

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Kevät 2024

Aada Viitanen

Analyysi veden laadusta ja vaihtuvuudesta Turun Yliopistonmäen suorakaiteen muotoisessa vesitornissa

– kulmien tarkastelu mallinnusmenetelmällä



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

Kevät 2024 | 77 sivua, 1 liitesivu

Aada Viitanen

Analyysi veden laadusta ja vaihtuvuudesta Turun Yliopistonmäen suorakaiteen muotoisessa vesitornissa

- kulmien tarkastelu mallinnusmenetelmällä

Vesilaitosten tehtävänä on varmistaa, että kuluttajille johdettava vesi täyttää talousvesiasetuksen mukaiset laatuvaatimukset. Vesijohtoverkoston osaksi lukeutuvat vesitornit ovat luokiteltu riskitekijöitä sisältäviksi, seuranta vaativiksi kohteiksi.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Turun Vesihuolto Oy:n toimeksiantona. Työssä selvitettiin, miten Turun Yliopistonmäen suorakaiteen muotoisen vesitornin kulmat vaikuttavat veden fysikaalis-kemialliseen ja mikrobiologiseen laatuun sekä vaihtuvuuteen. Veden virtausta mallinnettiin pienoismallin sekä vesitornin säiliöön asetettujen kellukkeiden avulla. Vesitornista otettiin kerrosvesinäytteitä, ja kulmissa seisovan veden laatua havainnollistettiin seisotetun veden laatumuutoksia analysoivan tutkimuksen avulla.

Tutkimuksessa todettiin, että veden virtaus painottuu vesitornissa säiliön keskiosaan, eikä vesi vaihdu kulmissa tarpeeksi usein. Pahimmassa tapauksessa veden ikä voi kasvaa kulmissa merkittävästi, jolloin sen mikrobiologinen laatu voi heiketä pitkään seisotetun veden laatu tulosten mukaisesti. Tutkimus toi Turun Vesihuollolle arvokasta riskienhallintaa tukevaa tietoa Yliopistonmäen vesitornin tilasta. Lisäksi työ toimii pohjana tuleville vesitornien seisovaa vettä tarkasteleville tutkimuksille.

Asiasanat:

Vesitornit, Vedenlaatu, Vesijohtoverkosto, Riskienhallinta, Mallintaminen

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Engineering

2024 | 77 pages, 1 appendix page

Aada Viitanen

Analysis on the quality and turnover of water in the rectangular water tower at Turun Yliopistonmäki

- Examination of angles by modelling

The main responsibility of water departments is to guarantee that the water conducted to consumers meets the quality requirements of the domestic water decree. Water towers that are part of the water supply network have been classified as risk factors that require monitoring.

This bachelor's thesis was commissioned by Turun Vesihuolto Oy. The thesis investigated how the corners of the rectangular water tower at Turun Yliopistonmäki influence the physical, chemical and microbiological quality and turnover of water. The flow of the water was modelled through a miniature model, as well as with floats. Stratified water samples were taken from stagnant water, and the quality of the stagnant water in the corners was illustrated with research analyzing changes in the quality of stagnant water.

As a result of this research, the flow of water concentrates in the middle of the tank, which results in inadequate turnover of water in the corners. In the worst scenario, the age of the water can grow noticeably leading to a decrease in the microbiological quality of the water as demonstrated by the quality results in the stagnant water research. This study provided valuable information for Turun Vesihuolto Oy to support their risk management regarding the state of the Turun Yliopistonmäki water tower. Furthermore, this study will provide a basis for future studies examining stagnant water.

Keywords:

Water towers, Water quality, Water supply network, Risk management, Modelling

Käytetyt lyhenteet	8
1 Johdanto	9
1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset	10
1.2 Opinnäytetyön rakenne	11
2 Kirjallisuuskatsaus	13
2.1 Tutkimuksessa käytetty kirjallisuus	13
2.2 Raakaveden vaikutus vedenpuhdistukseen	13
2.3 Talousveden tuotanto Turussa	14
2.4 Talousveden jakelu	15
2.5 Talousveden laatuvaatimukset	15
2.6 Laadunvalvonta	16
2.6.1 Fysikaalis-kemialliset parametrit	17
2.6.2 Mikrobiologiset parametrit	22
2.7 Vesitornit	25
2.7.1 Vesitornien säiliötilat	26
2.7.2 Veden kerrostuminen säiliössä	29
2.7.3 Veden ikääntyminen säiliössä	31
2.7.4 Biofilmit	32
3 Tutkimusmenetelmät	34
3.1 Tutkimuksen tausta	34
3.2 Turun Yliopistonmäen vesitorni	35
3.3 Pienoismallin rakennus	36
3.4 Veden virtaus vesitornissa	39
3.5 Näytteenotto vesitornissa	39
3.6 Seisovan veden seurantajakso	40
3.7 Vesinäytteiden analyysimenetelmät	41
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu	46
4.1 Pienoismallin toiminta ja tulokset	47
4.2 Veden virtaus vesitornissa	48
4.3 Fysikaalis-kemialliset parametrit	50

4.3.1 Lämpötila	50
4.3.2 Kloori	52
4.3.3 pH	54
4.3.4 Sähkönjohtokyky	56
4.3.5 Sameus	56
4.3.6 Rauta	57
4.3.7 Liuennut happi	58
4.4 Mikrobiologiset parametrit	59
4.4.1 <i>Escherichia coli</i> - ja koliformiset bakteerit	59
4.4.2 Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C TH-maljavälumenetelmällä	59
4.4.3 Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C R2A-pintaviljelymenetelmällä	62
4.4.4 ATP	64
4.5 Tuloksiin vaikuttavat epävarmuustekijät	66
5 Yhteenveto ja pohdinta	68
Lähteet	72

Liitteet

Liite 1. Veden laskennallinen ikä Turun vesijohtoverkostossa.

Kuvat

- Kuva 1.** Vesisäiliön sisäistä vedenkiertoa ohjaavia seinärakenteita erityyppisissä säiliöissä (RIL 124-2-2004, 336). 27
- Kuva 2.** Pohja- ja leikkauskuva vesitornin säiliöstä, jossa on yhteinen tulo- ja lähtöputki. Sininen alue kuvaa tuoretta vettä ja ruskea alue kulmissa vanhaa vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 11.) 28
- Kuva 3.** Pohja- ja leikkauskuva vesitornin säiliöstä, jossa on erillinen tulo- ja lähtöputki. Sininen alue kuvaa tuoretta vettä ja ruskea alue kulmissa vanhaa vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 11.) 28

Kuva 4. Leikkauskuva vesitornin säiliössä ilmenevästä veden kerrostumisesta. Sininen alue kuvaa tuoretta, kylmää vettä ja ruskea alue kuvaa vanhaa ja lämpimämpää vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 25.)	29
Kuva 5. Leikkauskuva vesitornin säiliössä ilmenevästä veden kerrostumisesta. Sininen alue kuvaa tuoretta, lämmintä vettä ja ruskea alue kuvaa vanhaa ja kylmempää vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 25.)	30
Kuva 6. Veden sekoittumista edistävä ilmastusjärjestelmä säiliössä (GNL 2011, 17).	32
Kuva 7. Hypoteesi veden virtaussuunnista ja pysähtyneistä vyöhykkeistä Turun Yliopistonmäen vesitornin säiliöissä. Ruskeat alueet kuvastavat kulmissa hypoteettisesti seisovaa vettä ja nuolet veden virtaussuuntaa. Vihreä ympyrä kuvastaa näytteenottopistettä ja musta viiva ohjausseiniä.	35
Kuva 8. Pienoismalli vesitornin suorakaiteen muotoisesta säiliöstä.	37
Kuva 9. Saavissa toteutettu seisovan veden seurantajakso.	40
Kuva 10. Merkkiaineen kulku pienoismallissa.	47
Kuva 11. Veden virtausta mallintavat kellukkeet Turun Yliopistonmäen vesitornissa.	48
Kuva 12. Veden virtausta mallintavat kellukkeet Turun Yliopistonmäen vesitornissa.	49

