lämmönsiirtomalli, jota käytetään Helsingin ja Turun jätevesiverkostojen mallintamisessa sekä analysoida hukkalämmön hyödyntämistä verkostojen toiminnan kannalta. Diplomityö tehdään osana Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) *Lämmön talteenoton energiatase ja kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn* -hanketta. Diplomityö tehdään Fluidit Oy:lle hankkeen työpaketissa kaksi: *Lämpötilan muutokset ja vaikutus*. Edellisten lisäksi yhteistyötä tehdään Turun seudun puhdistamo Oy:n, Turun Vesihuolto Oy:n, Turun Seudun Vesi Oy:n, Helen Oy:n, Fortum Power and Heat Oy:n, Turku Energian Oy:n, Gaia Consulting Oy:n, VTT Oy:n ja Afry Oy:n kanssa.

Jätevesiverkostomallit rakennetaan Fluidit Sewer -sovelluksella. Fluidit Sewer sisältää entuudestaan jätevesiverkostojen hydraulisen laskennan, jonka yhteyteen tässä työssä esiteltävä termodynaaminen laskenta liitetään. Laajennetun simulaattorin avulla voidaan laskea veden lämpötilamuutokset verkostossa hydraulisen toiminnan lisäksi. Helsingin ja Turun jätevesiverkostomallit ovat suurimmaksi osaksi valmiita, joten niihin tehdään vain termodynaamisen laskennan vaatimat lisäykset ja muutokset. Lämmönsiirtomallin kalibroimiseksi työssä hyödynnetään jätevesiverkostoissa tehtäviä lämpötilamittauksia. Kalibroitujen ja validoitujen lämmönsiirtomallien avulla työssä analysoidaan hukkalämmön hyödyntämistä verkostojen toiminnan kannalta pohjautuen mallien lisäksi alan kirjallisuuteen ja aikaisempiin tutkimuksiin.

Tämä diplomityö vastaa seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitkä lämmönsiirron ilmiöt on huomioitava jätevesiverkostossa veden jäähtymiseen ja lämmön talteenottoon liittyen?

2. Mitä menetelmiä jätevesien jäähtymismallinnukseen käytetään ja mitkä niistä ovat soveltuvimpia tämän työn kohteeseen?
3. Mitkä verkostomallin parametreista vaikuttavat eniten mallinnusten tarkkuuteen ja mitä parametreja säätämällä päästään lähimmäksi lämpötilamittauksia vastaavia tuloksiin?
4. Kuinka paljon jätevesi jäähtyy Turun ja Helsingin jätevesiverkostoissa ja aiheuttaako lämmön talteenotto ongelmia tulosten perusteella?

Seuraavassa luvussa esitellään jätevesiverkoston toimintaa ja siihen liittyviä yleisesti tunnettuja fysikaalisia ilmiöitä termodynamiikan ja virtaustekniikan näkökulmista. Lisäksi luvussa tutustutaan jätevesiverkoston kemiallis-biologisiin ilmiöihin tukosriksien analysoinnin kannalta. Toinen luku vastaa tutkimuskysymykseen yksi. Kolmas luku keskittyy virtausmallinnukseen kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäisessä jätevesiverkoston mallinnusta lähestytään isona kokonaisuutena ja jälkimmäisessä pienenä ilmiötason mallinnuksena. Kolmas luku vastaa tutkimuskysymykseen kaksi. Luvut kaksi ja kolme kattava tutkimuksessa käytetyn teorian. Neljäs luku käsittelee tutkimuksen etenemisen aina simulaattorin kehityksestä lopullisten jätevesiverkostomallien rakentamiseen. Viidennessä luvussa esitetään tutkimuksessa saadut tulokset ja analysoidaan niiden luotettavuutta. Neljäs ja viides luku vastaavat tutkimuskysymykseen kolme. Kuudennes luku on jatko viidennelle, ja siinä jatketaan tulosten analysoimista. Luvussa käsitellään ainoastaan lämmön talteenoton mallinnustuloksia kokonaisuuden kannalta. Kuudes luku vastaa tutkimuskysymykseen neljä. Viimeisessä luvussa seitsemän esitetään lopuksi yhteenveto ja johtopäätökset koko tutkimuksesta ja sen tuloksista.

## 2 JÄTEVESIVERKOSTON TOIMINTA JA FYSIKAALISET ILMIÖT

Toimiva jätevesiverkoston on yhteiskuntamme perusedellytyksiä. Suomessa makamme siitä, että saamme puhdasta vettä rakennuksiimme, mutta samalla makamme myös käytetyn veden siirtämisestä ja puhdistamisesta. Koska järjestelmä on hyvin toimiva, tulee tavallisen kuluttajan harvoin pohdittua asiaa sen enempää. Järjestelmän toimivuus korostuu vasta siinä vaiheessa, kun vertaa toimivaa vesihuoltoa huonosti järjestettyyn vesihuoltoon. Suomessa vesihuoltoa valvotaan tarkasti ja sitä määräävät myös lait. (Karttunen 2010)

Jätevesiverkoston toiminta yleisellä tasolla on yksinkertainen: jätevesi siirretään putkia pitkin jätevedenpuhdistamolle. Verkostossa tapahtuu kuitenkin paljon fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia ilmiöitä, jotka vaikuttavat verkoston toimintaan. Verkoston toimintaan vaikuttavat myös eri ympäristötekijät, kuten esimerkiksi sateet, maaperätyyppi ja ilman lämpötila. (Karttunen 2010) Seuraavissa luvuissa esitetään jätevesiverkoston toimintaa yleisesti ja osana hukkalämmön talteenottoa. Lisäksi luvuissa perehdytään verkostossa tapahtuviin kemiallisiin, biologisiin ja fysikaalisiin ilmiöihin.

### 2.1 Toiminta ja rakenne

Jätevesiverkoston tehtävänä on kerätä syntyvät jätevedet ja johtaa ne jätevedenpuhdistamon kautta puhdistettuina vesistöihin. Verkoston on toimittava niin, että ihmisille tai ympäristölle ei koidu tarpeettomia haittoja. Eri lait ja asetukset sekä lupaehdot säätelevät viemäriverkoston toimintaa. Näin haittoja voidaan rajoittaa ja taataan turvallinen jätevesien siirto jätevedenpuhdistamolle. Erityisesti pohjavesiä pyritään suojelemaan mahdollisimman tarkasti, sillä ne ovat tärkeä puhtaan veden lähde Suomessa. Lait asettavat vaatimuksia myös jätevesiverkoston ylivuodoille. Jätevesiverkostojen yhteydessä vuodoilla tarkoitetaan myös ympäristöstä jätevesikanavaan siirtyvää vettä. Vuotoja pyritään minimoimaan jätevedenpuhdistusprosessien toimivuuden takaamiseksi. Mikäli vuotoja tapahtuu ympäristöstä verkostoon, joudutaan kaikki tämä vesi puhdistamaan jätevedenpuhdistamolla. Mikäli taas verkosto halutaan rakentaa niin tiiviiksi, että vuotoja ei synny, verkoston rakentamis- ja ylläpitokustannukset nousevat hyvin paljon. Vuotojen osuus jätevesiverkostoissa vaihtelee huomattavasti verkoston kunnon, vuodenajan ja sateisuuden mukaan, ja niiden määrä voi olla jopa kaksinkertainen laskutettavaan jäteveeseen nähden. (Beck & Margheim 2011, Karttunen 2010)

Lisäksi jätevesiverkostoon voidaan johtaa sateiden aiheuttamia hulevesiä. Pääsääntöisesti tätä menettelytapaa vältellään, koska se lisää puhdistettavan jäteveden määrää. Vanhoilla kaupunkialueilla sekaviemäreitä kuitenkin käytetään vieläkin, esimerkiksi Helsingin keskustassa. Sateisina aikoina jätevettä voidaan joutua sekaviemäriverkostoissa johtamaan tulvakynnysrakenteiden kautta vesistöön turvallisissa kohdissa ennen jäteveden puhdistusta. Tällöin verkostoa ei tarvitse mitoittaa koko matkalta suurimpien virtauksien mukaiseksi, mikä tulisi hyvin kalliiksi. Jätevettä voi kuitenkin päätyä puhdistamattomana ympäristöön, minkä takia sekaviemäreitä ei nykyään rakenneta. Jätevesiverkostoa, jossa virtaa vain jätevesi kutsutaan erillisviiemäröinniksi. (Beck & Margheim 2011, Karttunen 2010)

Jätevesiverkostossa virtauskanavat ovat putkia tai tunneleita. Pääasiallisesti viemärit suunnitellaan ja rakennetaan toimimaan painovoimaisesti, jolloin jätevesi virtaa kanavassa ilman pumppausta. Kanavan kaltevuuden on oltava niin suuri, että tukosriskiä ei synny. Koska virtauksen suuruus riippuu paljon ajasta, on kanava mitoitettava niihin tilanteisiin, jolloin virtaus on suurimmillaan. Tämä tarkoittaa sitä, että suuren osan ajasta putket ovat osittain tyhjiä ja niissä virtaa myös ilmaa. Pumppaamoja käytetään mahdollisimman vähän, sillä pumppaamojen ja painelinjojen käyttökustannukset ovat korkeita verrattuna viettoviemäriin. Pumppaamon jälkeisessä paineputkessa virtaus on paineel- lista, ja putki on täynnä vettä. (Karttunen 2010) Koska putkessa ei ole ilmaa, siellä on vähähappiset olosuhteet. Jätevedessä elävät mikrobit tuottavat hapettomissa olosuh- teissa rikkivetyä, joka aiheuttaa hajuhaittoja. Reagoidessaan veden kanssa rikkivety ai- heuttaa myös korroosiota betoniputkissa, jotka ovat edelleen yleisiä jätevesiverkos- toissa. (Abdel-Aal et al. 2019)

Korroosiosta, putken eroosiosta, maaperän liikkeestä ja muista syistä johtuen putkia jou- dutaan korjaamaan tai vaihtamaan kokonaan uusiin. Koska putken vaihtaminen koko- naan uuteen on kallista, käytetään nykyään paljon myös jätevesiverkoston sukutusta. Sukituksen virtauskanavaan syötetään tarkastuskaivon kautta muovinen sukka, joka avataan putken sisällä paineen ja lämmön avulla. Virtauskanavan halkaisija pienenee hieman sukituksen, mutta samalla vältytään putken ylös kaivamiselta. (Karttunen 2010) Saneerauksella pyritään parantamaan verkoston toimivuutta ja vähentämään vuo- tojen määrää.

### **Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen**

Nykypäivänä ilmastopöimukset ajavat energiasektorin toimintaa ympäristöystävälli- sempään ja tehokkaampaan suuntaan. Erilaiset rajoitukset ja päästökauppa ohjaavat energiantuottajia investoimaan uusiin vähäpäästöisiin ja energiatehokkaisiin

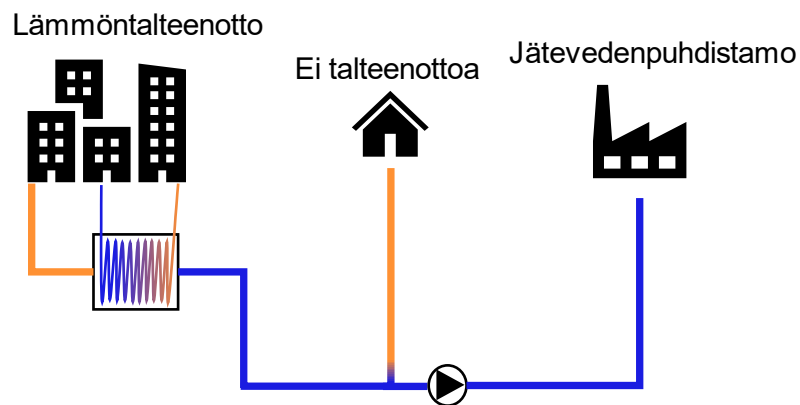
ratkaisuihin, joilla pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta (Ympäristöministeriö 2020). Lait mahdollistavat niin ikään uusien innovaatioiden käyttämisen energiantuotannossa kustannustehokkaasti, sillä aikaisemmin edulliset tavat tuottaa energiaa eivät uusien säädösten jälkeen olekaan välttämättä enää halvimpia. Lämmön tuotannossa erityisesti matalan lämpötilan energialähteet kuten jätevedet ovat kasvattaneet osuuttaan rakennusten lämmityksessä lämpöpumppujen myötä. Lämpöpumput mahdollistavat matalan lämpötilan energialähteiden hyödyntämisen tehokkaasti eri käyttökohteissa, sillä lämpötila voidaan muuttaa esimerkiksi yleiseen kaukolämpöverkoston sopivaksi. Jätevesi on hyvä lämpöenergiälähde, sillä siihen siirretään lämpöenergiaa jatkuvasti rakennuksissa, joissa käyttövesi lämmitetään eri prosesseissa ja syötetään lopulta jätevesiverkoston. Lämpöenergian hyödyntäminen jätevedestä ei ole uusi konsepti, sillä useilla jätevedenpuhdistamoilla lämpöä on kerätty talteen jo pitkään. Uusi lähestymistapa on kerätä lämpö talteen jätevedestä mahdollisimman lähellä sen syntypistettä, jolloin lämpöhäviöt jätevedestä ympäristöön ovat mahdollisimman pienet ja talteen saatava energia mahdollisimman suuri.

Suomessa jäteveden lämpöenergiaa ei kerätä yleisesti kiinteistöillä. Teknisenä toteutuksena lämmön talteenottaminen ennen jätevedenpuhdistamoa on maailmallakin harvinaista. Suomessa lämpöenergiähäviöistä noin 14–19 % johtuu jäteveden mukana siirtyvästä lämpöenergiasta rakennustyypistä riippuen (Pääkkönen 2020). Suurimman häviön aiheuttaa ilmastoinnin mukana siirtyvä lämpöenergia, joka vastaa noin 27–37 % rakennuksen kokonaislämpöhäviöistä (Pääkkönen 2020). Koska jäteveden sisältämä energiapotentiaali on huomattava, sen hyödyntämisestä on viime aikoina kiinnostuttu.

Coloradossa Denverin kampuksella aloitettiin vuonna 2021 jäteveden lämpöenergian hyödyntämiseen liittyvä hanke, jonka tarkoituksena on lämmittää seitsemää kampusrakennusta. Projekti on yksi Yhdysvaltojen suurimmista alalla, ja sen suunniteltu budjetti on noin 185 miljoonaa dollaria (Rubino 2020). Suurimpienkin hankkeiden koko maailmalla on pieni. Tällä hetkellä projekteja toteutetaan yksittäisiin rakennuksiin, vaikka lämmön talteenotto olisi teknisesti mahdollista toteuttaa kokonaiselle kaupungille. Hankkeiden määrää rajoittaa kustannukset, jotka nousevat lämmönvaihtimien ja lämpöpumppujen asentamisen takia suuriksi.

Jätevesi voi virrata jätevesiverkostossa kymmeniä kilometrejä ennen kuin se saapuu jätevedenpuhdistamolle. Mitä pidemmän ajan jätevesi on verkostossa, sitä enemmän se luovuttaa lämpöenergiaa ympäristöön. Kaikki tämä lämpöenergia menetetään pysyvästi, eikä sitä voida enää hyödyntää. Lämmön talteenotto mahdollisimman lähellä jäteveden syöttöpistettä vähentää hukkaan menevän lämpöenergian määrää. Kuvassa 1 esitetään yksinkertaistetusti jäteveden lämpöenergian hyödyntämistä kerrostalokiinteistöllä.

Jätevesiverkoston syötettävän veden lämpötila voi laskea alimmillaan noin 10 °C:seen ja nousta korkeimmillaan 25 °C:seen riippuen vuoden ja vuorokauden ajasta (Laitinen & Wallin 2022). Lämpöhäviö saadaan minimoitua, kun lämpöpumppu sijoitetaan heti rakennuksen yhteyteen, jolloin rakennus käyttää itse jätevedestä saatavan lämpöenergian. Lämmönvaihtimen jälkeen jäteveden lämpötila on laskenut säädettyyn lämpötilaan ja vesi virtaa jätevedenpuhdistamolle kuvan 1 mukaisesti. Jätevedestä talteen saatava lämpöteho on suoraan verrannollinen jäähtymään lämmönvaihtimessa.

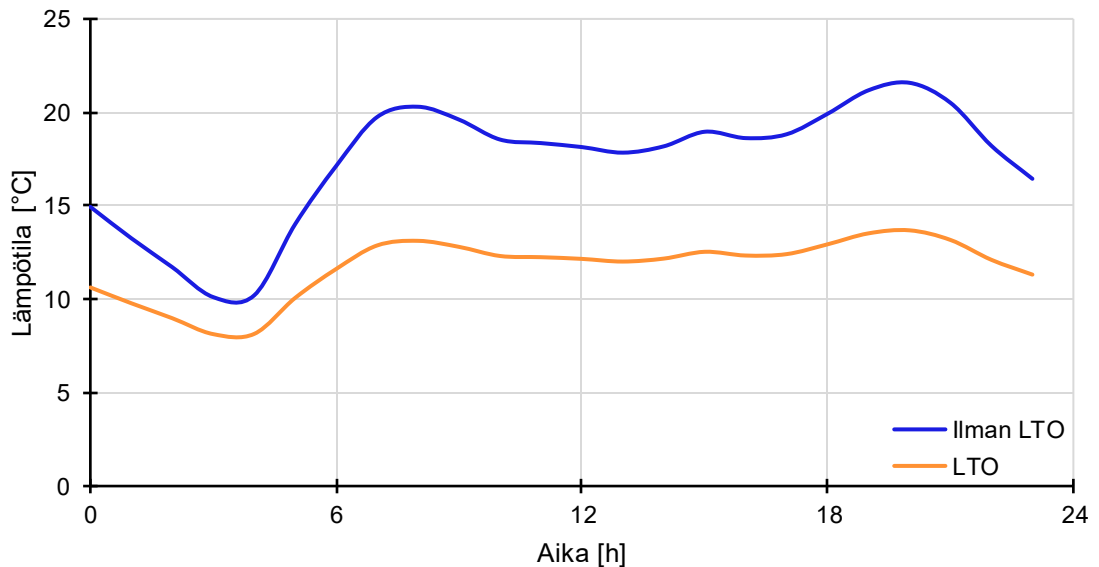


**Kuva 1** Jäteveden hukkalämmön talteenoton vaikutus jäteveden lämpötilaan.

VTT Oy määrittä tämän diplomityön kanssa samassa hankkeessa kiinteistöiltä lähtevän jäteveden lämpötilan normaali tilanteessa sekä lämmön talteenoton yhteydessä. Lämpötilat perustuivat stokastisiin veden kulutusmalleihin, joissa kiinteistöiden energiataseiden avulla lämpötilat oli mahdollista selvittää. Kiinteistöjen tyypit vaikuttivat lämmön talteenoton yhteydessä lämpötilatasoihin. Kerrostaloilla jätevesi oli mahdollista jäähdyttää matalampaan lämpötilaan verrattuna rivi- ja omakotitaloihin. Erot johtuivat lämmön talteenoton teknisistä toteutuksista. (Laitinen & Wallin 2022) Kuvassa 2 on esitetty kerrostalosta saapuvan jäteveden lämpötila lämmön talteenoton yhteydessä ja ilman talteenottoa. Koska lämpötilaero kuvaajien välillä ei ole vakio, vaihtelee lämmönvaihtimesta saatava lämpöteho vuorokauden aikana. Kuvasta 2 huomataan, kuinka varsinkin yöllä saatava lämpöteho on huomattavasti pienempi kuin päivällä.



### Jäteveden lämpötila talvella kerrostalokiinteistöllä arkipäivänä



**Kuva 2** Kerrostalolta lähtevän jäteveden lämpötila ilman lämmön talteenottoa ja sen kanssa (Laitinen & Wallin 2022).

Lämpötilan lisäksi myös jätevesivirtaamat laskevat yön aikana, sillä puhtaan veden kulutus laskee ihmisten kulutustottumuksista johtuen. Tästä syystä yön alhainen lämpötila kuvassa 2 ei vaikuta jätevesiverkoston lämpötilaan yhtä paljon, kun kuva 2 antaa aluksi ymmärtää. Yölliset kylmät virtaukset sekoittuvat verkossa muiden lämpimämpien virtausten kanssa, jolloin lopullinen lämpötila verkostossa ei laske laajalla alueella yhtä alas kuin kuvassa 2.

### Hukkalämmön hyödyntämisen vaikutukset verkostoon

Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen vaikuttaa luonnollisesti jäteveden lämpötilaan. Koska energian siirtäminen jätevedestä alentaa lämpötilaa, vaikuttaa se jätevesiverkostossa ja jätevedenpuhdistamolla tapahtuviin kemiallisiin ja biologisiin reaktioihin. Tyypillisesti tutkimuksissa mainitaan jätevedenpuhdistukseen liittyvät ongelmat, mutta lämpötilalla on vaikutuksia myös jätevesiverkostossa tapahtuviin ilmiöihin. Maija Ahonen (2021) tutki lämpötilan vaikutusta Viikinmäen, Suomenojan ja Kakolanmäen jätevedenpuhdistusprosesseihin tämän hankkeen työpaketissa 3. Tutkimuksen mukaan alle 11 °C lämpötila heikensi selvästi aktiiviliete-prosessin toimintaa, mutta selkeää alarajaa tulevan jäteveden lämpötilalle ei saatu. Tutkimuksessa esitetyissä mittauksissa jäteveden lämpötila laski alimmillaan keväällä noin 9 °C:seen. Koska Ahosen diplomityössä tehtiin kattava tutkimus lämpötilan vaikutuksista jätevedenpuhdistamon prosesseihin, ei

tässä diplomityössä perehdytä puhdistamon sisäisiin prosesseihin enempiä. Seuraavissa kappaleissa keskitytään lämpötilan vaikutuksiin jätevesiverkostossa ennen jätevedenpuhdistamoa.

Suomessa jätevesiverkoston jäätyminen ei ole mahdollista, sillä viemäriputket asennetaan routarajan alapuolelle. Asennussyvyyteen vaikuttaa maaperän laji sekä asennuksen maantieteellinen sijainti. Mikäli viemäriä ei ole mahdollista kaivaa tarpeeksi syväälle maaperään esimerkiksi sillan ylityksen vuoksi, on putki lämpöeristettävä. Tarvittaessa voidaan käyttää myös lämmityskaapeleita. Jäteveden aineominaisuuksina voidaan käyttää veden aineominaisuuksia, sillä jätevesi on lähes pelkästään vettä, johon on liuennut pieniä määriä muita aineita ja jonka mukana kulkeutuu hieman kiintoainesta. Mitoituksessa jäätympisteinä voidaan käyttää 0 °C, koska jäteveden suoloista johtuen sen jäätympiste on hieman alempi kuin puhtaalla vedellä. (Karttunen 2010) Lämmön talteenoton yhteydessä ei ole jäätymisriskiä riskiä, sillä jätevettä ei jäädytetä missään tapauksessa jäätympisteeseen saakka.

Jätevesiverkostoissa lämpötilan laskemisen ajatellaan usein vaikuttavan lähinnä erilaisien rasvojen ja öljyjen jähmettymiseen. Todellisuudessa lämpötilan aleneminen vaikuttaa moniin fysikaalis-kemiallisiin ja biologisiin ilmiöihin kuten rasvojen jähmettymiseen ja sappinifikaatioon sekä jäteveden saostumiseen ja biofilmin muodostumiseen (Abdel-Aal et al. 2019). Aineen faasiin vaikuttaa ympäristön lämpötila ja paine, joten lämpötilan laskeessa aine voi muuttua nestemäisestä kiinteäksi. Rasvojen ja öljyjen jähmettymislämpötilat voivat olla välillä 0–25 °C, joten tukosriskiä arvioitaessa niiden faasimuutokset ovat olennaisempia. Rasvat syntyvät rasvahappojen esteröityessä glyserolin kanssa muodostaen pitkiä hiilivetyketjuja. Puhekielessä öljyillä tarkoitetaan usein myös näitä rasvoja. Rasvahapon rakenne määrää, mikä on rasvan faasi missäkin lämpötilassa ja paineessa. Mikäli hiiliketjut sisältävät paljon vahvoja kovalenttisia kaksoissidoksia, ovat rasvat yleensä huoneen lämpötilassa kiinteinä. Mikäli hiiliketjut sisältävät vain yksinkertaisia sidoksia, ovat rasvat huoneen lämpötilassa usein nestemäisiä. (Iasmin et al. 2016, Marangoni 2018)

Sappinifikaatio on rasvojen muodostukselle päinvastainen reaktio, jossa hapon, emäksen tai entsyymin vaikutuksesta rasvat hajoavat rasvahappojen alkalisuoloiksi ja glyseroliksi. Lämpötilan laskeminen vähentää tämän reaktion tapahtumista ja samalla rasvojen hajoamista. Reaktiossa tarvittavat entsyymit ovat peräisin jätevedessä elävistä mikrobeista, jotka käyttävät rasvoja energianlähteenään. Lämpötilan vähentäminen vähentää mikrobien määrää, jolloin sappinifikaatiota tapahtuu vähemmän, mutta toisaalta mikrobeja on vähemmän kuluttamassa rasvoja energianlähteenään. Tästä syystä lämpötilan kasvattaminen voi tietyssä tilanteessa lisätä jäteveden rasvapitoisuutta. On kuitenkin

syytä muistaa, että mikrobien aktiivinen toiminta lisää myös biofilmiä, joka osaltaan lisää tukosriskiä. (Iasmin et al. 2016)

Rikkivedyn muodostuminen jätevedessä on mikrobien toiminnasta riippuva reaktio saponifikaation tapaan. Rikkivety on myrkyllinen ja helposti syttyvä kaasu, jota muodostuu hapettomissa olosuhteissa mikrobien toiminnasta. Varsinaista tukosriskiä rikkivety ei jätevesiverkoston aiheuta, mutta se aiheuttaa korroosio- ja hajuhaittoja. Erityisesti vähähappisissa paineellisissa jätevesiputkissa rikkivety aiheuttaa ongelmia. Lämpötilan laskeminen hidastaa rikkivetyä muodostavien mikrobien toimintaa ja samalla lisää hapen liukoisuutta jäteveteen rajoittaen hapettomia olosuhteita. Rikkivety voi reagoida veden kanssa muodostaen rikkihappoa, joka aiheuttaa betoniputkissa korroosiot. Korroosiossa muodostuvat kalsiumionit edistävät saponifikaatiota, joka vähentää rasvojen määrää jätevedessä (Gudjonsson et al. 2002, Nielsen 1987, Pomeroy 1959)

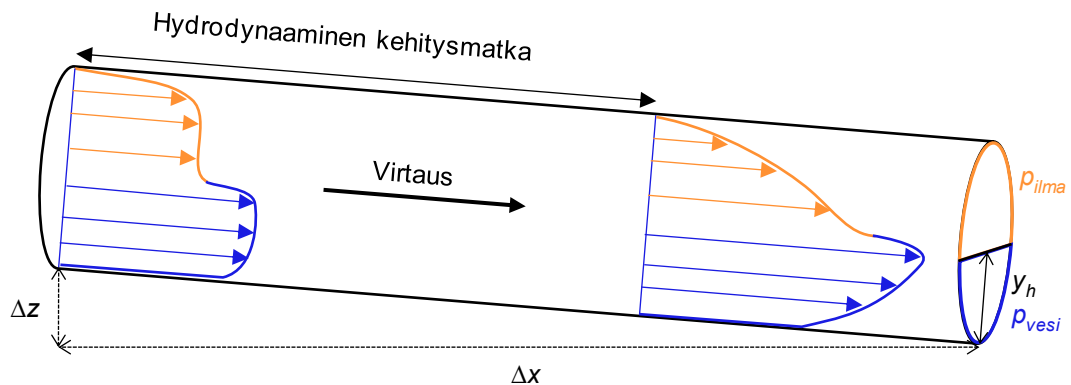
Koska jätevesiverkoston tapahtuvien ilmiöiden syy-seuraussuhteet ovat monimutkaisia, Mohamad Abdel-Aal et al. (2019) tekivät laboratorioskokeita, joissa he tutkivat lämpötilan vaikutusta jäteveteen 5–20 °C:n lämpötiloissa yhdeksän päivän ajan. Tutkitut lämpötilat valittiin jäteveden hukkalämmön talteenottoon perustuvan tutkimuksen pohjalta. Kokeessa tutkittiin jäteveden rasvojen jähmettymistä ja rikkivedyn muodostumista paineellisessa putkessa. Tarkastelut tehtiin paineellisessa putkessa, jotta saavutettaisiin parhaimmat vähähappiset olosuhteet rikkivedyn muodostumisen kannalta. Rasvojen jähmettymisessä ei löydetty selvää lämpötilariippuvuutta, mutta rikkivedyn muodostumisessa löydettiin selkeä korrelaatio. Tutkimuksessa rikkivedyn määrä väheni noin 40 % kun lämpötila laski 20 °C:sta 5 °C:seen. Rikkivedyn väheneminen pidentää betoniputkien käyttöikää ja vähentää hajuhaittoja. Varsinaisten tukosriskien lisääntymiseen hukkalämmön talteenotolla ei todettu olevan merkitystä. (Abdel-Aal et al. 2019)

## 2.2 Hydrodynamiikka

Jätevesiverkostoissa veden virtaus perustuu lähtökohtaisesti painovoimaiseen avokanavirtaukseen, jolloin pumppausta veden liikkeelle saamiseksi ei tarvita. Jätevesi virtaa kaltevia putkia pitkin jätevedenpuhdistamolle tai pumppaamolle, josta tietyn alueen jätevedet saadaan pumpattua paineputkessa vedenjakajien yli kohti puhdistamo. Kaltevissa, osittain täynnä olevissa putkissa virtaa jäteveden lisäksi myös ilmaa, sillä putket mitoiteetaan siten, etteivät ne paineellistu suurillakaan virtauksilla. Muita avokanavirtauksia ovat esimerkiksi joet, kanaalit ja kosket, joissa on kaikissa selkeä rajapinta ilman ja virtaavan veden.

Avokanavirtauksessa kiinnostavia tekijöitä ovat virtauksen tilavuusvirta, virtausnopeus ja vesisyvyys. Näiden suureiden perusteella verkoston kapasiteettia voidaan arvioida, jotta kaikki jätevedet saadaan siirrettyä turvallisesti jätevedenpuhdistamolle. Putkissa tapahtuvat hydromekaaniset ilmiöt linkittyvät vahvasti myös termodynaamisiin ilmiöihin, joita tarvitaan jäteveden lämpötilan laskennassa. (Çengel & Cimbala 2006)

Virtausta eteenpäin ajava voima on jätevesiverkostossa gravitaatio perinteisen paineeron sijaan. Virtaus kiihtyy kallistetussa putkessa, kunnes virtauksesta aiheutuva kitkavoima on yhtä suuri gravitaatiosta aiheutuvan voiman kanssa. Tällöin virtauksen sanotaan saavuttaneen terminaalinopeutensa ja virtauksen nopeusprofiili on saavuttanut vakio arvonsa. Suurissa verkostoissa virtaus on hydrodynaamisesti täysin kehittynyt, mutta yksittäisten putkien virtauslaskennassa kehitysmatka on tärkeää huomioida. Kuvassa 3 esitetään nopeusprofiilin kehittymistä avokanavavirtauksessa. Avokanavavirtauksessa nopeusprofiili muodostuu kummassakin fluidissa niiden viskositeetin perusteella. Nopeuden maksimi arvo saavutetaan vedessä noin ensimmäisen neljänneksen syvyydellä nesteen pinnasta mitattuna. (Akan 2006, Çengel & Cimbala 2006, Chaudhry 2008)



**Kuva 3** Nopeusprofiilin kehittyminen avokanavavirtauksessa. Siniset ja oranssit nuolet kuvaavat nopeusvektoreita virtauksessa (Çengel & Cimbala 2006).

Kuvan 3 mukaisesti nopeus aivan putken seinän välittömässä läheisyydessä on nolla ja suurimmillaan noin putken keskiviivalla. Aivan putken sisääntulossa virtauksen nopeus on vakio riippumatta sen etäisyydestä seinästä, jolloin virtausta kutsutaan tulppavirtaukseksi. Kuvaan on lisätty myös veden syvyys  $y_h$  sekä märkäpiirit vedelle  $p_{vesi}$  ja ilmalle  $p_{ilma}$ . Putken kaltevuus ilmoitetaan  $z$ - ja  $x$ -suuntaisten etäisyyksien osamääränä seuraavasti:

$$S = \frac{\Delta z}{\Delta x}. \quad (2.1)$$

Kitkallisesta virtauksesta johtuen nopeusprofiili saa lopullisen muotonsa turbulentissa virtauksessa alla olevan yhtälön mukaisesti hydrodynaamisen kehitysmatkan jälkeen:

$$\frac{L_h}{D} \approx \frac{L_t}{D} \approx 10, \quad (2.2)$$

jossa  $D$  on putken sisähalkaisija,  $L_h$  hydrodynaaminen kehitysmatka ja  $L_t$  terminen kehitysmatka. Termisellä kehitysmatkalla tarkoitetaan vastaavasti matkaa, jonka jälkeen virtauksen sisäinen lämpötilaprofiili ei enää muutu. Yhtälö (2.2) on suuntaa antava luku-arvo, joten sillä saataviin tuloksiin on suhtauduttava varauksellisesti. Turbulenttisuudella kuvataan virtauksen kaoottisuutta ja se vaikuttaa myös konvektiiviseen lämmönsiirtoon. (Çengel & Cimbala 2006) Turbulenttisuudesta kerrotaan tarkemmin konvektiivisen lämmönsiirron ja numeerisen virtauslaskennan yhteydessä.

Turbulenttisuuden lisäksi avokanavavirtaukset voidaan luokitella alikriittiseksi, kriittiseksi tai ylikriittiseksi virtaukseksi riippuen Frouden luvun arvosta:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gy_h}}, \quad (2.3)$$

jossa  $U$ ,  $y_h$  ja  $g$  ovat virtauksen nopeus, syvyys ja putoamiskihti. Frouden luku kuvaa virtauksen nopeuden suhdetta virtauksessa kulkevan häiriön nopeuteen, jossa yhtälön nimittäjä kuvaa virtauksessa etenevän häiriön eli aallon nopeutta. Aallon nopeus voidaan johtaa liikemäärän ja jatkuvuusyhtälön avulla. Frouden luvun referenssi arvo on 1, jolloin virtausta kutsutaan kriittiseksi. Mikäli Frouden luku on alle 1, on virtaus alikriittinen. Alikriittisellä virtauksella tarkoitetaan avokanavavirtausta, jossa virtauksessa tapahtuvat häiriöt voivat liikkua ylävirtaan virtaussuuntaa vastaan. Alikriittisiä virtauksia ilmenee silloin, kun virtauksen nopeus pieni, ja tällöin esimerkiksi takaisinvirtaus on mahdollinen virtauskanavassa. Ilmiötä tapahtuu muun muassa jätevesiverkostoissa, jossa putken kaltevuus pienenee nopeasti. Tällöin virtauksen nopeus hidastuu ja sen syvyys kasvaa nopeasti. Ylikriittiseksi puolestaan kutsutaan avokanava virtausta, jossa Frouden luku on yli 1. Tällöin virtauksen nopeus on suuri ja virtaussyvyys matala, eivätkä virtauksen häiriöt voi kulkea ylävirtaan. Kohtaa, jossa ylikriittinen virtaus muuttuu alikriittiseksi, kutsutaan hydrauliseksi hypyksi. (Akan 2006, Çengel & Cimbala 2006, Chaudhry 2008)

Koska jätevesiverkostossa putket ovat usein pitkiä ja niiden kaltevuus pysyy vakiona, on avokanavavirtaus yleensä hydrodynaamisesti täysin kehittynyt. Tällöin kitkallisesta virtauksesta aiheutuvat vastusvoimat vastaavat gravitaatiosta aiheutuvaa voimaa ja virtauksen nopeus pysyy vakiona. Ilmiö voidaan ilmaista myös painehäviöinä, jossa kitkan aiheuttamat painehäviöt vastaavat kaltevuudesta johtuvaa painekorkeuden menetystä. Kun painehäviöt merkitään yhtä suuriksi ja putken karheudesta aiheutuva termi muokataan Manningin kertoimen mukaiseksi, saadaan tilavuusvirta esitettyä muodossa:

$$Q = UA = \frac{1}{n} AR_h^{2/3} S^{1/2}, \quad (2.4)$$

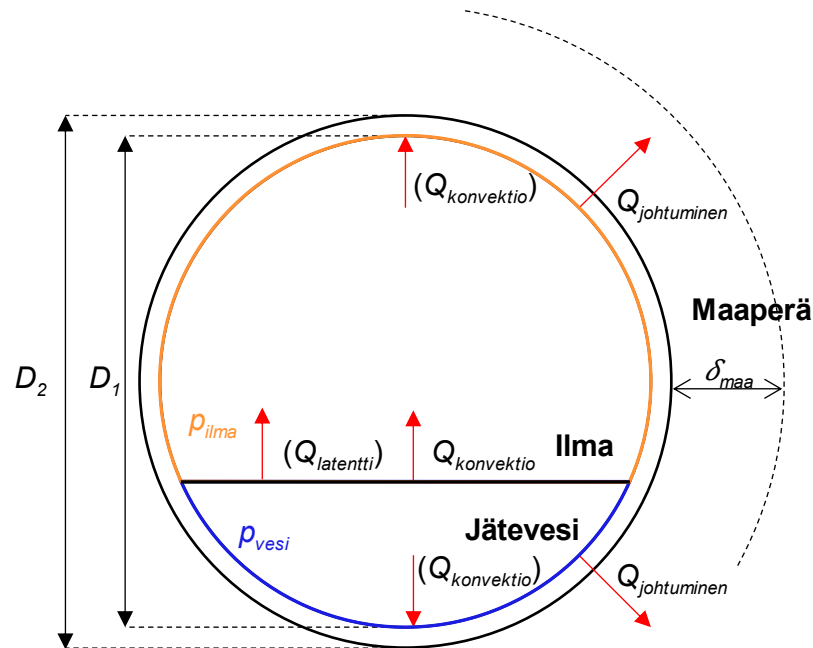
jossa  $n$ ,  $A$ ,  $R_h$ , ja  $S$  ovat Manningin kerroin, virtauksen poikkileikkauksen pinta-ala, hydraulinen säde ja virtauskanavan kaltevuus. Hydraulinen säde määrittää virtauksen poikkileikkauksen pinta-alan ja märkäpiirin osamääränä. Kuvassa 3 on esitetty avokanavavirtauksen märkäpiiri  $p_{vesi}$ . Yhtälöä kutsutaan yleisesti Manningin yhtälöksi, koska se perustuu Rober Manningin tekemiin empiirisiin tutkimuksiin kitkatermin yksinkertaistamiseksi. Yhtälö on kehitetty ranskalaisen insinöörin Antoine Chezy:n yhtälöstä. Manningin yhtälö on vakiintunut vuosien saatossa yleisimmäksi yhtälöksi avokanava virtauksien laskennassa hydrodynaamisesti kehittyneille virtauksille. (Akan 2006, Çengel & Cimbala 2006, Chaudhry 2008)

## 2.3 Lämmönsiirto

Lämpöenergia voi siirtyä korkeammasta lämpötilasta matalampaan termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Jätevesiverkostossa lämpö siirtyy kaikilla edellä mainituilla tavoilla, mutta säteilemällä siirtyvän lämpöenergian osuus on hyvin pieni alhaisen lämpötilatason johdosta. Tästä syystä lämpöenergian siirtymistä säteilemällä ei käsitellä seuraavissa luvuissa.

Kuvassa 4 on esitetty jätevesiputken poikkileikkaus, johon on lisätty tutkimuksessa huomioituiden lämmönsiirtoon liittyvät ilmiöt punaisilla nuolilla. Suluisissa olevat lämpövirrat kuvaavat ilmiöitä, jotka lopulta jätettiin huomioimatta lopullisessa mallinnuksessa. Niiden vaikutusta kuitenkin tutkittiin ennen lopullista päätöstä luopua niistä. Putken sisä- ja ulkohalkaisijat on merkitty  $D_1$  ja  $D_2$ . Lisäksi kuvassa on esitetty märkäpiirit sekä vedelle  $p_{vesi}$  että ilmalle  $p_{ilma}$ . Katkoviivalla kuvataan maaperässä aluetta, johon putken pinnasta syntyvä lämpötilagradientti yltää ja parametrilla  $\delta_{maa}$  lämpötilagradientin etäisyyttä putken ulkopinnasta. Virtauskanavan sisäpinnan likakerroksen aiheuttamaa

lämpövastusta tutkimuksessa ei huomioitu, koska likakerroksen vaikutuksista lämmönsiirtoon ei ollut saatavilla tutkimusaineistoa.



**Kuva 4** Poikkileikkaus jätevesiputkesta, johon on lisätty lämmönsiirtoon liittyvät ilmiöt punaisilla nuolilla.

Tässä tutkimuksessa huomioitavat lämmönsiirron ilmiöt ovat konvektio vesi-ilma-rajapinnasta ilmaan, johtuminen putken seinämän läpi ja johtuminen maaperään. Lisäksi lämmönsiirtoa tutkittiin konvektiolla virtauksesta putken sisäpintaan ja latenttilämmön vaikutusta jäteveden lämpötilaan.

### Lämmön johtuminen virtauskanavassa ja maaperässä

Lämmön johtumista tapahtuu jätevesikanavan seinämässä ja maaperässä. Johtumisen vaikutus on suuri jäteveden lämpötilaan, joten sen esittäminen tarkasti matemaattisessa muodossa on tämän tutkimuksen kannalta tärkeää. Yleinen yksiuotteista lämmönjohtumista hallitseva osittaisdifferentiaaliyhtälö kuvaa energiatasapainoa kappaleessa. Yhtälö huomioi kappaleeseen johtuvan lämpöenergian, siinä muodostuvan lämpöenergian ja kappaleen kyvyn varastoida lämpöenergiaa itseensä. Yhtälöllä kuvataan lämmönjohtumista kaikissa tilanteissa, kun ilmiöön liittyvät reunaehdot ovat määritellyt. Mikäli kappaleen lämmönjohtumista kuvaava suure  $k$  voidaan olettaa vakioksi, eikä kappaleessa muodostu lämpöenergiaa, yksikertaistuu osittaisdifferentiaaliyhtälö seuraavasti:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + e_{gen} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (2.6)$$

jossa  $\alpha$  on kappaleen termien diffusiviteetti,  $\rho$  on tiheys,  $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti,  $x$  on lämmön siirtymä matka  $x$ -suunnassa,  $t$  on aika,  $k$  on lämmönjohtumiskerroin,  $T$  on lämpötila ja  $e_{gen}$  kappaleessa muodostuva lämpöenergia. Mikäli lämmönjohtumista tarkastellaan ajasta riippumattomassa tilassa, supistuu viimeinen termi pois yhtälöstä (2.5), jolloin jäljelle jää vain lämmönjohtumista kuvaava termi. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015)

Lämpöenergian johtuminen putken seinässä on suoraan verrannollinen jäteveden ja maaperän lämpötilaeroon, putken märkäpinta-alaan sekä kääntäen verrannollinen putken seinän paksuuteen. Tätä yhteyttä kuvataan Fourierin lailla seuraavasti:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (2.7)$$

jossa  $\dot{Q}_{cond}$ ,  $k$ ,  $A$ ,  $dT/dx$  ovat siirtynyt lämpöenergia, lämmönjohtumiskerroin, pinta-ala ja lämpötilagradientti  $T$ - $x$ -tasossa. Yhtälön negatiivisella etumerkillä varmistetaan, että lämpöenergia on positiivinen tarkastelusuunnassa. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015)

Tässä tutkimuksessa lämmönjohtumista tarkastellaan yksiulotteisena ja ajasta riippumattomana. Koska virtauskanavat ovat pääasiallisesti lieriön muotoisia, tulee lämmön johtumista tarkastella sylinterikoordinaatistossa. Tällöin Fourierin laki saadaan muotoon:

$$\dot{Q}_{cond} = k \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2), \quad (2.8)$$

jossa  $k$ ,  $L$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $T_1$  ja  $T_2$  ovat lämmönjohtumiskerroin, putken pituus, putken sisähalkaisija, putken ulkohalkaisija, putken sisäpinnan lämpötila ja putken ulkopinnan lämpötila. Tarkastelu sylinterikoordinaatistossa johtuu siitä, että putken vaipan pinta-ala kasvaa säteen funktiona. Tällöin pinta-ala ei ole vakio kuten yhtälössä (2.7). Yhtälöstä on mahdollista johtaa lämpötilajakauma tarkasteltavassa kappaleessa, eli esitetään lämpötila putken säteen funktiona:



$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2) \ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2.9)$$

Yhtälössä ratkaisussa on käytetty reunaehtoina vakio lämpötilaa putken pinnalle sekä vakio lämpövirtaa putken seinämän lävitse Fourierin lain mukaisesti. (Çengel & Ghajar 2011)

### Maaperän lämpötilajakauman laskenta

Lämmönjohtumiseen virtauskanavasta maaperään vaikuttaa maaperän lämpötila. Koska virtauskanava kulkee tietyllä syvyydellä maan alla, tulee maaperän lämpötila selvittää kyseisellä syvyydellä. Maaperän lämpötilajakauma maanpinnasta alaspäin voidaan mallintaa puoliäärettömänä kappaleena, kun maanpinnan lämpötila tiedetään. Ulkolämpötilan vaihtelu ei tällöin vaikuta maaperän lämpötilaan syvällä, vaan lämpötila pysyy vakiona ajasta ja syvyydestä riippumatta. Puoliäärettömällä kappaleella tarkoitetaan termodynamiikassa kappaletta, jolla on äärettömän suuri tasainen pinta ja lämpötilajakauman voidaan ajatella tapahtuvan yksiuotteisesti kohtisuorassa tätä pintaa vasten. Tällöin lämmönjohtumista ei huomioida kaikissa kolmessa dimensiossa. (Çengel & Ghajar 2011) Tämän tutkimuksen kannalta oli tärkeää selvittää, miten maaperän lämpötila muuttuu eri vuodenaikoina, jotta jäteveden lämpötila pystyttiin mallintamaan eri olosuhteissa. Seuraavissa kappaleissa esitettyä teoriaa hyödynnetään maaperän lämpötilan laskennassa luvussa 4.4.