Kuviot

Kuvio 1. Yliopistonmäen vesitornin mediaanilämpötilat.	51
Kuvio 2. Yliopistonmäen vesitornin kokonaisklooripitoisuuksien mediaanitulokset. Näytteenottokerrat 1–5 on värikoodattu.	53
Kuvio 3. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden pH-arvot.	55
Kuvio 4. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden sameusarvot.	57
Kuvio 5. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden veteen liuennut happi.	58
Kuvio 6. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden heterotrofinen pesäkeluku 22 °C.	61
Kuvio 7. Seisovan veden seuranta. Saavista mitatun ATP:n ja heterotrofisten pesäkkeiden välinen korrelaatio.	62

Kuvio 8. Yliopistonmäen vesitornin heterotrofinen pesäkeluku 22 °C - mediaanitulokset R2A-pintaviljelymenetelmällä.	63
Kuvio 9. ATP-pitoisuuksien mediaanitulokset Yliopistonmäen vesitornista.	64
Kuvio 10. Seisovan veden seuranta. Saavista mitattu ATP.	65

Taulukot

Taulukko 1. Vesitornin veden pinnankorkeustiedon perusteella laskettu tilavuuden keskiarvo.	38
--	----

Käytetyt lyhenteet

ABS	Akryylibutadieenistyreeni, kestävä ja monikäyttöinen muovilaatu
ATP	Adenosiinitrifosfaatti, kaikissa elävissä soluissa esiintyvä molekyyli
FINAS	Suomen kansallinen akkreditointielin (engl. Finnish Accreditation Service)
ISO	Kansainvälinen standardisoimisliitto (engl. International Organization for Standardization)
LSVSY	Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy
ME/ml	Nesteessä esiintyvien bakteerien määrää kuvaava mittayksikkö
NTU	Sameuden yksikkö, (engl. Nephelometric Turbidity Unit)
PMY	Pesäkkeen muodostava yksikkö
RLU	Suhteellinen valoyksikkö (engl. Relative Light Unit) eli mittayksikkö, joka kuvaa kemiallisen reaktion yhteydessä syntyvää valoa (bioluminesenssia)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TH	Tryptoni-hiivauute-agar -elatusmalja, johon mikrobit rikastuvat 72 tunnissa
TSV	Turun Seudun Vesi Oy
VVY	Vesilaitosyhdistys
WSP	Water Safety Plan, talousveden riskienhallintamenetelmä

1 Johdanto

Vesihuolto on osa kriittistä infrastruktuuria. Sen tehtävänä on turvata ihmisten terveys varmistamalla turvallinen ja kestävä talousveden jakelu sekä jäteveden käsittely. Riskienhallinnan kehittäminen ja kuluttajaturvallisuuden varmistaminen ovat tärkeimpiä asioita talousveden jakelun turvaamisessa. (Maa- ja metsätalousministeriö n.d.) Talousveden riskienhallintatyökalun WSP:n (Water Safety Plan) tarkoituksena on tunnistaa ja hallita talousveden tuotannon toimintaympäristöön liittyviä riskejä (STM n.d.). Yhdeksi talousveden riskitekijäksi WSP on tunnistanut vedenjakelujärjestelmän osana olevat vesitornit, jotka on määritetty seurattaviksi kohteiksi. Vesitornien tehtävänä on vesijohtoverkoston paineentasaus sekä veden varastointi hätätilanteiden varalta (RIL 124-2-2004, 37). Kun veden vaihtuvuus tornissa on vähäistä, varastointi-ikä säiliössä kasvaa, heikentäen esimerkiksi veden mikrobiologista laatua (USEPA 2002, 1). Veden kiertoa pyritään parantamaan erilaisin rakentein, joiden tehokkuutta tarkastellaan kriittisesti opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksessa sekä pohdinnassa.

Tämä opinnäytetyö on tehty Turun Vesihuolto Oy:n toimeksiantona. Työssä tutkitaan Turun Yliopistonmäen vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmien vaikutusta veden laatuun ja vaihtuvuuteen. Veden laadusta säiliön kulmissa ei löytynyt aikaisempaa suomalaista tai kansainvälistä tutkimusta, joten tutkimuksessa on hyödynnetty useita soveltavia menetelmiä.

Opinnäytetyössä säiliön kulmien tutkimiseksi kehitettiin malli, jota voi hyödyntää pohjana tulevilla vesitornien veden laatua koskevissa tutkimuksissa.

1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena oli tutkia, miten Turun Yliopistonmäen vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmat vaikuttavat vesitornin veden fysikaalis-kemialliseen ja mikrobiologiseen laatuun sekä veden vaihtuvuuteen. Työssä tutkittiin säiliön kulmissa seisovan veden vaihtuvuutta mallintamalla vesitornin säiliötä pienoismallin avulla sekä todellisessa ympäristössä sijoittamalla tornin säiliöön kellukkeita. Lisäksi veden kerrostuneisuutta tutkittiin vesitornista otettujen kerrosvesinäytteiden avulla. Kulmissa seisovan veden ikääntymisen vaikutusta veden laatuun havainnollistettiin seisovan veden seurantajakson avulla, jossa saavissa seisotetun veden laatua analysoitiin viikon välein, kolmen kuukauden ajan.

Tutkimushypoteesi oli, että vesi vaihtuu säiliön kulmissa heikosti, ja pysähtyneitä vyöhykkeitä muodostuu säiliön kulmiin, koska veden liike on oletettavasti hitaampaa suorakaiteen muotoisissa säiliöissä verrattuna perinteisiin, pyöreisiin säiliöihin. Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen teettämän tutkimuksen perusteella joissakin Suomen vesitorneissa veden kerrostuneisuutta on ollut havaittavissa ja pintakerroksen veden on todettu poikkeavan laadullisesti torniin tulevasta vedestä (Pursiainen 2018). Yliopistonmäen vesitornissa kerrostuneisuutta epäiltiin ilmenevän enemmän säiliön kulmissa kuin tuloputken kohdalla. Veden kerrostuneisuuden tutkiminen Yliopistonmäen vesitornista katsottiin oleelliseksi osana kulmien mallintamista, jotta yleiskuva veden tilasta hahmottuisi paremmin.

Tutkimuksella tuotettiin Turun Vesihuollolle uutta ja arvokasta tietoa Yliopistonmäen vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmissa seisovan veden tilasta. Tutkimuksen tuloksista hyötyvät myös Suomen muut vesilaitokset, joiden jakeluverkostossa on suorakaiteen muotoisia vesitorneja.

Tutkimuskysymyksinä toimivat seuraavat kysymykset:

1. Miten vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmissa seisovan veden laatua voidaan tutkia?
2. Vaihtuuko vesi Turun Yliopistonmäen vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmissa yhtä tehokkaasti kuin keskellä?
 - a) Millainen on säiliön kulmissa olevan veden fysikaalis-kemiallinen ja mikrobiologinen laatu?
 - b) Onko vesitornin vedessä havaittavissa kerrostuneisuutta?
3. Mitkä toimenpiteet parantaisivat veden laatua ja vaihtuvuutta vesitornin säiliön kulmissa?

1.2 Opinnäytetyön rakenne

Tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa perehdytään talousveden tuotantoon ja jakeluun sekä veden laadunvalvontaan ja yleisimpiin veden laatuparametreihin. Lisäksi syvennytään vesitornien toimintaan sekä veden laatuun ja kerrostumiseen säiliössä. Talousveden tuotantoa ja jakelua käsittelevien osioiden kautta lukija ymmärtää paremmin, minkälaiset tekijät vaikuttavat veden laatuun sen lähtöpisteessä ja miten talousveden jakelu tapahtuu Turussa. Laadunvalvonnassa määritettävien parametrien sisäistäminen auttaa lukijaa ymmärtämään, miksi tutkimuksessa on huomioitu tietyt vedenlaatuparametrit ja millainen vaikutus niiden poikkeavilla pitoisuuksilla on vedenlaatuun. Vesitornien toiminnan ja veden vaihtuvuuden tai sen seisahtumisen ymmärtäminen on oleellinen osa työn kokonaiskuvan hahmottamista, koska lopussa työn tuloksia ja vesitornin toimintaa pohditaan niiden kautta.