Maaperän ajasta riippuvaa lämpötilajakauman laskentaa voidaan yksinkertaistaa oletta- malla kappaleen termofysikaaliset ominaisuudet vakioiksi, maaperän pinnan lämpötilan vakioiksi sekä kappaleessa muodostuva lämpöenergia mitättömäksi. Yksinkertaistukset eivät vaikuta maaperän tapauksessa lopputuloksiin merkittävästi. Maanpinnan lämpötila pysyy koko tarkastelun ajan vakiona ja maaperän lämpötila on kauttaaltaan vakio ensimmäisellä aika-askeleella. Edellä esitetyt reunaehdot esitetään matemaattisesti seuraavasti:

$$T(0, t) = T_s \text{ ja } T(x \rightarrow \infty) = T_i \quad (2.10)$$

$$T(x, 0) = T_i, \quad (2.11)$$

jossa  $T_i$  ja  $T_s$  ovat maaperän lämpötila ajanhetkellä nolla ja maanpinnan lämpötila. Osittaisdifferentiaali yhtälön ratkaiseminen lähtee liikkeelle similaarisuusmuuttujan valinnalla, jolla kaksi itsenäistä muuttujaa  $x$  ja  $t$  saadaan yhdistettyä yhdeksi muuttujaksi. Transientille puoliäärettömälle kappaleelle similaarisuusmuuttuja on määritelty:

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}, \quad (2.12)$$

jossa  $x$  kuvastaa tarkastelu syvyyttä ja  $\alpha$  maan termistä diffusiteettiä. Similaarisuus muuttujan avulla osittaisdifferentiaaliyhtälö saadaan muutettua tavalliseksi yhden muuttujan differentiaaliyhtälöksi. Differentiaaliyhtälöiden ketjutussäännön avulla yleinen lämmön johtumisen differentiaaliyhtälö voidaan muuttaa similaarisuusmuuttujasta riippuvaiseksi. Ketjutussäännön avulla yhtälön termit voidaan järjestää seuraavasti:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{x}{2t\sqrt{4\alpha t}} \frac{dT}{d\eta} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d}{d\eta} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{1}{4\alpha t} \frac{d^2 T}{d\eta^2}. \quad (2.14)$$

Kun uudet termit lisätään alkuperäiseen yhtälöön ja tehdään mahdolliset supistukset, saadaan uusi toisen kertaluvun differentiaaliyhtälö:

$$\frac{d^2 T}{d\eta^2} = -2\eta \frac{dT}{d\eta}. \quad (2.15)$$

Muuttujanvaihdoksesta johtuen myös alkuperäiset reunaehdot on muunnettava similaarisuusmuuttujasta riippuvaiseksi:

$$T(0) = T_s \text{ ja } T(\eta \rightarrow \infty) = T_i. \quad (2.16)$$

Uusi toisen kertaluvun differentiaaliyhtälö ratkaistaan reunaehtojen avulla separoinnilla, jossa toisen kertaluvun differentiaaliyhtälö (2.15) muutetaan ensimmäisen kertaluvun yhtälöksi sijoittamalla  $w = dT/d\eta$ , jolloin:

$$\frac{dw}{d\eta} = -2\eta w \rightarrow \frac{dw}{w} = -2\eta d\eta. \quad (2.17)$$

Integroimalla yhtälön molemmat puolet saadaan:

$$\ln w = -\eta^2 + C_0 \rightarrow w = C_1 e^{(-\eta^2)}, \quad (2.18)$$

jossa integroimisvakio  $C_1 = \ln C_0$ . Sijoittamalla  $w = dT/d\eta$  takaisin yhtälöön (2.18), ja integroimalla uudelleen apumuuttajan  $u$  suhteen saadaan yhtälö:

$$T = C_1 \int_0^\eta e^{-u^2} du + C_2. \quad (2.19)$$

Merkitsemällä edellä mainittujen reunaehtojen (2.16) mukaisesti  $\eta = 0$ , saadaan yhtälöstä (2.19) ratkaistua yksinkertaisesti integroimisvakio  $C_2 = T_s$ . Kun  $\eta$  lähestyy ääretöntä, voidaan  $C_1$  ratkaista edellisestä yhtälöstä. Integrointi tehdään apumuuttujien  $I$  ja  $v$  avulla, minkä jälkeen yhtälö muutetaan napakoordinaatteihin integroimisen helpottamiseksi:

$$I = \int_0^\infty e^{-u^2} du \rightarrow I^2 = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-u^2-v^2} dudv \rightarrow I^2 = \int_0^\infty \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-r^2} r d\theta dr \quad (2.20)$$

$$I^2 = \frac{\pi}{4} \rightarrow I = \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (2.21)$$

Integraaliosan ratkaisu ja integroimisvakio  $C_2$  sijoitetaan lopulta alkuperäiseen yhtälöön (2.19), josta saadaan ratkaistua integroimisvakio  $C_1$ :

$$T = C_1 \frac{\sqrt{\pi}}{2} + T_s \rightarrow C_1 = \frac{2(T_i - T_s)}{\sqrt{\pi}}. \quad (2.22)$$

Reunaehtojen perusteella ratkaistujen vakioiden  $C_1$  ja  $C_2$  avulla puoliäärettömän kappaleen lämpötilagradientti saadaan ratkaistua yhtälöllä:

$$\frac{T - T_s}{T_i - T_s} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-u^2} du = \text{erf}(\eta) = 1 - \text{erfc}(\eta), \quad (2.23)$$

jossa  $\text{erf}(\eta)$  ja  $\text{erfc}(\eta)$  kutsutaan virhe- ja komplementtinvirhefunktioiksi, jotka edustavat yhtälön integraaliosaa. Funktioiden analyyttisiä ratkaisuja ei ole olemassa, joten integraalit on ratkaistava numeerisesti. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015) Yhtälön 2.23 avulla maaperän lämpötila on mahdollista selvittää tietyllä syvyydellä tarkasteltavana ajanhetkenä.

## Konvektiiviset lämmönsiirtoilmiöt jätevesikanavassa

Konvektiivisella lämmönsiirrolla tarkoitetaan lämpöenergian kulkeutumista nesteissä ja kaasuissa, eli fluideissa. Konvektion mahdollistaa molekyylien vapaa liike fluidin sisällä, mikä ei ole mahdollista kiinteillä aineilla. Kiinteä aine voi kuitenkin olla vuorovaikutuksessa fluidin kanssa, jolloin niiden rajapinnassa lämpö siirtyy konvektiolla. Konvektiivisessa lämmönsiirrossa on kyse partikkeleiden liikkeestä osana lämmönjohtumista. Kun liikkeessä olevat molekyylit virtaavat tarkasteltavan kohdan ylitse, pysyy lämpötilaero

molekyylin ja tarkasteltavan kohdan välillä suurempana kuin tilanteessa, jossa molekyylit pysyisivät paikoillaan. Tämä johtuu siitä, että tarkasteltavan kohdan rajapintaan saapuu aina uusi molekyyli virtauksen mukana, joka ei ole vielä ehtinyt lämpenemään tarkasteltavan kohdan vaikutuksesta. Suuremman lämpötilaeron johdosta lämpöenergia siirtyy tehokkaammin virtaavissa molekyyleissä. Konvektiivinen lämmönsiirto voi olla luonnollista tai pakotettua riippuen siitä, liikuttaako fluidia jokin ulkoinen voima. Lopulta ilmiössä on kuitenkin kyse lämmönjohtuminen kahden partikkelin välillä. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015)

Viemäriverkostossa konvektiivista lämmönjohtumista tapahtuu veden ja ilman välillä, veden ja putken seinämän välillä sekä ilman ja putken seinämän välillä. Konvektiivisen lämmönsiirron yleinen yhtälö on:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty), \quad (2.24)$$

jossa  $h$ ,  $A$ ,  $T_s$  ja  $T_\infty$  ovat konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, rajapinnan pinta-ala, rajapinnan lämpötila ja fluidin lämpötila. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen käytetään dimensiotonta Nusseltin lukua  $Nu$ , joka kuvaa konvektiivisen lämmönsiirron suhdetta johtumalla tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Nusseltin luku määritellään seuraavasti:

$$Nu = \frac{hL}{k}, \quad (2.25)$$

jossa  $L$  ja  $k$  ovat kappaleen karakteristinen pituus ja lämmönjohtumiskerroin. Nusseltin luvulle on olemassa paljon eri korrelaatioita riippuen tarkasteltavasta ilmiöstä. Tason yli kulkevalle virtaukselle, jossa virtaus on turbulenti ja tason lämpötila on vakio, keskimääräinen Nusseltin luku on johdettu seuraavasti:

$$Nu = 0,037Re^{0,8} Pr^{1/3}, \quad (2.26)$$

jossa  $Re$  ja  $Pr$  ovat Reynoldsin luku, joka kuvaa virtauksen turbulentsuutta ja Prandtin luku, joka kuvaa liikemäärän suhdetta termiseen diffuusioon. Viemäriverkostossa veden ja ilman välistä lämmönsiirtoa voidaan tarkastella virtauksena tason yli. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015)

Putkivirtaukselle Nusseltin luvun empirinen korrelaatio on johdettu:

$$Nu = 0,023Re^{0,8} Pr^{1/3}, \quad (2.27)$$

kun virtaus on termisesti ja hydrodynaamisesti täysin kehittynyt, sekä putken seinämän lämpötila ja siihen siirtyvä lämpövirta ovat vakioita. Hydrodynaamisesti kehittyneen virtauksen nopeusprofiili ei muutu virtaussuunnassa putkessa. Samoin termisesti kehittyneessä virtauksessa lämpötilaprofiili pysyy muuttumattomana. Reynoldsin ja Prandtin luku määritellään seuraavasti:

$$Re = \frac{U_{\infty}L}{\nu} \quad (2.28)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \quad (2.29)$$

jossa  $U_{\infty}$ ,  $L$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $k$  ovat virtauksen nopeus, karakteristinen pituus, dynaaminen viskositeetti, kinemaattinen viskositeetti, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Putkivirtaus on turbulenti, kun Reynoldsin luku on yli 4000 ja laminaari Reynoldsin luvun ollessa alle 2300. Yleisesti virtaukset ovat usein turbulenteja, vaikka virtauksen kaottisuus ei näkyisikään voimakkaasti tarkastelijalle. Karakteristinen pituus tarkoittaa tasolevyn tapauksessa levyn pituutta ja putkivirtauksessa putken halkaisijaa. (Çengel & Ghajar 2011, Mills & Coimbra 2015)

Veden ja ilman välistä lämmönsiirtoa jätevesiverkostossa on tutkittu myös erikseen. Flinspachin vuonna 1973 tekemässä empiirisessä tutkimuksessa veden ja ilman väliselle lämmönsiirtokertoimelle määritettiin riippuvuus fluidien välisen nopeuden avulla seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$h = 5,85\sqrt{\Delta U_{wa}}, \quad (2.30)$$

jossa  $\Delta U_{wa}$  on veden ja ilman suhteellinen nopeus. Tutkimukseen on viitattu useissa jätevesimallinnuksiin liittyvissä tutkimuksissa (Abdel-Aal et al. 2014, Dürrenmatt & Waner 2014). Korrelaation käyttämisestä on kritisoitu heikkojen lähteiden käytöstä sekä tutkimuksen huonosta dokumentaatiosta (Abdel-Aal et al. 2018).

## 3 JÄTEVESIVERKOSTON VIRTAUKSEN JA LÄM- MÖNSIIRRON MALLINNUS

Virtauksen esittämistä matemaattisessa muodossa kutsutaan virtausmallinnukseksi. Ennen tietokoneiden kehitystä virtauslaskentaa yksinkertaistettiin empiirisiin tutkimuksiin pohjautuen, jolloin yhtälöitä oli mahdollista laskea myös käsin. Tietokoneet ovat mahdollistaneet modernin virtauslaskennan kehityksen, jossa yhtälöiden analyttisiä ratkaisuja ei välttämättä tarvita tarkkojen tulosten saamiseksi. Virtauslaskenta pohjautuu usein kuitenkin ennen modernia fysiikkaa keksittyihin yhtälöihin, joita ei aikoinaan pystytty ratkaisemaan. (Xavier 2009) Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää Adhémar Barré de Saint-Venantin vuonna 1871 kehittämiä yhtälöitä avokanavavirtauksille, joihin monet nykypäivän virtauslaskentaohjelmat edelleen perustuvat.

Virtausmallinnuksen käytännöllisyys perustuu siihen, että se mahdollistaa asioiden tarkastelun tietokonesimulaatioiden avulla, jolloin mittauksia ei tarvitse suorittaa yhtä paljon. Mallinnuksen yhteydessä tulee kuitenkin aina muistaa, että mallit ovat yksinkertaisuuksia todellisista fyysisistä prosesseista. Lähtötiedoissa tehdyt oletukset ja mahdolliset virheet vaikuttavat aina lopputulokseen. Tästä syystä mallinnuksella saataviin tuloksiin ei tule luottaa ilman tuloksia tukevia mittauksia, joilla mallinnuksen tarkkuudesta voidaan varmistua.

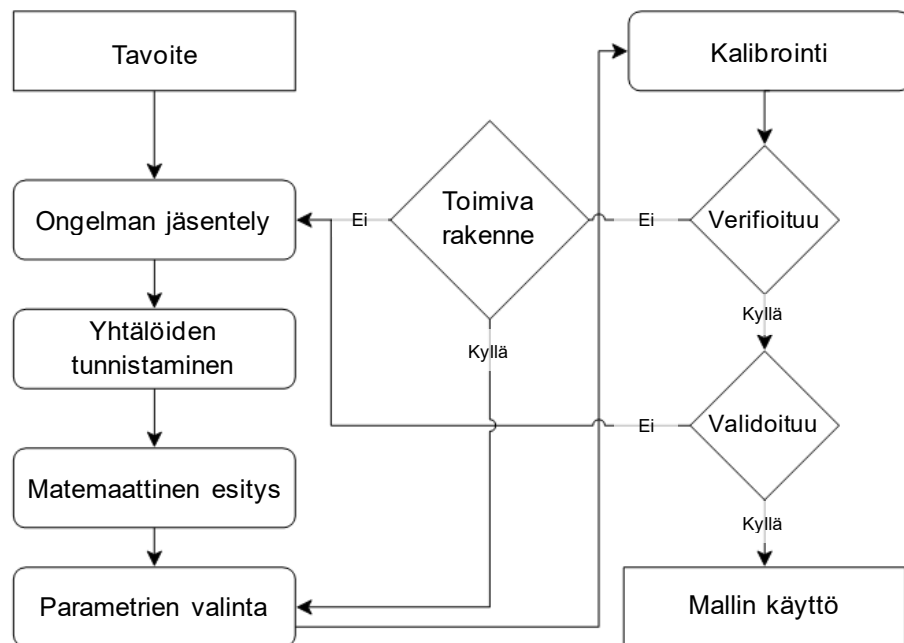
### 3.1 Fysikaalinen mallinnus yleisesti

Fysikaalista mallinnusta lähestytään perinteisesti kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä tavassa mallinnettava järjestelmä jaetaan pienempiin alijärjestelmiin niin pitkään, kunnes alijärjestelmän toimintaa voidaan kuvata tunnetuilla yhtälöillä. Tämän jälkeen alkuperäinen järjestelmä voidaan kuvata näiden pienempien järjestelmien avulla. Edellä esitetty menettelytapa vaatii hyvää luonnonlakien ymmärrystä ja prosessiin vaikuttavien tekijöiden tunnistamista. Usein joudutaan kuitenkin tekemään yksinkertaisuuksia, jotta fysikaaliset yhtälöt voidaan muodostaa. (Ljung & Glad 1994)

Toisessa lähestymistavassa mallintaminen perustuu täysin systeemissä tehtyihin mittauksiin eri alkuarvoilla. Mallinnus kuvaa alkuarvojen suhdetta lopputuloksiin, ja pyrkii antamaan uusia tuloksia perustuen edellisiin korrelaatioihin. Korrelaatiot perustuvat tilastollisiin menetelmiin, jotka pyrkivät saamaan tuloksen vastaamaan mittauksia ja alkuarvoja ottamatta kantaa prosessissa tapahtuviin fysikaalisiin ilmiöihin. Tapaa käytetään usein täydentämään ensimmäistä tapaa, mikäli fysikaalisten yhtälöiden antamat tulokset

eivät ole tarpeeksi tarkkoja tai kaikkia ilmiöitä ei tunneta. Lähestymistavan ongelmaksi muodostuu se, että se ei anna mitään tietoa fysikaalisista ilmiöistä, joita prosessin aikana tapahtuu. (Ljung & Glad 1994)

Kuvassa 5 esitetään mallinnusprosessin kulkua alusta loppuun. Prosessi lähtee liikkeelle ongelman jäsentelystä ja ilmiöiden tunnistamisesta. Tämän jälkeen matemaattinen malli rakennetaan ilmiöitä kuvaavien yhtälöiden avulla. Itse mallin testaaminen voidaan aloittaa, kun matemaattisen mallin on täysin valmis. Testaamisessa on kyse mallin tuottamien tulosten vertaamisesta mitattuihin tuloksiin. Kalibroinnissa parametrien arvoja säädetään todellisten arvojen rajoissa, jotta mallinnus vastaisi mahdollisimman tarkasti mitattuja tuloksia.



**Kuva 5** Matemaattisen mallinnusprosessi (Mustonen 1986, Ljung & Glad 1994).

Mikäli verifiointissa mallinnuksen tulokset eivät vastaa mitattuja tuloksia, parametrien arvoja muutetaan ja simulointi suoritetaan uudelleen. Jos tulokset eivät vastaa kalibroinnin jälkeen toisiaan, tulee prosessissa palata kuvan 5 mukaisesti ongelman jäsentely -vaiheeseen. Mikäli verifiointi onnistuu, siirrytään validointivaiheeseen, jossa mallinnus suoritetaan uudella tietoaaineistolla, joka ei ole kytköksissä verifiointissa käytettyyn tietoaaineistoon. Epäonnistunut validointi viittaa mallinnuksen rakenteellisiin ongelmiin, joten prosessissa palataan tällöin alkuun. Onnistuneen validoinnin tapauksessa malli on valmis ja sitä voidaan pitää luotettavana. (Mustonen 1986)

## 3.2 Jätevesiverkoston mallinnus

Jätevesiverkostomalli muodostuu solmuista ja linkeistä, jossa solmut ovat pistemäisiä komponentteja, joita yhdistää linkit. Yhdessä ne muodostavat yläluokan, jonka alle kaikki mallissa käytetyt fyysiset komponentit voidaan jakaa. Solmuja ovat esimerkiksi säiliöt ja verkoston päätepiisteet, ja linkkejä puolestaan ovat esimerkiksi virtauskanavat ja pumput. Kaikilla näillä komponenteilla on koordinaatit, joiden perusteella niiden sijainti ja korkeus-asema merenpintaan nähden määritetään. Muuten komponenttityyppien ominaisuudet erovavat toisistaan huomattavasti. Komponentteja käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.1. Fyysisten komponenttien lisäksi mallissa on esimerkiksi ohjauksiin, vedenkäyttöön ja geometriaan liittyviä ei-fyysisiä komponentteja, kuten tuotto- ja tilavuuskäyriä (curves), tuntikertoimia (patterns) ja aikasarjoja.

Jätevesiverkoston mallinnukseen on olemassa useita mallinnusohjelmia kuten EPA:n SWMM, Fluiditin Fluidit Sewer, Bentlyn SewerGems, DHI:n Mike Urban ja Innovyzin InfoSWMM (CH2M HILL 2014). Lähes kaikki ohjelmat kuitenkin käyttävät EPASWMM-pohjaista simulaattoria. Kaikki edellä mainitut ohjelmat sisältävät käyttöliittymän, jonka avulla verkosto ja halutut tulokset voidaan visualisoida. Jokaisella solmulla on koordinaatit, joiden perusteella solmut voidaan siirtää järjestelmästä toiseen ilman, että komponenttien maantieteellinen sijainti muuttuu.

Hydraulinen mallinnus aloitetaan verkoston tuomisella mallinnusohjelmaan. Suomessa verkoston paikkatiedot on yleensä hyvin dokumentoitu, jolloin verkoston solmut ja niitä yhdistävät linkit saadaan tuotua mallinnusohjelmaan automaattisesti. Tällöin myös komponenttien ominaisuustiedot voidaan tuoda samassa yhteydessä. Toinen vaihtoehto on käyttää verkostokarttaa taustakartta ja piirtää verkosto käsin taustakartan päälle mallinnussovelluksessa. Suurien verkoston tapauksessa käsin piirtäminen on todella työlästä ja hidasta.

Kun mallin fyysiset komponentit on syötetty mallinnusohjelmaan, loput parametrien sekä ei-fyysiset komponentit voidaan lisätä malliin. Näitä ovat muun muassa pumppujen tuotokäyrät, putkien halkaisijat ja materiaalit sekä verkostoon tulevat jätevedet ja vuotovedet. Jos sateiden tarkka vaikutus halutaan huomioida mallissa, voidaan malliin lisätä vielä valuma-alueet ja sademäärät. Usein hulevesimallinnus tehdään kuitenkin erikseen, ja viemäriverkostomalliin tuodaan vain tyypillisesti vuotavuudet vakiovirtauksina. Alueella, jossa on paljon sekaviemäreitä, mallit rakennetaan usein erikseen hulevesimallinnukseen erikoistuneilla ohjelmilla.

Ajasta riippuvassa mallinnuksessa myös simulointiin ja raportointiin liittyvät ajanjaksot täytyy määrittää. Lisäksi numeerisessa laskennassa käytettävät laskentamenetelmät,



alkuarvot, toleranssit ja laskennan erityisasetukset tulee määrittää ennen simulointien aloittamista. Numeerisesta laskennasta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2.2. Tavallisen käyttäjän ei kuitenkaan yleensä tarvitse ymmärtää syvällisesti kaikkia numeerisen laskennan parametreja, sillä niiden oletusarvot sopivat tyypillisimpiin mallinnustilanteisiin. Asetukset voivat kuitenkin olla hyvin mallinnuskohtaisia. Esimerkiksi todella tarkassa laskennassa käytettävän aika-askelen tulee olla hyvin pieni, jotta nopeatkin muutokset on mahdollista nähdä tuloksissa. Tämä kuitenkin hidastaa laskentaa huomattavasti, eikä pitkissä simuloinneissa tästä syystä ole kannattavaa käyttää kovin lyhyttä aika-askelta, sillä nopeat muutokset eivät vaikuta mallinnuksen lopputulokseen pitkässä tarkastelussa.

### **Viemäriverkostomallin tärkeimmät komponentit**

Tässä ja seuraavassa luvussa esitetään lyhyesti EPA SWMM -mallin peruskomponentit ja toiminta ohjelman teoriaoppaan pohjalta. Yksityiskohtaisempi kuvaus löytyy itse teoriaoppaasta (EPA 2017). SWMM-pohjaisissa simulaattoreissa on neljä eri solmutyyppiä (nodes): tarkastuskaivot, säiliöt, purkupisteet ja virtauksenjakajat. Usein solmuilla viitataan juuri tarkastuskaivoihin, koska ne ovat tyypillisin solmutyyppi. Verkostoon tuleva jätevesi mallinnetaan solmun parametrina. Virtaus voi vaihdella tunti-, viikonpäivä- ja kuukausikertoimen tai aikasarjan perusteella. Tulevan jäteveden määrä arvioidaan usein kunkin käyttäjän talousveden vuosikulutuksen perusteella, josta keskimääräinen päivittäinen jäteveden tuotanto on mahdollista arvioida. Muita kaivon parametreja ovat pohjan korkeusasema ja kaivon syvyys. Lisäksi voidaan tarvittaessa antaa kaivon poikkileikkauksen pinta-ala sekä kaivon paineenkesto, mikäli kaivo on osa paineviemäriä. Tällöin vesi ei ala tulvia kaivosta vedenpinnan saavuttaessa kaivon yläreunan, vaan paine voi nousta annettuun rajaan asti. Mikäli kaivolla ei ole pinta-alaa, ei sillä ole tilavuutta, joka vaikuttaisi tuloksiin.

Säiliöt ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia kaivojen kanssa. Olennaisin ero on se, että säiliöillä on aina tilavuus. Säiliön tärkeimpiä parametreja ovat pohjan korkeusasema, säiliön maksimisyvyys ja säiliön poikkileikkauksen pinta-ala suhteessa syvyyteen. Säiliön avulla mallinnetaan esimerkiksi pumppaamoiden imusäiliöt sekä erilaisia ylivuotokaivorakenteita.

Purkupisteet ovat solmuja, joista virtaus purkautuu ulos verkostosta ja ne toimivat laskennan reunaehtona ja päätepisteenä. Reunaehdot perustuvat purkupisteen korkeusasemaan tai sitä edeltävän linkin virtauksen syvyyteen, joka lasketaan Manningin yhtälöstä (2.4). Korkeusaseman voidaan määritellä myös muuttuvaksi tuntikertoimen tai

aikasarjan avulla. Purkupisteet vastaavat todellisuudessa jätevedenpuhdistamoita ja verkoston ylivuotopisteitä.

Linkit muodostavat toisen komponenttien pääluokan. Linkit yhdistävät aina kaksi solmua toisiinsa. Linkkejä ovat virtauskanavat, pumpput ja virtauksen säätämiseen tarkoitettut komponentit. Yleisin linkkityyppi on virtauskanava, joka kuvaa jätevesiverkoston putkia sekä muita virtauskanavia. Tärkeimpiä parametreja ovat alku- ja loppusolmu, korkeusasema, pituus, kanavan geometria ja Manningin karheuskerroin. Päätepisteiden korkeusasemien ja kanavan pituuden perusteella lasketaan kaltevuus, jota käytetään Manningin yhtälössä virtauksen ja virtaussyvyuden laskentaan.

Pumppuja käytetään veden nostamiseksi alkusolmusta päätössolmuun. Niiden parametreja ovat alku- ja päätössolmun lisäksi tuottokäyrät sekä pumpun käynnistys- ja pysäytyspinnankorkeudet. Tuottokäyrät ovat pumppumallikohtaisia ja ne saadaan pumppuvalmistajalta. Pumpun käynnistyy ja sammuu imusolmun pinnankorkeuden perusteella. Kun veden pinta nousee käynnistysrajalle, pumppu käynnistyy ja imusolmu alkaa tyhjentyä, kunnes pinta laskee annetulle pysäytysrajalle, jolloin pumppu sammuu.

Lisäksi viemäriverkostomallissa tarvitaan erilaisia tilavuus- ja tuottokäyriä, aikasarjoja sekä tuntikerroinkäyriä. Esimerkiksi pumppujen tuottokäyrillä määritellään pumpun nostokorkeus virtauksen funktiona. Aikasarjojen avulla on mahdollista käyttää esimerkiksi todellista mitattua dataa mallin syötteenä ja tutkia verkoston käyttäytymistä sen pohjalta. Aikasarjoja voidaan käyttää esimerkiksi tulovirtauksissa, sateiden mallintamisessa sekä purkupisteiden pinnankorkeuden asetusarvona. Tuntikertoimien avulla voidaan mallintaa esimerkiksi tulevan jäteveden vuorokausivaihtelu. Vuorokausivaihtelu voidaan arvioida talousveden käytön perusteella, sillä lähes koko käytetty talousvesi päättyy lopulta viemäriin.

### **Hule- ja jätevesien laskentamalli SWMM**

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto (United States Environmental Protection Agency, EPA) on kehittänyt avoimen lähdekoodin hule- ja jätevesien laskentamallin Storm Water Management Model, (SWMM), jota käytetään maailmanlaajuisesti työkaluna alan suunnittelussa ja analyyseissä. Fluidit Sewerin hydraulinen laskenta pohjautuu SWMM:n pohjalta kehitettyyn omaan simulaattoriin. Tässä luvussa keskitytään tutkimuksen kannalta olennaisimpiin SWMM:n ominaisuuksiin, koska SWMM on kokonaisuudessaan hyvin laaja ja sisältää paljon ominaisuuksia, joita ei käytetä tässä työssä.

Putkivirtauksen mallintamisen perustana on transientti jatkuvuusyhtälö ja liikemäärän säilymysyhtälö. Mikäli osittaisdifferentiaali yhtälöt ratkaistaan täysin, puhutaan

mallinnuksesta Dynamic Wave -analyysinä. Yhtälöt tunnetaan nimellä Saint-Venantin yhtälöt, ja ne voidaan yhdistää yksittäiseksi osittaisdifferentiaaliyhtälöksi seuraavasti:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y_h}{\partial x} - gAS_f, \quad (3.1)$$

jossa  $A$ ,  $Q$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $y_h$ ,  $g$ ,  $S_f$  ovat virtauskanavan poikkileikkauksen pinta-ala, tilavuusvirta, etäisyys virtaussuunnassa, aika, virtauksen painekorkeus, putoamiskiintyvyyys sekä kitkallisesta virtauksesta aiheutuva painehäviö esitettynä putken kaltevuutena. Yhtälö olettaa virtauksen olevan yksiulotteinen, paineen johtuvan vain hydrostaattisesta paineesta, pituuskaltevuuden olevan pieni ja että kitkallinen virtaus voidaan esittää Manningin yhtälöllä (2.4). Dynamic Wave-laskenta mahdollistaa silmukoituneen verkoston laskennan, joka voi sisältää myös paineellisia osuuksia ja takaisinvirtauksia. Täydelle putkivirtaukselle painehäviö voidaan laskea myös Darcy-Weisbachin tai Hazen-Williams yhtälön avulla.

Virtauksen painekorkeuden laskemiseen tarvitaan erillinen differentiaaliyhtälö, joka huomioi verkostossa olevat solmut. Solmut voivat toimia varastotilavuutena, mutta niiden tilavuus voi olla myös nolla. SWMM laskee virtauksen painekorkeuden yhdistämällä solmun ja siihen liittyvät putken niin, että putket jaetaan pituussuunnassa puoliksi alku- ja päätysolmun kesken. Yhtä tällaista solmun ja puolikkaiden putkien kokonaisuutta tarkastellaan yksikkönä, jossa sisään- ja ulosvirtaukset sekä yksikön pinta-ala määräävät painekorkeuden yksikössä. Kyseistä korrelaatiota kuvaa seuraava differentiaaliyhtälö:

$$\frac{\partial y_h}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{SN} + \sum A_{SL}}, \quad (3.2)$$

jossa  $Q$ ,  $A_{SN}$  ja  $A_{SL}$  ovat systeemiin tuleva nettovirtaus, solmun (kaivon) poikkileikkauksen pinta-ala sekä puolittaisten virtauskanavien ilma-vesi-rajapinnan pinta-ala. Systeemiin tuleva nettovirtaus  $Q$  sisältää myös systeemiin tulevan ulkoisen virtauksen kuten viemärimallissa jäteveden.

Differentiaaliyhtälöt (3.1) ja (3.2) ratkaistaan numeerisesti, sillä yhtälöille ei ole olemassa analyttisiä ratkaisuja. Yhtälöt ratkaistaan diskretoimalla eli esittämällä ne äärellisenä joukkona, jossa aika-askel on hyvin lyhyt. Diskretoinnin yhteydessä yhtälöiden parametrejä joudutaan aika-keskiarvottamaan. Kun yhtälöt on diskretoitu ratkaistaan ne impliittisellä Eulerin menetelmällä, joka on numeerisesti stabiilimpi eksplisiittiseen Eulerin menetelmään verrattuna. Laskenta alkaa termien  $Q_{alku}$  ja  $y_{h,alku}$  aluarvojen määrittämisellä, jonka jälkeen yhtälön (3.1) diskretoidusta muodosta saadaan laskettua virtaukselle uusi arvo  $Q_{uusi}$ . Laskennassa käytetään alirelaksointikertoimena arvoa 0,5. Uusi virtaus sijoitetaan yhtälön (3.2) diskretoituun muotoon, josta saadaan ratkaistua uusi

painekorkeus  $y_{h,uusi}$  samaan tapaan aikaisemman yhtälön kanssa. Tämän jälkeen uutta painekorkeutta ja virtausta verrataan edellisen laskentakierroksen arvoihin. Mikäli muutosta ei enää tapahdu merkittävästi, voidaan iterointi lopettaa. Muussa tapauksessa iterointia jatketaan, kunnes määritetty toleranssi uusien ja vanhojen arvojen välillä on saavutettu. Edellä esitetty ratkaisutapa virtaukselle ja painekorkeudelle tehdään jokaiselle virtauskanavalle ja solmu-putki-yhdistelmälle. Näin koko verkostomallin virtaukset ja painekorkeudet voidaan laskea numeerisesti.

Frouden lukua (2.3) käytetään differentiaaliyhtälöiden diskretoinnin yhteydessä hydraulisen säteen ja vesi-ilma-rajapinnan pinta-alan laskentaan. Mikäli virtaus on alikriittinen, alajuoksun tila vaikuttaa myös tarkasteltavaan linkkiin. Mikäli taas virtaus on ylikriittinen, virtaus riippuu yläjuoksun tilasta. Näin huomioidaan mahdollinen takaisinvirtaus virtauskanavassa, mikä tarkentaa laskentaa huomattavasti. EPASWMM:n dokumentaatio kuvaa tarkemmin diskretoinnissa käsitellyt erikoistapaukset, kuten pumppausten yhteydessä tapahtuvan painekorkeuden ja virtauksen laskennan.

### **Jätevesiverkostojen mallinnusohjelmat**

Fluidit Sewer on Fluidit Oy:n kehittämä yksiuotteiseen jätevesimallinnukseen kehitetty tietokoneohjelma, jonka virtauslaskenta perustuu Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston kehittämän laskentamallin (Storm Water Management Model, SWMM) pohjalta kehitettyyn simulaattoriin. Pääosa markkinoilla olevista viemäriverkostomallinnusohjelmista, kuten Bentley'n SewerGems, DHI:n Mike Urban ja Innovyzen InfoSWMM, käyttävät SWMM:iä omien simulaattoreidensa pohjana (CH2M HILL 2014). Vaikka mallinnusohjelmien virtauslaskenta perustuu pääosin samaan laskentamalliin ovat ohjelmat käyttöliittymiltään ja ominaisuuksiltaan erilaisia. Koska laskentamallin avoimesta rajapinnasta voidaan kutsua laskennassa käytettäviä tuloksia ja parametreja, ovat ohjelmistoyritykset pystyneet kehittämään omia kehittyneempiä versioitaan alkuperäisestä Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluviraston laskentamallista. Fluidit Sewer mahdollistaa muun muassa jätevesiverkoston kapasiteettianalyysit, sekaviemäri mallinnukset, pumppaamojen mitoituksen, energiataseanalyysin ja monia muita toiminnallisuuksia. Perustana on kuitenkin suunnittelutyökalu, jonka avulla voidaan suunnitella turvallinen ja tehokas jäteveden siirtäminen jäteveden tuottajilta jätevedenpuhdistamolle.

Jätevesiverkostojen mallintamisen yhteydessä virtauksen lämpötilamallinnukset eivät ole olleet kovin yleisiä, sillä suunnittelijoita ovat kiinnostaneet lähinnä verkoston virtausmekaninen toiminta. SWMM:ssä termodynaamista mallinnusta ei ole, joten siihen perustuvissa ohjelmissa jäteveden lämpötilaa ei voida suoraan mallintaa. Lämpötilan mallintaminen on lisääntynyt viimeisen 10 vuoden aikana, koska kiinnostus jäteveden lämmön

talteenottoa kohtaan on kasvanut. Termodynaamisia jätevesiverkoston mallinnuksia on tehty esimerkiksi Sveitsissä kehitetyllä TEMPEST-ohjelmalla, jolla voi mallintaa yksittäisiä putkilinjoja (Dürrenmatt, Wanner 2014). Eawag:n (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology) kehittämää TEMPEST-ohjelmaa on käytetty useissa jätevesien termodynaamisissa mallinnuksissa, vaikka sillä ei ole mahdollista mallintaa verkostoja. TEMPEST-ohjelma mahdollistaa yksittäisen putkilinjan todella yksityiskohtaisen mallintamisen, mutta se vaatii toimiakseen vaikeasti mitattavia parametreja, kuten putken seinämään kerääntyvän biofilmin lämpövastuksen (Dürrenmatt, Wanner 2014). Koska vaikeasti mitattavia parametreja on useita, joudutaan mallia kalibroimaan eri kerroksilla, jolloin yksittäisen parametrin vaikutusta kokonaisuuden kannalta on vaikea arvioida.

Jan Hofman et al. (2014) mallinsi noin 10 km pituisen jätevesiverkoston Danswijkissä Alankomaissa, käyttäen apuna SIMDEUM- ja SOBEK-ohjelmistoja. SIMDEUM-ohjelmalla työryhmä mallinsi ensimmäiseksi rakennusten jäteveden tuotannon perustuen stokastisiin malleihin. Näillä malleilla verkostoon tulevan veden lämpötila ja virtaus voitiin selvittää. Varsinainen virtauslaskenta suoritettiin SOBEK-ohjelmalla, jolla ratkaistiin verkoston lämpötilavaihtelut lämmönvaihtimien yhteydessä. SOBEK ei itsessään sisällä termodynaamista laskentaa, joten työryhmä lisäsi sen ohjelmaan erikseen. Työryhmä karsi lämmönsiirtoon liittyviä yhtälöitä huomattavasti verrattuna TEMPEST-ohjelmaan, jossa lämmönsiirtoon liittyviä yhtälöitä on yhteensä 12. Hofman et al. (2014) käyttivät vain yhtälöitä, jotka liittyivät lämmönsiirtymiseen jätevedestä maaperään. Ilmiöitä olivat konvektiivinen lämmönsiirto virtauksesta putken sisäpintaan, lämmönjohtuminen putkesta maaperään ja johtuminen maaperässä. Työryhmän herkkyyksianalyysin mukaan pienissä putkissa ilman vaikutuksen lämmönsiirtoon voisi jättää huomioimatta kokonaan, mutta suurissa putkissa sen merkitys voisi olla merkittävä. (Elías-Maxil et al. 2017)

Suurin kirjallisuuskatsauksessa löydetty jätevesiverkoston termodynaaminen mallinnus on tehty Vancouverissa vuonna 2014. Työssä Kerr Wood Leidal -insinööritoimisto mallinsi kaikkiaan 530 km pituisen jätevesiverkoston. Verkosto oli huomattavasti laajempi verrattuna muihin vastaaviin tutkimuksiin. Mallinnettu verkosto oli hieman tässä diplomityössä tarkasteltua Turun verkostoa pienempi. Mallinnuksen hydrauliseen laskentaan käytettiin erillistä mallinnusohjelmaa ja sen rinnalle rakennettiin erillinen termodynaaminen laskenta jäteveden lämpötilan ratkaisemiseksi. Mallin tulokset vastasivat jätevedenpuhdistamolle asennettuja lämpötila- ja virtausmittauksia 7 %:n tarkkuudella. Virtauslaskenta oli ajasta riippumattoman laskenta, jossa huomioitavat virtaukset olivat kotitalouksissa ja teollisuudessa syntyvät jätevedet, vuotovedet ja sadevedet. (Kerr Wood Leidal 2014) Laskennan tarkemmista yksityiskohdista ei ole kerrottu julkisesti.

Ensimmäinen SWMM-pohjainen jätevesiverkoston termodynaamiseen laskentaan kehitetty on ohjelma Figueroa et al. (2021) kehittämä SWMM-HEAT. Tutkimus julkaistiin 9.9.2021, ja samalla julkaistiin termodynaamiseen simulaattorin lähdekoodi. Tässä tutkimuksessa kehitetty simulaattori oli silloin jo valmis, eikä sen toteutukseen ollut tarpeen tehdä mitään muutoksia kyseisen tutkimuksen perusteella. SWMM-HEAT vastaa kuitenkin toteutukseltaan huomattavasti tässä diplomityössä kehitettyä simulaattoria, jossa SWMM:n rinnalle lisättiin erillinen termodynaaminen simulaattori.

Handenguen et al. (2021) tekivät ensimmäisen verkostomallinnuksen SWMM-HEAT:lla. Figueroa et al. (2021) mukaan verkossa virtaavan ilman ja veden latenttilämpö olisi merkittävä ilmiö jäteveden lämpötilan kannalta. SWMM-HEAT ei kuitenkaan huomionnut suhteellisen ilmankosteuden muutosta verkossa, vaan piti ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vakiona. (Figueroa et al. 2021) Mikäli edelliset parametrit pysyvät laskennassa vakiona ja latenttilämpö huomioidaan ilmiönä, voidaan ilmaan siirtää energiaa latenttilämpönä laskennallisesti loputtomasti.

Jätevesiverkoston termodynaamisen mallinnuksen haasteita ovat kaupallisten ohjelmistojen puute. Valmista kaupallista tietokoneohjelmaa jätevesiverkoston termodynaamiseen mallinnukseen ei ole ollut olemassa, joten tutkimuslaitokset ovat kehittäneet omia ohjelmia mallinnukseen. Nämä ohjelmat on usein räätälöity tiettyihin tutkimustilanteisiin, eivätkä siten sovellu yleisesti käytettäväksi. Nämä ohjelmat eivät myöskään ole yleisesti saatavilla. Ylipäätään suuria, yli 100 km pituisten verkoston, mallinnusprojekteja on toteutettu maailmassa vain muutamia.

Toisena haasteena jätevesiverkoston termodynaamisessa mallinnuksessa muodostuu ilmiöiden laajuus ja kompleksisuus. Koska mallinnuksessa on otettava huomioon sekä hydromekaaniset että termodynaamiset ilmiöt, nousee ratkaistavien ilmiöiden lukumäärä todella suureksi. Yhtälöt ovat usein osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joille ei ole olemassa analyttisiä ratkaisuja, jolloin numeerinen ratkaisu ainoa tapa. Ilman tietokonetta yhtälöiden ratkaisu tuhansille verkoston komponenteille on käytännössä mahdotonta.

Kolmantena haasteena mallinnuksessa on lähtötietojen ja mittausten saaminen. Vaikka mallinnuksessa käytettävien yhtälöiden määrää karsittaisiinkin huomattavasti, jäljelle jäi edelleen suuri määrä parametreja, joita mallinnuksessa tarvitaan välttämättä. Oikeiden arvojen löytäminen kaikille parametreille vaatii kalibrointia, joka voidaan toteuttaa vain verkossa tehtyjen mittausten pohjalta. Mittausten ongelmana on se, että niitä voi olla mahdotonta toteuttaa tai toteuttaminen on liian kallista. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää maaperän lämpötilan mittaamista yli 1,5 m syvyydellä; tällaisia mittauksia löytyy todella vähän.