Kolmannessa luvussa käsitellään työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Luvussa syvennytään säiliön kulmissa seisovan veden liikkeisiin mallintamalla säiliötä ja havainnollistetaan säiliön pysähtyneiden vyöhykkeiden veden laatua seisovan veden seurantajakson kautta. Luvussa käsitellään myös Turun Vesihuollon sekä Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy:n laboratorioden käyttämiä analyysimenetelmiä, koska niiden sisäistäminen

auttaa lukijaa ymmärtämään, kuinka tuloksissa käsiteltävät analyysit määritettiin ja mihin standardeihin määritysmenetelmät perustuvat. Lisäksi analyysimenetelmien läpikäynti mahdollistaa tutkimuksen toistettavuuden.

Neljännessä luvussa esitellään tutkimuksen tuloksia sekä tarkastellaan tuloksista tehtäviä päätelmiä. Viidennessä luvussa kootaan tuloksista johtopäätöksiä sekä pohditaan tutkimuksen kokonaiskuvaa ja onnistumista tavoitteiden ja tulosten kautta. Lisäksi pohditaan kehitysideoita säiliön veden vaihtuvuuden parantamiseksi sekä mahdollisuuksia jatkotutkimuksille.

2 Kirjallisuuskatsaus

2.1 Tutkimuksessa käytetty kirjallisuus

Tutkimuksessa käytettyä kirjallisuutta ja taustatietoa kerättiin talousveden tuotannosta ja jakelusta, talousveden laadusta sekä vesitornien toiminnasta, pohjustaakseen opinnäytetyön tutkimusnäkökulmaa ja tulosten tarkastelua. Kirjallisuuskatsauksessa hyödynnetyjä tutkimusartikkeleita ja kirjallisuutta kerättiin FINNA- ja Google Scholar -hakupalveluista. Talousveden lainsäädäntöä koskevissa osuuksissa hyödynnettiin Finlex-tietopalvelua ja standardiluokitukseen perustuvissa analyysimenetelmissä standardeja kerättiin Suomen Standardoimisliiton SFS Online -tietokannasta. Tutkimuksen toteutuksessa hyödynnettiin Turun Vesihuollon sisäisen intranetin sisältämiä tietoja koskien Turun Yliopistonmäen vesitornia, veden laatutuloksia sekä verkostokarttatietoja.

Tutkimuksia ja artikkeleita tarkasteltaessa kiinnitettiin huomiota luotettavuuteen ja ajantasaisuuteen sekä tulkittiin samaan aihepiiriin lukeutuvien eri lähteiden välisiä ristiriitaisia näkökulmia. Vesitornien kulmissa seisovan veden laadusta oli haastavaa löytää tietoa, koska kyseessä on niin tuore ja tiettävästi tutkimaton aihepiiri. Valvira julkaisi uuden talousvesiasetuksen soveltamisohjeen keväällä 2024. Kirjallisuuskatsaus sekä näytteenotto työstiin syyslukukaudella 2023, minkä vuoksi veden laatua koskevissa osuuksissa ensisijaisena tiedonlähteenä käytettiin sen hetkistä voimassa olevaa Valviran talousvesiasetuksen soveltamisohjetta vuodelta 2020.

2.2 Raakaveden vaikutus vedenpuhdistukseen

Talousveden laatua koskevaa tutkimusta tehtäessä on ymmärrettävä veden laatuun vaikuttavien lähtötekijöiden merkitys. Seuraavissa kappaleissa käsitellään yleisellä tasolla raakavettä sekä talousveden tuotantoa Turussa. Lisäksi käsitellään talousveden jakeluun liittyviä keskeisimpiä lukuja.

Vesilaitosten tuottaman talousveden perustana on laadukas raakavesi, joka on peräisin pinta-, pohja- tai tekopohjavedestä. Vedenpuhdistuksessa käytetyt menetelmät riippuvat aina laitoksen käyttämän raakaveden laadusta. (THL n.d.) Mikäli talousveden tuotannossa raakavesilähteenä on pintavesi, eli järvi-, joki- tai rannikkovedet, tulee vesi desinfioida aina käyttämällä kloorausta, otsonointia ja UV-säteilyä. Pohjavettä pidetään yleisesti laadun puolesta parempana kuin pintavettä, sillä toisin kuin pintaveteen, vuodenaikaiset vaihtelut eivät vaikuta pohjaveden laatuun. Lisäksi luonnontilaisessa pohjavedessä ei tavata taudinaiheuttajabakteereita tai -viruksia, eikä se likaannu yhtä herkästi kuin pintavesi. Pohjavesilähteestä tuotettua talousvettä voidaan toimittaa ilman erillistä desinfiointia, koska pohjavesialueet ovat valvottuja ja hyvin suojattuja. Tekopohjavedestä puhuttaessa tarkoitetaan pinta- ja pohjaveden välimuotoa, joka syntyy, kun pintavettä imeytetään luonnolliseen pohjavesiesiintymään. (RIL 124-1-2003, 44, 46–47.)

2.3 Talousveden tuotanto Turussa

Turussa toimitettava talousvesi on Virttaankankaan tekopohjavedessä tuotettua. Virttaankankaan tapauksessa tekopohjavesi luokitellaan pintavesilähtöiseksi veden tuotantotavaksi, koska sen raakavesi on peräisin Kokemäenjoesta, josta se johdetaan esikäsittelylaitokseen siivilöintiä, saostusta ja kiintoaineen suodattamista varten. Esikäsittelyn jälkeen vesi johdetaan imeytettäväksi Virttaankankaan harjulle osaksi pohjavettä, jossa imeytysprosessin avulla raakaveden laatu muuttuu pohjaveden kaltaiseksi 3–4 kuukauden aikana. Puhdas talousvesi johdetaan Virttaankankaalta noin 60 km pituisen matkan painovoiman avulla Turkuun ja Lietoon. Saramäen kalliosäilössä vettä desinfioidaan UV-valolla ja klooriamiinilla laadun säilyvyyden varmistamiseksi pitkissä jakeluverkoissa. (TSV n.d.) Lisäksi desinfiointia tehostetaan laadun säilyvyyden parantamiseksi yhdessä Turun verkoston osassa, jossa viipymä on laskennallisesti pitkä.

2.4 Talousveden jakelu

Talousvesi luokitellaan juotavaksi, ruoan valmistamiseen ja muihin kotitaloustarkoituksiin käytettäväksi vedeksi. Talousvettä toimittavan jakeluverkoston päätavoitteina on turvata veden riittävyys vedenjakelualueen kotitalouksille sekä varmistaa veden laatu talousvesiasetuksen mukaisesti. Vedenjakelualueella tarkoitetaan verkostoa, johon vesi kulkee vedenottamosta. (RIL 124-1-2003, 15; Valvira 2020a, 7, 11.) Suomessa vesijohtoverkostoa on noin 107 000 km, jonka piirissä on yli 90 % väestöstä. Vesijohtoverkostoista suurin osa on rakennettu 1970-luvun vaihteessa ja suurimmissa kaupungeissa toiminnassa on jopa yli 100 vuotta vanhaa verkostoa. Verkostojen korkean iän ja riittämättömästi toteutuneiden saneerausten seurauksena saneeraustarve on tällä hetkellä voimakkaasti pinnalla. (Maa- ja metsätalousministeriö n.d.; RIL 2019, 22.)

Vedenjakelujärjestelmän toiminta vaatii riittävän paineen verkoston kaikissa osissa, jotta vesi päätyy käyttöpisteeseen huolimatta verkoston maantieteellisistä korkeuseroista. Tällöin painetason tulee olla käyttöpisteiden yläpuolella. (RIL 124-1-2003, 45.)