### 3.3 Jäteveden numeerinen virtauslaskenta

Numeerisella virtauslaskennalla (Computational Fluid Dynamics) voidaan ratkaista monimutkaisia hydromekaanisia ongelmia, joita ei pystytä mittaamaan tai ratkaisemaan analyttisillä menetelmillä. Numeerinen laskenta ei koskaan anna täydellisiä matemaattisia ratkaisuja, mutta huolellisesti mallinnetut ilmiöt vastaavat usein todellisuutta riittävän tarkasti. Kokonaista jätevesiverkostoa ei voida mallintaa numeerisesti, koska yksittäisten laskutoimitusten määrä kasvaa liian suureksi jopa tehokkaimmille tietokoneille. Tästä syystä numeerisella virtauslaskennalla tutkitaan lähinnä pienempiä kokonaisuuksia, joiden tuloksia voidaan käyttää hyväksi suuremmissa mittakaavassa. Numeerinen virtauslaskenta soveltuu erityisesti kaksifaasivirtauksien tutkimiseen, jossa kahden fluidin rajapinnassa tapahtuvat ilmiöt on vaikea määrittää analyttisellä laskennalla tarkasti. (Versteeg & Malalasekera 2007)

Numeerinen virtauslaskenta perustuu äärelliseen tilavuusmenetelmään (Finite Volume Method), jossa tarkastettava kohde jaetaan pieniin kontrollitilavuuksiin, joita kutsutaan laskentakopeiksi. Tarkastettava kohteen jakoa laskentakopeihin kutsutaan verkotukseksi, ja se onkin yksi tärkeimmistä asioista numeerisessa virtauslaskennassa. Laskentakopeihin jako mahdollistaa virtauslaskentaan liittyvien differentiaaliyhtälöiden ratkaisemisen numeerisesti. Matemaattisesti laskentakopin tilavuus tulisi olla äärettömän pieni, jolloin yhtälö olisi ratkaistava analyttisesti. Kaikille yhtälöille ole kuitenkin mahdollista laskea analyttisiä ratkaisuja. Erityisesti monien osittaisdifferentiaaliyhtälöiden tapauksessa analyttisen ratkaisun muodostaminen muodostuu niin monimutkaiseksi, että numeerinen laskenta on lopulta ainoa tapa ratkaista differentiaaliyhtälöt. Numeerinen virtauslaskenta on mahdollista tehdä ajasta riippuvaisena eli transienttina tai ajasta riippumattomana eli stationäärisenä. Transientti laskenta vaatii huomattavasti enemmän laskentakapasiteettia, sillä tulokset on laskettava erikseen jokaiselle ajanhetkelle. Tästä syystä stationääristä laskentaa suositaan aina, kun tarkoituksena ei ole tutkia ajasta riippuvia ilmiöitä. Tilannetta, jossa laskennan tulokset eivät enää muutu iterointien välissä kutsutaan konvergoitumiseksi. (Eaton et al. 1999)

Ajasta riippuvien ilmiöiden kuvaaminen ajasta riippumattomina tarvitsee aina laskentamallin. Hyvä esimerkki tällaisesta ilmiöstä on turbulenssi, jota pyritään yksinkertaistamaan ajasta riippumattomaksi. Turbulenttisuuden mallintaminen on tieteenalana todella monimutkainen, eikä sen laskentaan ole vakiintunut yhtä oikeaa tapaa. Erityisesti monifaasivirtauksissa turbulenttisuuden mallintaminen on erityisen vaikeaa. Turbulenttisuutta ilmenee virtauksessa silloin kuin viskositeettiset voimat ovat pienemmät kuin advektiosta aiheutuvat voimat. Advektiovoimilla tarkoitetaan virtausnopeudesta aiheutuvia voimia. Tällöin virtaus alkaa pyörteillä ja se muuttuu kaoottiseksi. Isommat pyörteet synnyttävät

pienempiä pyörteitä niin kauan, kunnes lopulta viskoosit voimat ovat yhtä suuria advek-tiosta aiheutuvien voimien kanssa. Tällöin pyörteen energia muuttuu täysin lämpöener-giaksi ja pyörre katoaa. Turbulenttisuutta kuvataan Reynoldsin luvulla yhtälöllä (2.28) (Eaton et al. 1999)

Turbulentiisuutta voidaan kuvata erilaisten mallien avulla. Yleinen tapa on Navier-Sto-kesin yhtälöiden aikakeskiarvottaminen. Heilahtelevaa virtausnopeutta voidaan kuvata aikariippuvalla heilahdustermillä sekä aikakeskiarvotetulla termillä. Kun nämä termit si-joitetaan aikaisemmin esitettyihin osittaisdifferentiaali yhtälöihin, saadaan aikakeskiar-vottamisen jälkeen yhtälöihin uusi termi, jota kutsutaan Reynoldsin jännitykseksi. Tätä termiä voidaan kuvata fluidin viskositeetillä ja paikasta riippuvalla turbulenttisella visko-siteetilla, joita kutsutaan yhdessä efektiiviseksi viskositeetiksi. Paikasta riippuvaa visko-siteettiä voidaan mallintaa  $k$ - $\omega$  SST-mallin avulla, mikä ei ole fluidin aineominais-suus. Erityisesti silloin kun tutkittava virtausilmiö on lähellä seinämää, sopii  $k$ - $\omega$  SST-malli tarkoitukseen parhaiten. (Eaton et al. 1999, Versteeg & Malalasekera 2007)

### **Diskretointi ja verkotus**

Osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaiseminen numeerisesti vaatii yhtälöiden diskretoi-mista, jossa on kyse jatkuvan funktion esittämistä äärellisenä joukkona. Äärellisen tila-vuusmenetelmän ratkaisu perustuu siihen, että yksittäisen laskentakopin sisällä lukuarvo pysyy vakiona. Laskenta alkaa reunaehdoista, jolloin tietyt kopit saavat arvonsa heti las-kennan alussa. Kopit ovat vuorovaikutuksessa keskenään niin, että tarkasteltava koppi saa informaation viereisiltä laskentakopeilta, joiden perusteella koppi laskee omat tulok-sensa ja siirtää informaation seuraavalle kopille. Jokainen yhtälö ratkaistaan erikseen jokaiselle laskentakopille, joten yksittäisten laskutoimitusten määrä iteratiivisessa ratkai-sussa nousee todella suureksi. Tästä syystä laskentakoppien määrä pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä, mutta kuitenkin riittävänä vaadittuun tarkkuuteen nähden. (Versteeg & Malalasekera 2007)

Verkotuksen lähtökohtana voidaan pitää mallinnettavien ilmiöiden koon suhdetta lasken-takoppien kokoon. Jos tarkasteltava ilmiö on pieni, on verkotuksen oltava tällä alueella tiheä. Verkotuksen tihennykseen on kiinnitettävä huomiota erityisesti niiden rajapintojen läheisyydessä, joissa virtauksen nopeusprofiili muuttuu voimakkaasti. Nopeusprofiililla on merkittävä vaikutus muun muassa konvektiiviseen lämmönsiirtoon ja virtausvastuk-seen. Huolellisesti tehdyssä mallinnuksessa samasta geometriasta tehdään useita ver-kotuksia ja laskentatuloksia vertaillaan keskenään. Kun tulokset eivät enää muutu verk-koa tihennettäessä, voidaan verkotuksen tuloksia pitää luotettavina.



Dimensiottomalla Y-plus-arvolla voidaan arvioida erityisesti verkotuksen laatua. Virtausnopeuden laskeminen seinämän läheisyydessä on haastavaa, sillä virtauksen nopeus kasvaa voimakkaasti siirryttäessä seinämästä ulospäin. Ansys Fluent määrittelee Y-plus-arvon seuraavasti:

$$y^+ = \frac{yU}{\nu}, \quad (3.3)$$

jossa  $y$ ,  $U$  ja  $\nu$  ovat etäisyys seinästä, kitkallinen virtausnopeus ja kinemaattinen viskositeetti. Rajakerroksessa virtausnopeutta mallintavia funktioita kutsutaan yleisesti seinäfunktioksi (Wall Functions), koska niillä lasketaan virtauksen nopeutta juuri seinämän välittömässä läheisyydessä. Yksityiskohtaisessa mallinnuksessa hyvänä Y-plus-arvona voidaan pitää noin arvoa yksi, mutta alle viiden arvoja pidetään vielä suhteellisen tarkoina. Kun Y-plus-arvo on pienempi kuin viisi, voidaan virtausnopeutta mallintaa lineaarisesti Y-plus-arvon funktiona. Seinäfunktiot mallintavat tarkasti virtausnopeuden myös yli 30 Y-plus-arvoilla, jolloin nopeuden funktio on logaritminen. Y-plus arvoilla 8–30 nopeuden mallintaminen on epätarkkaa. Tästä syystä Y-plus arvoja tulisi välttää edellä mainitulla alueella, mikäli se on mahdollista tihentämällä tai harventamalla verkotusta. (Ansys 2009)

### **Kaksifaasivirtauksen hallitsevat yhtälöt ja menetelmät**

Tässä luvussa esitetyt menetelmät perustuvat Ansys Fluentin teoriaoppaaseen (Ansys 2009). Ansyksen Fluent ohjelma suosittelee käyttämään kaksifaasivirtauksen mallinnuksessa Volume of Fluid (VOF)-mallia, silloin kun kaksifaasivirtauksilla on selkeä rajapinta, eivätkä faasit sekoitu keskenään. VOF-malli perustuu Eulerialaiseen mallinnukseen, jossa tarkasteltava koordinaatisto pysyy paikallaan samalla tavalla kuin yksifaasimallinnuksissa. Laskennassa seurataan fluidien pitoisuusosuuksia laskentakoppien välillä virtauskanavassa, mutta yksittäisen partikkelin liikerataa laskennassa ei seurata lagrange-laisen mallinnuksen tapaan. Lagrangelaisessa mallinnuksessa yksittäisen partikkelin liikeradat mallinnetaan jatkuvan faasin virtauskentässä. Malli on turhan yksityiskohtainen viemärimallinnukseen, eikä tuo lisäarvoa tilanteessa, jossa faasit eivät sekoitu keskenään.

Reunaehtoina VOF -mallinnuksessa käytetään yleensä putkien tulo- ja lähtöpaineen kytkentää. Laskennalle ilmoitetaan haluttu vesisyvyys putkessa sekä virtauksen nopeus putken alkupäässä, joiden avulla malli laskee virtauksen hydraulisen paineen. Putken loppupäässä virtauksen paine voidaan jättää vapaaksi muuttujaksi. Tulopäässä virtaukselle annetaan reunaehdoiksi myös virtauksen lämpötila, referenssipaine ja turbulentsuuden intensiteetti sekä viskositeettikerroin. Loppupäässä takaisin virtaukselle

annetaan vastaavat arvot. Viemärimallinnuksen tapauksessa takaisin virtausta putkeen ei kuitenkaan pitäisi tapahtua.

Tärkeimmät osittaisdifferentiaaliyhtälöt kaksifaasivirtauksen laskennassa ovat jatkuvuusyhtälö, liikemäärän säilymisyhtälö ja energian säilymisyhtälö. Jatkuvuusyhtälöllä kuvataan massan häviämättömyyttä ja sen yleinen muoto kaksifaasivirtauksessa yhdelle faasille on:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (3.4)$$

jossa  $\rho_q$  on fluidin tiheys,  $\mathbf{u}_q$  on nopeusvektori,  $t$  on aika,  $S_{\alpha_q}$  on lähde-termi,  $\alpha_q$  on faasin  $q$  tilavuusosuus,  $\dot{m}_{pq}$  on massavirta faasista  $p$  faasiin  $q$ ,  $\dot{m}_{qp}$  on massavirta faasista  $q$  faasiin  $p$  ja  $\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q)$  on divergenssi. Divergenssillä kuvataan äärelliseen kontrollitilavuuteen tulevien virtausten summan muutosta. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi kaksiuolotteisessa tapauksessa massaa voi siirtyä kontrollitilavuuteen kahdesta suunnasta ja poistua kahdesta suunnasta. Mikäli sisään- ja ulosvirtaukset eivät ole yhtä suuret vähenee tai lisääntyy kontrollitilavuuden massa ajan kuluessa. Tiheyden ollessa vakio se voidaan siirtää yhtälössä (3.4) divergenssin ulkopuolelle, jolloin laskenta nopeutuu huomattavasti. Yhtälössä alaindekseillä  $p$  ja  $q$  kuvataan eri faaseja, joita jäteveden mallinnuksessa on kaksi: vesi ja ilma. Perinteiseen jatkuvuusyhtälöön verrattuna kaksifaasivirtauksessa on lisätty tilavuusosuudet, jotka lasketaan jatkuvuusyhtälön yhteydessä. Jatkuvuusyhtälöt ratkaistaan erikseen kummallekin faasille.

Liikemäärän säilymisyhtälö tunnetaan myös Newtonin toisena lakina. Kun yhtälö ilmoitetaan tilavuuden funktiona, tunnetaan se virtauslaskennassa Navier-Stokesin yhtälönä. Samoin kuin jatkuvuusyhtälössä myös liikemäärän on säilyttävä virtauksessa. Virtauslaskennassa sen yleinen muoto on:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) - \nabla p + f_b, \quad (3.5)$$

jossa  $p$ ,  $f_b$ ,  $\mu$  ovat paine, muut vaikuttavat voimat ja fluidin dynaaminen viskositeetti. Yhtälön vasen puoli kuvastaa massan ja kiihtyvyyden tuloa ja oikeapuoli systeemiin vaikuttavien voimien summaa. Termi  $\nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T))$  kuvastaa kitkallisen virtauksen aiheuttamia voimia ja  $\nabla p$  paineen aiheuttamia voimia. Kaksifaasivirtauksessa Navier-Stokesin yhtälöitä ratkaistaan yhteensä vain yksi. Tästä syystä virtausnopeuksien tulisi olla rajakerroksessa mahdollisimman lähellä toisiaan. Jäteveden mallinnukseen

menetelmä sopii hyvin, sillä veden ja ilman nopeusero rajapinnassa on suhteellisen pieni (Abdel-aal et al. 2018, Edwini-Bonsu & Steffler 2006).

Edellisten yhtälöiden tapaan myös energian on säilyttävä kontrollitilavuudessa ja sitä kuvaava yhtälö:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) + e_{gen}, \quad (3.6)$$

jossa  $E$ ,  $p$ ,  $k$  ja  $S_h$  ovat energia, paine, lämmönjohtavuus ja lämmön lähde-termi. Kaksi-faasimallin ratkaisussa ratkaistaan vain yksi energiayhtälö, joten aineominaisuudet lasketaan näiden faasien yhdistelmänä. Energia ja lämpötila lasketaan painotettunakeskiarvona massan suhteen. Kuten liikemäärän säilymisyyhtälössä nopeuden, tulee energian säilymisyyhtälössä faasien lämpötilaeron olla rajakerroksessa mahdollisimman pieni.

Osittaisdifferentiaaliyhtälöt ratkaistaan luvussa 2.3.1 mukaisesti diskretoimalla. Diskretointimenetelmistä First-order Upwind on yksinkertaisimpia tapoja ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälöihin pohjautuvia ongelmia. Menetelmää käytetään erityisesti monimutkaisissa numeerisissa virtausmallinuksissa, joissa laskenta on yleisesti raskas ja yhtälöiden konvergoituminen haastavaa. Menetelmä perustuu siihen, että informaatio siirtyy aina virtaussuuntaan. Esimerkiksi vasemmalta oikealle kulkevan virtauksen tapauksessa tarkasteltavan laskentakopin oikean reunan lämpötila on aina sama kuin itse laskentakopin lämpötila ja vastaavasti vasemman reunan lämpötila on sama kuin tarkasteltavan laskentakopin vasemmanpuoleisen naapurikopin lämpötila. Kaikki kolme edellä mainittua osittaisdifferentiaaliyhtälöä ratkaistaan jokaiselle laskentakopille ja laskentaa jatketaan niin kauan, kunnes yhtälöiden tulokset täsmäävät keskenään. (Versteeg & Malalasekera 2007)

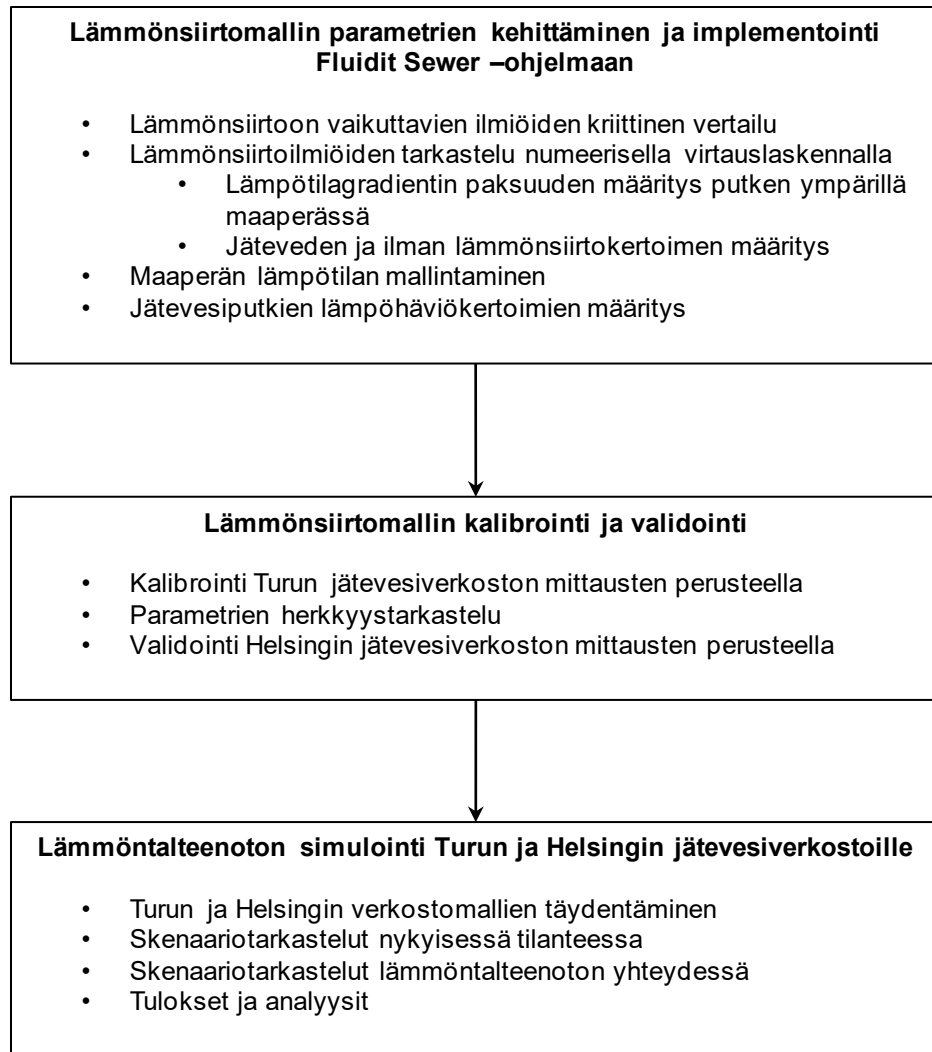
## 4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTOT

Tutkimus on osa Ympäristöministeriön rahoittamaa hanketta, jossa tutkitaan Suomessa laajamittaista hukkalämmön talteenottoa jätevedestä ennen jätevedenpuhdistamo ensimmäistä kertaa. Hanke koostuu useasta työpaketista. Tämä diplomityö tehdään osana työpakettia 2. Työpaketissa 2 tutkitaan jäteveden lämmön talteenottoa rakennuksilla ja sen vaikutuksia jätevesiverkostoon. Työpaketissa VTT Oy suorittaa tutkimuksen rakennusten energiataseista sekä tuottaa lämpötilaan ja virtauksiin liittyvät parametrit, joita verkostomallinnukseen tarvitaan. Diplomityö tehdään Fluidit Oy:lle, joka vastaa uuden simulaattorin kehityksestä ja termodynaamisesta verkostomallinnuksesta. Työssä tehty jätevesiverkostojen termodynaaminen mallinnus on yksi laajimmista tähän asti tehdystä mallinnoista, ja Fluidit Oy:n kehittämä simulaattori on yksi ensimmäisiä laajoihin jätevesiverkostojen termodynaamisiin mallinnoiksi kykenevistä simulaattoreista.

Tutkimuksen päätavoitteet määriteltiin pitkälti tutkimuksen alkuperäisen tilaajan Helsingin seudun ympäristöpalveluiden toimesta. Päätavoitteista muodostettiin tutkimuskysymykset, jotka on esitetty johdannossa. Tutkimuksen päätavoitteena oli mallintaa Turun ja Helsingin jätevesiverkostojen lämpötilat eri skenaarioissa, joissa tutkittiin lämmön talteenoton vaikutuksia verkostojen lämpötiloihin. Koska valmiita ohjelmistoja mallinnukseen ei ollut saatavilla, Fluidit Oy kehitti jätevesiverkostojen lämpötilamallinnukseen tarkoitetun simulaattorin. Ohjelman kalibroinnin ja validoinnin jälkeen tässä tutkimuksessa mallinnettiin ja tutkittiin Helsingin ja Turun jätevesiverkostojen termodynaaminen käyttäytyminen.

### 4.1 Tutkimuksen eteneminen

Tutkimus aloitettiin ongelman jäsentelyllä ja ongelmaan perehtymisellä. Vastaavista aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista pyrittiin hyötymään mahdollisimman paljon, jotta samat virheet voitiin välttää ja resurssit keskitettiin oleellisten asioiden tutkimiseen. Vastaavia tutkimuksia ei ollut tehty maailmalla monia, ja aihepiirin liittyvät tutkimukset viittasivat lähes poikkeuksetta Durrematin ja Wannerin (2014) tekemään tutkimukseen, jossa kaksikko kehitti TEMPEST-nimisen mallinnusohjelman. TEMPEST-ohjelma oli hyvä lähtökohta tutkimuksen aloittamiselle, sillä sen dokumentointi sisälsi monipuolisesti jätevesiputkessa tapahtuvat fysikaaliset ilmiöt. Näistä ilmiöistä valittiin tutkimuksen kannalta tärkeimmät, joilla oli merkittävä vaikutus jäteveden lämpötilaan. Samaan aikaan mittaus-ten suunnittelu aloitettiin, jotta lämpömittarit saataisiin asennettua verkostoihin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Tutkimuksen etenemistä kuvataan kuvassa 6.



**Kuva 6** Tutkimuksen eteneminen ja sen vaiheet.

Mallinnusmenetelmäksi valikoitui EPASWMM-laskentamalliin pohjautuva Fluidit Sewer, jonka yhteyteen kehitettiin termodynaaminen mallinnus. Fluidit Sewer valikoitui tutkimukseen luonnollisesti, sillä se sisälsi entuudestaan jäteveden hydraulisen laskennan ja se oli osa Fluidit Oy:n tuoteperhettä. Diplomityössä ei kirjoitettu varsinaista lähdekoodia, mutta lähdekoodin tarkistus, käytettävien algoritmien ja mallinnettävien ilmiöiden kriittinen vertailu sekä simulaattorin kalibrointi ja validointi olivat osa diplomityötä. Simulaattorin kehityksestä vastasi Fluidit Oy:n teknologiajohtaja Markus Sunela.

Kun kirjallisuustutkimuksen ja vertailevan laskennan perusteella oli varmistettu mallinnettävien ilmiöiden riittävydestä, siirryttiin tutkimuksessa tarvittavien parametrien laskentaan. Numeerisessa virtauslaskennassa tehtiin yksittäiselle jätevesiputkelle tarkka numeerinen mallinnus, jonka tuloksia käytettiin lämmönsiirtosimulaattorin parametrien määrittämisessä. Mallinnus antoi arvokasta tietoa jäteveden ja ilman välisestä lämmönsiirtokertoimesta sekä putken ympärillä olevasta lämpötilagradientista. Lämpötilagradienttia

hyödynnettiin putkimateriaalien lämmönsiirto-ominaisuuksien laskennassa. Jokaiselle virtauskanavatyypille ja -koolle määritettiin oma lämmönsiirtokerroin maaperään nähden. Tutkimuksessa ei tehty maaperän lämpötilamittauksia, joten lämpötilan arvioimiseen kehitettiin erillinen laskentatyökalu, joka kalibroitiin aiempien tutkimusten aineistoilla.

Ensimmäiset termodynaamiset laskentamallit rakennettiin olemassa olevien viemäriverkostomallien päälle. Turussa mittaukset saatiin toteutettua nopeammin kuin Helsingissä, joten Turun mallista erotettiin pieni kalibroitimalli, jolla simulaattorin toimintaa testattiin ja optioitiin sekä tehtiin parametrien herkkyytstarkastelu. Lopulta kalibroidut parametrit validoitiin Helsingin jätevesiverkostomallista erotetulla Jollaksen validointimallilla. Kun simulaattorin ja parametrien luotettavuus oli varmistettu, siirryttiin lopullisten mallien simulointiin.

Lopullisissa mallinnuksissa jäteveden lämpötilaa vertailtiin kummassakin kaupungissa eri skenaarioissa, joissa verkostoon tulevan jäteveden lämpötila vaihteli. Lämpötilaa alentamalla mallinnettiin kiinteistöille asennettavien lämpöpumppujen toiminta. Skenaarioiden tulokset kerättiin, analysoitiin ja esitettiin mahdollisimman informatiivisesti, minkä jälkeen tuloksista tehtiin johtopäätökset. Lämmön talteenoton vaikutuksia arvioitiin myös verkoston toiminnan ja jätevedenpuhdistamon toiminnan kannalta. Seuraavissa luvuissa perehdytään tarkemmin tämän työn osasuorituksiin.

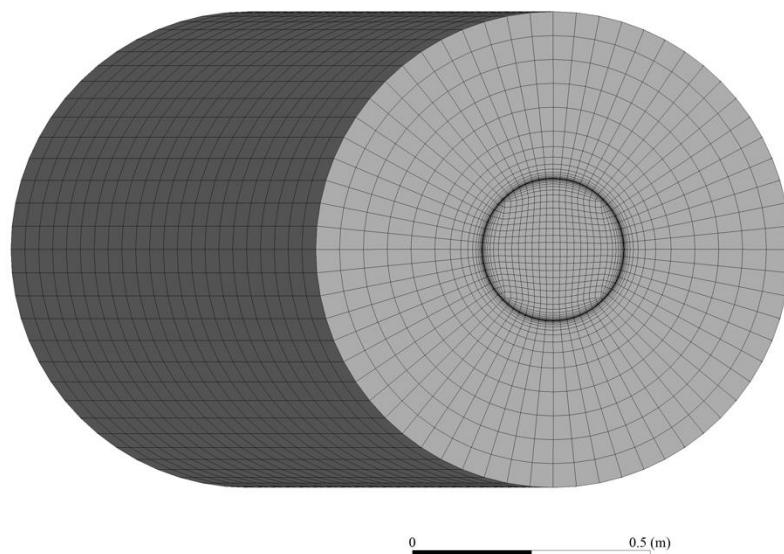
## **4.2 Lämmönsiirtoilmiöiden tarkastelu numeerisella virtauslaskennalla**

Tutkimuksessa käytettiin avuksi numeerista virtauslaskentaa (Computational Fluid Dynamics). Numeerisen virtauslaskennan hyötyjä tutkimukselle oli erityisesti virtauslaskennan ja termodynamiikan ilmiöiden yksityiskohtainen tarkastelu, jota ei pystytty laskemaan analyttisesti tai ilmiöistä ei ollut olemassa tarkkoja mittauksia. Luvussa esitettyjen osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla yksittäisen putken virtauslaskentaa pystyttiin mallintamaan tarkasti ja käyttämään tuloksia hyväksi Fluidit Sewer -ohjelman jatkokehityksessä ja kalibroimisessa. Simuloinneissa haluttiin erityisesti selvittää putkessa olevan ilman ja veden välinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, ilman turbulentsisuus sekä maaperän lämpötilagradientin paksuus.

Numeerinen virtauslaskenta suoritettiin kokonaisuudessaan Ansys Fluent -ohjelmalla. Ohjelma on laajasti käytössä teollisessa suunnittelussa ja se mahdollistaa monipuolisesti eri fysikaalisten ilmiöiden mallintamisen ja tulosten esittämisen. Ohjelmistopakettiin mukana Ansys tarjosi myös kappaleiden suunnitteluun ja verkotukseen tarkoitettua ohjelmaa, jonka avulla koko mallinnus voitiin suorittaa alusta loppuun. (Ansys 2021)

## Geometria ja verkotus

Tutkittavan mallin geometria suunniteltiin Ansys ohjelmistopakettien mukana tulleella Spaceclaim-ohjelmalla. Erityisesti 3D-mallinnukseen kehitetyllä ohjelmalla pystyttiin luomaan sylinterin muotoinen geometria, jota ympäröi toinen sylinteri kuvan 7 mukaisesti. Ulompi sylinteri edusti maata putken ympärillä ja sylintereiden väliin jäävä pinta putken ja maan välistä rajakerrosta, johon Ansys Fluentilla lisättiin jälkikäteen putken paksuus. Geometria pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, jotta sitä olisi mahdollisimman nopea muokata simulointien välissä. Etenkin eri maakerrosten paksuutta tutkittaessa yksinkertainen geometria nopeutti työskentelyä huomattavasti.



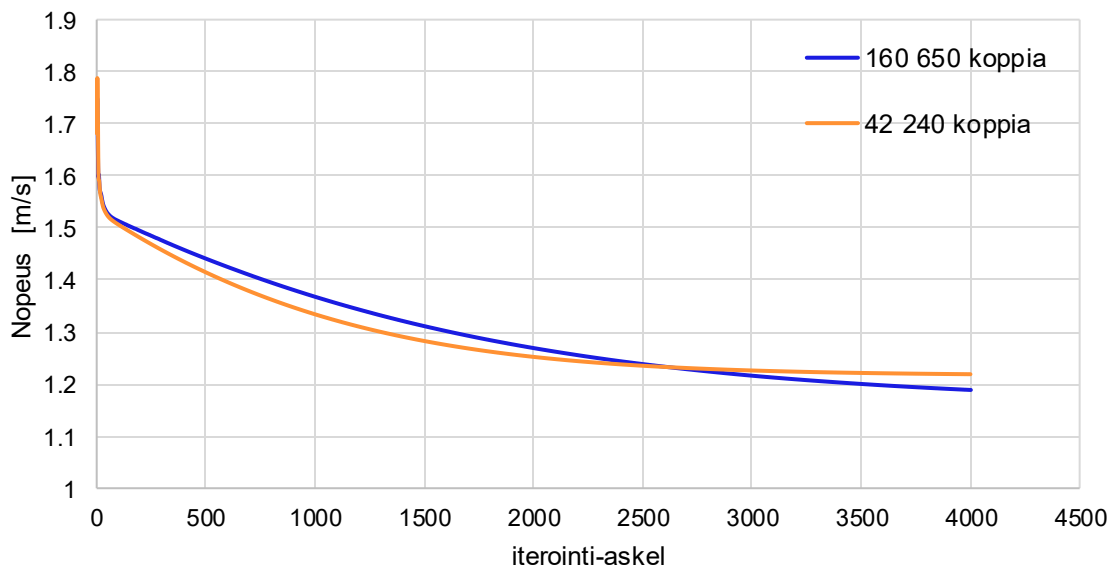
**Kuva 7** kuvassa 10 m pitkän putken verkotus 350 mm maakerroksella.

Verkotuksessa pyrittiin pääsemään mahdollisimman pieneen laskentakoppien määrään vaikuttamatta kuitenkaan laskennan tarkkuuteen. Lukumäärää pyrittiin minimoimaan tietokoneen laskennan nopeuttamiseksi. Tästä syystä laskentoja suoritettiin useilla verkon tiheyksillä ja simuloituja tuloksia vertailtiin keskenään. Maaperän verkotus pystyttiin pitämään harvana, koska siinä tarkasteltiin vain lämmönjohtumista. Verkotuksessa kiinnitettiin erityisesti huomiota putken sisäpinnan rajakerroksen tihennykseen, jossa fyysikaalisten ilmiöiden koko on pieni. Rajakerroksen laskentakoppien suuruutta arvioitiin Y-plus arvon avulla yhtälöllä (3.3), jolloin ensimmäisen kopin paksuus seinämän vieressä voitiin arvioida luotettavasti. Putken sisällä olevia laskentakoppeja tihennettiin huomattavasti maaperään verrattuna kuvan 7 mukaisesti.

Kaikissa verkotuksissa asetukset olivat pääpiirteittäin samat. Rajakerrostihennykset tehtiin putken sisä- ja ulkoreunaan kuvan 7 mukaisesti, jossa kerroksia oli 10–15 kappaletta. Jotta putken sisään muodostetut laskentakopit saatiin virtauksen suuntaisesti, käytettiin verkotusasetuksissa Multizone- ja Face Meshing -asetusta, jotka mahdollistivat säännöllisten nelikulmioiden mallintamisen putken sisään. Samoin uloimman sylinterin symmetrinen verkotus onnistui helposti näitä asetuksia käyttämällä. Säännöllisellä ja symmetrisellä verkotuksella haluttiin pienentää verkotuksesta johtuvaa virhettä simuloinneissa. Verkotuksessa yksittäisen laskentakopin särmän pituus oli rajoitettu 0,05 metriin. Putken pituuden skaalauksessa särmän pituus saattoi kuitenkin kasvaa suuremmaksi.

Ensimmäisenä verkon tiheyden vaikutusta tuloksiin vertailtiin kahdella metrin pituisella putkella, joilla maakerroksen paksuus oli kummallakin 350 mm. Putkien halkaisijoiksi valittiin 300 mm sen yleisyyden vuoksi Turun ja Helsingin jätevesiverkostoissa. Ensimmäisen sylinterin kehä oli jaettu 60 osaan ja toisen 80:een. Lisäksi laskentakopin maksimikooksi ensimmäisellä oli asetettu 5 mm ja jälkimmäisellä 3 mm. Harvemmassa verkossa laskentakoppeja oli yhteensä 42 240 ja tiheämmässä 160 650 kappaletta. Ensimmäisen laskentakopin paksuudeksi rajakerroksessa putken seinämän vieressä valittiin harvemmassa verkossa 0,1 mm ja tiheämmässä 0,01 mm. Muuten verkotusasetukset olivat identtiset. Kuvassa 7 esitetään harvemman mallin verkotus. Tulokset täsmäsivät hyvin lämpötilojen ja nopeuksien suhteen. Kuvassa 8 on esitetty virtauksien nopeudet putkien ulostuloissa. Nopeus laskettiin sekä veden että ilman pinta-alapainotettuna keskiarvona.

Virtauksen nopeus putken lopussa

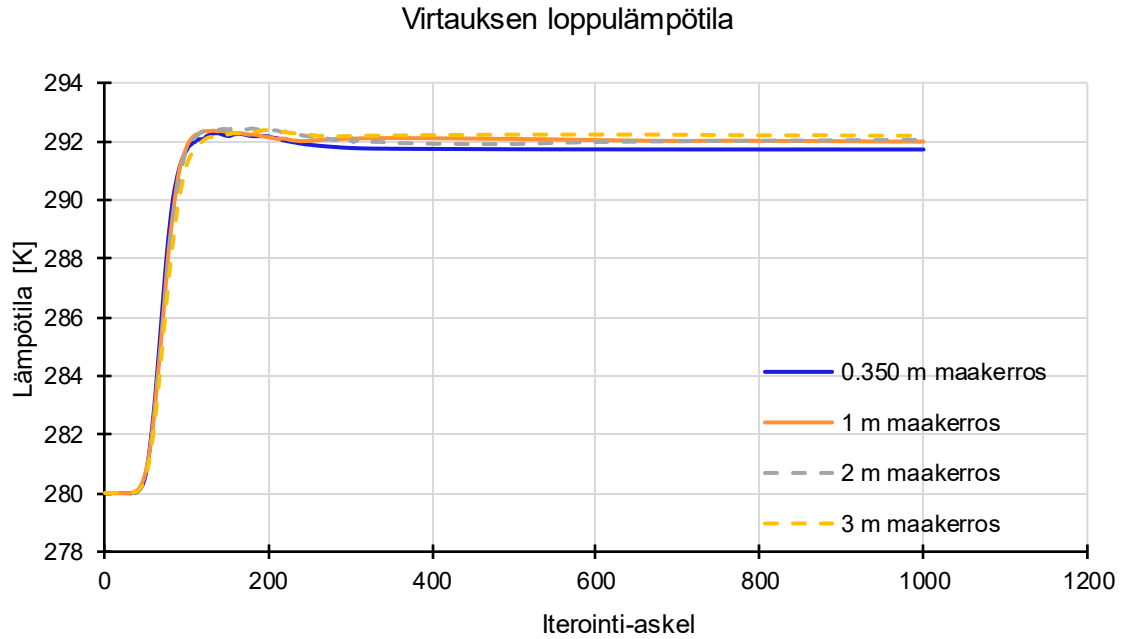


**Kuva 8** Virtauksen pinta-alapainotetut keskiarvo loppulämpötilat numeerisen laskennan aikana.



Toisessa tarkastelussa verkon tiheyden vaikutusta tutkittiin putken pituussuunnassa. Ensimmäisessä tarkastelussa todettiin harvemman verkon antavan tarkkoja tuloksia metrin pituisen putkelle, joten seuraavaksi harvemman verkotuksen putken pituus skaalattiin 10 m pituiseksi. Laskentakoppien määrä pidettiin vakiona, joten putken pituussuunnassa koppien pituus kymmenkertaistui. Skaalatun geometrian tuloksia verrattiin toiseen malliin, jossa geometria ja verkotus luotiin alkuperäisillä asetuksilla 10 m pitkälle putkelle. Tällöin putken pituussuunnassa verkotuksen tiheys oli 10 kertaa tiheämpi skaalattuun verrattuna. Skaalatun putken verkotus osoittautui vastaamaan hyvin tiheämmän verkotuksen tuloksia. Koska skaalatun ja skaalaamattoman mallin tuloksissa ei ollut eroavaisuuksia, jatkettiin tutkimuksia skaalatulla verkolla.

Viimeinen geometriaan ja verkotukseen liittyvä tarkastelu koski maakerroksen paksuutta putken ympärillä. Koska simuloinnissa laskennan reunaehdoksi asetettiin maakerrokselle vakio pintalämpötila, oli tärkeää säilyttää maakerroksen paksuus tarpeeksi suurena. Ideaalisessa tapauksessa maakerroksen paksuus olisi ääretön, jolloin lämpötilagradientti maaperässä putken ympärillä mallinnettaisiin täysin oikein. Maakerroksen paksuus haluttiin kuitenkin pitää mahdollisimman ohuena, jotta laskentakoppien määrä minimoitaisiin. Tarkasteluun valitut paksuudet olivat 0,350; 1,0; 2,0 ja 3 m. Simuloinnit suoritettiin 10 m pituiselle skaalatulle putkelle, jossa verkotusasetukset olivat lähes samat edellisiin verkotuksiin verrattuna. Muutoksena edellisiin verkotuksiin tehtiin 2 m ja 3 m tapauksissa ulomman sylinterin ulkoreunalle harvennus. Verkotuksen yleisistä asetuksista johtuen sylintereiden kehät jakautuvat automaattisesti noin 200 osaan, jotta laskentakoppien suuruus ei kasvaisi liian suureksi maakerroksen ulkokehällä. Tällöin virtauskanavan verkotus tihentyi kokonaiskoppiluvun noustessa 231 000:een. Kuvassa 9 on esitetty maakerroksen vaikutus virtauksen loppulämpötilaan. Kuten kuvasta huomataan, metrin paksuisen maakerroksen jälkeen suuremmalla maakerroksella ei ole juuri merkitystä virtauksen lämpötilan.



**Kuva 9** Virtauksien pinta-ala painotetut keskiarvolämpötilat putkien ulostulossa.

### Mallinnus ja reunaehdot

Numeerinen virtauslaskenta suoritettiin Ansys Fluent -ohjelmalla, jossa virtauslaskenta suoritettiin stationäärisenä kaksifaasivirtauksena. Mallinnukset suoritettiin kahdelle eri putkelle, joiden kaltevuudet olivat 8 ja 5 promillea. Seuraavissa kappaleissa esitetyt asetukset ja reunaehdot määritettiin yhtäläisesti kummallekin putkelle kaltevuuksien mukaisesti. Laskennan nopeuttamiseksi laskennassa käytettiin Pseudo Transient -asetusta, jolla tulokset saatiin konvergoitumaan nopeammin alirelaksoinnin ansiosta. Koska aikaisemmin luodut verkotukset haluttiin saada kallistettua oikeiden jätevesiputkien tapaan, käytettiin kaltevuudessa painovoiman jakamista  $x$ - ja  $y$ -suuntaisiin komponentteihin. Kaltevuudeksi valittiin ensimmäisissä mallinuksissa 8 promillea, jolloin  $x$ -suuntaiseksi arvoksi painovoimalle saatiin  $0,078 \text{ m/s}^2$  ja  $y$ -suuntaiseksi pyöristyksen jälkeen  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Mallin asetuksista monifaasialleista valittiin Volume of Fluid ja alimalliksi Open Channel Flow, jonka faaseiksi asetettiin vesi ja ilma. Veden pintajännityskertoimeksi ilman ja veden rajakerroksessa asetettiin vakioksi  $0,072 \text{ N/m}$ . Energiayhtälö otettiin käyttöön lämpötilojen tutkimisen mahdollistamiseksi. Lisäksi mallin yleisistä asetuksista valittiin turbulenssimalliksi  $k$ -omega SST, johon lisättiin liiallista turbulenssisuutta rajoittava Production Limiter -asetus. Turbulenssimallin vahvuuksia on automaattisesti parhaan seinäfunktion valinta, jolloin rajakerroksen nopeus saadaan mallinnettua mahdollisimman tarkasti.

Reunaehdot määritettiin erikseen kummallekin tutkittavalle putkikaltevuudelle. Kappaleessa on esitetty reunaehdot vain 8 promillen kaltevuudelle, mutta ne laskettiin

yhtäläisesti kummallekin tutkittavalle putkelle. Reunaehtoina simuloinneissa käytettiin virtauksen alku- ja loppupainetta putken päissä. Putken pinnalle asetettiin wall-reunaehto, joka kuvaa virtauskanavan reunoja. Virtauksen sisääntulossa virtauksen lämpötilaksi asetettiin 20 °C, syvyydeksi 10 cm ja nopeudeksi 1,31 m/s. Syvyyden, kallistuksen ja virtausnopeuden suhde määritettiin erikseen Manningin yhtälöllä (2.4), jossa putken kaltevuudeksi asetettiin 8 promillea ja putken karheusparametriksi 0,01 betonin karheuden mukaan (Çengel & Cimbala 2006). Syvyys perustui keskisyyvyyteen Turun jätevesimalissa, joka laskettiin Fluidit Sewerillä. Virtauksen ulostulon reunaehdoiksi monifaasi-asetuksissa asetettiin vakioaine ja virtauksen alimmaksi tasoksi kaltevuuden mukaan -0,23 m. Putken seinämälle asetettiin No Slip -reunaehto, paksuudeksi 60 mm ja materiaaliksi betoni. Putken karheusparametrit asetettiin vastaamaan Manningin yhtälössä käytettyä karheutta. Viimeisenä reunaehtona maanpinnalle asetettiin vakiolämpötilaksi 6 °C. Muuten reunaehtojen asetukset vastasivat monifaasimallin oletusasetuksia. Reunaehdot laskettiin yhtäläisesti toiselle putkelle, jonka kaltevuus oli 5 promillea.

Aineominaisuuksina numeerisessa virtauslaskennassa käytettiin Fluentin omaa aineominaisuuskirjastoa vedelle ja ilmalle. Aineominaisuuksia verrattiin myös muihin lähteisiin niiden luotettavuuden varmistamiseksi (Çengel & Cimbala 2006). Koska laskennassa tutkittiin virtauksen stationääriä ratkaisua, jossa lämpötilan ja paineen vaihtelut olivat pieniä, voitiin monille aineominaisuuksille antaa vakioarvoja. Taulukossa 1 on esitetty laskennassa käytetyt arvot aineominaisuuksille. Betonille ja maalle aineominaisuudet haettiin kirjallisuudesta ja muista tutkimuksista (Çengel & Ghajar 2011, Myers et al. 2010, Ympäristöministeriö 2003). Vakioarvojen käyttäminen auttoi huomattavasti laskennan konvergoitumisessa.