2.5 Talousveden laatuvaatimukset

Talousveden laatua ja laatuun vaikuttavia tekijöitä tarkasteltaessa tulee ymmärtää veden laatuparametrien merkitys sekä niille asetetut talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaiset laatuvaatimukset ja -tavoitteet. Seuraavissa kappaleissa syvennyttään tutkimuksen kannalta keskeisiin laatuvaatimuksiin ja talousveden laatua kuvaaviin parametreihin.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus koskien talousveden laatuvaatimuksia ja valvontatutkimuksia on päivitetty vuonna 2023. Talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan, talousvesi ei saa sisältää pieneliöitä, taudinaiheuttajamikrobeja, loisia tai mitään aineita terveyshaittoja aiheuttavina pitoisuuksina eikä talousvesi saa olla syövyttävää, saati aiheuttaa vahinkoa vedenjakelujärjestelmässä tai

vesilaitteistoissa. Hygieenisten ja teknisten laatuvaatimusten lisäksi vedelle on asetettu esteettisiä laatuvaatimuksia, joiden mukaan vedessä ei tule olla sameutta, väriä, hajua tai makua, ja lämpötilan tulee olla tasainen vuodenaikaan nähden. (RIL 124-1-2003, 41–42.)

2.6 Laadunvalvonta

Talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan, kunnan terveydensuojeluviranomaisen on laadittava valvontatutkimusohjelma yhteistyössä talousvettä toimittavan laitoksen kanssa. Veden laatua valvotaan säännöllisesti jatkuvassa ja jaksoittaisessa seurannassa, jotta varmistutaan, ettei talousvedestä aiheudu terveyshaittoja. Jatkuvassa valvonnassa talousvedestä määritettäviä parametreja ovat mikrobiologiset muuttujat, kuten *Escherichia coli* -bakteeri (E. coli), suolistoperäiset enterokokit, koliformiset bakteerit ja pesäkkeiden lukumäärä 22 °C:ssa. Lisäksi määritetään fysikaalis-kemialliset muuttujat, kuten sameus, väri, pH, sähkönjohtavuus, rauta ja mangaani. Aistinvaraiseen veden laadun seurantaan lukeutuvat haju- ja makunäytteet, joita pidetään yleisindikaattoreina (Valvira 2020c, 28).

Talousveden laadunvalvonta perustuu viranomaisvalvontaan ja vettä toimittavan laitoksen omavalvontaan. Viranomaisvalvonnalla kunnan viranomaiset varmistuvat, ettei vesi aiheuta terveyshaittaa ja on talousvesiasetuksessa määritettyjen kriteerien mukaista. Vesilaitoksen tulee olla välittömästi yhteydessä kunnan terveydensuojeluviranomaisiin, mikäli omavalvonnassa ilmenevien tulosten perusteella epäillään tai todetaan talousveden saastuminen. Keskiössä laadunvalvonnassa on kuitenkin vesilaitoksen omavalvonta, koska laitoksen tulee toimittaa talousvesiasetuksen laatukriteerit täyttävää vettä jatkuvasti. Omavalvonnassa vesinäytteitä tutkitaan verkoston lisäksi vesitorneista. (Valvira 2020b, 92.) Omavalvonnassa vesilaitoksen velvollisuutena on tunnistaa toiminnan aiheuttamat vaarat ja suorittaa riskiarviointia, jotta talousveden turvallinen laatu voidaan taata (Valvira 2020a, 28).

Tässä opinnäytetyössä keskitytään seuraavassa kappaleessa lueteltuihin parametreihin, koska ne ovat Turun Vesihuollon omavalvonnan piiriin määriteltäviä tutkimuskohteita. Kyseisiä parametreja analysoitiin tutkimuksessa, koska niiden esiintyvyys ja mahdolliset muutokset pitoisuuksissa ovat merkittävässä osassa tutkimuksen tulosten analysoinnin ja pohdinnan kanssa. Aistinvaraiset näytteet (haju ja maku) eivät ole tämän tutkimuksen kannalta oleellisia tekijöitä analysoida, mutta niiden ymmärtäminen helpottaa yleisesti vedenlaadun kokonaiskuvan tulkitsemista. Liuenneen hapen määrittäminen ei lukeudu omavalvontaan, mutta sen esiintyvyyttä haluttiin seurata seisovassa vedessä.

2.6.1 Fysikaalis-kemialliset parametrit

Lämpötila

Lämpötila on tärkeä fysikaalis-kemiallinen määrittäminen, joka heijastuu myös veden mikrobiologiseen laatuun. Lämpötilan noustessa veden kemialliset reaktiot nopeutuvat, mikä puolestaan vähentää veteen sitoutunutta ja veden desinfiointiin tarvittavaa klooria nopeammin. Lämpötilan nousu aiheuttaa myös mikrobien kasvua, heikentäen veden mikrobiologista laatua, jonka vuoksi sen määrittäminen katsottiin oleelliseksi osaksi vesitornien kulmien laatua koskevaa tutkimusta. Lämpötilan kasvaessa makua aiheuttavat aineet haihtuvat vedestä herkemmin, mikä johtaa aistinvaraisen laadun muutoksiin, maku- ja hajuhaittoihin. (Valvira 2020c, 50.) Talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan talousveden lämpötilan enimmäisarvoksi on määritetty 20 °C. Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa viranomaisvalvonnassa määritetty lämpötila oli mediaaniltaan 9,6 °C ja keskiarvoltaan 10 °C (TVH 2024).

Kloori

Kloori on voimakas hapetin ja perinteisesti käytetty desinfiointimenetelmä. Kloorin puhdistusteho on vaikuttanut merkittävästi vesiepidemioiden vähenemiseen maailmalla. Yleisimmin talousvedessä käytettyjä kloorauskemikaaleja ovat natriumhypokloriitti, klooriamiini, kloorikaasu ja klooridioksidi. (Valve & Isomäki 2007, 6, 10.) Aktiivinen kloori jaetaan sidottuun (kokonainen) ja vapaaseen klooriin, joista sidottu kloori on klooriamiineihin (mono-, di- ja triklooriamiini) sitoutunutta, kun taas vapaa kloori muodostuu yhdessä kloorista, alikloorihapokkeesta ja hypokloriitista (Valvira 2020c, 45).

Kloorijäämiä on todettava kaikista vesijohtoverkoston osista, ja haitallisten bakteerien osalta näytteiden on oltava negatiivisia, jotta veden desinfiointiteho katsotaan riittäväksi (Valvira 2020c, 46). Kokonaisklooria tulee syöttää verkostoon 0,2–40 mg/l, useimmiten syöttömäärä on kuitenkin 0,15 mg/l. Lopulliseen syöttömäärään vaikuttaa vapaa jäännöskloori, jota tulee syöttää verkostoon 0,2–0,5 mg/l. (RIL 124-2-2004, 421.)

Turun Vesihuollon verkostossa seurataan klooripitoisuuksia, koska klooria pidetään verkoston laadun kannalta keskeisenä parametrina. Turussa vähäinen klooripitoisuus korreloi heikompana mikrobiologisena laatuna ja kertoo osittain veden iästä, koska verkostoalueilla, jossa veden ikä on erityisen korkea, on kloori kulunut lähes kokonaan pois. Tutkimuksessa veden klooripitoisuus oli määritettävä, koska sen pohjalta pystyttiin tekemään johtopäätöksiä veden yleisestä tilasta.

Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa viranomaisvalvonnassa määritetty klooriamiinilla desinfioidun veden kokonaiskloori oli mediaaniltaan 0,3 mg/l ja keskiarvoltaan 0,4 mg/l. Vapaan kloorin osalta mediaanin ja keskiarvon tulos oli 0,04 mg/l. (TVH 2024.)

pH

Pinta- ja pohjavedet ovat Suomessa lievästi happamia pH-asteikollaan 6–7. Alhainen pH-taso aiheuttaa vedenjakelussa käytettyjen materiaalien, kuten kuparin ja betonin syöpymistä. Vesijohtoveden pH:n laatutavoitteeksi on määritetty 6,5–9,5, mutta haitallisen syöpymisen välttämiseksi vesilaitosten tulisi pyrkiä pH-arvoon 7,0–8,8. (Valvira 2020c, 32–33.) Mikäli veden pH-arvo ylittää arvon 9,5, tulee talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan asettaa veden käyttökielto terveyshaittojen ehkäisemiseksi. pH-arvoa tulee seurata myös desinfiointitehon kannalta, koska kloorin desinfiointiteho heikkenee pH:n ylittäessä arvon 7,5 (TSV 2021). Turussa pH-taso on jo luontaisesti korkea, johtuen Virttaankankaan harjuhiekan kalsiittimineraalista (TSV 2021). pH-määrittäminen sisällytettävä tutkimukseen, koska sen mahdollisten muutosten tarkkailun katsottiin antavan tulosten kannalta lisää johtopäätöksiä veden laadusta. Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa viranomaisvalvonnassa määritetty pH oli mediaaniltaan ja keskiarvoltaan 8,5 (TVH 2024).