**Taulukko 1** Numeerisessa virtauslaskennassa käytetyt aineominaisuudet.

<b>Fluidit</b>		<b>Vesi</b>		<b>Ilma</b>	
Suure	Yksikkö	Tyyppi	arvo	Tyyppi	Arvo
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	Vakio	998	Vakio	1,225
Ominaislämpökapasiteetti	J/(kgK)	Vakio	4182	Vakio	1006,4
Lämmönjohtavuus	W/(mK)	Vakio	0,6	Vakio	0,0242
Viskositeetti	kg/(ms)	Vakio	1,001	Vakio	1,789E-05
Molekyylin massa	kg/kmol	Vakio	18,02	Vakio	28,97
Standarditilan entalpia	J/kgmol	Vakio	-2,86E+08	Vakio	0,0
Referenssi lämpötila	K	Vakio	298,15	Vakio	298,15
<b>Kiinteät</b>		<b>Betoni</b>		<b>Maaperä</b>	
		Tyyppi	arvo	Tyyppi	arvo
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	Vakio	2350	Vakio	1610
Ominaislämpökapasiteetti	J/(kgK)	Vakio	880	Vakio	1520
Lämmönjohtavuus	W/(mK)	Vakio	1,4	Vakio	2,0

Ennen varsinaisen laskennan aloittamista määritettiin diskreetointiin ja laskentaan liittyvät asetukset. Laskenta-asetuksena paineen ja virtausnopeuden ratkaisuun käytettiin Coupled-menetelmää, jota suositellaan käytettäväksi monifaasilaskennassa. Lisäksi paineen ja virtausnopeuden laskenta yhdistettiin fluidien tilavuusosuuksien laskentaan virtauksessa. Diskreetointimenetelmissä gradienttimenetelmäksi valittiin Least Squares Cell based -menetelmä, joka sopii yleisesti moniin virtauslaskennan ongelmiin. Paineen diskreetointiin valittiin PRESTO! - ja tilavuusosuuksien Compressive-menetelmä. Muhin diskreetointimenetelmiin valittiin First Order Upwind, jotta laskenta ei muuttuisi liian raskaaksi. Ansys suosittelee edellä olevien asetusten käyttämistä putkivirtausten monifaasilaskennassa. Asetusten tarkat yksityiskohdat on selitetty Ansys Fluentin teoriaoppaassa. (Ansys 2009)

Edellä mainittuja asetuksia käytettiin kummallekin eri kaltevuuden putkelle. Reunaehdoissa huomioitiin putken kaltevuuksista johtuvat eroavaisuudet. Lopulliset mallinnukset tehtiin 3 m maakerroksella, mahdollisimman tarkkojen tulosten takaamiseksi. Mallinnuksissa tutkittiin erityisesti lämpötilagradienttia maaperässä, sekä veden ja ilman välistä lämmönsiirtoa. Lämmönsiirtoon vaikutti fluidien virtausnopeudet, joten mallinnukset tehtiin eri kaltevuuksilla tulosten vertailemiseksi. Tutkitut kaltevuudet olivat 5 ja 8 promillea, eli 10 m matkalla tämä vastaa 5 ja 8 cm korkeuseroa putken päiden välillä.

### 4.3 Lämpöhäviökertoimien määrittäminen jätevesiputkille

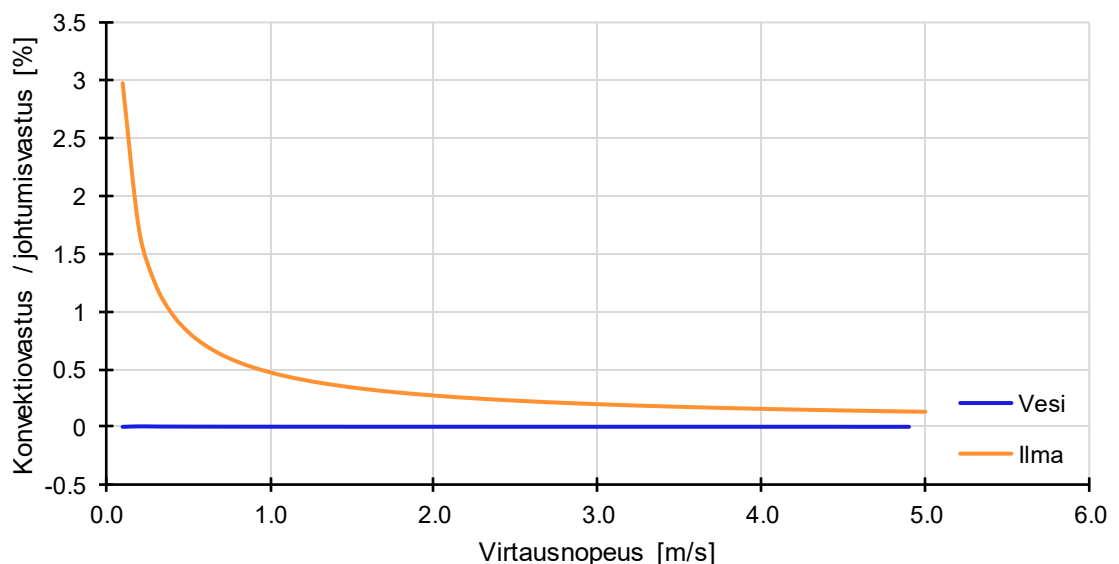
Jätevesiverkostomallissa, jokaisella virtauskanavalla on oma putkimateriaali. Putkimateriaali sisältää putken halkaisijan, karheuden ja lämmönsiirtokertoimen maaperään. Putkien halkaisijat ja karheet saadaan tyypillisesti putkien valmistajilta. Koska Turun ja Helsingin jätevesimallit ovat jo kaupunkien käytössä, löytyy malleista karheet ja dimensiot putkille valmiiksi. Näiden lisäksi putkille määritetään lämmönsiirtokertoimet maaperään yksikössä  $W/(m^2K)$ , joka eroaa hieman perinteisesti käytettävästä yksiköstä  $W/(mK)$ . Yksikössä metri viittaa putken pituuteen ja neliometri putken vaipan alaan. Yksikkö ilmaistaan neliömetreissä, jotta lähdekoodissa kerrointa voidaan käyttää suoraan märkäpinta-alan yhteydessä laskemaan lämpöhäviöitä virtauksesta maaperään. Lämmönsiirtokertoimesta käytetään usein myös nimitystä U-arvo.

Jäteveden lämpötilaan vaikuttaa verkostossa eniten lämpöhäviöt maaperään sekä verkostoon syötettävän veden lämpötila. Lämpöä siirtyy ympäristöön putken seinämän läpi, josta lämpöenergia johtuu ympäröivään maaperään. Koska Jätevesiputkia ei erikseen eristetä virtauskanavan ympäriltä, siirtyy lämpöä maaperään huomattavasti nopeammin kuin esimerkiksi eristetyissä kaukolämpöputkissa. Tästä syystä myös ympäröivällä

maaperällä on huomattavasti suurempi vaikutus eristettyihin putkiin verrattuna, sillä maa-aines toimii putken ympärillä eristeenä. Jätevesiputken lämmönsiirtoprosessit on esitetty toisessa luvussa kuvassa 4. Kuten kuvasta nähdään, siirtyy lämpöenergia ensin virtauksesta konvektiivisesti putken seinämään. Tämän jälkeen lämpö johtuu putken seinämän läpi ja jatkaa johtumista maaperässä, kunnes lämpötilaerot ovat tasaantuneet.

Konvektiivisen lämmönsiirtovastuksen suuruutta vedelle ja ilmalle suhteessa johtumisvastukseen arvioitiin yhtälöiden 2.24, 2.25, 2.27, 2.28 ja 2.29 avulla. Lämmönsiirtovastuksella tarkoitetaan lämmönsiirtokerroimen käänteislukua, joka kuvaa materiaalin ominaisuutta toimia eristeenä. Siirtovastusta laskettaessa yhtälöstä 2.8 jätetään lämpötilaero huomioimatta, mutta putken materiaalin lämmönsiirtokerroin ja dimensiot huomioidaan. Tutkimuksessa betoniputken halkaisijaksi valittiin 300 mm, paksuudeksi 60 mm ja pituudeksi 1000 m. Lisäksi putken ympärille arvioitiin numeeristen virtausmallinnusten perusteella 10,5 cm maakerros. Putken ja maan aineominaisuudet valittiin taulukon 1 mukaisesti. Ilman ja veden aineominaisuudet haettiin Coolprop-kirjastosta, jossa lämpötilana käytettiin 20 °C ja ilmanpaineena 101325 pa (Bell et al. 2014). Johtumisvastus määritettiin yhtälöstä 2.8. Laskenta suoritettiin Python-ohjelmointikielen avulla, jossa virtausnopeuksia generoitiin välille 0,1 m/s – 5,0 m/s tasaisesti 50 kappaletta. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 10.

Konvektiovastuksen suhde johtumisvastukseen putken lämpöhäviöissä



**Kuva 10** Kuvassa esitetty konvektiovastuksen suhde johtumisvastukseen täydessä putkivirtauksessa.

Kuvasta 10 huomataan selvästi, kuinka vedelle konvektiovastuksen suhde johtumisvastukseen on lähes nolla. Ilman tapauksessa suhteellinen konvektiovastuksen suuruus on

huomattavasti vettä suurempi ollen kuitenkin vielä alle 1 % nopeuden ollessa yli 0,5 m/s. Koska konvektion merkitys putkivirtauksen lämmönsiirtoon on pieni, voidaan se jättää huomioimatta jatkotarkasteluissa simulaattorin laskennan nopeuttamiseksi.

Koska konvektiivinen lämmönsiirtovastus jätettiin tarkasteluissa huomioimatta, vaikutti lämpöhäviöihin virtauksesta ympäristöön vain johtumisvastus. Johtumisvastukset määritettiin sekä putkelle että sitä ympäröivälle 10,5 cm paksuiselle maaperälle yhtälön 2.8 mukaisesti. Tämän jälkeen vastuskertoimet summattiin yhteen, muunnettiin johtumiskertoimeksi ottamalla summasta käänteisluku ja lopulta jakamalla putken sisäpuolen piirillä. Näin saatiin muodostettua jokaiselle putkelle lämmönsiirtokerroin sisävaipan pinta-ala-yksikköä kohden. Materiaalit, niihin käytetyt dimensiot ja aineominaisuudet löytyvät liitteestä 12.

#### **4.4 Maaperän lämpötilan mallintaminen**

Maaperän lämpötila oli viemäriverkoston lämpöhäviöiden kannalta yksi tärkeimmistä parametreista, jotka syötettiin Fluidit Sewer -ohjelmalle. Tarkoituksena oli ratkaista maaperän lämpötilan aikasarja tietyllä syvyydellä vuoden mittaiselle ajanjaksolle, jota voitaisiin hyödyntää lopullisessa mallinnuksessa. Koska maaperän lämpötilamittauksia ollut saatavilla tutkimusta vastaavissa olosuhteissa, täytyi lämpötila mallintaa matemaattisesti. Mallinnus perustui ilman lämpötilaan, josta termodynamiikan avulla pystyttiin laskemaan maaperän lämpötila eri syvyyksillä. Tätä varten työssä kehitettiin Microsoft Excel-pohjainen työkalu, jolla lämpötilojen aikasarjat oli helppo muodostaa automatisoidusti. Jotta tuloksien tarkkuudesta voitiin varmistua, käytettiin kalibroinnissa Anne Mäkirannan väitöskirjan tuloksia hyödyksi (Mäkiranta 2020). Mäkirannan maaperän lämpötilamittaukset suoritettiin Oulun yliopistolla eri syvyyksillä maaperässä vuosina 2014–2017.

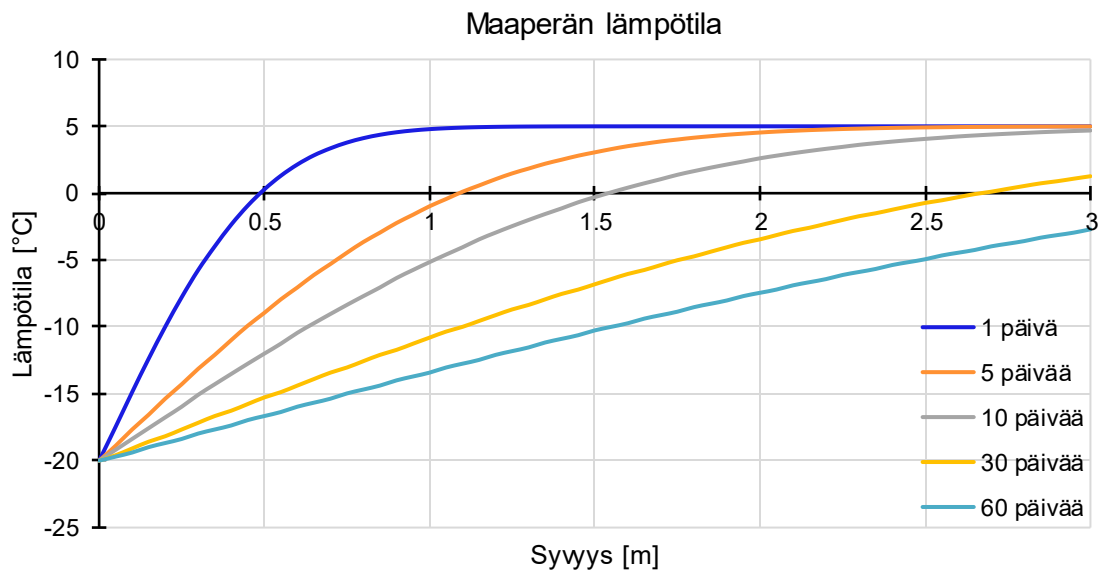
Maaperän lämpötilan selvittäminen tarkasti oli tutkimuksen kannalta ensi arvoisen tärkeää, sillä aikaisemmissa tutkimuksissa maaperän lämpötila nousi yhdeksi suurimmista jäteveden lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä (Dürrenmatt & Wanner 2014, Elías-Maxil 2015). Tutkimuksessa selvitettiin häiriöttömän maaperän lämpötilaa eli tilannetta, jossa maaperässä ei ole erillistä lämmönlähdettä. Tätä lämpötilaa käytetään lopullisessa viemärimallinnuksessa lämpöhäviöiden laskentaan numeerisesta virtausmallinnuksesta saatujen tulosten kanssa.

#### **Alkuarvot ja reunaehdot**

Maaperän lämpötilan mallintamisessa lähdettiin liikkeelle laskentaa helpottavilla oletuksilla, joita korjattiin lopulta kalibroinnin yhteydessä. Suurin yksinkertaistus mallinnuksessa tehtiin olettamalla maanpinnan lämpötilan samaksi ilman lämpötilan kanssa.

Erityisesti talvella eristävä lumipeite ja kesällä auringon säteily vaikuttavat vahvasti pinnan lämpötilaan, jolloin se eroaa huomattavasti ilman lämpötilasta. Mäkirannan tulokset oli tehty lumettomana talvena, joten mitatut olosuhteet vastasivat matemaattista mallinusta talven osalta. Lisäksi viemäriputket kulkevat usein huollettujen teiden alapuolella, joten oletus lumettomasta maanpinnasta oli perusteltu mallinnuksessa. Kesällä auringon säteilystä johtuva maanpinnan lämpeneminen huomioitiin kertoimilla huhti- elokuulle. Kertoimet valittiin Ilmatieteen laitoksen säteilymittausten perusteella niille kuukausille, jolloin globaali säteily oli suurimmillaan. (Ilmatieteen laitos 2014) Globaalilla säteilyllä tarkoitetaan auringosta maahan saapuvaa suoraa- ja hajasäteilyä, jonka mittaussyksikkönä käytetään  $W/m^2$ . Kertoimien avulla maanpinnan mallinnettua lämpötilaa kalibrointiin vastaamaan paremmin todellista lämpötilaa. Samoilla kertoimilla huomioitiin myös maaperän aineominaisuuksien muutoksesta johtuvaa virhettä eri vuodenaikoina.

Reunaehtoina maaperän lämpötilan mallinnuksessa käytettiin yhtälöiden (2.10) ja (2.11) mukaisia reunaehtoja. Koska vuoden mittaisen aikasarjan aikana ulkolämpötila ei ole vakio, valittiin uudet reunaehdot aina jokaiselle kuukaudelle. Kuukauden keskiarvolämpötila laskettiin ilman lämpötilamittauksista Turun lentoasemalta vuosilta 2020–2021 (Ilmatieteen laitos 2021). Kalibroinnissa lämpötiloina käytettiin Mäkirannan tutkimuksessa mitattuja lämpötiloja. Kuukauden pituinen aikajakso valikoitui ensimmäisten laskentatulosten myötä, joista voitiin päätellä lämpötilagradientin vaikuttavan merkittävästi yli 2,5 m syvyydelle vasta noin 30 päivän kuluttua. Kuvassa 11 on esitetty lämpötilan riippuvuus ajasta ja maakerroksen paksuudesta. Kuvassa maaperän alkulämpötila on  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja maanpinnan lämpötila on  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esimerkiksi yhden päivän ajanjaksolla lämpötilan muutos pinnan ja muun maaperän välillä ylettää vasta noin 1 m syvyydelle. 10 päivän tapauksessa muutos alkaa näkyä jo 2,9 m syvyydellä asti. Laskennan lähtöarvot eivät vaikuta gradientin syvyyteen, mutta suuremmalla lämpötilaerolla aikariippuvuus on selkeämmin havaittavissa.



**Kuva 11** Mallinnettu maaperän lämpötila eri syvyyksillä.

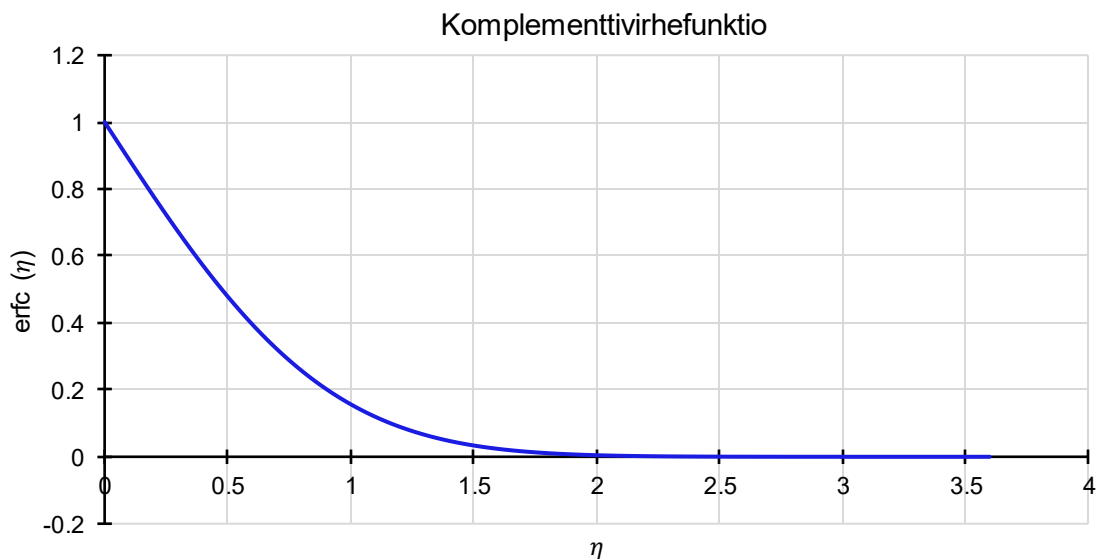
Aineominaisuudet maaperällä valittiin moreenin aineominaisuuksista, sen yleisyyden johdosta Suomen maaperässä. Moreenin ominaislämpökapasiteetiksi kalibroitiin  $1520 \text{ J}/(\text{kgK})$ , tiheydeksi  $1610 \text{ kg}/\text{m}^3$  ja lämmönjohtuvuudeksi  $2,0 \text{ W}/(\text{mK})$ . Aineominaisuuksia säädettiin muiden tutkimusten ilmoittamien aineominaisuuksien rajoissa (Mäkiranta 2020, Ympäristöministeriö 2003). Aineominaisuudet oletettiin laskennassa vakioiksi, mutta lopullisen kalibroinnin yhteydessä lämpötilojen korjauskertoimet huomioivat myös aineominaisuuksien muutoksesta johtuvan virheen. Etenkin maaperän kosteus vaikuttaa sen tiheyteen ja ominaislämpökapasiteettiin, joten korjaus oli merkittävä.

### Laskentatyökalun kehittäminen

Maaperän lämpötilan laskemisen helpottamiseksi työssä kehitettiin Microsoft Excel-pohjainen työkalu, jonka avulla lämpötilojen aikasarjat oli mahdollista muodostaa helposti eri kuukausille. Laskenta perustui aikariippuvaan lämmönjohtumiseen maaperässä yhtälön (2.5) mukaisesti. Jotta osittaisdifferentiaaliyhtälö saatiin ratkaistua puoliäärettömän maaperän tapauksessa, tehtiin yhtälölle muuttujanvaihdos yhtälön (2.14) mukaisesti. Reunaehdot (2.10) ja (2.11) muunnettiin myös similaarisuusmuuttujan mukaan, jolloin uudet reunaehdot ilmaistiin yhtälöllä (2.16). Toisen kertaluvun osittaisdifferentiaali yhtälöstä (2.15) ratkaistiin separoimalla integroimisvakiot  $C_1$  ja  $C_2$ , jonka jälkeen ne sijoitettiin alkuperäiseen ratkaistuun yhtälöön (2.19), josta muodostui lopullinen yhtälö (2.23). Funktiolle (2.23) ei analyttistä ratkaisua, joten yhtälön ratkaiseminen tehtiin numeerisesti.



Virhefunktion (2.23) numeerisesti laskettuja arvoja esitetään usein kirjallisuudessa, mutta kuvaajien ja taulukoiden tarkkuudesta aiheutuva virhe haluttiin minimoida laske-  
malla komplementtinvirhefunktion arvot suuremmalla määrällä similaarisuusmuuttujan ar-  
voja. Numeerinen laskenta suoritettiin Python-ohjelmointikielellä Scipy-kirjastoa hyödyn-  
täen. Similaarisuusmuuttujalle annettiin arvoja väliltä 0–3,6 yhteensä 1000 kappaletta,  
jonka jälkeen yhtälö (2.23) ratkaistiin aina yksittäisellä similaarisuusmuuttujan arvolla.  
Tulokset on esitetty alla kuvassa 12. Kuvassa esitetyn funktion datapisteet siirrettiin Ex-  
celiin, josta sen omalla xlookup-funktiolla similaarisuusmuuttujaa vastaavaa komple-  
menttifunktion arvoa pystyttiin hakemaan automatisoidusti. Similaarisuusmuuttujan ar-  
voksi valittiin kalibroinnissa 3 m, mutta syvyys muutettiin tarkasteltujen verkostojen kes-  
kimääräisen asennussyvyyden mukaiseksi lopullisissa laskelmissa. Termiseksi diffusi-  
teetiksi (2.6) ratkaistiin aineoinaisuuksien mukaan  $8,33 \text{ E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$  ja tarkasteluajanjak-  
soksi valittiin kuukausi.



**Kuva 12** Kuvassa numeerisesti ratkaistu komplementtinvirhefunktion eri similaarisuus-  
muuttujan arvoilla.

Termodynaamisen laskennan jälkeen aloitettiin itse laskentatyökalun kehitys. Lasken-  
nan reunaehdoissa määritellään maaperälle annettavaksi vakioämpötila laskennan al-  
kaessa. Tämä aiheuttaa laskentaan virhettä, sillä todellisuudessa maaperässä lämpöti-  
lajakauma on jo laskennan alkaessa. Tällöin lopputulos riippuisi laskennan aloitushet-  
kestä. Tästä syystä laskennan alussa tammikuun alkulämpötilaksi annettiin häiriöttömän  
maaperän lämpötila  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  ja pinnan vakioämpötilaksi tammikuun keskiarvolämpötila il-  
malle (Mäkiranta 2020). Tämän jälkeen maaperän lämpötila laskettiin normaalisti

similaarisuusmuuttujan ja komplementtivrhefunktion avulla kuukauden mittaiselle ajanjaksolle. Helmikuulle reunaehdoksi pinnan lämpötila asetettiin tammikuun tapaan, mutta maaperän alkulämpötilaksi asetettiin tammikuun laskennan viimeinen lämpötila tarkastelusyvyydellä. Samaa tapaa jatkettiin koko vuoden ajan jokaiselle kuukaudelle, jonka jälkeen tammikuulle annettiin alkuarvoksi jo ratkaistun joulukuun lämpötila. Iterointia jatkettiin niin pitkään, kunnes arvot samojen kuukausien välillä eivät enää vaihdelleet. Näin tuloksissa voitiin minimoida laskennan aloituspäivämäärästä aiheutuva virhe.

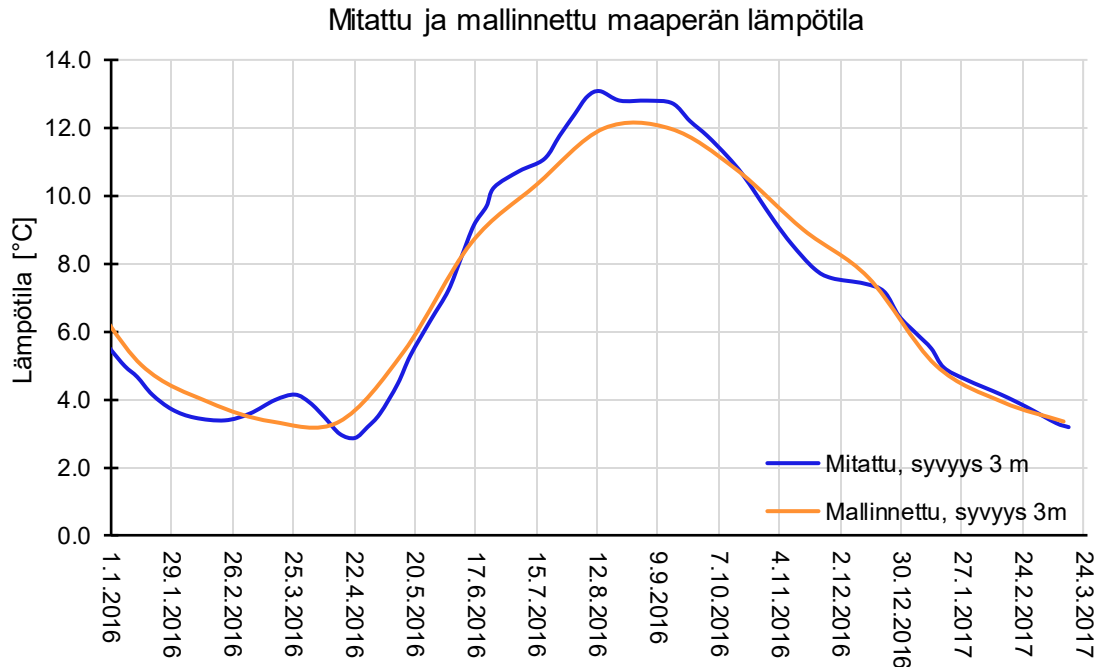
### **Laskentatyökalun kalibrointi**

Eryteisesti kesäisin laskentatyökalun arvioimat lämpötilat jäivät liian matalaksi mittauksiin verrattuna. Aineominaisuuksia muuttamalla simuloitujen tulokset täsmäsivät mittaustuloksiin hieman paremmin, mutta ei tyydyttyvästi. Maanpinnan lämpötilaa suurentamalla todettiin olevan positiivinen vaikutus simuloitujen tulosten tarkkuuteen kesäkuukausien aikana. Syyksi selvisi lämpösäteily, jota ei ensimmäisissä simuloinneissa huomioitu. Auringon lämpösäteilyllä oli merkittävä vaikutus maanpinnan lämpötilaan erityisesti kesäisin, jolloin maaperä lämpeni tehokkaammin. Koska laskennassa käytettävien parametrien määrä haluttiin pitää mahdollisimman pienenä, käytettiin laskennassa vakiokertoimia kompensoimaan säteilystä aiheutuva maanpinnan lämpeneminen.

Kalibroinnin yhteydessä huhti-elokuulle määritettiin vakiokertoimet, jotka suurensivat mitattua ilman lämpötilaa. Kertoimien määrittämiseksi käytettiin pienimmän neliösumman menetelmää. Menetelmässä toisiaan vastaavista datapisteistä lasketaan erotuksen neliö ja kaikki erotuksen neliöt summataan yhteen. Ideaalisessa tapauksessa kokonaissumman tulisi olla nolla, joten summaa pyritään minimoimaan säätämällä parametreja. Kalibroinnissa apuna käytettiin Excelin Solver-toimintoa, jolla neliösummaa minimoitiin gradientti pohjaisella menetelmällä. Säädettävät parametrit olivat kuukausien lämpötilakertoimet, joille annettiin reunaehdoiksi yli yhden lukuarvot. Laskennan tapauksessa lukuarvo yksi merkitsee tilannetta, jossa ilman lämpötila vastaa maanpinnan lämpötilaa, eikä lämpösäteilyllä ole tällöin merkitystä.

Vakiokertoimien iteroinnin jälkeen tuloksia vertailtiin mitattuun lämpötiladataan, joka on kuvassa 13. Mäkirannan tulokset kopioitiin MathWorksin Matlab-ohjelman avulla, jolla kuvatiedostosta datapisteet oli mahdollista erottaa tekstitiedostoksi, jotta niitä pystyttiin käyttämään kalibroinnissa tarkasti. Datapisteiden erotuksessa pientä virhettä aiheutti manuaalisesti hiirellä valitut yksittäiset datapisteet, joiden perusteella loput datapisteet interpoloitiin. Virhe ei ole kalibroinnin, eikä tutkimuksen kannalta kuitenkaan merkityksellinen. Vakiokertoimien arvot kalibroinnin jälkeen huhti-elokuulle olivat: 1,00; 1,57; 1,91; 1,16; 1,47. Hypoteesissa heinäkuun kerroin olisi ollut elokuun kerrointa suurempi.

Toisaalta myös aineominaisuuksista johtuva kuukausittainen eroavuus vaikuttaa kertominen suuruuteen, joten tulokset eivät selity pelkästään lämpösäteilyn tarkastelulla. Muuten kalibroinnin tulokset olivat linjassa oletusten kanssa. Kuvassa 13 on esitetty kalibroinnin jälkeiset tulokset maaperän lämpötilan aikasarjalle.



**Kuva 13** Kalibroitujen tulosten vertailu Mäkirannan mittauksiin (Mäkiranta 2020).

Kalibroinnin jälkeen laskentatyökalulle tehtiin vielä validointi perustuen Mäkirannan vuoden 2015 mittauksiin, minkä jälkeen tulosten tarkkuudesta voitiin varmistua. Kun tulokset olivat validoitu, asetettiin tarkastelusyvyudeksi 2,6 m putkien keskimääräisen asennussyvyyden mukaan. Ilman lämpötila asetettiin liitteen 11 mukaisesti, jota kalibroidiin aikaisemmin määritellyillä kertoimilla. Lopullisissa jätevesiverkostojen simuloinneissa käytetyt maaperän lämpötilat on esitetty liitteessä 5 ja 10. Liitteessä 11 on esitetty maaperän lämpötila jokaiselle vuoden kuukaudelle.

## 4.5 Helsingin ja Turun jätevesiverkostomallien rakentaminen ja mittaukset

Mallien rakentamisen lähtökohtana tutkimuksessa oli Turun ja Helsingin jätevesiverkostojen olemassa olevat Fluidit Sewer-mallit. Lisäksi simulaattorin validointia varten Helsingin Jollaksesta rakennettiin validointimalli, jolla simuloituja ja mitattuja tuloksia pystyttiin vertailemaan keskenään. Mittauksia tehtiin myös Turussa, johon uuden simulaattorin kalibrointi perustui. Mallit sisälsivät valmiiksi muun muassa putket, kaivot, pumppaamot,

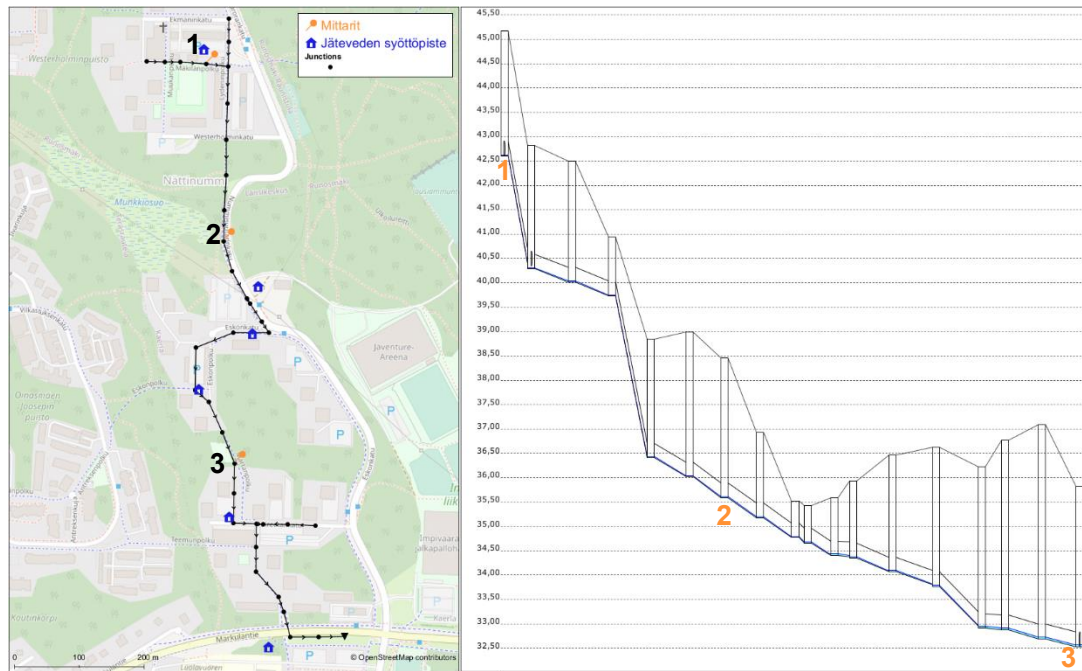
jätevedenpuhdistamot, kuluttajat, vuodot ja yleiset ohjaukset. Näiden lisäksi malliin tuotiin tutkimusta varten uudet putkien lämpöhäviökertoimet, lämpötilan aikasarjat maaperälle ja ilmalle sekä tuntikertoimet jäteveden lämpötilalle ja virtaukselle. Mallien rakentaminen oli itsenäinen prosessi itse ohjelman kehityksestä, eikä uuden Fluidit Sewer -ohjelman lähdekoodeihin tehty muutoksia, jotka olisivat olleet mallikohtaisia.

Mallien rakentaminen sekä mittausten toteuttaminen tehtiin tiiviissä yhteistyössä HSY:n, Turun vesihuollon, Turun seudun puhdistamon ja Fluiditin kanssa. Tiivis yhteistyö oli edellytys toimivien verkostomallien saamiseksi, joihin vuosien varrella monet eri henkilöt olivat tehneet muutoksia. Vaikka mallit olivat virtausteknisesti valmiit, jouduttiin niihin silti tekemään muutoksia, jotta haluttuun mallinnustarkkuuteen oli mahdollista päästä.

### **Lämpötilamittaukset**

Tutkimuksessa tehtiin jäteveden lämpötilamittaukset Turun ja Helsingin jätevesiverkostoissa, jotta simuloituja ja mitattuja tuloksia voitaisiin verrata keskenään. Alkuperäisessä suunnitelmassa mittauspisteitä olisi ollut yhteensä noin 10–20 kappaletta, mutta lämpömittareiden huonon saatavuuden vuoksi suurin osa mittauksista tehtiin kolmella Soficta Oy:n ADM Chamber 1 TH/WL -mittarilla Turussa Mäkilänpolulla ja Nummisuutarin kadulla. Etäluettavat mittarit asennettiin jätevesikaivoihin, niin että itse mittausyksikkö oli kiinnitettynä vajjeriin, joka syötettiin purkuputkeen. Mittaustarkkuudeksi ilmoitettiin  $\pm 0,2$  °C. Mittaukset suunniteltiin yhdessä Fluiditin, Turun vesihuollon ja HSY:n kanssa ja niiden toteutuksista vastasivat itse vesilaitokset. Mittaustuloksia saatiin Turusta 11.6.2021 alkaen 15 minuutin mittausresoluutiolla.

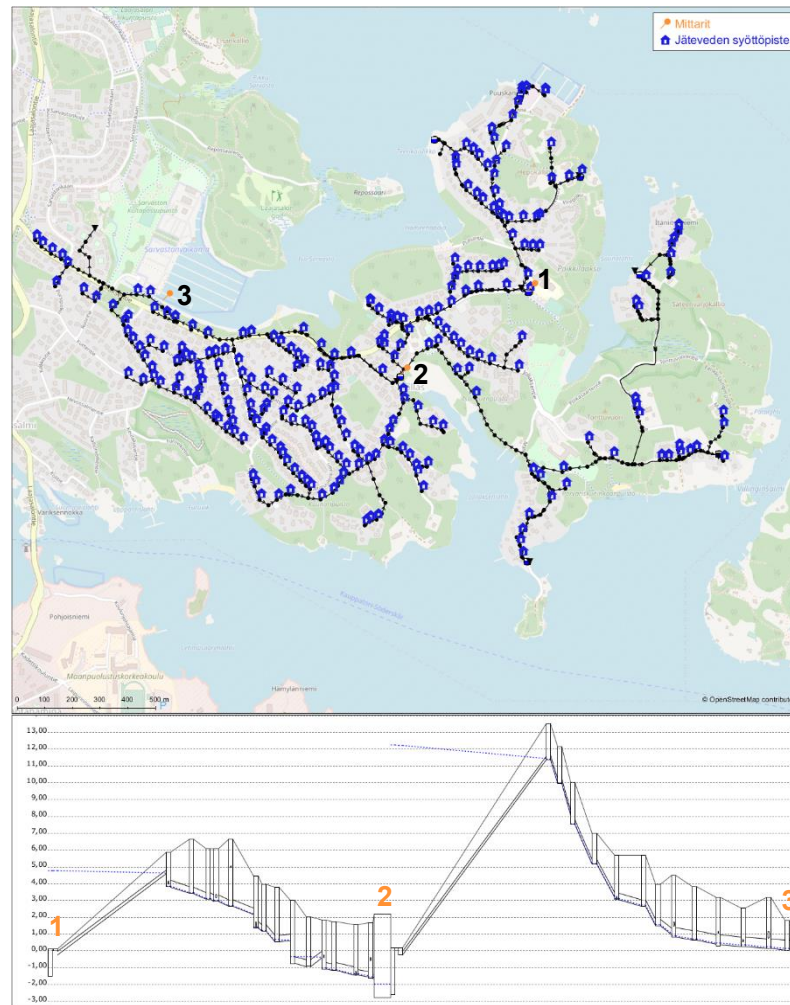
Mittaukset haluttiin suorittaa tilanteessa, jossa putket olisivat vain osittain täynnä vettä, ja verkostoon syötettävä jätevesi tulisi kerrostalokiinteistöltä, jolloin yksittäisen ihmisen vedenkäyttötottumukset vaikuttaisivat mahdollisimman vähän mittauksiin. Mittauksissa ensimmäisen mittauspisteen haluttiin olevan mahdollisimman lähellä jäteveden syöttöpistettä, niin että verkostoon syötettävän jäteveden lämpötilaa voitaisiin tarkastella ennen sen jäähtymistä verkostossa. Toinen mittauspiste valittiin niin, että mittauspisteiden 1 ja 2 välissä verkostoon ei syötetty uutta jätevettä, mutta mittauspiste olisi mahdollisimman kaukana ensimmäisestä pisteestä. Kolmannen mittauspisteen valintakriteerit olivat samat kuin toisella. Kolmannen ja toisen mittarin välillä verkostoon syötettiin kuitenkin sekä Turussa että Helsingissä uutta jätevettä, sillä sopivampaa kohdetta ei löydetty. Vesilaitokset halusivat minimoida mittareista mahdollisesti aiheutuvat tukosriskit asentamalla ne mahdollisimman suuren kaltevuuden putkiin. Tämä rajasi myös mahdollisia mittauskohteita. Kuvassa 14 on esitetty Turun mittausalue sekä putkien korkeusprofiilit metreinä merenpinnasta.



**Kuva 14** Turkuun asennettujen lämpötilamittareiden sijainnit sekä putkien profiilit metreinä meren pinnasta. Pystysuuntaiset viivat kuvaavat kaivoja ja vaakasuuntaiset jätevesiputkia. Lisäksi kuvaan on lisätty maanpinnan korkeus merenpinnasta kaivojen välille.

Ensimmäinen lämpömittari asennettiin kaivoon, johon usean kerrostalokiinteistön jätevedet johdettiin. Myös toinen mittari saatiin asennettua suunnitelmien mukaisesti noin 303 m päähän ensimmäisestä mittarista. Kolmatta lämpömittaria jouduttiin siirtämään lähemmäksi mittaria 2 sen alkuperäisestä paikasta mahdollisesta tukosrikistä johtuen. Lopullinen etäisyys mittarin 1 ja 3 välillä oli tällöin 777 m. Mittarin 2 ja 3 välillä verkostoon syötettiin uutta jätevettä, joka häiritsi mittauksia. Tästä johtuen 3. mittarin tuloksiin tuli suhtautua varauksella. Mittarit sisälsivät vain lämpötilamittauksen, joten mittauksen yhteydessä ei tehty virtausmittauksia.

Helsingissä mittaukset suoritettiin lopulta kolmella mittarilla Jollaksessa, joka ei ollut täysin ideaali sijainti haaroittuneesta verkostosta johtuen. Mittauksessa yksittäisen kuluttajan vedenkäyttötottumukset korostuivat, sillä asuinalueella oli paljon omakotitaloja. Jollaksen mittareista kaksi ensimmäistä olivat pumppaamojen yhteydessä ja viimeinen viettoviemärissä. Jokaisessa mittauksessa oli sekä lämpötila- että virtausmittaus. Mittareiden sijainnit on esitetty kuvassa 15. Ensimmäisen ja toisen mittarin välillä etäisyyttä oli noin 740 m ja toisen ja kolmannen välillä noin 960 m.



**Kuva 15** Jollakseen asennettujen lämpötilamittareiden sijainnit sekä putkien profiilit metreinä meren pinnasta.

Koska mittareiden välillä verkostoon syötettiin uutta jätevettä, ei lämpöhäviöiden vaikutusta jäteveden lämpötilaan voitu määrittää tarkasti. Kaikille niille kuluttajille, joiden jäteveden lämpötilaa ei tiedetty asetettiin VTT:n määrittämä lämpötilakerroin. Simuloinnit validoivat näin ollen kokonaisuutta, jossa arvioitiin sekä simulaattorin että VTT Oy:n määrittämien kertomien toimintaa. Idealisessa tilanteessa mittareiden välillä verkostoon ei olisi syötetty uutta jätevettä, jolloin simulaattorin toimintaa olisi voitu verrata tarkemmin todellisuuteen.

Lämpötila- ja virtausmittauksia verrattiin verkostomallien simuloituihin tuloksiin. Vertailussa käytettiin keskineliövirheen neliöjuuri -menetelmää (Root Mean Square Error), sillä samaa menetelmää käytettiin useissa vertailtavissa tutkimuksissa (Dürrenmatin & Wanerin 2014, Elías-Maxilin 2015, Figueroa et al. 2021). RMSE-arvo määritellään seuraavasti:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - y_t)^2}{T}}, \quad (4.1)$$

jossa  $T$ ,  $y_t$  ja  $\hat{y}_t$  ovat tarkastelu aika, mitattu arvo ja ennustettu arvo. RMSE-arvo kuvaa kuinka paljon ennustetut arvot eroavat keskimäärin mitatuista arvoista. Ennustettujen tulosten tarkkuuden arvioimiseen on olemassa myös muita menetelmiä, mutta tässä tutkimuksessa virheen arvioiminen haluttiin suorittaa systemaattisesti muiden vertailtavien tutkimusten kanssa. RMSE-menetelmän käyttö tieteellisissä tutkimuksissa on yleistä, mutta sen käyttämistä on myös kritisoitu (Chai & Draxler 2014).

### **Turun jätevesiverkoston mallinnus**

Turun jätevesiverkostomalli saatiin tutkimukseen Turun Seudun Vesi Oy:ltä (TSV). Mallin on rakentanut alun perin Fluidit Oy vuonna 2018 ja TSV on kehittänyt sitä vuosien varrella. Malli kokonaispituus on noin 610 km ja se koostuu 38 vuotoalueesta. Mallin topologiaa pyrittiin muuttamaan mahdollisimman vähän, mutta pieniä muutoksia verkostoon tehtiin laskennan nopeuttamiseksi. Muutoksilla ei ollut kuitenkaan vaikutusta mallin tulosten kannalta, vaan ne nopeuttivat lähinnä simulaattorin toimintaa. Lisäksi malliin laskettiin keskimääräisiä vuotoja eri vuodenajoille, sillä alkuperäinen malli ei näitä vuotoja sisältänyt. Malli ei myöskään sisältänyt Turun ulkopuolisilta kunnilta saapuvia jätevesiä, joten ne lisättiin yksittäisinä suurina kuluttajina verkostoon. Edellisten muutosten lisäksi malliin tehtiin termodynaamisen mallinnuksen kannalta välttämättömät lisäykset.

Lämmönsiirtolaskennan mahdollistamiseksi malliin lisättiin ulkoilman ja maaperän lämpötila, kiinteistöiltä syötettävä jäteveden lämpötila ja virtaus sekä putkien ja kaivojen lämmönsiirtokertoimet. Ulkoilman lämpötilana käytettiin Ilmatieteenlaitoksen mittauksia Kumpulasta vuosilta 2007–2020. Lämpötiloista laskettiin kuukausikohtaiset mediaanilämpötilat, joita käytettiin mallissa sellaisenaan sekä maaperän lämpötilan mallinnuksessa. Koska maaperän lämpötilan vaikutus oli herkkyyksanalyysin mukaan suurin jäteveden lämpötilaan vaikuttava tekijä, valittiin pääskenaarioiksi maaliskuu-, syys- ja kesäkuu. Maaliskuussa maaperän lämpötila oli mallinnuksen mukaan kylmimmillään ja syyskuussa lähes korkeimmillaan. Tarkasti ottaen elokuu oli 0.62 °C lämpimämpi verrattuna syyskuuhun, mutta syyskuu oli tutkimusmielessä mielenkiintoisempi kylmemmän ulkolämpötilan johdosta. Kesäkuu valittiin tutkimukseen keskimääräisenä kuukautena maaperän lämpötilan suhteen. Simuloinneissa käytetyt lämpötilat on esitetty liitteessä 11.

Mallinnuksen skenaariojako suunniteltiin yhdessä VTT Oy:n kanssa, jotta tulokset tukisivat tutkimushanketta mahdollisimman monipuolisesti. Skenaariojaossa simuloitavien tilanteiden määrää rajoitti erityisesti pitkä laskenta-aika. Simuloitaviksi skenaarioiksi

valittiin yksi validointimallinnus ja seitsemän mallinnusta jokaisesta pääskenaariosta. Kaikki simuloinnit suoritettiin päivän mittaisina. Näistä seitsemästä skenaariosta yksi oli keskimääräisen päivän mallinnus ilman lämmön talteenottoa ja yksi keskimääräisen päivän mallinnus talteenoton kanssa. Talteenoton yhteydessä kiinteistöiltä syötettävän jäteveden lämpötilan aikasarjaa muutettiin kiinteistötyypin mukaan kerrostalolle, rivitalolle ja omakotitalolle sopivaksi VTT Oy:n määrittämien aikasarjojen mukaan. Viisi jäljelle jäävää skenaariota suoritettiin jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan selvittämiseksi eri syötettävillä jäteveden lämpötiloilla. Verkostoon syötettävät lämpötilat olivat 20, 16, 12, 8 ja 4 °C. Viimeisten simulointien yhteydessä syötettävällä lämpötilalla ei ollut päivän sisäistä aikariippuvuutta samalla tavalla, kuin kahdella ensimmäisellä simuloinnilla. Yhteensä simulointeja Turun verkolle suoritettiin 22 kappaletta. Mallin yleiset asetukset on listattu liitteessä 5.

Mallissa verkostoon saapuvat virtaukset voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: kiinteistöiltä tulevat virtaukset, Turun verkoston ulkopuolelta saapuvat virtaukset ja vuotovedet. Kiinteistöiltä verkostoon tulevat virtaukset olivat mallissa valmiina. Erona aikaisempaan malliin päivän sisäistä vaihteluita ohjattiin uusilla VTT Oy:n tekemillä tuntikertomilla. Uudet tuntikertoimet eivät olleet kalibroinnissa yhtä tarkkoja verrattuna alkuperäisiin tuntikertomiin, mutta niiden käyttö oli VTT:n oman tutkimuksen kannalta välttämätöntä. Lisäksi virtausten tuntikohtaista muutosta ohjattiin VTT:n tuottamilla tuntikertomilla.

Koska Turun malli ei sisältänyt kaupungin ulkopuolelta saapuvia virtauksia, lisättiin kaikkiin skenaarioihin Raison, Kaarinan ja Ruskon suunnalta verkostoon saapuvat virtaukset. Mittausdataa löytyi vain virtausten osalta, joten saapuvan virtauksen lämpötilaksi arvioitiin maaperän lämpötila, johon lisättiin yksi aste. Yhden asteen lisäykseen päädyttiin ensimmäisten simulointien yhteydessä, jossa tuloksia verrattiin jätevedenpuhdistamolla mitattuun lämpötilaan. Tarkempi mallinnus tarvitsisi lämpötilamittauksia kohteissa, joissa ulkoiset virtaukset liittyvät Turun verkostoon.

Vuodot malliin laskettiin Turun Seudun Puhdistamo Oy:n toimittaman virtausdatan perusteella. Virtausmittauksia suoritetaan jäteveden pumppausten yhteydessä, joten tietyn alueen vuodot voitiin määrittää vesitaseesta. Vuotojen määrä alueella oli pumpattu jätevesi, josta vähennettiin kuluttajilta laskutettu vesijohtovesi ja mahdollisesti muilta alueilta saapuva jätevesi. Turussa kuukausikohtaiset mediaanivuodot määritettiin kaikille 38 vuotoalueelle ja vuodot jaettiin Fluidit Seweri -ohjelman vuototyökalun avulla mallin solmuille. Validointi skenaariossa kaikki mahdolliset parametrit kuten vuodot määritettiin yksittäiselle päivälle, jolloin mallinnuksesta saatiin mahdollisimman tarkka.



## Helsingin jätevesiverkoston mallinnus

Helsingin hydraulinen jätevesiverkostomalli saatiin valmiina HSY:ltä. Jätevesiverkoston alkuperäisen mallin on rakentanut Fluidit Oy ja sitä päivitetään edelleen. Malli oli alun perin rakennettu hulevesimallina, joten se sisälsi myös hydrologisen mallinnuksen, jota ei käytetty tässä tutkimuksessa. Varsinkin Helsingin keskustassa sekaviemäreiden osuus on suuri, jolloin hulevesien vaikutus virtauksen lämpötilaan on merkittävä. Tutkimuksessa ei kuitenkaan ollut mittauksia hulevesien lämpötiloille, joten kaikki mallinnukset suoritettiin kuivina aikoina, jolloin mallinuksissa huomioitiin vain maaperästä verkostoon tulevat vuodot. Verkostomallin kokonaispituus oli 470 km ja sisälsi kaupunginosia, jotka oli mallinnettu vain suurina jäteveden tuottajina ilman niiden sisäistä verkostoa.

Mallinnus suoritettiin mahdollisimman yhtenäisesti Turun verkostomallinnuksen kanssa. Näin ollen myös skenaariojako tehtiin Turun kanssa yhtäläisesti, ja kummassakin verkostossa tehtiin samat simulointitarkastelut. Vuotojen mallinnusta Helsingin verkostolle ei tehty, sillä ne löytyivät mallista valmiina. Ulkolämpötila, maaperän lämpötila ja syötettävien jätevesien lämpötilat pidettiin samoina Turun mallin kanssa. Putkimateriaalien osalta kirjastoa täydennettiin, mutta suurimmaksi osaksi samaa materiaalikirjoastoa pystyttiin hyödyntämään Helsingin mallissa. Yksittäisinä kuluttajina mallinnettujen kaupunginosien jätevesien lämpötilana käytettiin maaperän lämpötilaa, johon lisättiin kolme astetta. Simuloinnin ja Viikinmäessä tehtyjen lämpötilamittausten vertailussa voitiin päätellä oletus kohtuulliseksi, sillä lämpötilat olivat lähellä toisiaan. Pohjoisesta tunnelista Viikinmäelle saapuva jätevesi jätettiin pois mallista, sillä jätevedestä ei ollut saatavilla lämpötilamittauksia ja tunnelin lämpöhäviöiden määrittäminen tarkasti oli näin mahdollonta. Tarkan mallinnuksen saavuttamiseksi tulisi kaikkien verkostoon syötettävien virtauksien lämpötila tietää tarkasti. Muuten Helsingin mallinnus suoritettiin yhtäläisesti Turun mallinnuksen kanssa.

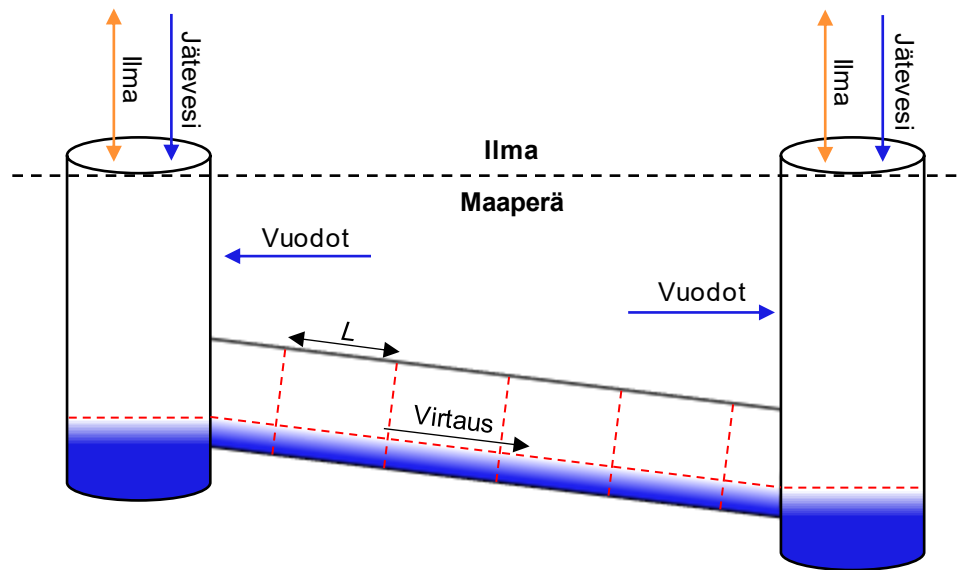
### 4.6 Lämmönsiirtomallin lisääminen Fluidit Sewer -ohjelmaan

Lämmönsiirtomalli kehitettiin osaksi Fluidit Sewer -ohjelmaa, koska alkuperäinen ohjelma ei tukenut lämmönsiirtolaskentaa. Fluidit Sewer -ohjelman hydraulista laskentaa käytettiin tutkimuksessa sellaisenaan, eikä siihen tehty tutkimuksen aikana muutoksia. Lämmönsiirtomallin keskeisin haaste oli löytää tärkeimmät jäteveden lämpötilaan vaikuttavat luonnonilmiöt ja pitää laskenta mahdollisimman yksinkertaisena. Yksinkertaisuuteen pyrittiin laskenta-ajan minimoimiseksi, sillä simulointien kesto Turun ja Helsingin kokoisille jätevesiverkoille ilman lämmönsiirtolaskentaakin kesti jo useita tunteja. Lämmönsiirtoon liittyvien ilmiöiden valinnassa kiinnitettiin huomiota tarvittaviin parametreihin,

jotka haluttiin pitää mahdollisimman helposti mitattavina. Tällä pyrittiin siihen, että vapaita kalibroitava muuttujia olisi mahdollisimman vähän. Useiden kalibroitavien muuttujien ongelma mallinnuksessa on niiden tarvitsemat mittaukset. Lisäksi yksittäisen parametrin arvosta ei voida tehdä johtopäätöksiä, sillä kalibroinnissa muuttujat kompensoivat toisiaan. Fluidit Oy:n teknologiajohtaja Markus Sunelan vastasi lämmönsiirtomallin lähdekoodin kirjoittamisesta, ja mallin laskennan tarkistaminen tehtiin osana tätä diplomityötä.

Lämmönsiirtolaskenta suoritettiin ajasta riippuvana laskentana, jossa virtaus mallinnettiin tulppavirtauksena. Tulppavirtauksessa virtaus jaetaan liikkuviin segmentteihin veden lämpötilaeron mukaan, jossa ilman segmentin pituus asetettiin samaksi veden segmentin kanssa. Segmentit liikkuvat putkivirtauksessa sisään saapuvan virtauksen mukaisesti. Uuden segmentin tilavuus määräytyy hydraulisen laskennan virtaamasta ja aika-askleen pituudesta. Tällöin putken ulostulossa sama tilavuusosuus poistuu putkesta, ja kaikki segmentit liikkuvat eteenpäin poistuvan tilavuuden verran. Yksittäisessä putkessa lämpötilaerot oletetaan niin pieniksi, että jatkuvuusyhtälössä voidaan käyttää tilavuusvirtoja massavirtojen sijaan.

Putkeen saapuva virtaus liitetään putkeen omana segmenttinään tai yhdistetään osaksi seuraavaa segmenttiä, mikäli lämpötilaero näiden kahden segmentin välillä on alle määritetyn toleranssin. Toleranssiksi kahden segmentin lämpötilaerolle asetettiin  $0,5\text{ °C}$ . Kahden segmentin yhdistyessä segmentin uudeksi lämpötilaksi laskettiin segmenttien tilavuusosuuspainotettu keskiarvo. Kuvassa 16 on esitetty kahden solmun välillä kulkeva putki, jossa on yhteensä 12 segmenttiä. Koska laskennassa oletettiin veden ja ilman kulkevan samaa nopeutta, voitiin ilman segmenttien pituus  $L$  laskea suoraan veden segmentin pituudesta. Laskennassa kaikki kaivot olivat täysin sekoittuneita ja sisälsivät aina yhden segmentin sekä ilmalle että vedelle. Kaikkien segmenttien tilavuusosuudet laskettiin virtauksen korkeuden avulla, joka saatiin hydraulisesta laskennasta.



**Kuva 16** Lämmönsiirtolaskennassa käytetty segmenttijako.

Mikäli tietyn segmentin tilavuusosuus muuttui ajasta riippuvassa laskennassa verrattuna edelliseen aika-askeleeseen, laskettiin uusi segmentin lämpötila tilavuusosuuspainotetuna keskiarvona. Jäteveden pinnankorkeuden laskeessa ilman tilavuusosuus kasvoi, jolloin sisään virtaava ilma otettiin verkostoon ulkoilman lämpötilassa.

Segmentteihin jako mahdollisti virtauksen diskretoinnin, jolloin yksittäiselle segmentille tietyllä aika-askeleella voitiin ratkaista lämpötilan muutos. Ilmalle ja vedelle muutos laskettiin alla esitettyjen differentiaaliyhtälöiden mukaisesti:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{A_{wa}h_{wa}(T_a - T_w) - A_w U(T_w - T_g)}{c_{pw} m_w} \quad (4.2)$$

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{A_{wa}h_{wa}(T_w - T_a) - A_a U(T_a - T_g)}{c_{pa} m_a}, \quad (4.3)$$

jossa  $T_w$ ,  $T_a$ ,  $T_g$ ,  $A_{wa}$ ,  $A_w$ ,  $A_a$ ,  $h_{wa}$  ja  $U$  ovat veden, ilman ja maaperän lämpötila, vesi-ilma-rajapinnan pinta-ala, veden märkäpinta-ala, ilman märkäpinta-ala, vesi-ilma-rajapinnan lämmönsiirtokerroin ja putken lämmönsiirtokerroin. Veden ja ilman väliseen konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa fluidien suhteellinen nopeus. Koska simulaattorin laskennassa suhteellinen nopeus oli nolla, laskettiin numeerisella

virtauslaskennalla konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, jota käytettiin vakiona kaikissa putkissa. Veden lämpötilan muutoksessa huomioitiin alun perin myös kitkallisesta virtauksesta aiheutuva lämmönsiirto, mutta se jätettiin lopullisesta laskennasta pois veden liiallisen lämpenemisen johdosta.

Aika-askeleen sisällä suoritettu laskenta voitiin tehdä stationäärisenä. Tästä johtuen lämmönsiirtoprosessien laskenta yksinkertaistui huomattavasti, koska ajasta riippumattomalle lämmönsiirtolaskennalle on olemassa paljon empiirisiin tutkimuksiin perustuvia tunnettuja korrelaatioita. Edellisissä luvuissa 4.2, 4.3 ja 4.4 on esitetty kuinka yhtälöissä (4.2) ja (4.3) olevat parametrit  $h_{wa}$ ,  $U$  ja  $T_g$  on laskettu. Ensimmäisen asteen differentiaaliyhtälöt ratkaistiin numeerisesti toisen asteen Runge-Kutta -menetelmällä, joka tunnetaan myös keskipistemenetelmänä. Keskipistemenetelmä on perinteisen Eulerin menetelmän tapaan explisiittinen menetelmä, mutta ratkaisu on suurilla aika-askeleen arvoilla huomattavasti Eulerin menetelmää tarkempi. Menetelmä perustuu oletukseen lineaarisesta funktiosta, jolloin aika-askeleen seuraavaa arvoa laskettaessa differentiaaliyhtälössä käytetään edellisen arvon sijasta keskiarvoa uudesta ja vanhasta muuttujan arvosta seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t \cdot f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, \frac{\Delta t}{2} f(t_n, T_n)\right), \quad (4.4)$$

jossa  $\Delta t$ ,  $T$  ja  $f$  ovat aika-askeleen pituus, lämpötila ja differentiaaliyhtälöiden (4.2) ja (4.3) oikeat puolet. Alaindeksi  $n$  viittaa tiettyyn aika-askeleeseen. Yhtälön etuna pidetään sen nopeutta verrattuna korkeamman asteen Runge-Kutta -menetelmiin. Kalibroinnin yhteydessä eri Runge-Kutta -menetelmiä verrattiin toisiinsa eri aika-askeleen arvoilla. Lopulliseksi menetelmäksi valittiin keskipistemenetelmä ja aika-askeleen arvoksi 0,1 s. Sekä putkille että kaivoille lämmönsiirto laskettiin yhtäläisesti. Lähdekoodin kirjoittaminen ei kuulunut diplomityöhön, mutta toteutuksen tarkistaminen, ja testaus suoritettiin osana diplomityötä.

## 5 TUTKIMUKSEN TULOKSET

Tässä luvussa esitetään tutkimuksessa lasketut mallinnustulokset. Mallinnustulokset esitetään kalibrointi- ja validointimallille sekä Turun ja Helsingin jätevesiverkostomalleille. Lisäksi kalibroinnin ja validoinnin yhteydessä esitetään herkkyystarkastelun tulokset mallinnuksessa käytetyille parametreille. Koska numeerinen virtauslaskenta oli simulaattorin kehityksessä suuri yksittäinen kokonaisuus, on sen tulokset esitetty myös tässä luvussa. Putkien lämpöhäviökertoimet ja maaperän lämpötilamallinnuksen tulokset on esitetty niiden laskennan yhteydessä luvuissa 4.3 ja 4.4 sekä liitteissä.

Koska tuloksia oli tutkimuksessa paljon, esitetään niitä myös liitteissä. Liitteet 1-5 esittävät Turun mallinnuksen tuloksia koko verkostolle ja liitteet 6-10 vastaavasti Helsingin verkoston tuloksia. Liitteessä 11 ja 12 esitetään maaperän lämpötilalaskennan tulokset sekä putkimateriaalien U-arvot.

### 5.1 Numeerisen virtauslaskennan tulokset

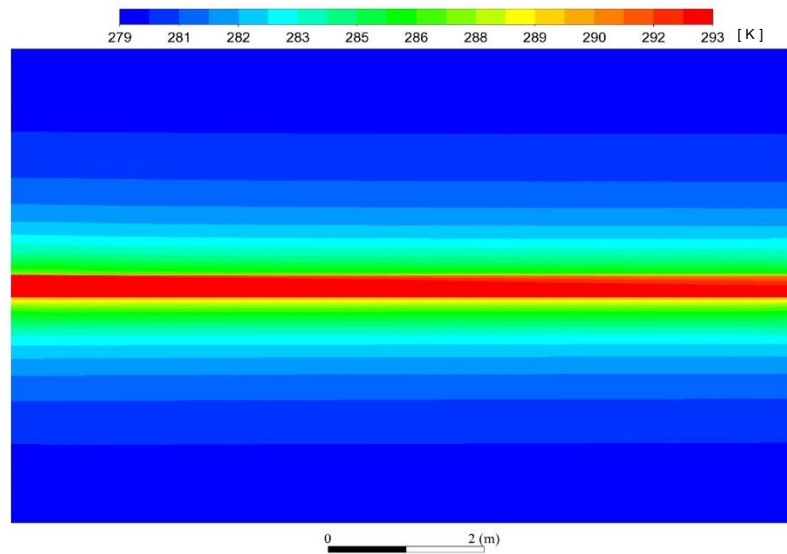
Numeerisen virtauslaskennan tulokset perustuivat Ansys Fluentilla tehtyihin mallinnuksiin luvussa 3.3 esitettyjen menetelmien mukaisesti. Tutkimuksen kannalta kiinnostavimpia tuloksia olivat maaperän lämpötilagradientin paksuus putken ympärillä, virtausnopeudet sekä veden ja ilman välinen lämmönsiirtokerroin. Erityisesti lämmönsiirtokerroimen suuruus vaihteli eri tutkimuksien välillä, joten sen suuruutta haluttiin tarkastella erillisellä laskennalla.

Numeerisen virtauslaskennan tuloksia hyödynnettiin suoraan Fluidit Sewerin kehityksessä ja verkostomallien parametrien määrittämisessä. Lämpötilagradienttia hyödynnettiin putkien U-arvojen laskennassa, jotka lisättiin Fluidit Sewerin materiaalikirjastoon. Ilman ja jäteveden lämmönsiirtokerrointa käytettiin sellaisenaan Fluidit Sewerin lähdekoodissa.

#### Lämpötilagradientti virtauskanavan ympärillä

Kuvassa 17 on esitetty 20 °C virtauksen aiheuttama lämpötilagradientti kolmen metrin etäisyydellä putken ulkoreunasta 6 °C:ssa maaperässä. Virtaus kulkee kuvassa vasemmalta oikealle. Kuvassa 17 lämpötilan muutos on suurimmillaan alle metrin etäisyydellä putken ulkopinnasta. Lämpötilagradientin voimakkuuteen vaikuttaa virtaavan fluidin ai-neominaisuudet, joten putken alapuolella maaperän lämpötila on korkeampi verrattuna

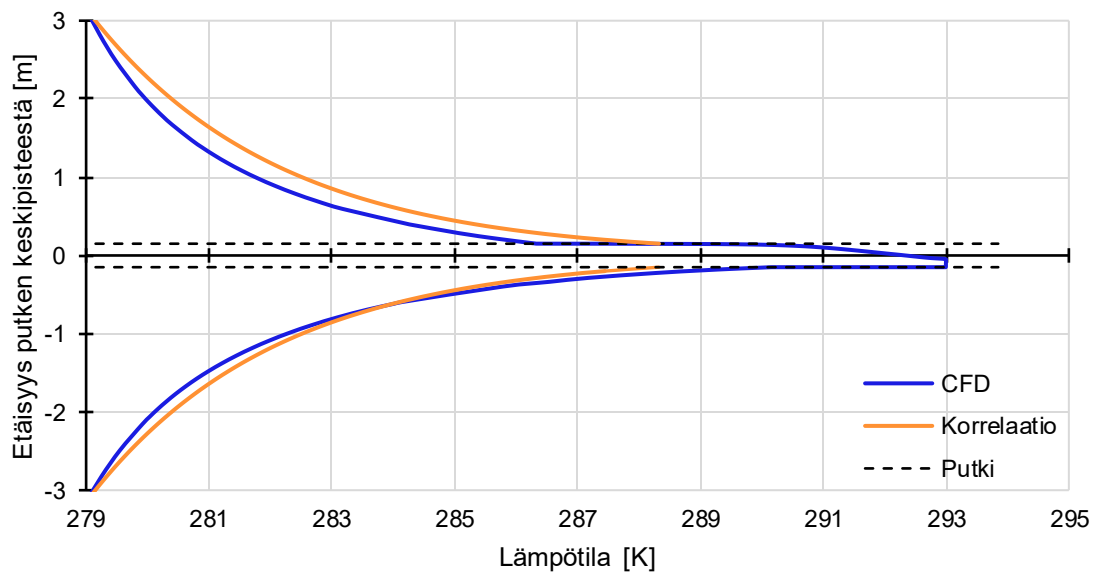
putken yläpuolella olevaan maaperään. Tämä johtuu virtaavan veden korkeasta ominaislämpökapasiteetista, jonka takia se sisältää enemmän lämpöenergiaa saman lämpöiseen ilmaan verrattuna. Lämpötilagradientti on kuitenkin lähes symmetrinen putken ylä- ja alapuolella, vaikka virtaus putkessa ei olekaan homogeeninen. Erityisesti kauempana putkesta lämpötilan muutokset ovat yhtäläiset.



**Kuva 17** Lämpötilagradientti 3 m etäisyydellä putken pinnasta. Putki kuvattu punaisella.

Numeerisessa virtauslaskennassa oli tärkeää selvittää, kuinka paksu lämpötilagradientti oli suurimmillaan, jotta sen vaikutus putken lämpöhäviöissä voitiin huomioida. Näin ollen putken pituudella ei ollut laskennan kannalta merkitystä. Kuvassa 18 esitetään samaa lämpötilagradienttia putken päässä kuin kuvassa 17. Kuvaaja esittää lämpötilagradienttia ykistyiskohtaisesti 0,5 m kohdalla ennen putken ulostuloa, jolloin gradientin todellinen muoto on helpompi havaita verrattuna kuvaan 17. Lisäksi kuvaan on lisätty yhtälöllä (2.9) laskettu lämpötilagradientti maaperässä oranssilla kuvaajalla. Numeerisen virtauslaskennan tuloksista putkesta maaperään siirtyväksi keskimääräiseksi lämpövirraksi saatiin  $43,93 \text{ W/m}^2$  ja putken keskimääräiseksi lämpötilaksi ulkopinnalla  $288,48 \text{ K}$ . Yhtälön (2.8) avulla maaperästä johtuvan eristekerroksen paksuudeksi saatiin  $10,5 \text{ cm}$ , joka vastasi myös kirjallisuuskatsauksessa tehtyjä arvioita maakerroksen paksuudesta (Dürrenmatt & Wanner 2014). Lämpötilagradientti ei ole lineaarinen kuvassa 18, koska kuvan koordinaatisto on karteesisen. Todellisuudessa lämpötilanmuutos on lineaarinen ominaislämpökapasiteetin pysyessä vakiona stationäärisessä tilassa.

## Lämpötilagradientti häirityssä maaperässä



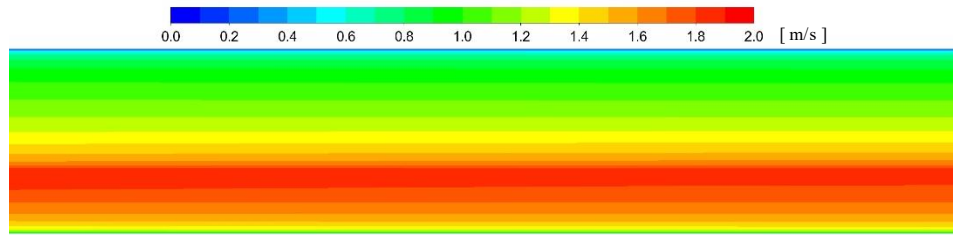
**Kuva 18** Lämpötilaprofiili 0,5 m ennen putken ulostuloa kehittyneessä virtauksessa.

Kuvasta 18 nähdään numeerisella virtauslaskennalla ja korrelaatiolla laskettujen lämpötilagradienttien eroavan hieman toisistaan. Erot johtuvat korrelaation keskiarvotetuista tuloksista koko putken matkalta verrattuna numeerisella virtauslaskennalla raportoituun tarkkaan arvoon 9,5 m:n kohdalla putken sisääntulosta. Eroa aiheuttaa myös se, että numeerisella virtauslaskennalla ei päästy maaperän ulointen laskentakoppien osalta täysin stationääriseen tilaan, sillä simulointiajan olisi pitänyt olla todella pitkä. Näin pitkiä simuloitteja tutkimuksessa ei ollut mahdollista tehdä.

### Jäteveden ja ilman lämmönsiirtokerroin

Putkessa virtaavan veden ja ilman suhteellisen nopeuden selvittäminen liittyi niiden välisen lämmönsiirtokerroimen määrittämiseen. Samalla haluttiin myös varmistua siitä, että putken ilmatilassa ei tapahdu takaisinvirtausta. Kuvassa 19 on esitetty 8 ‰:n kallistuksella oleva putki, jossa hydraulisesti täysin kehittynyt virtaus kulkee vasemmalta oikealle. Aivan putken seinän välittömässä läheisyydessä virtauksen nopeus on kuvan mukaisesti nolla, mutta virtauksen suuruus ei ole negatiivinen missään tilanteessa. Suurimmillaan virtauksen nopeus on noin 2,0 m/s. Ilma kulkee putkessa vettä hitaammin, joka aiheuttaa virtausten välille nopeuseron. Tämän johdosta lämmönsiirto veden ja ilman välillä kasvaa verrattuna tilanteeseen, jossa virtausten välillä ei olisi suhteellista nopeutta. Flinspachin yhtälön (2.30) mukaisesti konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan ratkaista virtausten

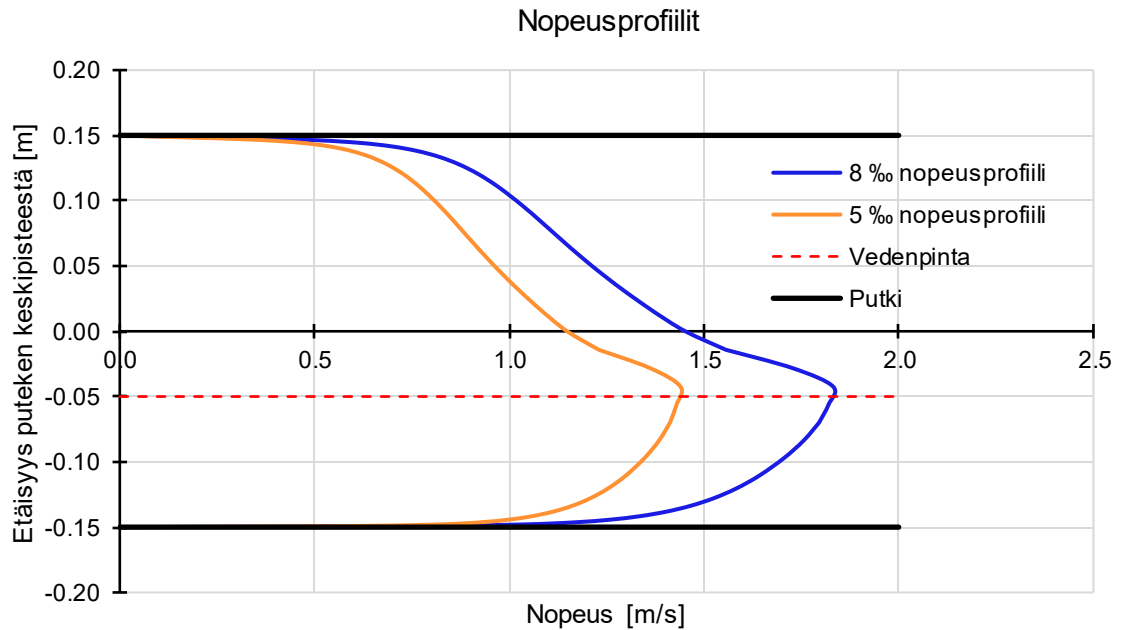
suhteellisen nopeuden avulla, jolloin käyttämällä keskiarvoisia nopeuksia vedelle ja il-  
malle, saadaan lämmönsiirtokertoimeksi  $3,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



**Kuva 19** Nopeuskenttä putkessa kehittyneessä virtauksessa.

Lämmönsiirtokerroin veden ja ilman välillä voitiin määrittää myös laskemalla ilman ja ve-  
den rajakerroksessa siirtyvä lämpövirta. Lämpövirran arvoksi saatiin noin  $0,60 \text{ W}/\text{m}^2$ ,  
josta keskiarvotetulla lämpötilaerolla lämmönsiirtokertoimeksi saatiin noin  $0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .  
Flinspachin yhtälöön nähden kerroin on noin kymmenesosan. Koska kertoimissa oli suuri  
ero, laskettiin lämmönsiirtokerroin vielä yleisesti tunnetulla korrelaatiolla (2.26). Tutki-  
muksen tapauksessa veden ja ilman rajapintaa voidaan pitää tasona, jolloin yhtälöllä  
(2.26) Nusseltin luvuksi ratkaistiin 197,8, josta ilman ja veden väliseksi lämmönsiirtoker-  
toimeksi ratkaistiin  $0,51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Korrelaatiolla laskettaessa aineominaisuudet ilmalle  
otettiin  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja  $101325 \text{ pa}$  paineessa. Suhteelliseksi nopeudeksi asetettiin  
 $0,42 \text{ m/s}$  numeerisen virtauslaskennan mukaisesti. Korrelaation mukaan Flinspachin  
lämmönsiirtokerroimen saavuttamiseksi suhteellisen nopeuden olisi oltava  $5,2 \text{ m/s}$ , joka  
ei ole realistinen nopeus viemärikanavassa (Abdel-Aal et al. 2018). Kuvassa 20 on esi-  
tetty simuloitua nopeusprofiilit  $0,5 \text{ m}$  ennen putken ulostuloa. Kuvasta nähdään yksityis-  
kohtaisesti, kuinka fluidien virtausnopeus kasvaa veden ja ilman rajapintaa lähestyttä-  
essä. Aivan seinämän välittömässä läheisyydessä virtausnopeus on nolla.





**Kuva 20** Virtauksien nopeusprofiilit 0,5 m ennen ulostuloa kehittyneissä virtauksissa.

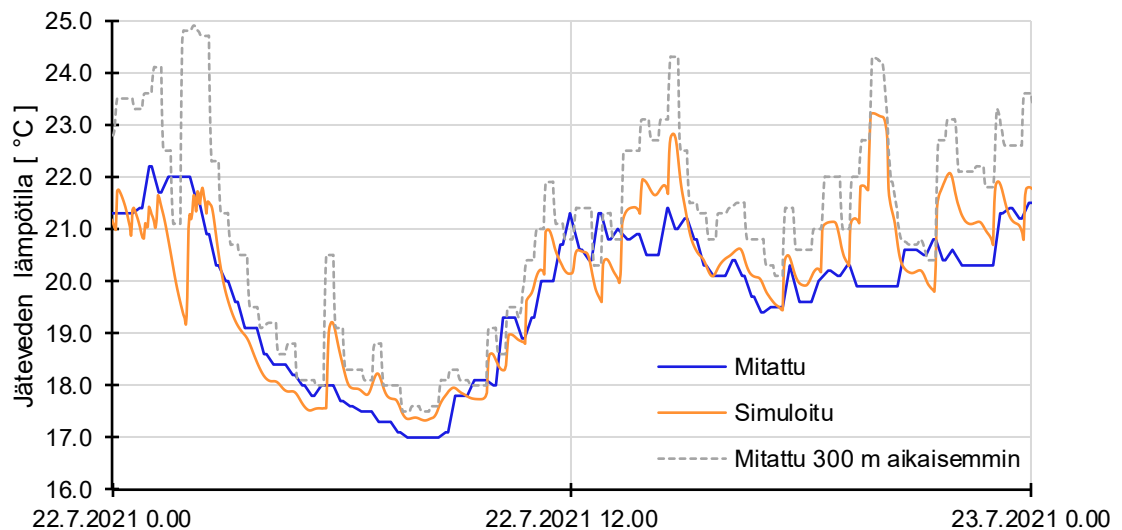
Kuvassa 20 esitetyjä virtauksen nopeusprofiileja tukee aikaisemmat tutkimukset, joissa veden virtausnopeudeksi saatiin 0–2 m/s (Abdel-Aal et al. 2018). Mallinnetut virtausnopeudet vastaavat lähes Manningin yhtälöllä 2.4 laskettuja keskimääräisiä virtausnopeuksia 10 cm syvyiselle virtaukselle. Yhtälöllä 8 ‰:n kaltevuudella nopeudeksi saatiin 1,31 m/s ja 5 ‰:n kaltevuudella 1,03 m/s. Numeerisen virtauslaskennan ja korrelaation välinen pieni ero virtausnopeuksissa ei ole merkittävä konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämisen kannalta, sillä lämmönsiirtoon vaikuttaa lähinnä veden ja ilman suhteellinen nopeus. Korrelaatioilla laskettu virtausnopeus ja konvektiivinen lämmönsiirtokerroin tukevat numeerisella virtauslaskennalla saatuja tuloksia. Näin ollen tutkimuksessa päädyttiin käyttämään konvektiivisena lämmönsiirtokertoimena 0,40 W/(m<sup>2</sup>K) veden ja ilman rajapinnassa.

## 5.2 Mallien kalibrointi, herkkyytarkastelu ja validointi

Fluidit Sewerin kalibrointi suoritettiin pienellä verkostomallilla, jota varten jäteveden lämpötilaa mitattiin kolmesta pisteestä Turun Mäkilänpolulla ja Nummisuutarinkadulla. Simuloituja tuloksia verrattiin mitattuihin tuloksiin, jolloin simulaattorin asetettuja parametreja voitiin säätää vastaamaan paremmin todellisia mitattuja arvoja. Kalibroinnissa mittauspisteessä 1 mitattu virtauksen lämpötilan aikasarja syötettiin sellaisenaan simulaattorille, jolloin mittauspisteissä 2 ja 3 voitiin tarkastella simuloitujen tulosten tarkkuutta. Virtausmittauksia kohteesta ei ollut saatavilla, joten mallissa käytettiin käyttöveden vuosikulutuksiin perustuvia arvoja. Käyttöveden vuosikulutuksesta jokaiselle kuluttajalle

laskettiin keskimääräinen päivittäinen jäteveden tuotto, jota ohjattiin tuntikohtaisella kertoimella. Kertoimen ansiosta asiakkaiden vuorokausikäyttäytyminen saatiin mallinnettua Fluidit Sewerissä todenmukaisesti. Mittareiden 1 ja 2 välillä ei ollut liittyjiä, joten jäteveden jäähtymistä pystyttiin seuraamaan tarkimmin tällä 300 m linjalla. Kuvassa 21 on esitetty simuloinnin tuloksia jätevedenlämpötilalle kahden päivän mittaisessa simuloinnissa.

Mitattu ja simuloitu jäteveden lämpötila



**Kuva 21** Kalibroimattoman mallinnuksen tulos jäteveden lämpötilalle kalibrintimallilla.

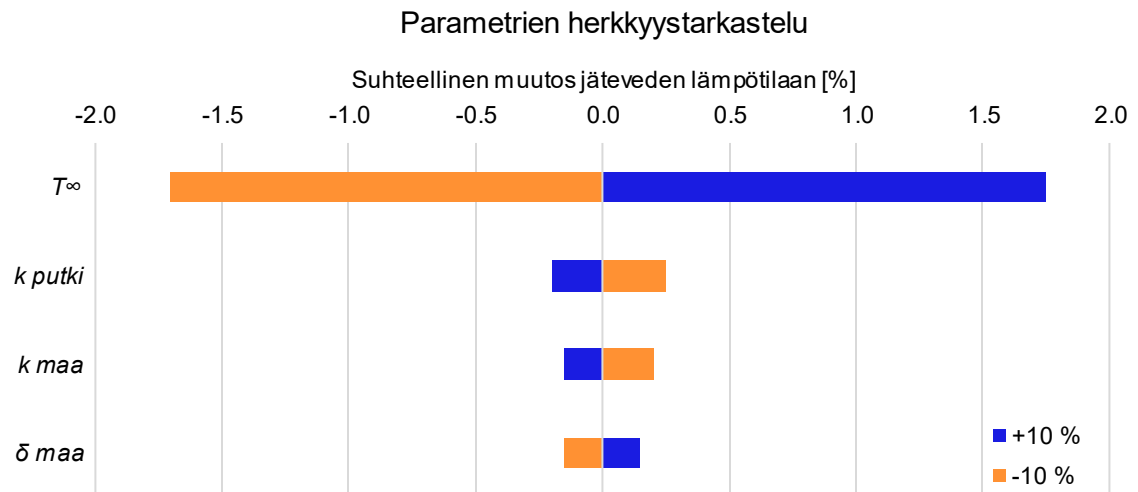
Kuvasta 21 huomataan kuinka mitattu ja simuloitu lämpötila vastaavat profiileiltaan hyvin toisiaan. Simuloituissa tuloksissa on kuitenkin nopeita muutoksia, joita mitatussa lämpötilassa ei näy. Nopeiden muutosten puuttuminen johtuu todennäköisesti mittarin 2 mittausvirheestä, sillä lämpötilan muutokset on mahdollista havaita mittareista 1 ja 3. Mittaria 3 ei käytetty kalibroituvaiheessa tarkkaan analyysiin, sillä mittarien välillä verkoston syötetyn jäteveden lämpötilaa ei tiedetty tarkasti. Mittarin 3 tuloksia voitiin kuitenkin hyödyntää mittarin 2 mittausvirheiden määrittämisessä.

Simuloituista ja mitatuista arvoista laskettiin yhtälöllä 4.1 RMSE-arvo (Root-Mean-Square-Error), joka kuvaa simuloitujen arvojen keskimääräistä virhettä. Simulointi suoritettiin välillä 18.7.2021–26.7.2021, jolloin mitattuja ja simuloituja arvoja oli 4141 kappaletta. Jäteveden lämpötilan RMSE-arvoksi mittarin 2 kohdalla saatiin 0,77 °C. Elías-Maxilin (2015) tutkimuksessa RMSE-arvo oli 1,0 °C ja Dürrenmatin ja Wannerin (2014) tutkimuksessa 0,14 °C. RMSE-arvoa suurentaa huomattavasti mittarin 2 mittauksesta puuttuvat nopeat lämpötilan muutokset. Epätarkkuutta aiheutti myös virtausmittausten puuttuminen, jolloin virtausta jouduttiin arvioimaan käyttöveden kulutuksen perusteella.

Kalibroitavia parametreja oli huomattavasti vähemmän verrattuna muihin vastaaviin tutkimuksiin, sillä mahdollisimman monen parametrin arvot oli pyritty ratkaisemaan fysikaalisesti edellisissä luvuissa esitetyillä menetelmillä. Tutkimuksessa maaperän fysikaaliset ominaisuudet olivat suurin epävarmuustekijä, sillä maaperän koostumuksesta ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Maaperän aineominaisuuksia käytettiin Fluidit Sewer -ohjelman parametrien määrittämisessä, vaikka itse ohjelman laskennassa aineominaisuuksia ei suoraan hyödynnetty. Maaperän aineominaisuuksien kalibrointi suoritettiin maaperän lämpötilajakauman määrittämisen yhteydessä. Aineominaisuuksia säädettiin kirjallisuudessa esitettyjen perusteella, niin että mallinnettu maaperän lämpötila vastaisi mahdollisimman tarkasti Mäkirannan (2020) mittaamia arvoja. Lopulta kalibroitu lämpötila asetettiin Fluidit Sewer- ohjelmaan maaperän lämpötilaksi.

Maaperän lämmönjohtavuuden arvoksi saatiin kalibroinnissa  $2,0 \text{ W/(mK)}$ . Arvot vaihtelivat kirjallisuudesta riippuen  $1,1\text{--}2,4 \text{ W/(mK)}$  (Abdel-Aal et al. 2014, Dürrenmatt & Wanner 2014). Kostealle maaperälle arvot olivat kuitenkin lähempänä arvoa  $2,0 \text{ W/(mK)}$ . Maaperän lämmönjohtavuuden arvoa tutkittiin tarkemmin vielä erillisessä herkkyyssanalyysissä. Maaperän ominaislämpökapasiteetti oli kalibroinnin jälkeen  $1520 \text{ J/(kgK)}$  kirjallisuudesta löytyvien arvojen vaihdella  $830\text{--}2200 \text{ J/(kgK)}$ . Maaperän tiheys oli kalibroinnin jälkeen  $1610 \text{ kg/m}^3$  arvojen vaihdella muissa tutkimuksissa välillä  $1440\text{--}2080 \text{ kg/m}^3$ . (Çengel & Ghajar 2011, Elías-Maxil et al. 2017, Elías-Maxil 2015, Mäkiranta 2020, Ympäristöministeriö 2003) Ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden kohdalla maaperän aineominaisuudet vaihtelivat enemmän tutkimusten välillä. Kalibroituja maaperän aineominaisuuksia käytettiin maaperän lämpötilan selvittämisen lisäksi myös numeerisessa virtauslaskennassa ja jätevesiputkien lämpöhäviökertoimien määrittämisessä. Jätevesiputkien aineominaisuuksia ei kalibroitu, sillä ne olivat hyvin määritetty. Putkien lämmönjohtavuudet on esitetty liitteessä 12.