Sähkönjohtavuus

Veden sähkönjohtokyvyllä kuvataan veteen liuenneiden mineraalisuolojen määrää. Talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan sähkönjohtavuuden laatutavoitteeksi on asetettu 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Korkeiden sähkönjohtavuustasojen seurauksena putkistoissa voi ilmetä korroosiota, jonka ehkäisemiseksi sähkönjohtavuuden olisi suositeltavaa pysyä pienemmissä lukemissa. (Valvira 2020c, 34.) Äkillinen sähkönjohtavuuden nousu verkostossa voi kertoa myös saastumistapauksesta (USEPA 2006, 42) ja tämän vuoksi sen määrittäminen tutkimuksessa oli olennaista. Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa mitattu sähkönjohtavuus oli mediaaniltaan ja keskiarvoltaan 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (TVH 2024).

Sameus

Sameus on veden laatua kuvaava optinen parametri, jossa veden sisältämä kiintoaines aiheuttaa valonsirontaa, nostaen samalla sameusarvoa (Arola ym. 2012, 9). Sameudella ei suoranaisesti ole terveydellisiä haittavaikutuksia, mutta veden desinfiointitehokkuus voi laskea, mikäli sameuden aiheuttajana ovat veden sisältämät hiukkaset. Myös monet haitalliset yhdisteet, kuten raskasmetallit ja pestisidit ovat taipuvaisia sitoutumaan sameutta aiheuttaviin partikkeleihin. (Valvira 2020c, 34.) Talousvesiasetuksen (STM 2023) laatutavoitteiden mukaan sameuden on oltava käyttäjien hyväksyttävissä, eikä siinä saa esiintyä epätavallisia muutoksia. Sameuden mittayksikkönä käytetään usein NTU (engl. Nephelometric Turbidity Unit) sameuslukua, joka puolestaan tulisi olla enintään 1 NTU pintavesilaitoksilta lähtevässä vedessä. (Valvira 2020c, 34.) Tutkimuksessa veden sameutta seurattiin, koska sen katsottiin olevan olennaista veden laadun arvioinnissa. Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa viranomaisvalvonnassa määritetty sameus oli keskiarvoltaan 0,1 NTU (TVH 2024).

Rauta

Rautaa esiintyy Suomen pohjavesissä eri yhdistemuodoissa ja pintavesissä saostuneena humusyhdisteisiin (RIL 124-1-2003, 225). Pohjavesialueilla raudan esiintyvyyteen vaikuttavat muun muassa kallioperän koostumus ja veden pH. Talousvedessä esiintyvät rautapitoisuudet eivät aiheuta merkittäviä terveyshaittoja, mutta suurina pitoisuuksina rauta voi aiheuttaa ärsytystä ruoansulatuskanavassa. (THL 2023a.) Talousveteen rautaa voi liueta jakeluverkon ja -laitteiden materiaaleista, aiheuttaen suurina pitoisuuksina ruostekerrostumia saniteettikalusteisiin ja pyykkiin (Valvira 2020c, 33). Rauta aiheuttaa värimuutoksia tekstiileissä sekä huomattavia makuhaittoja pitoisuuden ollessa 0,3 mg/l. Rautasaostuma on huomattavissa 0,5 mg/l pitoisuudessa. (RIL 124-1-2003, 226.) Suurin hyväksyttävä rautapitoisuus talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan on 0,2 mg/l. Rautapitoisuuden tulisi kuitenkin olla

vesilaitokselta lähtiessä laatutavoitteita pienempi, jotta rautasaostumia ei kertyisi verkostoon. Tietyissä olosuhteissa vesilaitteisiin voi kehittyä mikrobikasvustoa, joka rautasaostumaan sitoutuneena heikentää veden laatua virtaussuunnan ja paineen vaihtuessa. Tämän vuoksi tutkimuksessa päätettiin määrittää veden rautapitoisuutta. Säännöllinen verkostohuuhtelu vähentää rautasaostumien aiheuttamia ongelmia vedessä. (Valvira 2020c, 33.)

Vuonna 2023 Turun vesijohtoverkostossa viranomaisvalvonnassa määritetty rauta oli mediaaniltaan ja keskiarvoltaan 0,01 mg/l (TVH 2024).

Haju ja maku

Aistinvaraiseen veden laadun seurantaan lukeutuvat haju- ja makunäytteet, joita pidetään yleisindikaattoreina. Haju ja maku tulee analysoida aina osana näytteenottoa. (Valvira 2020c, 28.) Talousvesiasetuksen (STM 2023) laatutavoitteiden mukaan veden hajun ja maun on oltava käyttäjän hyväksyttävissä. Aistinvaraisten poikkeamien ilmetessä on selvitettävä muutokseen johtaneet syyt, koska poikkeavuus voi viitata veden terveydellistä laatua uhkaavasta tekijästä. Haju- ja makuhaittoja voi esiintyä vedessä, mikäli talousvesi on seissyt kiinteistön putkissa pitkään. Toisinaan vedessä saattaa haista lievästi kloori, jota klooridesinfiointia käyttävät laitokset lisäävät veteen. Kloorin hajua ja makua ei kuitenkaan luokitella laatuvirheeksi. (Valvira 2020c, 28.)

Liennut happi

Veden happipitoisuus (O_2) on yleisesti luonnonvesissä tärkeä veden laatuparametri, koska veteen liunneen hapen määrä kasvaa lämpötilan laskiessa, kylmän veden sidottaessa hapetta lämmintä vettä paremmin. (Leppäranta ym. 2017, 46–47.)

Hapetta päätyy veteen ilmakehästä sekä osittain yhteyttämisen seurauksena. Koska veden happipitoisuus vaikuttaa veden aistinvaraisiin huomioihin, tulee

talousveden olla happitasoltaan alimmillaan 3 mg/l⁻¹. Mikäli veden happipitoisuus laskee alle 2 mg/l⁻¹, happea tarvitsevat eliöt kuolevat, synnyttäen hajoamisprosessin, joka aiheuttaa veteen rikkivedyn tuomaa hajua. (Leppäranta ym. 2017, 46–47.)

Turussa veteen liuennutta happea ei tutkita säännöllisesti, eikä se lukeudu viranomaisvalvonnan piiriin, jonka vuoksi siitä ei ole saatavilla verkoston keskiarvollisia tuloksia. Sen katsottiin kuitenkin soveltuvan seisovan veden seurantajaksoon, koska tutkimuksessa haluttiin tietää, minkälainen vaikutus pitkään seisseellä vedellä on sen happipitoisuuteen ja mikrobiologiseen laatuun.

2.6.2 Mikrobiologiset parametrit

***Escherichia coli*- ja koliformiset bakteerit**

Koliformisten bakteerien ryhmään lukeutuva *Escherichia coli* -bakteeri (*E. coli*) esiintyy ainoastaan ihmisten ja tasalämpöisten eläinten suolistossa. Sen esiintyvyys talousvedessä kuvaa suolistoperäistä saastumista, minkä vuoksi sitä voidaan pitää yhtenä tärkeimpinä veden hygieenisen laadun indikaattoribakteereina. (RIL 124-1-2003, 246; Valvira 2020c, 7–8.)

Koliformisten bakteerien sukuun lukeutuu myös useita luonnossa, kuten maaperässä ja pintavesissä esiintyviä lajeja, jolloin koliformisten bakteerien löydös vesinäytteestä ei ole yksinomaan merkki suolistoperäisestä saastumisesta. Koliformisten bakteerien esiintyminen vesinäytteessä voi olla peräisin esimerkiksi bakteerien kasvusta verkostossa tai näytteenoton yhteydessä tapahtuneesta virheestä. (Valvira 2020b, 44; Valvira 2020c, 8.)

Talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaan laatuvaatimus

E. coli -bakteereissa on 0 PMY/100 ml ja laatutavoite koliformisissa bakteereissa 0 PMY/100 ml. Kummatkin muuttujat lukeutuvat jatkuvan valvonnan piiriin (STM 2023). *E. coli*- ja mikrobiologisten bakteerien määrittäminen oli olennaista etenkin seisovan veden seurantajaksolla, koska niiden esiintymistä haluttiin seurata tilanteessa, jossa veden ikä kasvaa sekä yhdistää tuloksia

todelliseen ympäristöön, vesitornin säiliön kulmiin. Mikäli vesinäytteistä tehdään *E. coli* -löydös, tulee käynnistää välittömät toimenpiteet ongelman selvittämiseksi. Verkosto tulee desinfioida sekä huuhdella tai tilanteen mukaan myös tehokloorata. (Valvira 2020b, 6.)

Vuonna 2023 viranomaisvalvonnassa Turun vesijohtoverkostosta ei tehty löydöksiä *E. coli* tai koliformisten bakteereiden osalta (TVH 2024).

Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C TH-maljavalumenetelmä

Vesilaitosten desinfioinnin tehokkuutta ja verkostoveden laatua seurataan heterotrofisen pesäkeluvun määrittämisellä, joissa selvitetään veden aerobisten ja heterotrofisten bakteerien sekä hiivojen ja homeiden lukumäärä. Pesäkkeet muodostuvat TH (tryptoni-hiivauute-agar) -elatusmaljalle 72 tunnin inkubointiajassa. Pesäkeluvun tuloksiin vaikuttavat muun muassa verkoston rakenne ja kunto, veden lämpötila ja viipymä vesitornin säiliössä tai verkostossa sekä mikrobeille käyttökelpoisten ravinteiden määrä. Tämän vuoksi pesäkkeiden esiintyvyyttä ja kasvua tutkittiin vesitornista sekä seisovan veden seurantajaksolla saavista otetuissa näytteissä. (Valvira 2020c, 11–12.)

Talousvesiasetuksen (STM 2023) asettaman laatutavoitteen mukaan pesäkeluvussa ei saa olla epätavallisia muutoksia. Mikäli verkoston heterotrofinen pesäkeluku ylittää arvon 100 PMY/ml, tulee verkoston tilanne kartoittaa ja suorittaa huuhtelu (RIL 124-1-2003, 246).

Vuonna 2023 viranomaisvalvonnassa Turun vesijohtoverkostossa heterotrofisia pesäkkeitä havaittiin keskiarvallisesti 1 PMY/ml ja mediaaniltaan 0 PMY/ml (TVH 2024).

Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C R2A-pintaviljelymenetelmä

Vesinäytteiden heterotrofista pesäkelukua määritetään myös pintaviljelynä R2A-alustoilla, joissa inkubointiaika on seitsemän vuorokautta. Inkubointiajan jälkeen maljasta lasketaan muodostuneet pesäkkeet. R2A-menetelmän

ansioista pesäkelukumäärät ovat yleensä suurempia kuin TH-ravintoalustaan määritetyt pesäkeluvut, mikä tulee ottaa huomioon tulosten tarkastelussa.

Tutkimuksessa pesäkkeiden esiintyvyyttä ja kasvua tutkittiin TH-maljavalumenetelmän lisäksi R2A-menetelmällä, koska R2A-menetelmä on osaltaan luotettavampi – viikon kestävässä kasvatusajassa myös hitaasti kasvavat mikrobilajit, kuten homeet ja aktinomykeetit (sädesienet) kehittyvät alustan pinnalle. (Valvira 2020c, 45; THL 2023b.)

Heterotrofisten pesäkkeiden määrittäminen R2A-menetelmällä on aloitettu Turun verkostosta vasta vuoden 2023 lopulla, jonka vuoksi siitä ei ole saatavilla vuoden keskiarvollisia tuloksia.

ATP (Adenosiinitrifosfaatti)

ATP eli adenosiinitrifosfaatti on kaikissa elävissä soluissa esiintyvä molekyyli, joka varastoi ja kuljettaa runsaasti energiaa organismien ja solujen toimintaan (Stanley 1989, 378; Agteresch ym. 1999, 211). ATP-pitoisuuden määrittäminen perustuu tulikärpäsestä erotetun lusiferaasin käyttöön. Lusiferaasi-entsyymi reagoi näytteen mikrobeista vapautuneen ATP:n kanssa, muodostaen mitattavaa luminosenssia. Tulos ilmoitetaan suhteellisena valoyksikkönä (RLU) ja on samalla verrannollinen mikrobien määrään. (Stanley 1989, 375.)

Perinteisiin pesäkeviljelymenetelmiin verrattuna ATP-pitoisuuden määrittäminen on huomattavasti tehokkaampaa, koska tulokset veden mikrobiologisesta aktiivisuudesta saadaan reaaliaikaisina heti näytteenoton jälkeen.

Heterotrofisten pesäkelukujen viljelyillä ja R2A-tuloksilla puolestaan kestää 3–7 vuorokautta. Näin ollen verkoston mikrobiologinen tila voidaan saada selville jo ennen kuin mahdollinen laatupoikkeama päättyy kuluttajalle. (Vang ym. 2014, 310.) ATP-pitoisuuden määrittäminen osana tutkimusta katsottiin aiheelliseksi sen tehokkuuden ja herkkyyden mikrobiologiseen laatuun verrattavuuden myötä.

2.7 Vesitornit

Tämän työn kannalta on oleellista tuntee vesitornien toimintaperiaatteet sekä säiliötilojen vaikutus veden laatuun. Seuraavissa kappaleissa syvennyttään vesitornien ja niiden säiliöiden toimintaan sekä veden kerrostumiseen ja sekoittumiseen vaikuttaviin tekijöihin. Lisäksi sivutaan lyhyesti, millaisia vaikutuksia säiliön rakenteilla on veden mikrobiologiseen laatuun.

Vesitornit ovat osa vesijohtoverkostoa. Niiden tarkoituksena on tasata verkoston kulutusvaihteluja eli ylläpitää verkoston painetasoa ja varastoida talousvettä muun muassa kriisitilanteita varten. (RIL 124-2-2004, 37.)

Vedenjakelujärjestelmän toiminnan takaamiseksi tulee veden paineen olla kaikissa verkoston osissa riittävä, jotta vesi saadaan nostettua jokaiseen käyttöpisteeseen. Öisin vedenkulutus on pientä, jolloin jakelujärjestelmän painetaso on koko jakelualueella samalla korkeudella kuin verkostoon liitetyn ylävesisäiliön pinta. Päivisin, kun vedenkulutus on runsaampaa, johtoverkossa tapahtuu virtausvastuksista johtuvaa painehäviötä, minkä seurauksena verkoston painetaso laskee. (RIL 124-1-2003, 45.)

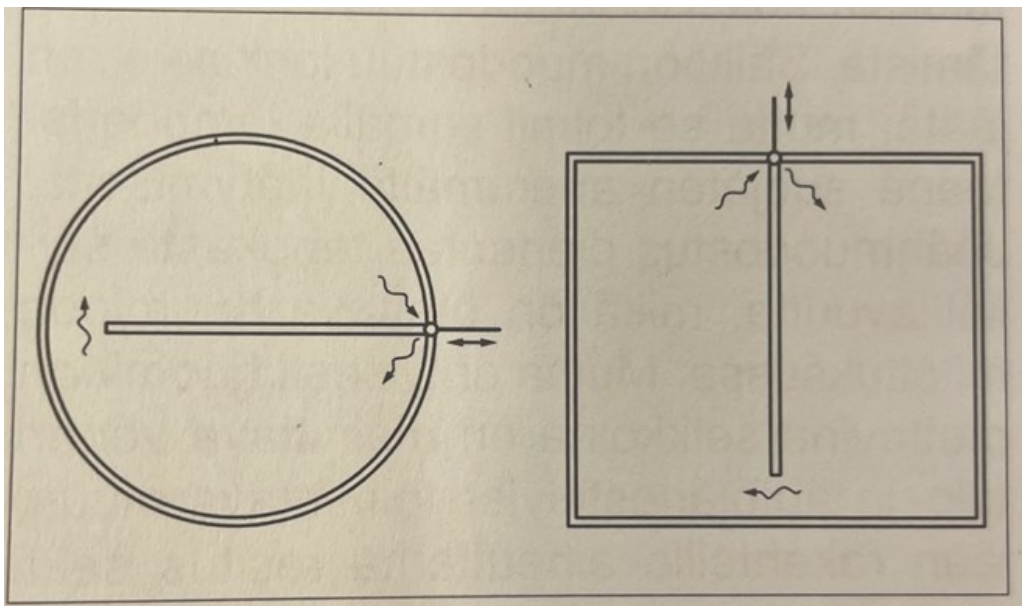
Vesisäiliöiden perustyytit jakautuvat toimintaperiaatteensa mukaan jalallisiin ylävesisäiliöihin sekä maanvaraisiin tai maanalaisiin vesisäiliöihin (RIL 124-2-2004, 37). Jakeluverkkoon liitetty säiliörakenteet vaihtelevat maaston korkeuserojen mukaisesti. Maan sisään voidaan rakentaa edullisemmin vesisäiliöitä, mikäli maastonkorkeus on riittävä ja korkea maastonmuoto takaa riittävän verkostopaineen. Matalampien maastonmuotojen omaavissa alueissa tulee puolestaan turvautua vesitorniin, jotta verkostopaine pysyy tasaisena. (RIL 124-1-2003, 63.) Äkillisten ja suurta vesitarvetta aiheuttavien hätätilanteiden vuoksi vesitornit ovat suunniteltu suurten tilavuuksien mukaisesti. Normaalisissa kulutuksissa veden vaihtuvuus tornissa on vähäistä suhteessa säiliön tilavuuteen, minkä takia veden ikääntyessä myös laatu heikkenee. (USEPA 2002, 1.) Vesitornien järjestelmälliseen tarkastustoimintaan kuuluu talousveden laadunvalvonta vesitorneissa kuukausittain suoritettavalla vesinäytteenotolla (RIL 264-2013, 21).

Turussa käytössä olevia vesitorneja on neljä – Yliopistonmäen, Luolavuoren, Juhannuskukkulan ja Parolanpuiston vesitornit (TVH 2019). Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan jalallisen ylävesisäiliön, erityisesti suorakaiteen muotoisen vesitornin toimintaa, koska mallinnuksen pohjana käytettiin Turun Yliopistonmäen vesitornia.

2.7.1 Vesitornien säiliötilat

Vesitornin säiliön koolla ja muodolla on vaikutusta veden vaihtuvuuteen ja sen kautta myös laatuun. Säiliöt ovat yleisimmin pyöreitä tai suorakaiteen muotoisia. Laadun kannalta optimaalisimmaksi menetelmäksi on todettu rakennustapa, jossa säiliön korkeus on pienempi kuin kaksinkertainen sen leveyteen nähden. Koska veden tasaisen sekoittumisen on todettu olevan heikompaa suuremmissa säiliöissä, tulee veden laatu varmistaa tällöin minimoimalla veden viipymisaika sekä huomioimalla syvyyttä ja ilmanvaihtoa koskevat säädökset. Säiliön keskisyvyyden tulisi olla yli kolme metriä, jolloin vesi pääsee tasaisesti sekoittumaan. Lisäksi pitkissä ja kapeissa säiliöissä putket tulisi sijoittaa vastakkain, jotta vesi kulkisi tulppavirtauksena. (WHO 2004, 47.) Hygieniasyistä ilmanvaihto on suunniteltava vesitornissa siten, ettei pöly tai hyönteiset kulkeudu vesitilaan vedenkorkeuden laskiessa. Vesitilan tulee olla pimeä, koska valo voi lisätä veden laatua heikentävän planktonlevän muodostumista. (RIL 124-2-2004, 337.)

Veden kulkua ja sekoittumista pyritään ohjaamaan säiliöön rakennettavilla seinärakenteilla (Kuva 1), jotka tulee suunnitella siten, että vesi vaihtuu vesitilan kaikissa osissa (RIL-124-2-2004, 337).

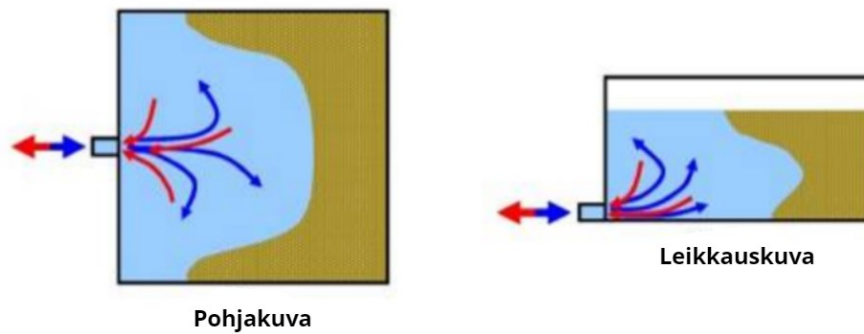


Kuva 1. Vesisäiliön sisäistä vedenkiertoa ohjaavia seinärakenteita erityyppisissä säiliöissä (RIL 124-2-2004, 336).

Vesitornien ohjausseinien merkittävyydellä on näkemyseroja kansallisissa ja kansainvälisissä tutkimuksissa. Suomen RIL 124-2-2004 ohjeistus ja WHO:n ohjeistus ohjausseinien käytöstä poikkeavat toisistaan. WHO:n (2004, 48) mukaan jatkuvissa tulovirtauksissa ohjausseinän käytön on todettu heikentävän veden laatua, eikä sitä suositella rakennettavaksi uusiin vesitorneihin.

Suomessa toimitaan RIL 124-2-2004 ohjeistuksen mukaan, joten tässä opinnäytetyössä ohjausseinien toimintaa käsitellään sekoittuvuutta edistävänä parannusehdotuksena. Turun Yliopistonmäen vesitornissa ohjausseinä on rakennettu kumpaankin säiliöön, mutta niiden vaikutusta tutkimustuloksiin ei analysoida syvemmin.

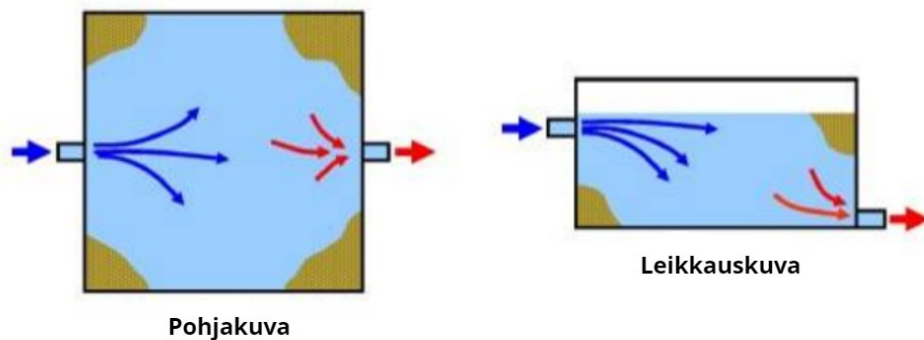
Vesitornin tulo- ja lähtöputkien sijainnilla on havaittu olevan vaikutusta veden laatuun ja vaihtuvuuteen. Mikäli vesitornissa on käytössä yhteisputki eli säiliöön tuleva vesi poistuu samaisen tuloputken kautta, on veden vaihtuminen heikkoa, koska epätasaisen sekoittumisen seurauksena vanha vesi jää putken vastakkaiseen reunaan, säiliön kulmiin (Kuva 2). Yhden putken toimintaan perustuvissa vesitorneissa voi olla riski, että sama vesi virtaa toistuvasti säiliöstä sisään ja ulos.



Kuva 2. Pohja- ja leikkauskuva vesitornin säiliöstä, jossa on yhteinen tulo- ja lähtöputki. Sininen alue kuvaa tuoretta vettä ja ruskea alue kulmissa vanhaa vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 11.)

Säiliössä, jossa vesi kulkee erillisen tulo- ja lähtöputken kautta, on veden vaihtuminen tehokkaampaa ja vesi laadultaan parempaa. Kuvan 3 asennetut tulo- ja lähtöputket ylläpitävät veden vaihtuvuutta ja sekoittumista, koska vesi pääsee virtaamaan koko säiliössä eri vesikerrosten läpi.