Jätevesiputkien lämpöhäviökertoimiin vaikutti maaperän lämmönjohtavuuden lisäksi lämpötilagradientin paksuus putken ympärillä, putken halkaisija ja materiaali. Jotta parametrien vaikutuksia jäteveden lämpötilaan voitiin arvioida, suoritettiin kalibrointimallilla simuloiteja, joilla verrattiin parametrien vaikutusta lopulliseen jäteveden lämpötilaan. Vertailtavia parametreja olivat maaperän lämpötila  $T_\infty$ , putken lämmönjohtavuus  $k_{putki}$ , maaperän lämmönjohtavuus  $k_{maa}$  sekä lämpötilagradientin paksuus maaperässä  $\delta_{maa}$ . Kuvassa 22 on esitetty parametrien muutoksen suhde jäteveden suhteelliseen lämpötilan muutokseen 300 m matkalla.



**Kuva 22** Parametrien suhteellisen muutoksen vaikutus jäteveden lämpötilan muutokseen.

Maaperän lämpötilan vaikutus nousi odotetusti suurimmaksi tekijäksi ollen noin 1,7 %. Dürrenmatt ja Wanner (2014) saivat maaperän lämpötilan vaikutuksen olevan 10 %:n muutoksella noin 1 %:n muutoksen jäteveden lämpötilaan. Myös heidän tutkimuksessaan maaperän lämpötila oli suurin vaikuttava tekijä jäteveden lämpötilaan. Jorge Alias-Maxil (2015) sai 20 % muutoksella noin 5,5 % suhteellisen muutoksen. Yleisesti tutkimusten tulokset vastasivat hyvin toisiaan. Suurimpana erona oli lämpötilagradientin paksuuden vaikutus Elías-Maxilin tuloksiin, joissa 20 % muutoksella saatiin aikaan vain noin 0,3 % muutos lämpötilassa. Maaperän yksilölliset aineominaisuudet vaikuttavat kuitenkin viimeiseen tulokseen merkittävästi.

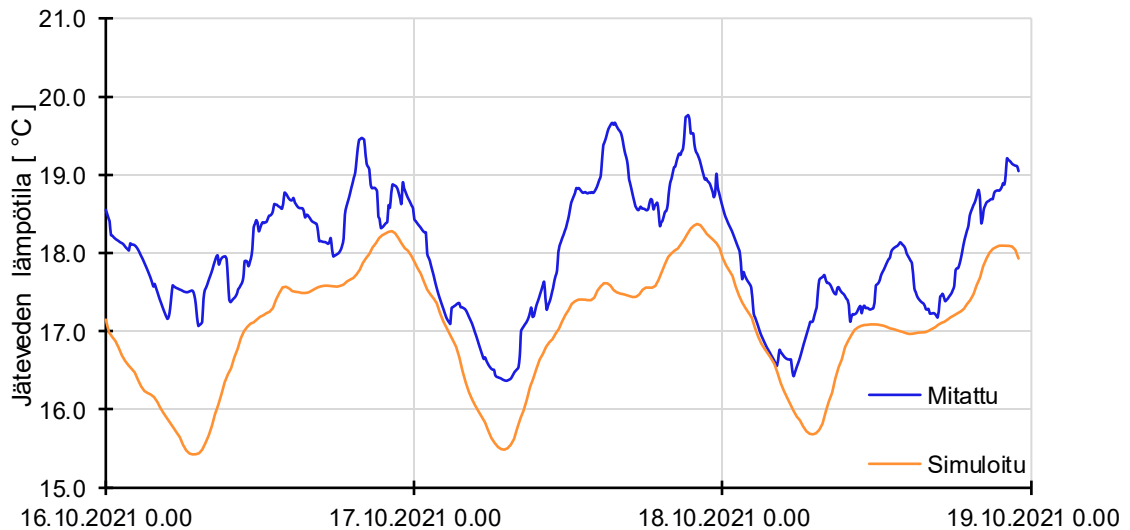
Koska maaperän lämpötilan muutokset vaikuttivat huomattavasti muita parametreja enemmän jäteveden lämpötilaan, ja ensimmäiset verkostosimuloinnit antoivat jo hyvinkin tarkkoja tuloksia, ei aineominaisuuksien arvoja muutettu enää herkkyysoanalyysin jälkeen. Maaperän lämpötilan mallinnus oli kuukauden tarkkuudella, joten 10 % virhe oli täysin mahdollinen. Tästä syystä muiden parametrien tarkentaminen oli tutkimuksen lopputulosten kannalta merkityksetöntä, sillä maaperän lämpötilaa ei voitu tarkentaa ilman erillisiä lämpötilamittauksia. Tästä syystä parametrien kalibroinnit lopetettiin herkkyysoanalyysien jälkeen, jotka osoittivat yhdessä aikaisempien simulointien kanssa nykyiset parametrien arvot tarkoiksi.

Koska latenttilämmön vaikutus mainittiin aikaisemmissä tutkimuksissa merkittäväksi jäteveden lämpötilan kannalta, tutkittiin sitä erillisellä laskennalla. Ensimmäisissä simuloinneissa selvisi nopeasti, että virtauskanavassa oleva ilma tasaantuu useissa tapauksissa lähelle maaperän lämpötilaa. Tästä syystä latenttilämmön vaikutus on suurimmillaan

syksyllä, jolloin ulkoa virtaava kylmä ilma lämpenee virtauskanavassa ja pystyy sitomaan enemmän kosteutta itseensä. Tarkastelussa arvioitiin 1000 m pituisen 300 mm halkaisijaltaan olevan putkikanavan jäteveden lämpötilan muutosta silloin, kun putki on 90 % täynnä ilmaa, jonka suhteellinen ilman kosteus muuttuu 80 %:sta kastepisteeseen. Käytännössä tämä tarkoittaisi koko viemärin tuulettamista 1000 m matkalta. Apuna laskennassa käytettiin X-Steam-ohjelmaa, jolla ilman ja veden aineominaisuudet saatiin laskettua tarkasti. Jäteveden lämpötilan muutos tarkastelussa oli alle 0.1 °C. Lämpötilan muutos jätevetteen oli hyvin pieni suhteessa muista termodynaamisista ilmiöistä johtuvaan lämpötilan muutokseen, kun huomioidaan tarkastelutilanteen äärimmäisyys. Tarkastelu vahvisti hypoteesin, minkä perusteella latenttilämmön laskenta jätettiin pois simulaattorin lähdekoodista.

Kalibroinnin jälkeen tutkimuksessa tehtiin erillinen validointi ennen varsinaisten simuloimien aloittamista. Validoinnissa käytettiin Jollaksen validointimallia aikavälillä 16.10.-19.10.2021. Simulointi oli huomattavasti vaikeampi kalibrointiin nähden, sillä verkosto sisälsi paljon paineellisia osuuksia pienellä alueella. Pumppaamot toivat laskentaan epätarkkuutta, sillä vesi seisojia pitkiä aikoja säiliöissä, joiden termiset ominaisuudet eivät olleet tarkasti tiedossa. Lämpöhäviöinä säiliöille käytettiin suuren betoniputken lämpöhäviökerrointa  $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Kuvassa 23 on esitetty mittarin 2 mittaustuloksia verrattuna simuloituihin lämpötilatuloksiin.

Mitattu ja simuloitu jäteveden lämpötila



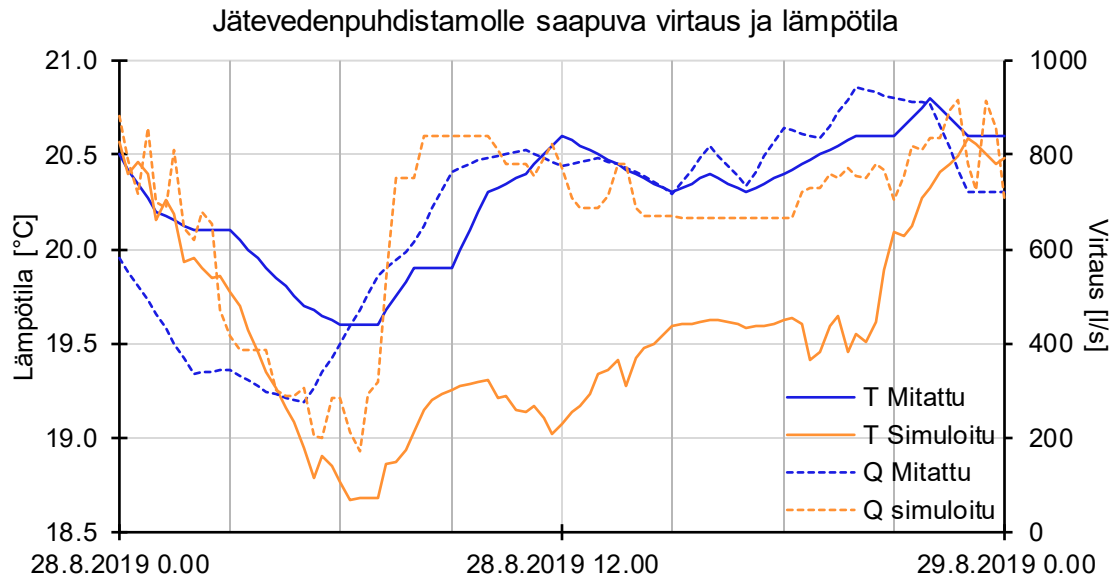
**Kuva 23** Jollaksessa suoritetun lämpötilamittauksen ja simuloinnin tulokset.

Koska validointimallissa oli paljon tuntemattomia virtauksia, voitiin tulosten tarkkuuteen olla tyytyväisiä. Samalla VTT Oy:n tuottamien jäteveden lämpötilakertoimien tarkkuutta pystyttiin arvioimaan, sillä mittarille 2 noin 50 % saapuvasta vedestä oli arvioitu tällä tun-  
 tikohtaisella lämpötilakertoimella. RMSE-arvo kolmen päivän simuloinnille oli 1,07 °C, joka vastaa suuruusluokaltaan kalibrointia. SWMM-HEAT-simulaattorin kohdalla RMSE-  
 arvot vaihtelivat tutkimuksessa 0,67–2,2 °C välillä riippuen mittauskohteesta (Figuroa  
 et al. 2021). Toteutuksiltaan diplomityö ja SWMM-HEAT ovat lähellä toisiaan, joten  
 RMSE-arvojen oletettiin olevan samaa suuruusluokkaa. Validointitulokset vahvistivat  
 uuden simulaattorin toimivuuden, joten käyttö voitiin aloittaa.

### 5.3 Turun jätevesiverkoston mallinnustulokset

Seuraavissa luvuissa esitetään Turun jätevesiverkostolle tehtyjä mallinnuksia, joista en-  
 simmäiset käsittelevät verkoston tilaa ilman lämmön talteenottoa normaalitilassa ja vii-  
 meiset lämmön talteenoton yhteydessä. Mallinnukset esittävät verkoston keskimääräistä  
 käyttäytymistä maaliskuu-, kesä- sekä syyskuussa, ja niitä verrataan jätevedenpuhdistamon  
 mittaustuloksiin. Mallinnusten asetukset on esitetty liitteessä 5.

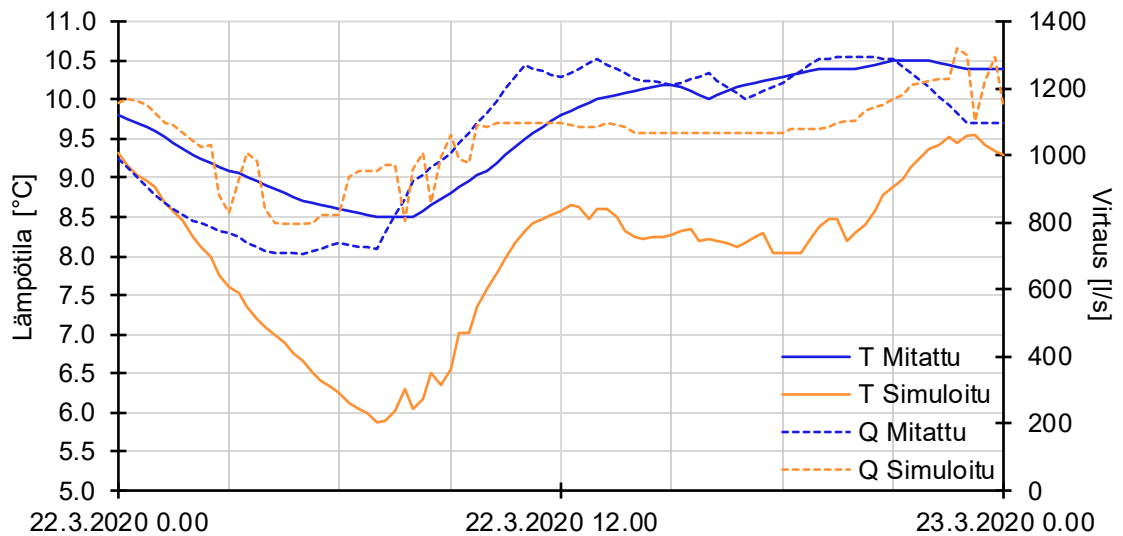
Turun jätevesiverkostomallin tuloksia verrattiin Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla  
 tehtyihin lämpötila- ja virtausmittauksiin. Ensimmäisessä simuloinnissa mallinnettiin al-  
 kusyksen olosuhteita, jotka on esitetty kuvassa 24. Lämpötilan ja virtauksen RMSE-ar-  
 voiksi laskettiin 0,81 °C ja 149 l/s. Päivittäisen virtauksen keskiarvo simuloinnille oli  
 666 l/s ja mitatulle 670 l/s. Mallinnuksessa vuodot oli määritetty vesitaseesta kyseiselle  
 päivälle erikseen, jonka takia keskiarvovirtaukset täsmäsivät todella hyvin. Myös maa-  
 perän lämpötila laskettiin vuoden 2019 syksyille erikseen. Muiden skenaarioiden kohdalla  
 käytettiin kuukausikohtaisia vuotoja ja maaperän lämpötilat perustuivat ilman lämpötila-  
 mittauksiin 14 vuoden ajalta. Simulointituloksia ei keskiarvotettu, joten simuloinneissa on  
 havaittavissa nopeita heilahteluita, jotka johtuvat pumppausten käynnistyksistä ja sam-  
 mutuksista. Virtauksen ja lämpötilan nopea pudotus yöllä selittyy pumppausten mallin-  
 nustechnisestä toteutuksesta, jossa ennen jätevedenpuhdistamo-oleva suuri pump-  
 paamo sammuu hetkellisesti yöllä sille annettujen ohjausten mukaisesti. Ohjaukset eivät  
 täysin vastanneet todellisuutta, mutta niihin ei tehty muutoksia, sillä mallin hydraulinen  
 laskenta haluttiin pitää Turun aikaisemman mallin kanssa yhtäläisenä. Kaikissa mallin-  
 nuksissa on havaittavissa vuorokausivaihtelua, joka johtuu ihmisten veden kulutustottu-  
 muksista. Kokonaisuudessaan tulokset vastasivat hyvin mitattuja tuloksia, kun huomioidaan  
 verkoston suuruus ja kompleksisuus.



**Kuva 24** Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset.

Turussa vuotojen lämpötilaksi asetettiin maaperän lämpötila, jolloin maaliskuussa niiden lämpötilaksi laskettiin  $3,94\text{ °C}$ . Maaperän lämpötila mallinnettiin erikseen monen vuoden keskiarvona, joka aiheutti virhettä poikkeuksellisen lämpimässä vuodessa 2020. Maaliskuun yksittäisen päivän tuloksia esitetään kuvassa 25. Virtauksen ja lämpötilan RMSE-arvoiksi saatiin  $157\text{ l/s}$  ja  $1,75\text{ °C}$ . Mallinnuksessa maaperän alhainen lämpötila laski jäteveden lämpötilaa verrattuna mitattuun arvoon, mutta virtauksien osalta simulaatio vastasi hyvin mitattua virtausta Kakolanmäellä. Kuukausikohtaisissa mallinuksissa historiadatasta etsittiin mallinnetun kuukauden päivistä se, joka vastasi virtauksien osalta keskimääräistä päivää. Tämä johtui siitä, että mitatussa datassa oli paljon heilahteluita, joita mallinnuksessa ei yritettykään ottaa huomioon. Tämälaisia päiviä olivat esimerkiksi hyvin sateiset päivät.

### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila maaliskuussa

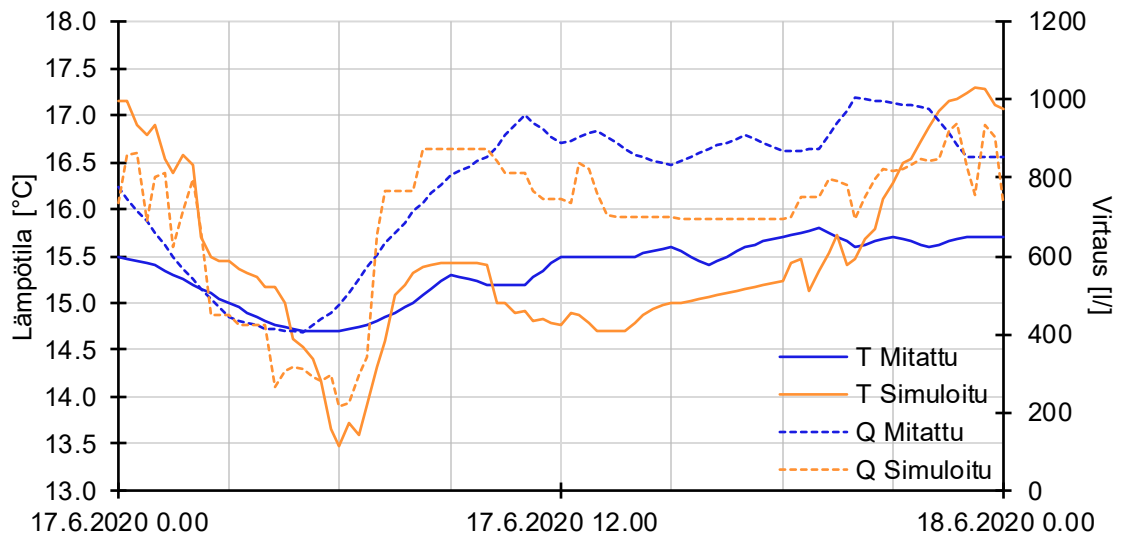


**Kuva 25** Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset maaliskuussa.

Kesäkuussa RMSE-arvoksi virtaukselle laskettiin 145 l/s ja lämpötilalle 0,79 °C. Tulokset on esitetty kuvassa 26. Lämpötila ja virtaus vastaavat mitattuja arvoja huomattavasti paremmin verrattuna maaliskuuhun. Maaperän ja vuotojen lämpötila mallinnuksessa oli 11,34 °C ja naapurikunnilta saapuvan jäteveden 12,34 °C. Kesäkuussa ulkopuolisten virtausten ja vuotojen lämpötilan arviointi onnistui tarkemmin maaliskuuhun nähden, jossa lämpötilataso laski huomattavasti kylmistä virtauksista johtuen. Kaikissa skenaarioissa vuotojen ja naapurikunnilta saapuvien vesien lämpötilat arvioitiin systemaattisesti, jotta tuloksia olisi helpompi vertailla keskenään. Tästä syystä esimerkiksi maaliskuuta kuvaavassa skenaariossa naapurikunnilta saapuvien jätevesien lämpötilaa ei nostettu, vaikka lämpötila taso oli selkeästi liian matala lämpötilan ollessa 4,94 °C. Kesä- ja syyskuulle arvioidut lämpötilat vuodoille ja ulkopuolisille jätevesille sopivat hyvin.



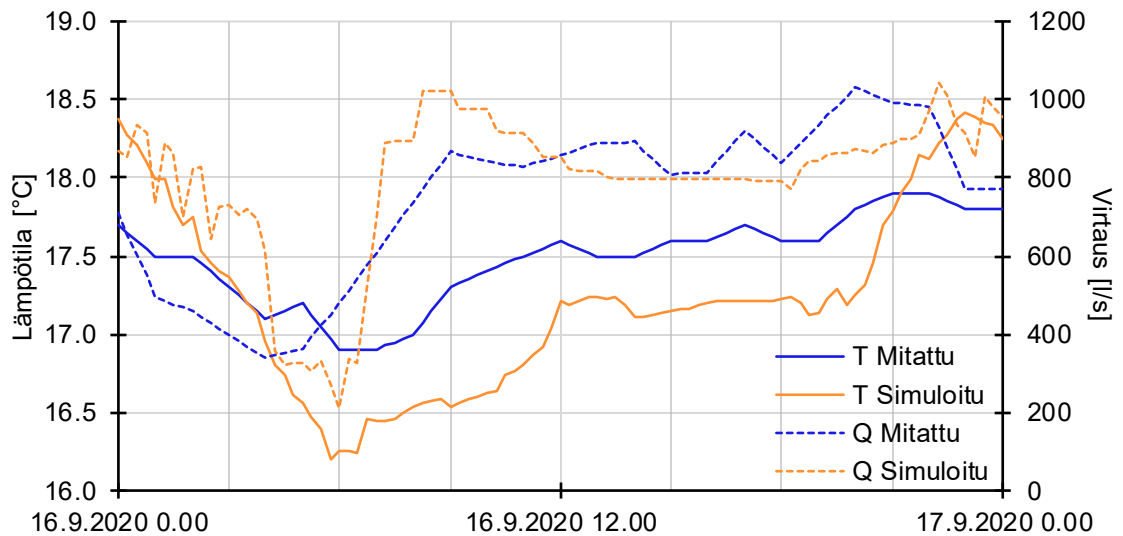
### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila kesäkuussa



**Kuva 26** Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset kesäkuussa.

Viimeisenä mallinnuksena ennen lämmön talteenottomallinnuksia simuloitiin syyskuun tilannetta, jonka tuloksia on esitetty kuvassa 27. Syyskuussa mallinnuksen RMSE-arvot virtaukselle ja lämpötilalle olivat 171 l/s ja 0.49 °C. Jäteveden lämpötilassa havaitaan selvästi lämpimän maaperän vaikutus, sillä lämpötila pysyy jatkuvasti yli 16 °C:ssa. Esimerkiksi maalikuussa alimmat mitatut lämpötilat olivat noin puolet tästä lämpötilasta. Simuloinnissa lämpötila yliarvioidaan illalla kulutuksen kasvaessa. Mittausten perusteella yöllä lämpötila putoaa hetkellisesti noin puoli astetta, mutta nousee päivän aikana tasaisesti alkuperäiseen arvoonsa. Simuloinnissa päivän sisäiset muutokset lämpötilassa ovat suurempia verrattuna mitattuihin arvoihin. Mittausten perusteella kuluttajista johtuvat päivän sisäiset lämpötilan heilahdukset eivät näy enää yhtä vahvasti jätevedenpuhdistamolla, vaikka kalibrointimittausten yhteydessä selvä muutos oli havaittavissa rakennusten läheisyydessä. Ilmiötä selittää mitattujen arvojen risteily, jossa kuluttajien maksimi ja minilämpötilat eivät osu täydellisesti samoilta ajanhetkelle. Mallinnuksessa kuluttajien vuorokausivaihtelut mallinnettiin identtisesti, jolloin vaikutus kumuloituu jätepuhdistamon lämpötilassa. Tästä syystä simuloituissa lämpötiloissa vuorokauden sisäiset heilahtelut olivat suurempia verrattuna mitattuihin arvoihin. Virhettä mallinnuksessa aiheuttaa myös VTT Oy:n epätarkemmat kuluttajien lämpötila-aikasarjat, joita käytettiin lopullisissa mallinnuksissa. Vanhat kuluttajien lämpötila-aikasarjat muutettiin uusiin VTT:n jatkotarkasteluiden mahdollistamiseksi. Aikaisemmat aikasarjat perustuivat puhtaasti jäteveden lämpötilamittauksiin ilman stokastisia malleja.

### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila syyskuussa



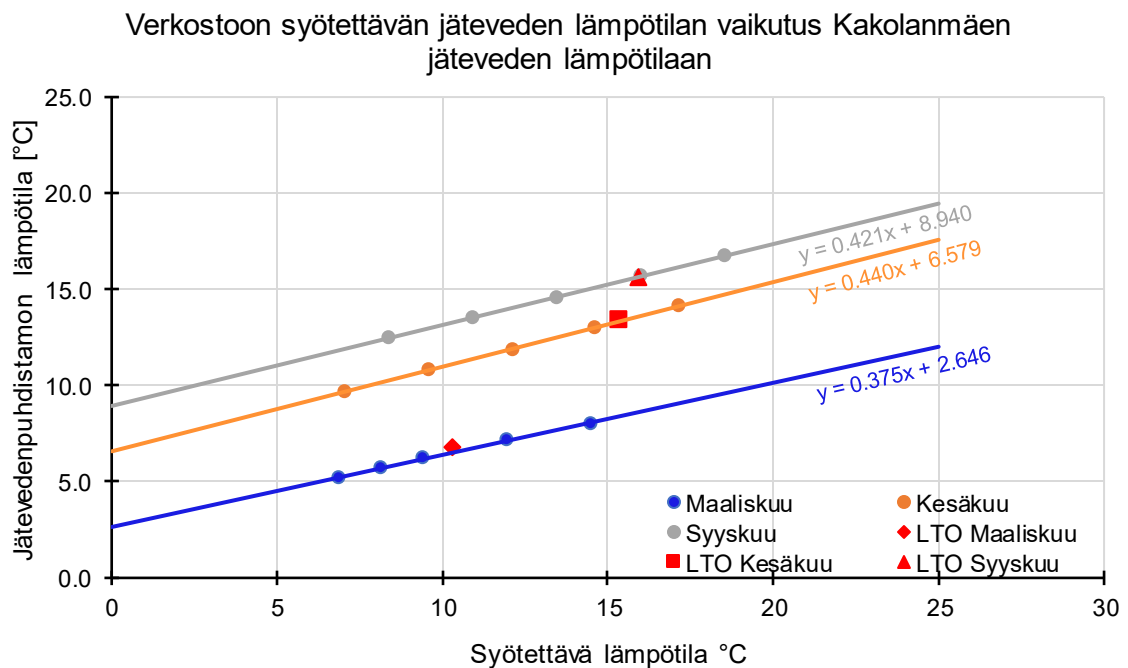
**Kuva 27** Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset syyskuussa.

Liitteissä 1, 2, 3 ja 4 esitetään edellä esitettyjen kuukausiskenaarioiden tuloksia koko verkostolle. Liitteissä 2, 3 ja 4 esitetään vuorokauden keskimääräiset virtaukset, lämpötilat ja lämpöhäviöt verkostossa. Liitteiden kuva oikeassa alareunassa esittää lämpötilaa lämmön talteenoton yhteydessä. Kuvista on selkeästi havaittavissa Turun keskustastaan tulevat suuret ja lämpimät virtaukset, jotka pumpataan lähellä sijaitsevaan Kakolanmäen jätevedenpuhdistamoon. Lisäksi liitteessä 1 esitettyjen liitospiteiden sijainnit on mahdollista löytää myös lämpötilan perustella, sillä virtaukset tulevat selkeästi yleistä lämpötilatasoa kylmempänä verkostoon. Tämä vastaa todellisuutta, sillä jätevedet ovat virranneet pitkiä matkoja verkostossa ennen niiden liitosta Turun verkostoon. Maaliskuussa virtaukset ovat suuremmat verrattuna kesä- ja syyskuuhun, mikä selittyy sulamisvesien suurena määränä. Sama ilmiö laskee myös jäteveden lämpötilaa huomattavasti. Lämpöhäviöitä esiintyy erityisesti suurissa putkissa, joissa virtaukset ovat suuria. Samankokoisten betoni- ja muoviputkien välillä erot eivät olleet suuret, mutta asbestiputket johtivat lämpöä lähes 1,5-kertaa betoniputkia tehokkaammin. Metalliputkien kohdalla suhteelliset häviöt olivat suuret, mutta yleisesti pienistä virtauksista johtuen kokonaishäviöt jäivät pieniksi.

Hukkalämmön talteenoton vaikutusta jätevedenpuhdistamolle saapuvan veden lämpötilaan analysointiin ensin syöttämällä verkostomallille jätevettä eri lämpötiloissa. Jokaiselle tarkasteltavalle kuukaudelle tehtiin simulointeja viisi kappaletta eri syötettävillä lämpötiloilla ja datapisteisiin sovitettiin suora kuvan 28 mukaisesti. Syötettävä lämpötila

pysyi vakiona koko päivän mittaisen simuloinnin ajan. Ainoastaan liitteessä 1 esitettyjen naapurikuntien jätevedet syötettiin eri vakioämpötilassa, joka oli yhden asteen maape-  
rän lämpötilaa korkeampi. Sovitteiden avulla jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteve-  
den lämpötilaa voitiin arvioida syötettävän jäteveden lämpötilan funktiona.

Toisessa lämmön talteenoton tarkastelussa jokaiselle kuukaudelle tehtiin tarkempi simu-  
lointi VTT:n tuottamien lämpötila-aikasarjojen mukaisesti. Aikasarjat asetettiin eri raken-  
nustyypeille liitteen 1 mukaisesti, jossa kappalemäärällisesti kerrostaloja oli noin 11 % ja  
muuta rakennuksia 89 %. Jako suoritettiin syötettävän päivittäisen jätevesivirtaaman pe-  
rusteella, jolloin kerrostaloiksi laskettiin kaikki yli 5 m<sup>3</sup>/d tuottavat rakennukset, rivitaloiksi  
1–5 m<sup>3</sup>/d ja omakotitaloiksi alle 1 m<sup>3</sup>/d tuottavat rakennukset. Suhteessa virtaamaan  
vettä tuli kerrostaloilta 51 % rivi- ja omakotitaloilta 13 % ja naapurikunnista 36 %. Läm-  
pötila-aikasarjoissa lämmön talteenotto rakennuksilla huomioitiin laskemalla syötettävää  
jäteveden lämpötilaa. Rivi- ja omakotitalojen aikasarjat olivat samat, mutta kerrostalolla  
käytettiin matalampaa lämpötilaa. Simuloinnin jälkeen koko mallin rakennusten jäteve-  
destä laskettiin massapainotettu keskiarvolämpötila syötettävälle jätevedelle ja jäteve-  
denpuhdistamolle saapuvalla jätevedelle. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 28 punai-  
silla symboleilla aikaisemmin laskettujen sovitteiden kanssa.



**Kuva 28** Jätevesiverkostoon syötettävän jäteveden lämpötilan vaikutus jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan. Suorat kuvaavat yleisesti jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaa syötettävän lämpötilan funktiona. Punaiset symbolit kuvaavat lämmön talteenoton vaikutusta puhdistamon lämpötilaan eri kuukausina.

Verkostoon syötettävien lämpötilojen kohdalla naapurikunnista saapuvat jätevedet on huomioitu kuvassa 28. Rakennuksilta syötetyn jäteveden lämpötila oli kesä- ja syyskuussa 20, 16, 12, 8 ja 4 °C ja maaliskuussa 20, 16, 12, 10 ja 8 °C. Verkostoon saapuvat ulkoiset jätevedet laskevat verkostolle syötettävän kokonaisvirtauksen lämpötilan kuvan 28 mukaisesti. Esimerkiksi maaliskuussa rakennuksilta syötetty 20 °C virtaus sekoittuu naapurikunnista saapuvan 4.94 °C virtauksen kanssa, jolloin kokonaisvirtauksen lämpötila on kuvaajan mukaan noin 14 °C x-akselilta luettuna. Tällöin y-akselilta voidaan lukea kokonaisvirtauksen loppulämpötila jätevedenpuhdistamolla, joka on noin 8 °C.

Virtauksen lämpötila jätevedenpuhdistamolla on suoraan verrannollinen syötettävän jäteveden lämpötilaan kuvan 28 mukaisesti. Syyskuussa maaperän lämpötila on korkeimmillaan ja lämpöhäviöt ympäristöön pienimmillään. Mikäli syyskuussa jätevesi syötetään vain nolla-asteisena, lämmittää maaperä, ilma ja vuotovedet sen noin 8,9 °C:seen sen saapuessa jätevedenpuhdistamolle. Maaliskuussa maaperän lämpötila on puolestaan alimmillaan, ja tästä johtuen lämpöhäviöt ympäristöön ovat suuret. Maaliskuussa lämpötila ei nouse yli 12.5 °C jätevedenpuhdistamolla, vaikka syötettävän jäteveden lämpötila olisi 25 °C. Kesäkuu sijoittuu maaperän lämpötilan mukaan maaliskuu- ja syyskuun välille, jolloin myös jäteveden lämpötila pysyttelee tällä välillä. Maaperän lämpötila vaikuttaa lämpöhäviöiden suuruuteen, mutta samalla vuotovesien lämpötilaan. Keskimääräisten kuukausikohtaisten vuotovesien määrät skenaarioissa ovat maaliskuu-, kesä- ja syyskuussa suhteessa laskutettuun jäteveeseen 73 %, 17 % ja 34 %. Vuotovesien lämpötila vaikuttaa paljon jäteveden loppulämpötilaan jätevedenpuhdistamolla, koska vuotovedet syötettiin verkostomallille maaperän lämpötilassa.

Syötettävän lämpötilan ja loppulämpötilan suhde on selkeästi lineaarinen kuvassa 28. Lineaarisuus johtuu lämpötilaan vaikuttavista lineaarisista ilmiöistä. Lämpöhäviöt verkostossa riippuvat lineaarisesti jäteveden ja maaperän lämpötilaerosta yhtälön 2.8 mukaisesti. Jäteveden lämpötilan laskiessa myös lämpöhäviöt laskevat. Toinen ilmiö liittyy jätevesien sekoittumiseen verkostossa. Koska tietynä kuukautena verkoston vuotojen lämpötila pysyy vakiona, muuttuu vain kuluttajilta syötettävän jäteveden lämpötila. Verkostossa vuoto- ja jätevesien sekoituessa seoksen loppulämpötila riippuu lineaarisesti jäteveden alkulämpötilasta. Tästä syystä syötettävän jäteveden lämpötilan suhde puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan on lineaarinen.

## 5.4 Helsingin jätevesiverkoston mallinnustulokset

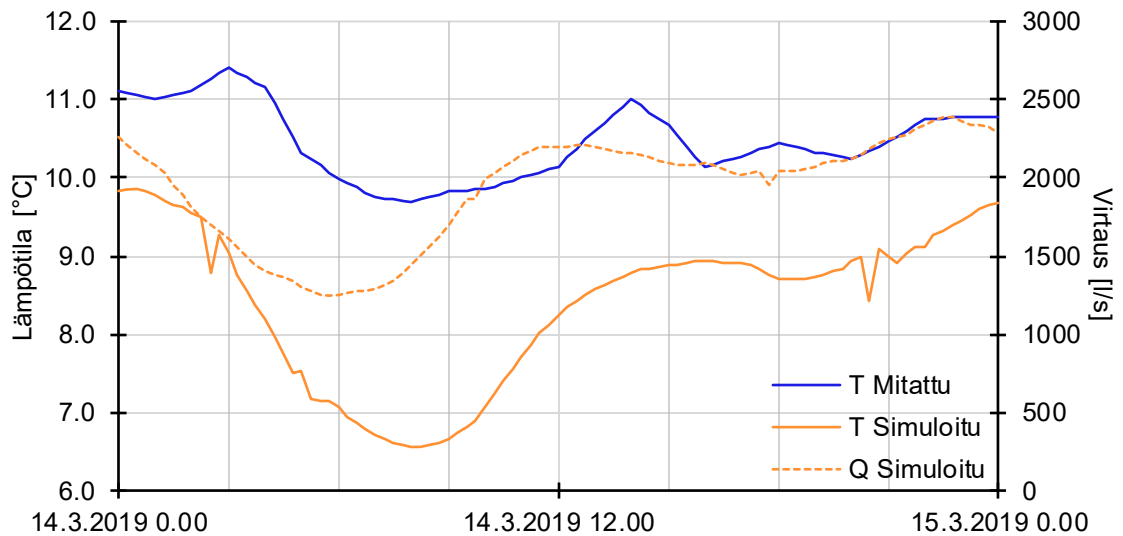
Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle tehtiin vastaavat mallinnukset kuin Turussa. Poikkeuksena mallinuksissa jätettiin pois erillinen yhden päivän validointimallinnus, sillä aineistoja ei ollut tarpeeksi näin tarkkaan mallinnukseen. Viikinmäen verkoston

ulkopuolelta saapuvia virtauksia oli mallissa paljon, ja ne tulivat maantieteellisesti lähempää Turun malliin verrattuna. Ulkopuolisten virtausten lämpötilaksi kalibroitiin maaperän lämpötila, johon lisättiin kolme astetta, koska ulkopuolisten virtausten lämpötilaa ei tunnettu. Mallinnuksessa huomioitiin liitteessä 6 esitetty verkosto. Tarkkaa tuntikohtaista mittausta saapuvasta virtauksesta jätevedenpuhdistamolle ei ollut saatavilla, joten tuntikohtaisia arvoja ei voitu verrata simuloitujen tulosten kanssa. Tutkimuksessa käytettiin mallissa valmiina olevia virtauksia. Jätevedenpuhdistamolla lämpötilamittauksia oli saatavilla vuosilta 2019 ja 2020 vain hiekanerotuksen yhteydestä. Tästä syystä aikaisempien vuosien perusteella lämpötilaa laskettiin  $0,53\text{ °C}$ , jotta tuloksissa ei huomioitaisi jätevedenpuhdistamon sisällä tapahtuvaa jäteveden lämpenemistä. Viikinmäen verkoston tarkemmat asetukset on esitetty liitteessä 6.

Viikinmäen verkostomallinnuksesta teki erityisen haastavan mittausten vähäisyys ja ulkopuolisten virtausten suuri määrä. Viikinmäelle pohjoisesta tunnelista saapuvan jäteveden lämpötilaa ei tunnettu, eikä tunneliin liittyviä verkostoja ollut verkostomallissa. Tästä syystä tunnelista saapuva jätevesi jätettiin mallintamatta. Tämä johtui siitä, että kalibroinnissa yhteydessä kyseinen virtaus olisi vaikuttanut liian vahvasti kalibrointiin vääristäen keskusta-alueen tuloksia.

Ensimmäisessä mallinnuksessa tutkittiin jäteveden lämpötilaa maaliskuussa, jonka tuloksia esitetään kuvassa 29. Mallinnuksessa lämpötilan RMSE-arvoksi laskettiin  $2,16\text{ °C}$ . Lämpötila jää selkeästi matalammaksi mitatuista arvoista samoin kuin Turussa, mutta päivittäiset muutokset ajoittuvat mitatun lämpötilan kanssa samoille ajanhetkille. Alimmillaan lämpötila laskee mitatussa jäteveden lämpötilassa hieman alle  $10\text{ °C}$ :seen ja mallinnuksessa  $6,6\text{ °C}$ :seen. Muutokset mallinnetussa lämpötilassa ovat selkeästi suuremmat, mikä johtuu mallissa käytetyistä aikasarjoista, joissa hetkittäiset muutokset kumuloiduvat jätevedenpuhdistamolla. Todellisuudessa kaikilta rakennuksilta syötettävän jäteveden virtauksen ja lämpötilan lokaalit minimi- ja maksimit eivät osu täsmälleen samoille ajanhetkille, jolloin yhteisvaikutus ei kumuloidu jätevedenpuhdistamolla yhtä vahvasti. Myös vuotojen ja muiden ulkoisten virtausten mallinnustarkkuus vaikuttaa verkoston lämpötilaa.

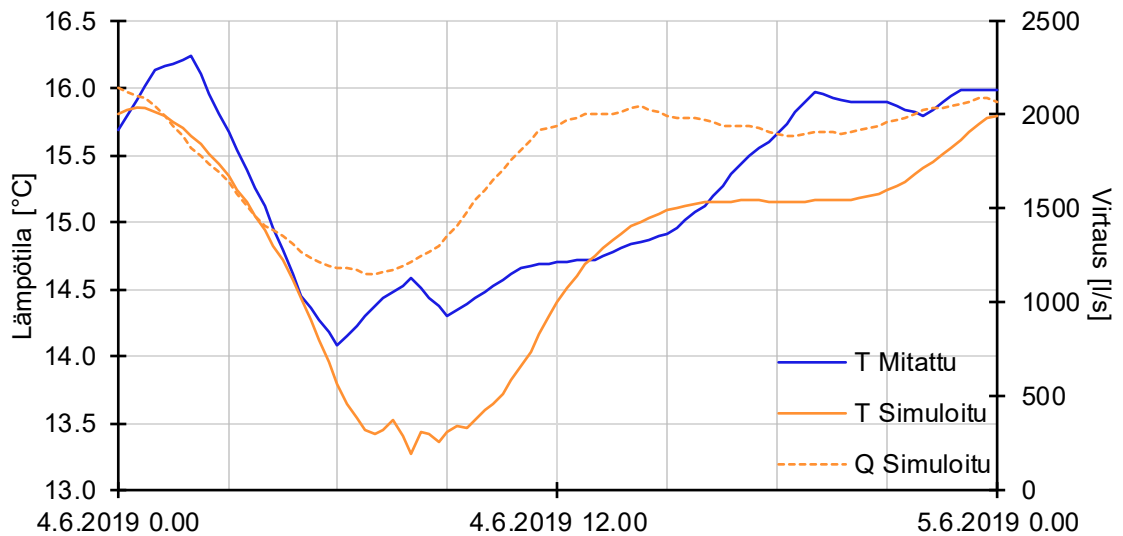
### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila maaliskuussa



**Kuva 29** Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset maaliskuussa.

Kesäkuun mallinnustuloksia esitetään kuvassa 30. Lämpötilan RMSE-arvoksi jätevedenpuhdistamolla laskettiin 0,55 °C. Tulokset olivat huomattavasti tarkempia verrattuna maaliskuun mallinnukseen, jonka RMSE-arvo oli 2,16 °C. Kesäkuussa päivän sisäinen jäteveden lämpötila kohoaa korkeimmillaan noin 16 °C:seen ja laskee alimmillaan noin 14 °C:seen. Matalimpien lämpötilojen ero mallinnuksen ja mitatun jäteveden lämpötilan välillä on noin 0,6 °C. Lämpötila pysyy reilusti yli 11 °C:seen, joka oli maaliskuun korkein lämpötila. Mallinnettu lämpötila putoaa edelleen hetkellisesti liian alhaiseksi, mutta ero mitattuihin lämpötiloihin ei ole suuri. Suuremmat muutokset lämpötilassa mitattuun lämpötilaan verrattuna johtuvat todennäköisesti samasta syystä kuin maaliskuun kohdalla. Kesäkuu on mallinnuksellisesti maaliskuuta helpompi, sillä sulamisvedet eivät vaikuta verkoton vuotoihin yhtä paljon. Kylmien vuotojen määrä keväällä vaikuttaa jäteveden lämpötilaan merkittävästi. Kesällä tasaisemmat vuodot ja korkeampi maaperän lämpötila takaavat stabiilimmat olosuhteet, jossa jäteveden lämpötilan päivittäisiä muutoksia on vähemmän.

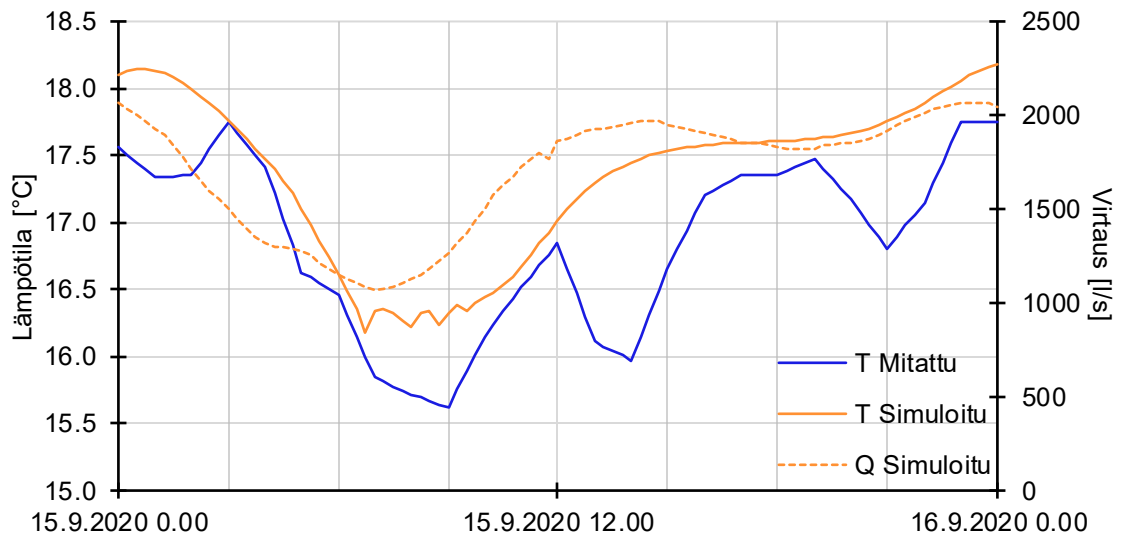
### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila kesäkuussa



**Kuva 30** Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset kesäkuussa.

Syyskuussa maaperän lämpötila oli mallinnuksessa korkeimmillaan, joten myös jäteveden lämpötila oli korkeampi verrattuna kesä- ja maaliskuuhun. Korkeimmillaan lämpötila on noin 18 °C ja alimmillaan noin 16 °C, joka vastasi kesäkuussa päivän korkeinta lämpötilaa. Syyskuun mallinnustuloksia esitetään kuvassa 31. Mallinnuksen RMSE-arvo oli 0.6 °C, joka vastasi suuruusluokaltaan kesäkuun arvoa. Mitatussa lämpötilassa on normaalista poikkeavia muutoksia, jotka viittaavat mittausvirheisiin tai verkoston epätavalliseen toimintaan, johon mallinnus ei pysty reagoimaan. Mikäli lämpötilan pudotuksia mitatussa lämpötilassa ei olisi, vastaisi mallinnus mitattua lämpötilaa todella tarkasti. Kaikissa Viikinmäen lämpötilamittauksissa pitää muistaa kuitenkin virhe, joka johtuu mittauksessa hiekanerotuksessa. Vaikka lämpötilaa laskettiin historiadatan perusteella vastaamaan sisään saapuvan jäteveden lämpötilaa, ei se täysin vastaa totuutta.

### Jätevedenpuhdistamolle saapuva virtaus ja lämpötila syyskuussa



**Kuva 31** Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla tehdyt mittaukset ja simulointitulokset syyskuussa.

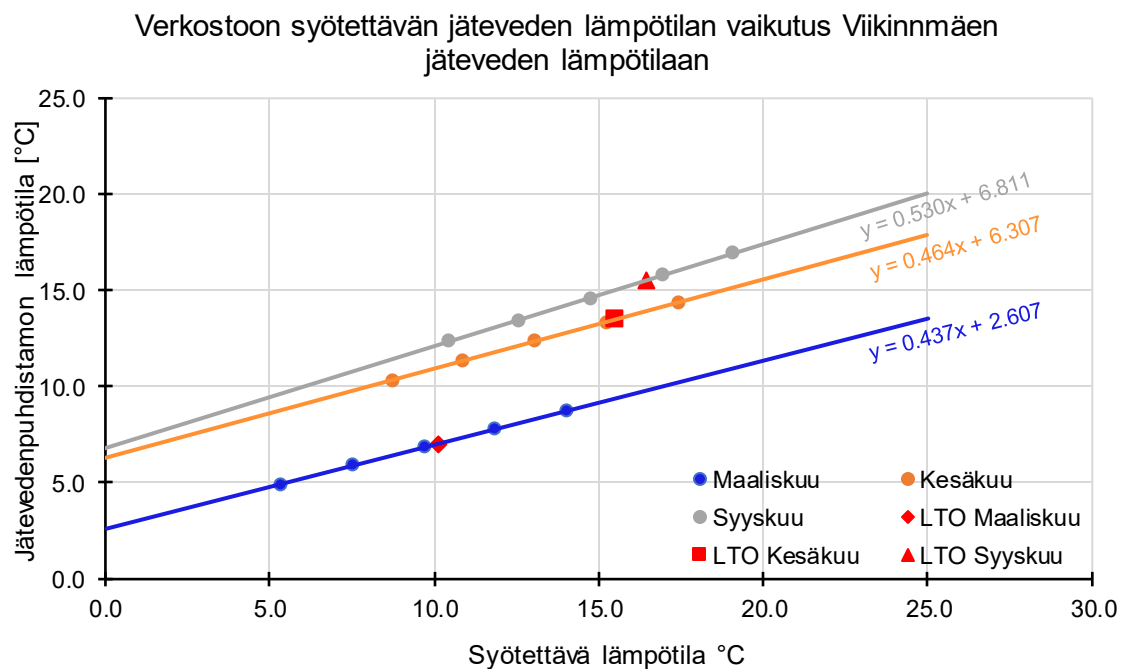
Liitteissä 7, 8 ja 9 esitetään koko Helsingin jätevesiverkoston tuloksia edellä esitetyille kuukausittaisille mallinnuksille. Kuvissa normaalit tilanteet viittaavat verkoston toimintaan ilman lämmön talteenottoa ja oikeassa alakulmassa lyhenteellä *LTO* viitataan lämmön talteenottoon. Liitteessä 6 on esitetty yleisesti Helsingin jätevesiverkosto ja lämmön talteenoton yhteydessä tehty jako eri rakennustyyppeihin. Kuten kuvista on mahdollista huomata, pysyvät päävirtauskanavien virtaamat maalisi- ja kesäkuussa samassa suuruusluokassa. Syyskuussa virtaamat ovat paikoittain yhtä suuruusluokkaa pienemmät. Suuria lämpötilaeroja verkoston sisällä ei ole, sillä jätevettä syötetään suhteellisen tasaisesti verkoston eri osissa toisin kuin Turussa, jossa keskusta-alue erottui selvästi lämpimämpänä. Kuukausikohtaiset lämpötilaerot riippuvat vahvasti maaperän ja vuotojen lämpötilasta, mikä näkyy yleisenä muutoksena jäteveden lämpötilassa kuukausien välillä. Lämpötilaparametrit on esitetty liitteessä 10. Lämpöhäviöt ovat malliskuussa suurimmillaan, mutta selkeitä pitkiä putkiosuuksia, joissa häviöt olisivat selkeästi muuta verkostoa suuremmat ei ole havaittavissa.

Lämmön talteenottoa Helsingin jätevesiverkostossa tutkittiin kahdella tavalla samoin kuin Turun verkon kohdalla. Ensimmäisessä tarkastelussa verkostomallille syötettiin jätevettä eri lämpötiloissa. Syötettävät lämpötilat rakennuksilta olivat 20, 16, 12, 8 ja 4 °C. Kuten kuvasta 32 huomataan, vaikuttaa ulkopuoliset virtaukset jäteveden lämpötilaan laskemalla esimerkiksi syyskuussa kokonaisvirtauksen lämpötilan 19 °C:seen rakennuksilta syötettävän jäteveden ollessa 20 °C. Verkostomallin ulkopuoliset virtaukset syöttivät



verkostoon jätevettä kolme astetta maaperää korkeammassa lämpötilassa. Nämä liittypisteet on esitetty punaisella liitteessä 11. Kuvassa 32 x-akselilta luettavassa syötettävässä lämpötilassa ei huomioitu vuotovesiä.

Toisessa tavassa tutkia lämmön talteenottoa rakennuksilta syötätettävän jäteveden lämpötilaa muutettiin rakennustyyppin mukaan. Jako suoritettiin yhtäläisesti Turun mallin kanssa jakamalla syötettävän virtauksen lämpötila rakennustyyppin virtaaman mukaan. Helsingin verkostossa 73 % rakennuksista laskettiin rivi- tai omakotitaloiksi ja 27 % kerrostaloiksi. Jakoa havainnollistetaan liitteessä 6. Virtaamiin suhteutettuina vastaavat luvut olivat rivi- ja omakotitaloille 4 %, kerrostaloille 56 % ja verkoston ulkopuolelta saapuville virtauksille 40 %. Lämmön talteenotto mallinnuksessa kulmakertoimissa oli suurempia eroja Turun mallinnukseen verrattuna. Kulmakerroin edustaa puhdistamolle saapuvan jäteveden ja syötettävän jäteveden lämpötilan suhdetta. Näin ollen esimerkiksi kesäkuussa yhden asteen lasku syötettävän jäteveden lämpötilassa tarkoittaa 0,46 °C asteen laskua jäteveden lämpötilaan puhdistamalla.



**Kuva 32** Jätevesiverkostoon syötettävän jäteveden lämpötilan vaikutus jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan. Suorat kuvaavat yleisesti jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaa syötettävän lämpötilan funktiona. Punaiset symbolit kuvaavat lämmön talteenoton vaikutusta puhdistamon lämpötilaan eri kuukausina.

Helsingin verkostolle tehdyt hukkalämmön talteenotto mallinnukset vastasivat lämpötilojen puolesta Turun verkostolle tehtyjä mallinnuksia. Tulosten lineaarisuudesta kerrotaan Turun mallinnustulosten yhteydessä luvussa 5.3, ja Turun ja Helsingin mallinnusten tuloksia vertaillaan tarkemmin luvussa 6.3.

## 6 MALLINNUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Lopullisia simuloiteja suoritettiin yhteensä 46 kappaletta, joissa keskimääräinen simuloituaika oli 3 tuntia. Simuloinnit laskettiin tavallisella kannettavalla tietokoneella, jonka prosessorina toimi Intelin 4-ytiminen i7-6820HQ. Näihin simuloiteihin ei laskettu kalibrointi- tai validointisimuloiteja, jotka olivat huomattavasti nopeampia pienistä verkostomalleista johtuen. Mallinnusten tarkoituksena oli selvittää, miten verkostojen lämpötilat muuttuivat syötettävän virtauksen lämpötilan muuttuessa. Tällä muutoksella simuloitiin kiinteistöille integroituja lämmönvaihtimia, joilla jätevedestä saatiin lämpöenergia uudelleen rakennusten hyödynnettäväksi.

Tämä luku keskittyy erityisesti Turun ja Helsingin verkostojen mallinnustulosten analysoimiseen hukkalämmön talteenoton kannalta. Luvussa ei analysoida simulaattorin kehityksessä mallinnettuja tuloksia. Simulaattorin kalibrointiin ja validointiin liittyvät analyysit on esitetty niiden tulosten yhteydessä luvussa 5.

### 6.1 Lämmön talteenoton vaikutukset Turun jätevesiverkostossa

Turussa lämmön talteenotto suoritettiin vain liitteessä 1 esitetyissä kohteissa, joten naapurikunnista saapuville jätevesille ei tehty lämmön talteenottoa. Lämmön talteenoton vaikutuksia verkoston lämpötilaan esitetään maaliskuu-, syys- ja kesäkuussa liitteissä 2, 3 ja 4. Maaliskuu on lämmön talteenoton kannalta haastavin, sillä jäteveden lämpötila on paikoitellen noin 5 °C ilman lämmön talteenottoa. Puhdistamolle saapuva jätevesi mallinnuksessa oli noin 8,0 °C ja lämmön talteenoton kanssa 6,8 °C. Lämpötilan lasku ei aiheuta suurempaa tukosriskiä, sillä kirjallisuuskatsauksessa yli 5 °C:een lämpötilassa ei havaittu olevan muutosta jätevesiverkoston toimintaan (Abdel-Aal et al. 2019). Lämpötilan lasku vaikeuttaa kuitenkin Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon toimintaa, sillä puhdistusprosessi heikkenee nopeasti saapuvan jäteveden lämpötilan laskiessa alle 11 °C:n (Ahonen 2021). Erityisen paljon lämpöenergiaa on tarjolla Turun keskustassa, jossa lämpötila ilman talteenottoa on 12–16 °C ja sen kanssa noin 8–12 °C. Suurin virtaus keskustassa on Itäisellä Rantakadulla, jossa virtaama on noin 97 l/s. Suuret lämpötilat ja virtaukset johtuvat tiiviistä kerrostalorakentamisesta, joten kauempana keskustasta virtausten lämpötila laskee. Keskustasta saapuva lämmin jätevesi sekoittuu kylmän jäteveden kanssa ennen jätevedenpuhdistamoa, jolloin lämpötilaerot tasoittuvat. Maaliskuussa yhden asteen lämpötilamuutos syötettävässä jätevedessä vastaa 0,38 asteen muutosta jätevedenpuhdistamolla. Lämpöhäviöissä säästetään 4,9 MW ottamalla lämpöenergia

talteen jo rakennuksilla verrattuna perinteiseen lämmön talteenottoon jätevedenpuhdistamolla.

Kesäkuussa maaperä on huomattavasti maaliskuuta lämpimämpi, mikä näkyy puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilassa, joka on ilman lämmön talteenottoa 15,6 °C ja sen kanssa 13,3 °C. Lämmön talteenotto ei häiritse verkoston tai puhdistamon toimintaa. Virtaus Itäisellä Rantakadulla on noin 56 l/s, joka laskee huomattavasti sateiseen maaliskuuhun nähden. Keskustan lämpötila ilman lämmön talteenottoa on 18–22 °C ja sen kanssa noin 12–16 °C. Kesäkuussa yhden asteen lämpötilamuutos syötettävässä jätevedessä vastaa 0,44 asteen muutosta jätevedenpuhdistamolla. Koska kesäkuussa maaperän lämpötila on yli 11 °C, alkaa maaperä lämmittämään jätevettä, mikäli jäteveden lämpötila lasketaan alle 11 °C:n. Lämpöhäviöissä säästetään 4,4 MW suorittamalla lämmön talteenotto rakennuksilla. Kesäkuu ei ole rakennusten lämmittämisen kannalta otollisin kuukausi, koska lämmityksen tarve on vähäinen. Liitteestä 11 kuitenkin nähdään kuinka marraskuussa maaperän lämpötila vastaa lähes kesäkuun lämpötilaa. Näin ollen marraskuussa lämmön talteenotto jätevedestä onnistuu lähes vastaavasti kesäkuuhun nähden. Vielä joulukuussakin maaperään varastoitunut lämpöenergia pystyy lämmittämään jäteveden noin 10 °C:seen.

Syyskuussa jäteveden lämpötila Kakolanmäellä on 17,5 °C ja lämmön talteenoton yhteydessä 15,6 °C. Koska maaperä on hyvin lämmin, voidaan rakennuksilta syötetyn jäteveden lämpötila laskea jopa 5 °C:seen, jolloin jätevedenpuhdistamolle saapuva jätevesi ehtii lämmitä 11 °C:seen. Mikäli naapurikunnilta saapuvan jäteveden lämpötila pysyy normaalina, saapuu Turun rakennuksilta syötetty 4 °C jätevesi lopulta sekoittumisen jälkeen 12,5 °C jätevedenpuhdistamolle. Yhden asteen muutos syötettävässä jätevedessä vastaa näin ollen 0,42 asteen muutosta puhdistamolle saapuvassa jätevedessä. Koska jätevettä voidaan jäähdyttää alkusyksyllä eniten, on lämmön talteenottopotentiaali tällöin suurin. Syyskuussa Itäisen Rantakadun virtaus vastaa kesäkuun virtaamaa, mutta yhtä selkeää lämpötilaeroa keskustan ja muun verkoston välillä ei enää ole. Lämpöhäviöissä voidaan säästää noin 3,3 MW toteuttamalla lämmön talteenotto jo jätevettä syötävillä rakennuksilla.

## 6.2 Lämmön talteenoton vaikutukset Helsingin jätevesiverkostossa

Helsingin verkostossa lämmön talteenotto mallinnettiin rakennuksilla, jotka on esitetty liitteessä 6. Mallinnettavat skenaariot olivat maalissyys- ja kesäkuu, ja niiden mallinustulokset on esitetty liitteissä 7, 8 ja 9. Lämmön talteenoton kannalta maaliskuu on oletettavasti haastavin, sillä Turun aikaisemmat tulokset tukivat tätä havaintoa.

Verkoston lämpötila ei kuitenkaan laske alle 5 °C:n, joten rasvoista johtuvaa tukosriskiä ei lämmön talteenotosta ei ole odotettavissa (Abdel-Aal et al. 2019). Myöskään jäätyminen vaaraa verkostossa ei ole, koska lämpötilat pysyvät selvästi jäätymlämpötilan yläpuolella. Maaperän lämpötila 1,6 m:n syvyydellä maaliskuussa oli mallinnuksen mukaan noin 4 °C, joten tämän kylmemmäksi jätevesi ei voi jäähtyä ilman lämmön talteenottoa. Viikimäen jätevedenpuhdistamolle jätevesi saapuu 8,5 °C:ssa ja lämmön talteenoton yhteydessä 7,0 °C:ssa, joten lämpötila laskee noin 18 %. Talteenotossa on syytä huomioida, ettei sitä mallinnettu ulkopuolisille virtauksille, jolloin niiden lämpötila pysyi ennallaan. Syötettävässä lämpötilassa yhden asteen muutos vaikutti 0,44 astetta puhdistamolle saapuvassa jäteveden lämpötilassa. Verkoston lämpöhäviöt verkostossa laskevat lämmön talteenoton vaikutuksesta keskimäärin 6,4 MW verrattuna tilanteeseen, jossa lämpö otettaisiin talteen vasta jätevedenpuhdistamolla. Maaliskuussa hukkalämmön talteenotto jätevedestä vaikuttaa mallinnustulosten perusteella haastavalta jätevedenpuhdistamon kannalta, jossa puhdistusprosessi heikkenee lämpötilan laskiessa alle 11 °C:n. Jotta jätevesi saapuisi puhdistamolle yli 11 °C:ssa tulisi syötettävän kokonaisvirtauksen oltava yli 17 °C sisältäen ulkoiset jätevedet.

Kesäkuussa jätevedenpuhdistamolle saapuva jätevesi on noin 15 °C ja lämmön talteenoton yhteydessä 13,5 °C. Näin ollen lämpötila taso pysyy reilusti yli 11 °C:n jätevedenpuhdistamolla, joten lämpötilan lasku ei häiritse puhdistusprosessia. Verkoston toimintaan lämpötilan alenemisella ei ole myöskään suurta vaikutusta. Liitteestä 8 nähdään, kuinka lämpötila pysyy kauttaaltaan 12–14 °C keskusta-alueella lämmön talteenoton aikana ja noin 18–20 °C ilman talteenottoa. Koska maaperän lämpötila on marraskuussa lähes sama kesäkuuhun verrattuna, voidaan lämmön talteenotto olettaa toimivaksi ratkaisuksi myös marraskuussa. Verkoston lämpöhäviöt pienevät keskimäärin 6,1 MW verrattuna perinteiseen lämmön talteenottoon jätevedenpuhdistamolla.

Syyskuussa jätevesi saapuu jätevedenpuhdistamolle 17,4 °C:ssa ja lämmön talteenoton yhteydessä 15,5 °C. Liitteessä 9 esitetään verkoston tuloksia syyskuussa. Ilman lämmön talteenottoa jäteveden lämpötila on tasaisesti 18–20 °C ja lämmön talteenoton yhteydessä 12–16 °C. Koska maaperän lämpötila on syyskuussa korkeimmillaan, jätevesi jäähtyy verkostossa vain vähän. Verkostossa ei ole juurikaan lämpöhäviöitä lämmön talteenoton yhteydessä. Hetkellisesti maaperä jopa lämmittää jätevettä. Rakennuksilla tehdyn lämmön talteenoton yhteydessä lämpöhäviöissä säästetään 7,9 MW verrattuna tilanteeseen, jossa lämpö otettaisiin talteen vasta jätevedenpuhdistamolla. Verkoston lämpötilataso ei luonnollisesti aiheuta tukos- eikä jäätymisriskejä.

### 6.3 Tulosten vertailu

Turun ja Helsingin tuloksia vertaillaessa on tärkeää muistaa, että verkot ovat hyvin erilaisia monessa suhteessa. Viikinmäellä virtaamat ovat suurempia ja ulkoisten virtausten tuntemattomia lämpötiloja oli huomattavasti enemmän. Helsingin keskusta on pääasiassa sekaviemärialueita, joten hulevedet vaikuttavat todellisuudessa voimakkaasti verkoston lämpötilaan. Turussa naapurikunnista saapuvat virtaukset saapuivat verkostoon vain kolmesta liittymispisteestä, jotka on esitetty liitteessä 1. Toisaalta mallintamattomien liittymispisteiden takana on verkostoa useita kymmeniä kilometrejä, mikä vaikuttaa lämpötilatasoon huomattavasti. Lisäksi kummassakin verkostossa putkimateriaalien käyttö oli täysin yksilöllistä. Muun muassa edellä esitettyjen erojen takia tuloksia ei voi verrata suoraan keskenään.

Taulukkoon 2 on kerätty lämmön talteenoton vaikutuksia jäteveden lämpötilaan kummassakin verkostossa eri kuukausina. Tulokset on esitetty myös edellisissä luvuissa 6.1 ja 6.2 muiden tulosten yhteydessä yksityiskohtaisemmin. Yleisesti lämmön talteenoton vaikutuksista voidaan sanoa, että se ei vaikuta itse verkoston toimintaan, mutta jätevedenpuhdistamolla liian alhainen lämpötila voi aiheuttaa ongelmia erityisesti helmi-huhtikuussa. Syötettävän jäteveden lämpötilan muutos ei muuta jäteveden lämpötilaa jätevedenpuhdistamolla yhtä paljon. Mallinuksissa keskimäärin yhden asteen muutos vaikutti puhdistamolla noin 0,44 astetta.

**Taulukko 2** Lämmön talteenoton vaikutus jäteveden lämpötilaan jätevedenpuhdistamolla.

	Puhdistamo [°C]	LTO Puhdistamo [°C]	Muutos [°C]	Muutos [%]
<b>Kakolanmäki</b>				
maaliskuu	8.0	6.8	-1.2	-15.4
syyskuu	17.5	15.6	-2.0	-11.2
kesäkuu	15.6	13.3	-2.2	-14.3
<b>Viikinmäki</b>				
maaliskuu	8.5	7.0	-1.6	-18.2
syyskuu	17.4	15.5	-1.9	-11.2
kesäkuu	14.9	13.5	-1.4	-9.7

Koska maaperän lämpötilalla on hyvin suuri vaikutus jäteveden lämpötilaan, voidaan lämpöenergiaa kerätä jätevedestä helpoiten kesän aikana ja sen jälkeen. Oletus perustuu liitteessä 11 esitettyyn maaperän lämpötilaan. Selkeää rajaa lämmön talteenotolle on vaikea arvioida, koska vuosien ulkolämpötilat vaihtelevat voimakkaasti. 14 vuoden mediaanilämpötilat Etelä-Suomessa kuitenkin viittaavat siihen, että kesäkuusta joulukuuhun lämmön talteenotto olisi helpoin toteuttaa. Tammikuusta toukokuuhun maaperän

lämpötila on huomattavasti kylmempi, jolloin jäteveden lämpötila voi laskea puhdistamolla liian alhaiseksi. Maaliskuun mallinuksissa jäteveden lämpötila puhdistamoilla ilman talteenottoakin oli selkeästi alle 11 °C, joten lämpöenergian poistaminen jätevedestä tähän aikaan todennäköisesti häiritsee puhdistamoiden toimintaa. Lisäksi erityisesti sulamisvesien aikaan jäteveden lämpötila putoaa entisestään. Mallinuksissa huomioitiin vuotovedet, mutta ei hulevesiä ei huomioitu.

Etuna lämmön talteenoton toteuttamisessa itse kiinteistöillä on lämpöhäviöiden minimointi verkostossa. Mikäli lämmön talteenotto suoritettaisiin vasta jätevedenpuhdistamolla, ehtisi huomattavasti suurempi määrä lämpöenergiaa siirtymän maaperään. Helsingin verkostossa säästöpotentiaali oli huomattavasti Turun verkostoa suurempi. Tämä johtui siitä, että Turussa lämpöenergia on keskittynyt lähemmäksi Kakolanmäen jätevedenpuhdistamoa, joka sijaitsee aivan Turun keskustan läheisyydessä. Tällöin vesi ei ehdi jäähtyä verkostossa ennen sen päätymistä jätevedenpuhdistamolle. Helsingin keskustasta Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle on pidempi matka, jolloin jätevesi menettää energiaa matkalla puhdistamolle. Keskusta on myös levittänyt laajemmalle alueelle verrattuna Turun keskustaan. Lämpöhäviötehoihin vaikutti myös virtausten suuruudet, jotka olivat Helsingissä suuremmat. Lisäksi Helsingin mallissa ulkoiset virtaukset syötettiin verkostoon korkeammassa lämpötilassa, joka lisäsi Helsingin lämpöhäviöitä entisestään verrattuna Turun malliin.

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiristyvät ilmastotavoitteet kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi ovat ajaneet yhteiskuntaa etsimään vähäpäästöisempiä energiantuotantoratkaisuja. Erityisesti kivihiilen poltosta luopuminen kaukolämmön energialähteenä jättää lämmön tuotantoon vajeen, joka on täytettävä uusilla lämmön tuotantoratkaisuilla. Viime vuosina erityisesti matalan lämpötilan energialähteet ovat kasvattaneet suosiotaan myös keskitetyssä energiantuotannossa lämpöpumpputeknologioiden kehittyessä. Matalan lämpötilan energialähteistä erityisesti hukkalämmön talteenottoon on kiinnitetty huomiota. Hukkalämmöllä tarkoitetaan erilaisissa prosesseissa syntyviä energiavirtoja, joita ei hyödynnetä prosessin jälkeen. Hukkalämmön hyödyntäminen on erityisen tärkeää, koska lämmön tuottamiseen on käytetty resursseja, jotka menetetään lopullisesti, mikäli jäännöslämpöenergiaa ei kerätä talteen. Hyvä esimerkki hukkalämmön talteenotosta on jätevedenpuhdistamoilla sijaitsevat lämmönvaihtimet, jotka keräävät puhdistusprosessin jälkeen jätevedestä lämpöenergiaa käytettäväksi uudelleen puhdistamon omaan tarpeeseen ja lähialueen rakennusten lämmittämiseen.

Lämpöenergiaa kerätään jätevedestä tyypillisesti vasta jätevedenpuhdistamolla, jolloin jätevesi on jo luovuttanut osan energiastaan maaperään ja ilmaan virratessaan jätevesiverkostossa. Tästä syystä lämmön talteenotto olisi energiatehokkuuden kannalta kannattavinta mahdollisimman lähellä jäteveden syntypistettä. Tällöin jokaisessa rakennuksessa olisi oma lämpöpumppu, jolla lämpöenergia saataisiin kerättyä takaisin kiinteistön käyttöön. Suomessa lämmön talteenottoa jätevedestä ei ole tehty isossa mittakaavassa ennen jätevedenpuhdistamoita. Tästä syystä lämmön talteenoton vaikutusta jätevesiverkoston lämpötilaan ja lämpöhäviöihin ei tiedetty. Tässä tutkimuksessa Turun ja Helsingin jätevesiverkoista rakennettiin fysikaaliset laskentamallit, joiden avulla verkostojen lämpötiloja voitiin tutkia eri vuodenaikoina erilaisissa skenaarioissa. Koska sopivia laskentamalleja ei ollut käytettävissä, Fluidit Oy:ssä suunniteltiin ja toteutettiin simulaattorin suurten verkostojen hydraulis-termodynaamisen toiminnan mallintamiseksi. Tämä diplomityö oli merkittävä osa simulaattorin parametrien määrittämis-, kalibrointi- ja validointityötä.

Jätevesiverkostojen termodynaamisista laskentaohjelmista tunnetuin on Dürrenmatin ja Wannerin kehittämä TEMPEST-ohjelma (Dürrenmatt & Wanner 2014). Ohjelma ei soveltunut tutkimukseen, koska sillä pystyy tarkastelemaan vain yksittäisiä putkilinjoja, ja ohjelman toteutus oli laskennallisesti hyvin raskas. Ohjelman laskentamalli tarjosi kuitenkin pohjan uuden simulaattorin toiminnan validoinnille, sillä TEMPEST mallintaa termodynaamiset ilmiöt hyvin yksityiskohtaisesti. Diplomityön tekemisen aikana

sveitsiläinen tutkimusryhmä julkaisi oman jätevesiverkoston termodynaamiseen tarkasteluun tarkoitetun laskentaohjelmansa SWMM-HEAT:n (Figuroa et al. 2021). SWMM-HEAT:n toteutus perustui samaan ideaan rakentaa termodynaaminen laskenta yleisesti käytetyn yhdysvaltalaisen hule- ja jätevesilaskentamallin (SWMM) rinnalle. SWMM-HEAT:n toteutusta ei käytetty tutkimuksessa hyödyksi, sillä tässä diplomityössä käytetty simulaattori oli Figuroa et. al (2021) julkaisuhetkellä jo kokonaan toteutettu.

Uuden simulaattorin validoinnissa ja fysikaalisten parametrien määrittämisessä hyödynnettiin numeerista virtauslaskentaa, jolla yksittäisen putken lämmönsiirron ilmiötä voitiin tutkia yksityiskohtaisesti. Erityisesti jäteveden ja ilman rajapinnan lämmönsiirtokerrointa haluttiin tutkia, sillä aiemmissa tutkimuksissa käytetyt arvot vaihtelivat suuresti keskenään. Numeerisella virtauslaskennalla myös tutkittiin lämpötilagradientin syntymistä maaperässä putken ympärille, minkä perusteella voitiin arvioida putkien lämpöhäviökerrointen laskennassa vaadittava putkea ympäröivän maaperän paksuus. Lämmönsiirtokerroimeksi mallinnuksessa saatiin tulokseksi  $0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja lämpötilagradientin paksuudeksi  $10,5 \text{ cm}$ . Lämmönsiirtokerroimen suuruus oli huomattavasti pienempi muihin tutkimuksiin nähden, joissa sen arvoa oli kalibroitu vapaasti. Lämpötilagradientin arvoa käytettiin virtauskanavien lämpöhäviöiden laskennassa.

Herkkyystarkastelun perusteella maaperän lämpötila vaikutti jätevedenlämpötilaan eniten, joten sen arviointiin kehitettiin laskentamalli, jolla ilman lämpötilahistoriadatasta pystytään arvioimaan maaperän lämpötilaa tietyllä syvyydellä. Maaperän lämpötila selvitetiin laskennallisesti, koska maaperän lämpötilamittauksia ei ollut saatavilla. Mallinnuksen perusteella maaperän lämpötila on alimmillaan jätevesiputkien ympärillä noin  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  ja korkeimmillaan noin  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Laskentamallin kalibroinnissa käytettiin Anne Mäkirannan väitöskirjan mittauksia (Mäkiranta 2020).

Simulaattorin lopullisessa toteutuksessa huomioitiin lämmön johtuminen ilmasta ja jätevedestä putken seinämän läpi maaperään sekä jäteveden ja ilman välinen konvektiivinen lämmönsiirto. Jokaiselle virtauskanavalle laskettiin materiaalin ja dimensioiden perusteella lämpöhäviökerroin, jolla lämpö siirtyi virtauksesta maaperään. SWMM-HEAT:stä poiketen Fluidit Sewerin lämmönsiirtosimulaattori mallintaa myös ilman virtauksen verkostossa, jolloin todellinen lämmönsiirto jäteveden ja ilman välillä saatiin mallinnettua. Latenttia lämmönsiirtoa ei huomioitu mallinnuksessa, koska se ei vaikuttanut merkittävästi herkkyystarkastelussa jäteveden lämpötilaan.

Tutkimushankkeessa tehtiin lämpötilamittauksia Turun ja Helsingin jätevesiverkostoissa. Kummassakin kohteessa lämpötilamittauksia oli kolme kappaletta. Mallin lämmönsiirtokerroimet kalibroitiin ja validoitiin niiden perusteella. Kalibroinnissa lämpötilan RMSE-



arvoksi saatiin  $0,77^{\circ}\text{C}$  ja validoinnissa  $1,07^{\circ}\text{C}$ . Validoinnissa käytetyn jakson aikana mitareiden välillä verkkoon liittyi tuntemattomia virtauksia, mikä heikensi validoinnin tarkkuutta. Validointimallissa tuntemattomille virtauksille käytettiin VTT Oy:n määrittämiä lämpötiloja ja virtaamia, joita käytettiin myös lopullisessa mallinnuksessa (Laitinen & Wallin 2022).

Helsingin Viikinmäen valuma-alueen ja Turun Kakolanmäen jätevesiverkostojen mallit saatiin tutkimukseen lähes valmiina. Kummankin verkoston hydrauliseen laskentaan tehtiin pieniä muutoksia, mutta pääasiassa mallit pidettiin ennallaan. Malleihin lisättiin vain termodynaamisen laskennan kannalta tarpeelliset tiedot kuten lämpötila- ja lämpöhäviöparametrit. Kummassakin mallissa huomioitiin verkostojen vuodot ja mallinnetun alueen ulkopuolelta saapuvat virtaukset, kuten naapurikunnista saapuvat jätevedet. Nämä virtaukset mallinnettiin yksittäisin suurina käyttäjinä, jotka liitettiin mallinnettuun verkostoon liityntäpisteissä. Näiden käyttäjien mallintaminen aiheutti malleihin virhettä, sillä tulevan veden lämpötila ei ollut tiedossa. Tästä syystä näiden käyttäjien jäteveden tulolämpötiloja kalibroitiin, jotta ne vastaisivat paremmin todellisuutta. Turussa näitä virtauksia oli kolme kappaletta ja Helsingissä 22. Mahdollisissa jatkotarkasteluissa virtaamat ja lämpötilat tulisi mitata myös näissä liityntäpisteissä.

Tarkasteluun valittiin maaliskä- ja syyskuu maaperän lämpötilan perusteella, sillä lämpötila oli alimmillaan maaliskuussa ja korkeimmillaan syyskuussa. Jokaiselle kuukaudelle mallinnettiin skenaario ilman lämmön talteenottoa ja erillinen skenaario, jossa lämmön talteenotto oli käytössä jokaisella käyttäjällä. Rakennuksilta syötettävien jätevesien lämpötilat asetettiin VTT Oy:n tuottamien stokastisesti mallinnettujen lämpötila-aikasarjojen mukaisiksi. Lämmön talteenoton yhteydessä verkostoon kiinteistöiltä tulevan jäteveden lämpötilaa laskettiin, millä kuvattiin kiinteistökohtaista lämmön talteenottoa prosessia. Tuloksista muodostettiin kuvaajat, joiden avulla jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaa arvioitiin syötettävän jäteveden lämpötilan funktiona. Kaikki skenaariot tehtiin sekä Helsingin Viikinmäen puhdistamon valuma-alueen että Turun jätevesiverkostoille.

Mallinnuksen tarkkuus vaihtelee kuukausittain. Erityisesti maaliskuun kohdalla simulointien tulokset erosivat merkittävästi jätevedenpuhdistamolla mitatuista arvoista. Kummankin verkoston kohdalla mallinnetut lämpötilat olivat liian matalia mitattuihin arvoihin verrattuna. Tähän vaikutti erityisesti vuotojen mallinnuksen tarkkuus, sillä kylmät vuotovesivirtaukset jäädyttivät huomattavasti jäteveden lämpötilaa. Maaliskuussa Etelä-Suomessa vuotovesiin vaikuttaa lumien sulamisvedet, joita mallinuksissa ei määritetty tarkasti yksittäisille päiville. Toinen virhettä aiheuttava asia oli tarkastelualueen ulkopuoliset virtaukset, joiden lämpötiloja ei tiedetty. Lämpötilan RMSE-arvot vaihtelivat

jätevedenpuhdistamolla 0,49–2,16 °C. Kesä- ja syyskuussa RMSE-arvot olivat kaikissa skenaarioissa alle 1,0 °C, joten niiden mallintaminen onnistui todella tarkasti huomioiden verkostojen pituudet ja kompleksisuudet. SWMM-HEAT-tutkimuksessa (Figuroa et al. 2021) RMSE-arvot vaihtelivat 0,67–2,20 °C ja mallinnettu verkostopituus oli 27 km. Turun verkostomallin kokonaispituus oli 610 km ja Helsingin 470 km, joten virheen suuruus oli tässä työssä huomattavasti pienempi verkostojen pituuteen suhteutettuna.

Hukkalämmön talteenottoskenaarioissa lämpötila laski jätevedenpuhdistamoilla 9,7–18,2 % tavalliseen tilanteeseen verrattuna. Yhden asteen muutos kiinteistöiltä tulevan jäteveden lämpötilassa vaikutti keskimäärin 0,44 °C jätevedenpuhdistamolle saapuvaan jäteveden lämpötilaan. Lämmön talteenoton siirtäminen kiinteistöille vähensi verkoston lämpöhäviöiden määrää erityisesti Helsingissä, jossa keskusta-alueelta virtaava jätevesi jäähtyy merkittävästi matkalla Viikinmäen puhdistamolle. Syyskuussa Viikinmäen verkoston lämpöhäviöissä säästettiin keskimäärin jopa 7,9 MW syöttämällä verkostoon kylmempää vettä ottamalla lämpöä talteen kiinteistöillä. Tämä johtui siitä, että tietyillä ajanhetkillä maaperän lämpötila oli suurempi kuin jäteveden, jolloin lämpöenergiaa siirtyi maasta jäteveeseen eikä päinvastoin. Turussa lämpöhäviötehot olivat pienempiä, sillä keskustasta tuleva jätevesi ei ehdi jäähtyä paljon matkalla Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle. Syyskuussa lämpöhäviöissä oli mahdollista säästää keskimäärin 3,3 MW ottamalla lämpöenergia talteen jo kiinteistöillä.

Mallinnuksen perusteella hukkalämmön talteenotto ei aiheuta verkostossa tukos- tai jäätymisriskejä missään skenaarioissa. Lämpötilan laskeminen maaliskuussa voi kuitenkin vaikeuttaa jätevedenpuhdistamon puhdistusprosesseja. Koska varsinkin sulamisvesien aikaan puhdistamolle saapuva jätevesi on jo normaalissakin tilanteessa suhteellisen kylmää, ei lämpötilaa voida välttämättä laskea enempää. Maaperän lämpötilan ja verkostomallinnusten perusteella lämmön talteenotto olisi jätevedenpuhdistukselle vähiten haitallista kesä–joulukuussa. Hukkalämmön talteenotto voidaan suorittaa myös keskitetymin jätevedenpumppaamoilla, jolloin laitteistokustannuksissa voidaan säästää. Koska pumppaamoja on verkostossa suhteellisen tiheästi, on lämmön talteenottopotentiali lähes sama verrattuna kiinteistökohtaiseen lämmön talteenottoon. Tutkimuksessa tehtiin alustavat simuloinnit pumppaamokohtaiselle lämmön talteenotolle, mutta niiden vertaaminen kiinteistökohtaiseen lämmön talteenottoon vaatisi tarkempia mallinnuksia, joissa täsmälleen sama lämpöenergia otettaisiin talteen kummassakin tapauksessa. Alustavissa tuloksissa suurta eroa lämpötilassa jätevedenpuhdistamolle saapuvassa virtauksessa ei ollut.

Jatkotutkimuksissa lämpötila- ja virtausmittauksia tulisi tehdä erityisesti niissä kohdissa, joissa ulkoiset virtaukset liittyvät pääverkostoon. Lisäksi maaperän lämpötilamittauksia

pitäisi tehdä Etelä-Suomessa, jotta maaperän lämpötilamallinnusta voitaisiin tarkentaa. Mikäli mallit haluttaisiin saada vastaamaan täysin todellisuutta, tulisi myös hulevedet mallintaa tarkemmin varsinkin Helsingin sekaviemärialueella. Hulevesien mallinnus vaatisi kuitenkin vielä lisää lämpötilamittauksia verkoston eri osiin.

## LÄHTEET

Abdel-aal M., Schellart A., Kroll S., Mohamed M., ja Tait S., 2018. Modelling the potential for multi-location in-sewer heat recovery at a city scale under different seasonal scenarios. *Water Research*.

Abdel-aal M., Smits R., Mohamed M., De Gussem K., Schellart A. ja Tait S., 2014. Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Science & Technology*.

Abdel-aal M., Villa R., Jawiarczyk N., Alibardi L., Jensen H., Schellart A., Jefferson B., Shepley P., and Tait S., 2019. Potential influence of sewer heat recovery on in-sewer processes. *Water science and technology*.

Ahonen M., 2021. Effects of wastewater heat recovery on nitrogen removal in Finnish wastewater treatment plants, Aalto university.

Akan A., 2006. *Open channel hydraulics*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.

Ansys, 2021-last update, Ansys student - free software download. Saatavissa (viitattu 11.9.2021): <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>

Ansys, 2009. *Ansys fluent 12.0 theory guide*.

Beck G. ja Margheim W., 2011. *Prevention and control of sewer system overflows wef manual of practice no. FD-17, third edition*. McGraw-Hill.

Bell I., Wronski J., Quoilin S., ja Lemort V., 2014. Welcome to coolprop. Saatavissa (viitattu 2.12.2021): <http://www.coolprop.org/>.

Chai T., Draxler R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in literature. *Geoscientific model development*.

Chaudhry M., 2008. *Open-Channel Flow*. 2nd ed., Springer US.

Çengel Y. ja Cimbala J., 2006. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. Boston: Mcgraw-Hillhigher education.

Çengel Y. ja Ghajar A., 2011. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. New York: Mcgraw-Hill.

CHJ2M Hill, 2014. Hydraulic modeling software recommendation. Saatavissa (viitattu 22.10.2021): <https://gnhwpc.com/wp-content/uploads/2018/02/2015-New-Haven-Hydraulic-Model-Update-Appendicies-B-H-07-01-15-reduced.pdf>

Dürrenmatt D. ja Wanner O., 2014. a Mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*.

Eaton A., Smoot L., Hill s., Eatough C., 1999. Components, formulation, solution, evaluation, and application of comprehensive combustion models, Progress in energy and combustion science.

Edwini-Bonsu S., Steffler P., 2006 Modeling ventilation phenomenon in sanitary sewer systems: A system theoretic approach. Journal of hydraulic engineering.

Elías-Maxil J., 2015. Heat modeling of wastewater in sewer networks, determination of thermal energy content from sewage with modeling tools.

Elías-Maxil J., Hofman J., Wols B., Clemens F., Van Der Hoek J. ja Rietveld L., 2017. Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks.

EPA, 2017. Storm water management model reference manual, volume 2 hydraulics. Saatavissa (viitattu 22.9.2021): <https://npis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100S9AS.pdf>

Figuroa A., Hadengue B., Leitao J., Rieckermann J. ja Blumensaat F., 2021. A distributed heat transfer model for thermal-hydraulic analyses in sewer networks. Water Research.

Gudjonsson G., Vollertsen J. ja Hvitved-Jacobsen T. 2002 Dissolved oxygen in gravity sewers – Measurements and simulation. Water Science technology.

Hadengue B., Joshi P., Figuroa A., Larsen T. ja Blumensaat F., 2021. In-building heat recovery mitigates adverse temperature effects on biological wastewater treatment: a network-scale analysis of thermal-hydraulics in sewers. Water Research.

Helen, 2021. Helsinki sulkee Hanasaaren voimalaitoksen lähes kaksi vuotta etuajassa – hiilivarasto poistuu katukuvasta. Saatavissa (viitattu 1.6.2021): <https://www.helen.fi/uutiset/2021/helsinki-sulkee-hanasaaren-voimalaitoksen-lahes-kaksi-vuotta-etuajassa>.

HSY, 2017. HSY:n alueen vesihuollon kehittämissuunnitelma 2017–2026. Saatavissa (viitattu 20.6.2021): [https://www.hsy.fi/globalassets/vesi-ja-viemarit/tiedot/hsyn\\_alue\\_suunnitelma.pdf](https://www.hsy.fi/globalassets/vesi-ja-viemarit/tiedot/hsyn_alue_suunnitelma.pdf)

lasmin M., Dean L., ja Ducoste J., 2016. Quantifying fat, oil, and grease deposit formation kinetics. Water Research.

Ilmatieteen laitos, 2021. Download observations. Saatavissa (viitattu 3.9.2021): <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/download-observations#!/>.

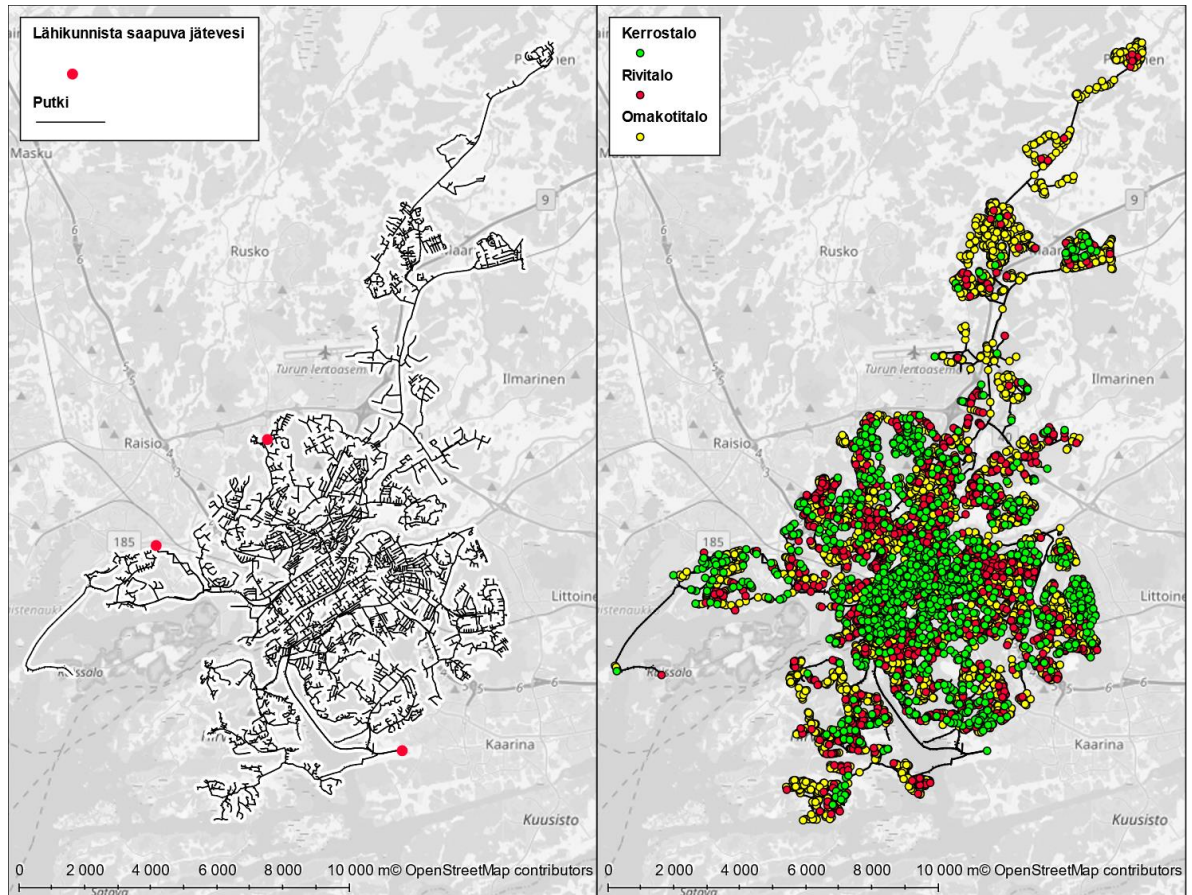
Ilmatieteen laitos, 2014. Auringonsäteily Helsingin Östersundomissa. Saatavissa (viitattu 10.9.2021): <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/135830/2014nro5.pdf?sequence=1>.

Karttunen E., 2010. Vesihuoltoverkostojen suunnittelu. 1, Perusteet ja toiminnallisuus. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

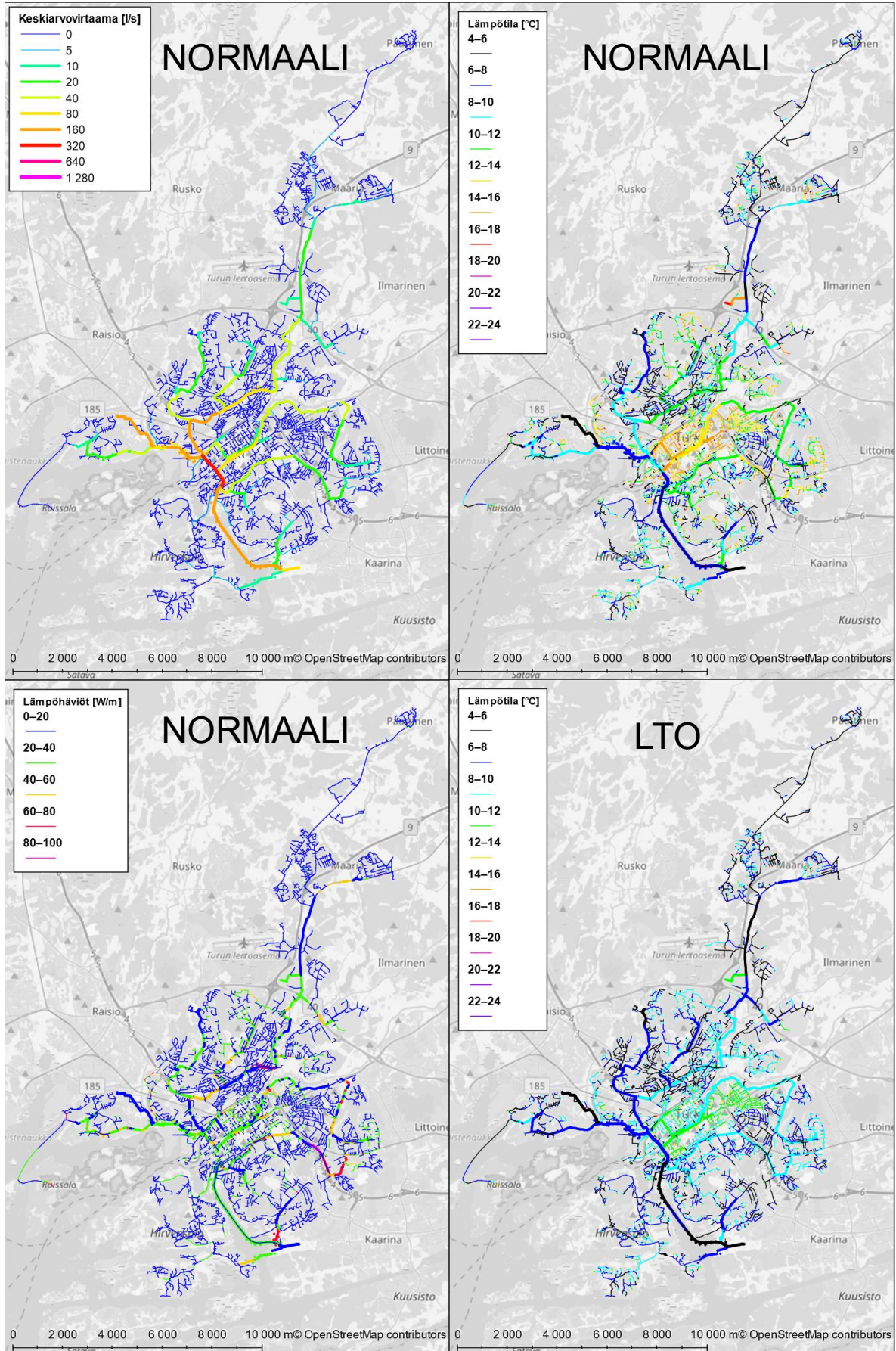
Karttunen E., 2010. Vesihuoltoverkostojen suunnittelu. 2, Mitoitus ja suunnittelu. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

- Kerr Wood Leidal, 2014. Heat-seeking sewer model. Saatavissa (viitattu 10.12.2021): [https://www.canadianconsultingengineer.com/awards/pdfs/2014/F5\\_HeatSeeking-SewerModel.pdf](https://www.canadianconsultingengineer.com/awards/pdfs/2014/F5_HeatSeeking-SewerModel.pdf)
- Laitinen A., vanhempi tutkija, Wallin A., vanhempi tutkija, 2022 VTT Oy. Yhteistyö hankkeessa.
- Ljung L., Glad T., 1994. Modeling of dynamic systems.
- Marangoni A., 2018. Structure-function analysis of edible fats. AOCS Press.
- Mills A., ja Coimbra C., 2015. Basic heat and mass transfer. 3. edition.
- Mustonen S., 1986. Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y.
- Myers T., Fowkes N. ja Ballim, Y., 2010. Modelling the cooling of concrete by piped water. Centre de recerca matemàtica.
- Mäkiranta A., 2020. Renewable thermal energy sources, sediment and asphalt energy applications in an urban northern environment, Vaasan yliopisto.
- Nielsen P., 1987. Biofilm dynamics and kinetics during high-rate sulfate reduction under anaerobic conditions. Appl. Environ. Microbiol.
- Pomeroy R. 1958. Generation and control of sulphide in filled pipes. Sewage ind. waste.
- Pääkkönen P., 2020. Energiatehokkuuden parantamisvaihtoehtojen taloudellisuus, micro-polis Oy.
- Rubino J. 2020. Sewer pipes carrying dirty water will be a key part of national western center's clean energy future. The Denver Post. Saatavissa (viitattu 10.1.2022): <https://www.denverpost.com/2020/08/04/sewer-pipes-dirty-water-national-western-center-clean-energy/>
- Tilastokeskus, 2020. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Saatavissa (viitattu 12.6.2021): [https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-05-21\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html).
- Versteeg H. and Malalasekera W., 2007. an Introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2 edn. Harlow: Pearson/Prentice Hall.
- Xavier L., 2009. Modeling and control of hydrosystems.
- Ympäristöministeriö, 2020. Hiilineutraaliuden tiekartta 03022020.
- Ympäristöministeriö, 2003. C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma lämmöneristys ohjeet 2003 Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä.

# LIITE 1: TURUN VERKOSTOMALLI

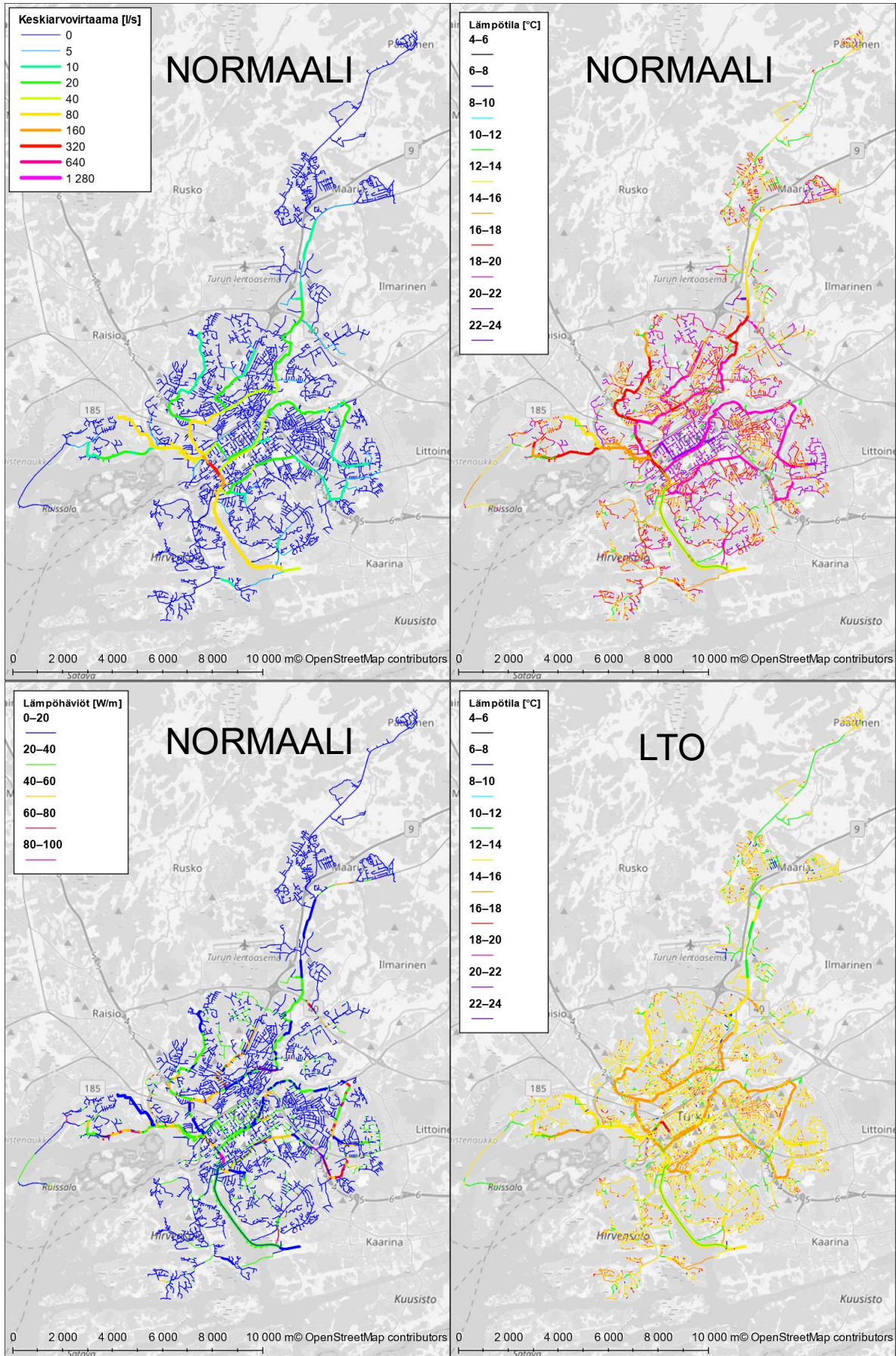


# LIITE 2: TURKU MAALISKUU

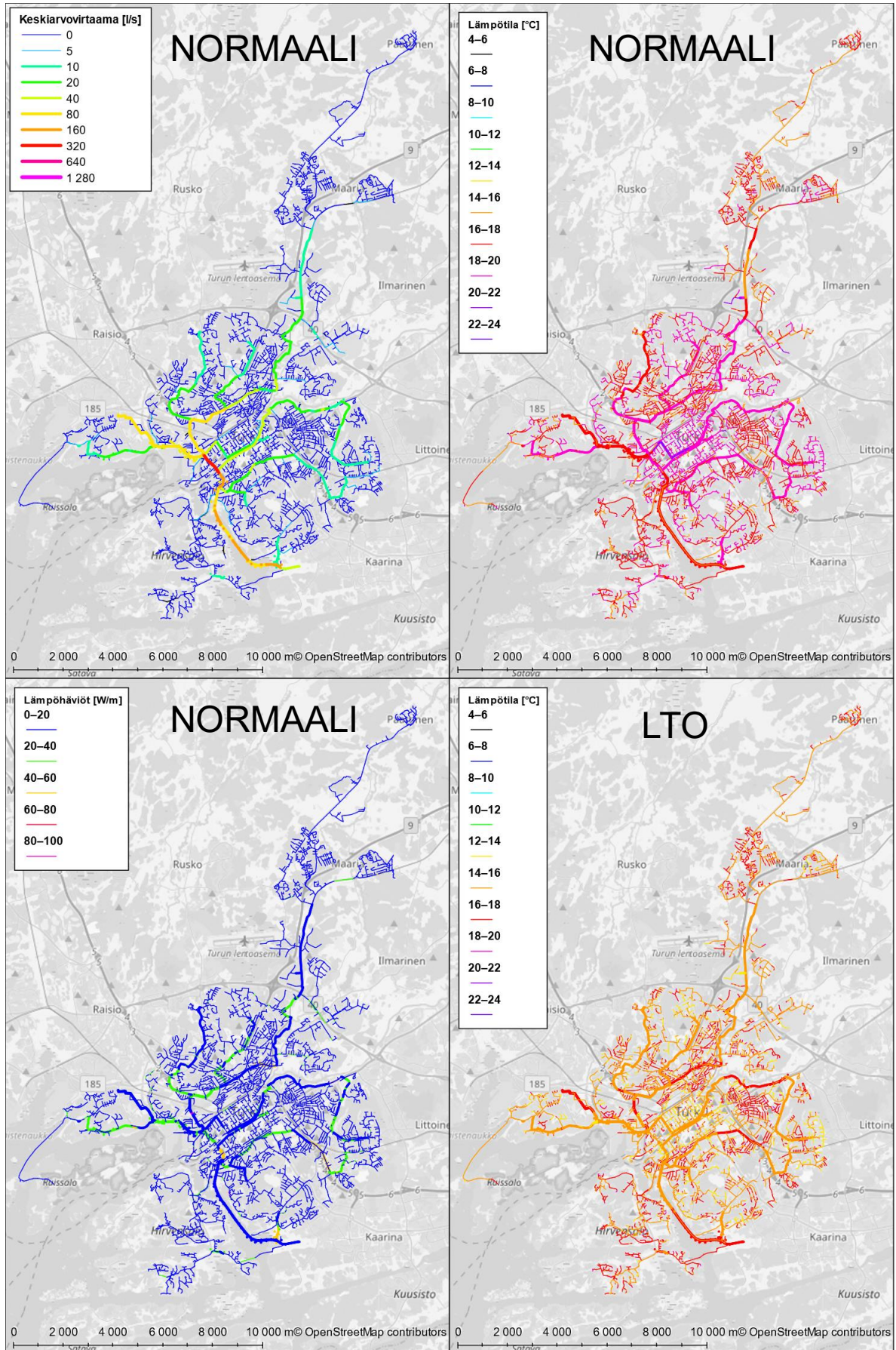




# LIITE 3: TURKU KESÄKUU



# LIITE 4: TURKU SYYSKUU



## LIITE 5: TURUN VERKOSTOMALLIN ASETUKSET

### Mallin asetukset

Report step	0:15:00
Allow Ponding	off
Dry Step	0:30:00
Wet Step	0:30:00
Flow Routing	Dynamic wave
Head Tolerance	0,002
Headloss Formula	Darcy-Weisbach Preissmann
Surcharge Model	Slot
Ignore Groundwater	off
Ignore Quality	off
Ignore Rainfall	off
Ignore RDII	off
Ignore Routing	off
Ignore Snow Melt	off
Inertia Terms	Dampen
Infiltration Model	Horton
Lengthening Step	10
Link Offset	Depth
Maximum Trials	150
Minimum Slope	0,02
Minimum Surface Area	1,168
Minimum step	1
Minimum routing step	10
Skip Steady State	on
Lateral Flow Tolerance	5
System Flow Tolerance	5
Supercritical Flow	Slope + Froude
Units	l/s
Variable Step	0,5
Report Averages	on

### Skenaario asetukset

#### Validointi

Simulation Start Time	26.8.2019 0:00
Simulation End Time	29.8.2019 0:00
Report Result Start	28.8.2019 0:00
Air Temperature	13,4 °C
Ground Temperature	15,95 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	18,95 °C

#### Maaliskuu

Simulation Start Time	4.3.2019 0:00
Simulation End Time	8.3.2019 0:00
Report Result Start	7.3.2019 0:00
Air Temperature	0,4 °C
Ground Temperature	3,94 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	4,94 °C

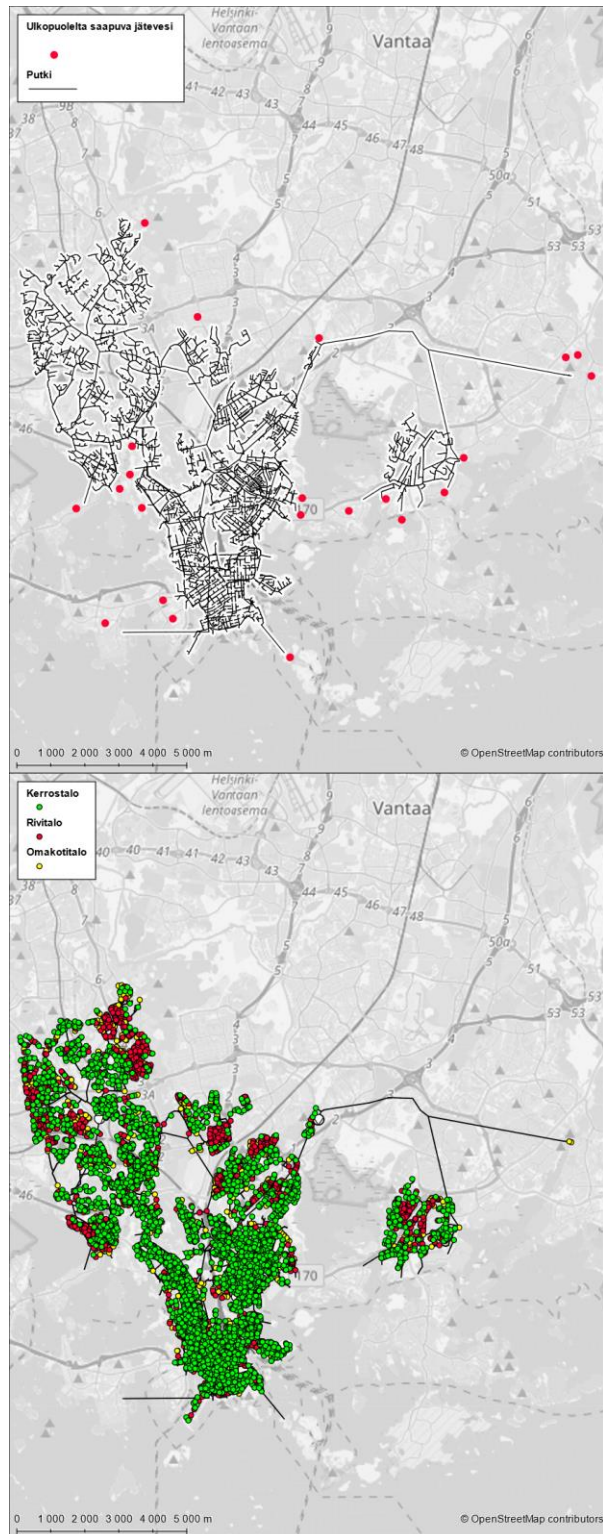
#### Kesäkuu

Simulation Start Time	10.6.2019 0:00
Simulation End Time	14.6.2019 0:00
Report Result Start	13.3.2019 0:00
Air Temperature	15,2 °C
Ground Temperature	11,34 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	12,34 °C

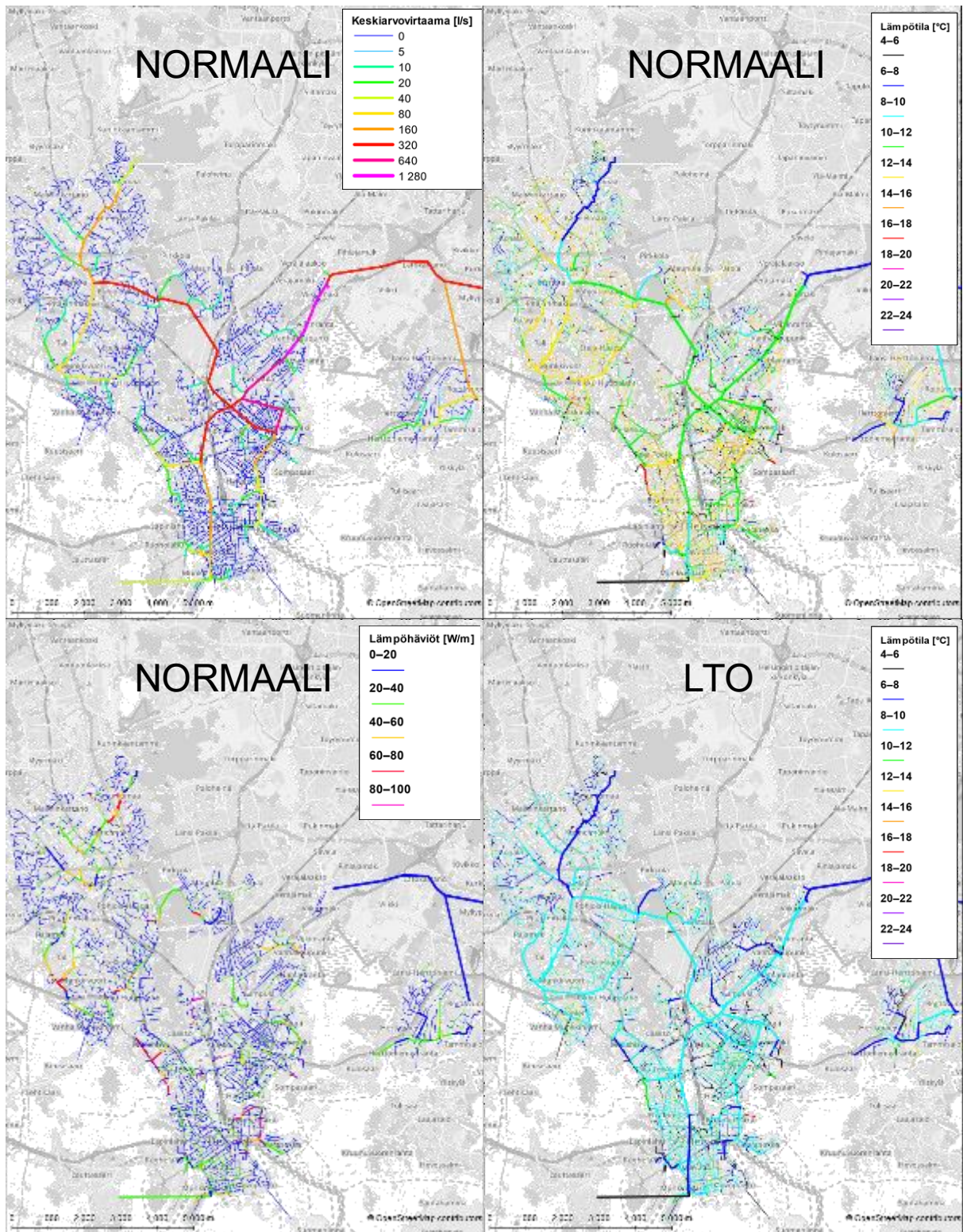
#### Syyskuu

Simulation Start Time	2.9.2019 0:00
Simulation End Time	5.9.2019 0:00
Report Result Start	4.9.2019 0:00
Air Temperature	12,6 °C
Ground Temperature	15,07 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	16,07 °C

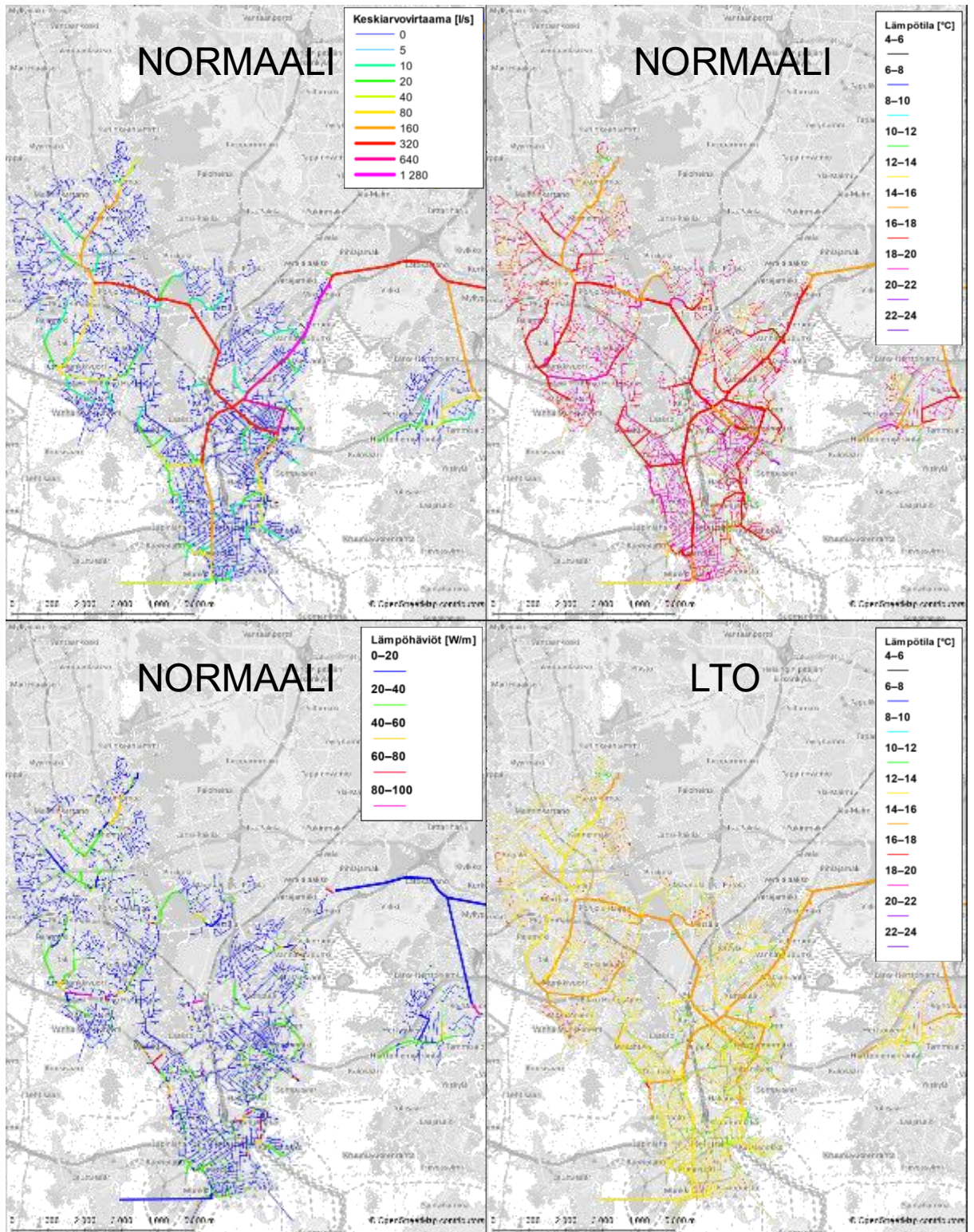
## LIITE 6: HELSINGIN VERKOSTOMALLI



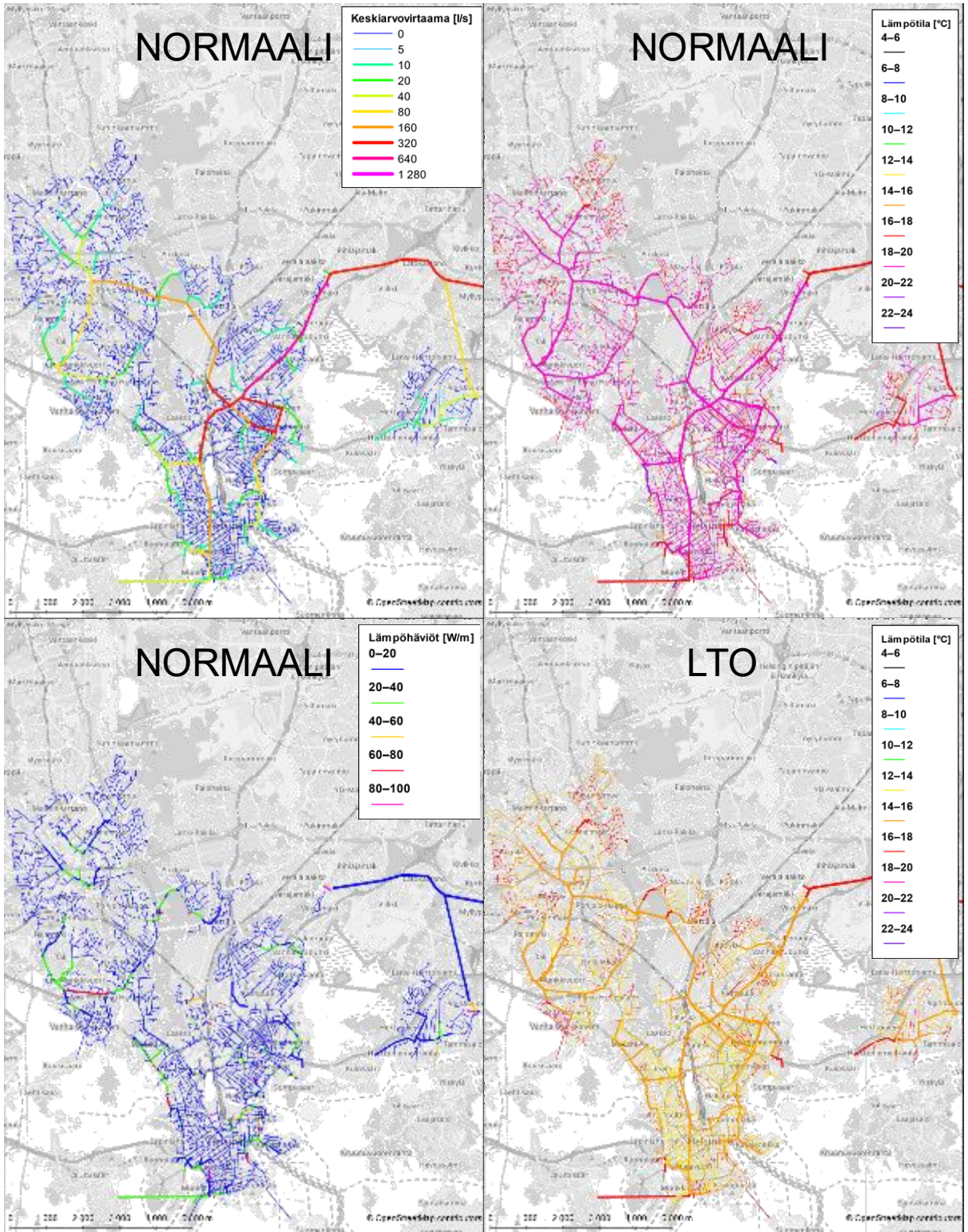
# LIITE 7: HELSINKI MAALISKUU



# LIITE 8: HELSINKI KESÄKUU



# LIITE 9: HELSINKI SYYSKUU



## LIITE 10: HELSINGIN VERKOSTOMALLIN ASE- TUKSET

### Mallin asetukset

Report step	0:15:00
Allow Ponding	off
Dry Step	0:30:00
Wet Step	1:00:00
Flow Routing	Dynamic wave
Head Tolerance	0,01
Headloss Formula	Darcy-Weisbach
Surcharge Model	Preissmann Slot
Ignore Groundwater	off
Ignore Quality	off
Ignore Rainfall	off
Ignore RDII	off
Ignore Routing	off
Ignore Snow Melt	off
Inertia Terms	Ignore
Infiltration Model	Green ampt
Lengthening Step	10
Link Offset	Depth
Maximum Trials	150
Minimum Slope	0,02
Minimum Surface Area	0,503
Minimum step	0,5
Minimum routing step	15
Skip Steady State	off
Lateral Flow Tolerance	5
System Flow Tolerance	5
Supercritical Flow	Slope + Froude
Units	l/s
Variable Step	0,75
Report Averages	on

### Skenaario asetukset

#### Maaliskuu

Simulation Start Time	25.3.2019 0:00
Simulation End Time	27.8.2019 0:00
Report Result Start	26.8.2019 0:00
Air Temperature	0,4 °C
Ground Temperature	3,94 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	6.94 °C

#### Kesäkuu

Simulation Start Time	19.6.2019 0:00
Simulation End Time	21.6.2019 0:00
Report Result Start	20.3.2019 0:00
Air Temperature	15,2 °C
Ground Temperature	11,34 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ulkopuoliset jätevedet	14,34 °C

#### Syyskuu

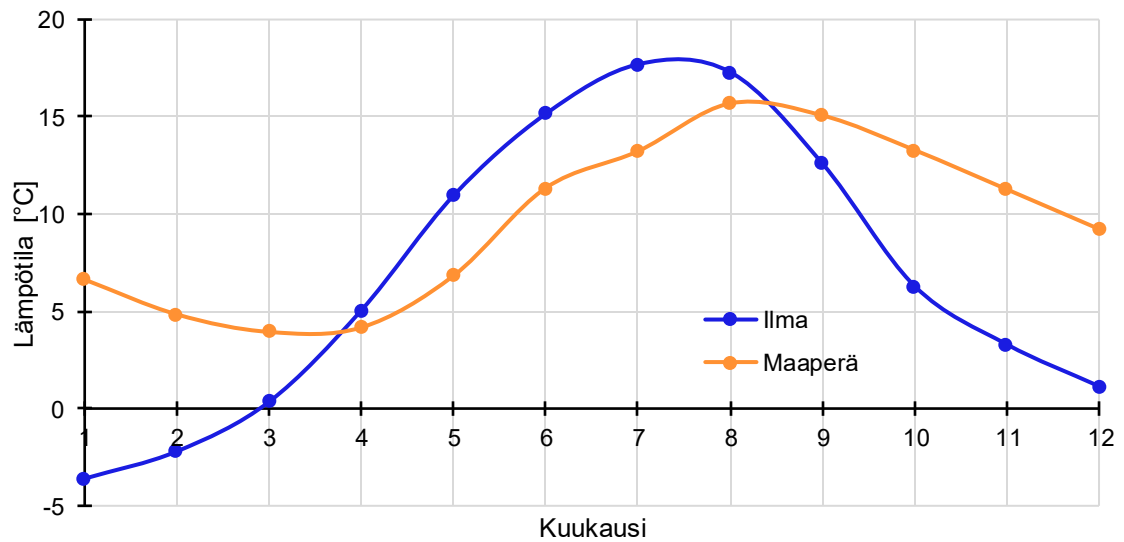
Simulation Start Time	21.9.2020 0:00
Simulation End Time	23.9.2020 0:00
Report Result Start	22.9.2020 0:00
Air Temperature	12,6 °C
Ground Temperature	15,07 °C
Heat Loss Coefficient	8,0 W/(mK)
Ulkopuoliset jätevedet	18,07 °C



## LIITE 11: MALLINNETTU MAAPERÄN LÄMPÖTILA

Tutkimuksessa Käytettiin Helsingin Kumpulassa mitattuja ilman kuukausilämpötiloja vuosilta 2007–2020 maaperän lämpötilan mallintamiseen 2.6 m syvyydellä. Alla olevassa kuvassa ilman lämpötilat on esitetty mediaanilämpötilana jokaiselle kuukaudelle. Maaperän lämpötilat mallinnettiin erillisellä laskennalla, ja kalibrointi suoritettiin Anne Mäkirannan väitöskirjan mittauksiin pohjautuen (Mäkiranta 2020).

Mallinnuksessa käytetyt lämpötilat



## LIITE 12: PUTKIMATERIAALIT

Liitteessä esitellään putkien lämpöviiväkerroimien laskennassa käytetyt materiaalit ja mallinnuksessa käytetyt materiaalit. Turun mallissa U-arvot lisättiin suoraan materiaali-kirjastoon muiden hydrauliseen laskentaan liittyvien parametrien tavoin. Materiaalit ja U-arvot on esitetty alla olevissa taulukoissa. Helsingin mallille U-arvot asetettiin jokaiselle putkelle erikseen, joten niitä ei ole esitetty putkien suuresta määrästä johtuen. Helsingin materiaaleihin lisättiin yksittäisiä putkikokoja alla esitettyjen lisäksi.

Lasikuidulla viitataan saneerattuihin putkiin, joihin on tehty sukitus. Näissä putkissa on oletuksena lasikuidun lisäksi betoninen ulkokuori, jonka paksuudeksi arvioitiin 70 mm. Kaikki U-arvot sisältävät maaperän tuoman lämpövastuksen putken ympärillä, jonka paksuudeksi arvioitiin numeerisen virtauslaskennan avulla 105 mm. Maaperän tyyppinä käytettiin moreenia ja aineominaisuuksina numeerisen virtauslaskennan kanssa samoja arvoja.

Lyhenne	Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]
A	Asbesti	2.07
B, Tunneli	Betoni	1.4
VRA	Valurauta	52
PVC, PP	Polyvinyylikloridi, Polyetyleni	0.19
PEH	Polyetyleni korkea tiheys	0.47
PEM, M	Polyetyleni keskitiheys	0.4
PEL	Polyetyleni matala tiheys	0.33
SG, RST	Pallografiittivalurauta, Valu- rauta	52
LK, FL, LSA	Lasikuitu	0.039

Nimi	U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]	Nimi	U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]	Nimi	U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]	Nimi	U-arvo [W/(m <sup>2</sup> K)]
32PEM	53,09	140PEH17	22,34	355PEH17	12,80	125LK	11,78
40M	42,97	140PVC	17,58	355PVC	9,36	150LK	10,30
40PEH	45,39	150A	24,17	400A	16,87	150RST	31,46
40PEH17	47,92	150B	19,91	400B	14,01	160LK	2,79
40PEL	36,47	150SG	31,09	400M	9,63	180FL	2,81
40PEM	42,97	150VRA	31,09	400PEH	10,67	200FL	2,56
40PVC	30,78	160M	17,92	400PEH17	11,87	200HST	28,54
50M	36,78	160PEH	19,33	400PVC	8,60	200LK	8,32
50PEH	39,00	160PEH17	20,67	400SG	23,91	200RST	28,54
50PEH17	41,55	160PVC	16,06	400VRA	23,91	225LK	7,62
50PEL	30,64	180M	16,58	450A	16,78	250LK	1,84
50PEM	36,78	180PEH	17,94	450B	14,09	270FL	2,35
50PVC	32,64	180PEH17	19,28	450M	8,84	300LK	6,14
63M	32,81	180PVC	14,92	450PEH	9,83	300RST	25,52
63PEH	34,65	200A	21,47	450PEH17	11,01	315LK	1,48
63PEH17	36,01	200B	17,75	450PVC	7,89	350T	24,64
63PEL	25,70	200M	15,50	450SG	23,40	400LK	4,92
63PEM	31,33	200PEH	16,81	450VRA	23,40	400RST	23,97
63PVC	27,85	200PEH17	18,13	500B	12,57	450LK	4,49
75M	29,37	200PVC	13,88	500M	8,18	500A	15,32
75PEH	31,10	200SG	28,32	500PEH	9,12	500HST	23,02
75PEH17	32,38	200VRA	28,32	500PEH17	10,27	500LK	4,13
75PEL	22,41	225B	18,55	500PVC	7,30	600A	14,11
75PEM	27,90	225M	14,31	500SG	22,98	600LK	3,57
75PVC	24,86	225PEH	15,58	500VRA	22,98	600RST	22,38
80SG	40,11	225PEH17	16,90	560M	7,52	700B	10,05
80VRA	40,11	225PVC	12,86	560PEH	8,41	700LK	3,15
90M	26,08	250A	22,35	560PEH17	9,51	790M	5,76
90PEH	27,72	250M	13,34	560PVC	6,69	800A	11,43
90PEH17	29,00	250PEH	14,57	600B	11,46	800LK	2,82
90PEL	19,48	250PEH17	15,88	600SG	22,35	800M	5,70
90PEM	24,59	250PVC	11,94	600VRA	22,35	800PEH	6,44
90PVC	23,44	250SG	26,60	630M	6,88	800PVC	3,07
100A	31,57	250VRA	26,60	630PEH	7,72	900B	8,40
100SG	36,35	280M	12,36	630PEH17	8,77	1000LK	2,34
100VRA	36,35	280PEH	13,54	630PVC	6,11	1000M	3,61
110M	22,87	280PEH17	14,83	700SG	21,89	1100B	7,30
110PEH	24,43	280PVC	11,08	700VRA	21,89	1100LK	2,33
110PEH17	25,77	300A	18,25	710M	6,26	1100PEH	5,01
110PEL	16,64	300B	15,05	710PEH	7,06	1200LK	2,33
110PEM	21,46	300SG	25,42	710PEH17	8,07	1300B	6,74
110PVC	20,14	300VRA	25,42	710PVC	5,56	1300LK	2,32
125A	30,43	315M	11,39	800B	8,95	1400LK	2,32
125M	21,06	315PEH	12,53	800SG	21,55	1400M	4,29
125PEH	22,56	315PEH17	13,79	800VRA	21,55	1500LK	2,31
125PEH17	23,89	315PVC	10,17	900B	8,23	1600LK	2,31
125PVC	18,97	350A	19,65	1000B	7,63	1600M	4,24
125SG	33,23	350SG	24,56	1200B	7,01	1600RST	20,32
125VRA	33,23	350VRA	24,56	1400B	6,50	1800B	5,70
140M	19,57	355M	10,48	1500B	6,22	2000B	5,46
140PEH	21,02	355PEH	11,57	1600B	5,97	Tunneli	1,00