(GNL 2011, 10–12.)



Kuva 3. Pohja- ja leikkauskuva vesitornin säiliöstä, jossa on erillinen tulo- ja lähtöputki. Sininen alue kuvaa tuoretta vettä ja ruskea alue kulmissa vanhaa vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 11.)

Veden sekoittumisen ja vaihtuvuuden parantamiseksi säiliöihin on mahdollista suunnitella potkurilaitteita tai lisätä pumpun tehoa veden virtausolosuhteiden mukaiseksi. Säiliön ilmastus edistää veden sekoittumista ja pienentää veden ikääntymistä suihkuttamalla säiliön pohjasta pumpattua vettä säiliön pintakerrokseen. (GNL 2011, 16; WHO 2017, 172.)

2.7.2 Veden kerrostuminen säiliössä

Veden lämpötilaeroilla on selkeä vaikutus veden kerrostuneisuuteen ja mikrobiologiseen laatuun tornissa. Kylmä vesi on tiheämpää kuin lämmin vesi, minkä seurauksena se laskeutuu vesipatsaan pohjalle. Tuloputkista virtaavan veden lämpötilan ollessa huomattavasti kylmempää kuin tornissa seissyt vanha vesi, jää se helpommin pohjalle, aiheuttaen lämpimän veden ikääntymistä ja veden laadun heikentymistä vesipatsaan pintakerroksissa (Kuva 4). Veden kemialliset reaktiot lisääntyvät lämpötilan kasvaessa, jolloin jäännöskloorin määrä vähenee ja desinfioinnin sivutuotteita muodostuu enemmän. Lämpötilan nousu aiheuttaa myös biofilmeille alttiit kasvuo-olosuhteet, jolloin veden mikrobiologinen laatu heikkenee. (GNL 2011, 24.)



Kuva 4. Leikkauskuva vesitornin säiliössä ilmenevästä veden kerrostumisesta. Sininen alue kuvaa tuoretta, kylmää vettä ja ruskea alue kuvaa vanhaa ja lämpimämpää vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 25.)

Etenkin talvella kerrostuneisuutta voi ilmetä myös säiliöön tulevan veden ollessa huomattavasti lämpimämpää kuin säiliössä seisova vesi. Tällöin tuleva vesi nousee säiliön pinnalle kuvan 5 mukaisesti, jättäen kylmän ja vanhemman veden säiliön pohjaan. Tasainen lämpötilaprofiili koko vesipatsaassa kertoo veden onnistuneesta sekoittuvuudesta. (GNL 2011, 24–25.)



Kuva 5. Leikkauskuva vesitornin säiliössä ilmenevästä veden kerrostumisesta. Sininen alue kuvaa tuoretta, lämmintä vettä ja ruskea alue kuvaa vanhaa ja kylmempää vettä. (Muokattu kuvasta GNL 2011, 25.)

Suomessa vesitorneissa esiintyvää veden kerrostuneisuutta on tutkittu Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitoksen (THL) toimesta vuosien 2016 ja 2017 aikana. Tutkimuksessa todettiin osassa vesitorneissa mikrobiologisen laadun heikkenemistä veden pintakerroksista havaittavien koliformisten bakteerien sekä korkeiden pesäkelukemien perusteella. Laadun havaittiin olevan muuta verkoston laatua heikompaa erityisesti pintakerroksen vedessä. Tutkimuksen tiimoilta THL on kannustanut vesilaitoksia selvittämään, kuinka tasaisesti vesi sekoittuu vesitornissa ja ilmeneekö säiliön vedessä kerrostuneisuutta. (Pursiainen 2018.)

2.7.3 Veden ikääntyminen säiliössä

Vesitornien heikentyneen veden laadun taustalla on usein stagnaatio (liiallinen viipymäaika) ja ikääntynyt vesi. Veden ikä vaihtelee vesitornien säiliöiden eri kohdissa sekoitusolosuhteiden mukaan. Etenkin säiliön kulmissa voi teoreettisesti esiintyä seisovaa vettä, mikäli virtausnopeus on liian alhainen. Mikäli säiliössä muodostuu pysähtyneitä vyöhykkeitä, voi veden ikä kasvaa loputtomasti. Tällöin veden klooripitoisuus voi haihtua kyseiseltä alueelta ja säiliön seinämiin voi syntyä biofilmiä, joka on otollinen kasvualusta bakteereille ja patogeeneille. Suositeltu veden viipymäaika vesitornin säiliössä on enimmillään noin 72 tuntia. Erilaiset sekoitusjärjestelmät voivat vähentää veden ikääntymistä ja estää veden pysähtymisen säiliössä. Tällaisista sekoitusjärjestelmistä puhuttaessa tarkoitetaan esimerkiksi tulo- ja lähtöputkien erottamista toisistaan sekä niiden sijoittamista kuvan 3 mukaisesti. Lisäksi säiliöön oikein asetetut kuvan 1 mukaiset ohjausseinät ja mekaaniset sekoituslaitteet parantavat veden sekoittumista. Mekaanisista sekoituslaitteista esimerkkinä on säiliön ilmastusprosessi (Kuva 6), jossa vettä kierrätetään pumpun avulla säiliön pohjasta ja suihkutetaan ilmakehään veden pinnalle. Vesitornin säiliöiden sekä tulo- ja lähtöveden säännöllinen kloorin mittaaminen on tärkeää, koska tasaiset kloorilukemat kertovat säiliön veden toimivasta sekoittuvuudesta. (GNL 2011, 10, 16–17, 20, 22, 28.)



Kuva 6. Veden sekoittumista edistävä ilmastusjärjestelmä säiliössä (GNL 2011, 17).

2.7.4 Biofilmit

Biofilmi on heterotrofisista bakteereista ja sienistä koostuva mikro-organismiyhteisö. Sen sisältämien mikrobilajien esiintyvyys talousvesiverkostossa on vaihtelevaa, johtuen ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilaeroista ja ravinteiden saatavuudesta. Biofilmien muodostumiseen vaikuttavat virtausolosuhteet, putkien tai säiliön seinämän materiaali sekä veden fysikaalis-kemialliset olosuhteet. Pysyvien virtausolosuhteiden tai alhaisten virtausnopeuksien seurauksena mikrobeilla on myös enemmän aikaa tarttua putkistojen ja vesitornin seinämien pintaan. Pintamateriaaleista etenkin betoni on otollinen kasvualusta biofilmeille, koska mikrobit pääsevät herkemmin kiinnittymään karheaan ja epätasaiseen pintaan. Korkea lämpötila voi puolestaan nopeuttaa biofilmin kasvua ja vaihtelevilla pH-tasoilla voi olla vaikutusta erilaisten mikrobipopulaatioiden kasvuun. (Li ym. 2023, 445–447.)

Biofilmeistä aiheutuvat terveyttä uhkaavat vedenlaatuongelmat ja vedessä esiintyvät laatupoikkeamat riippuvat biofilmin sisältämistä mikrobeista. Pahimmassa tapauksessa ne voivat sisältää terveydelle haitallisia taudinaiheuttajia, kuten Legionella- (*Legionella pneumophila*) sekä E. coli -bakteereita, jotka verkostosta irrottautuessa vaihtelevan paineen tai virtausolosuhteiden muutoksen seurauksena voivat aiheuttaa suuren terveysriskin kuluttajille. (Li ym. 2023, 445–447.)

3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin mallintamalla Turun Yliopistonmäen vesitornin säiliötä pienoismallin avulla, analysoimalla vedenlaatua ottamalla tornista kerrosvesinäytteitä sekä havainnollistamalla vesitornin kulmien vedenlaatua seisovan veden seurantajaksolla otettujen vesinäytteiden perusteella. Pienoismallin lisäksi veden virtausta tutkittiin asettamalla kellukkeita vesitornin säiliöön vuorokauden ajaksi. Tutkimusmenetelmissä hyödynnettiin Turun Vesihuollon asiantuntijoiden näkemyksiä ja neuvoja.

3.1 Tutkimuksen tausta

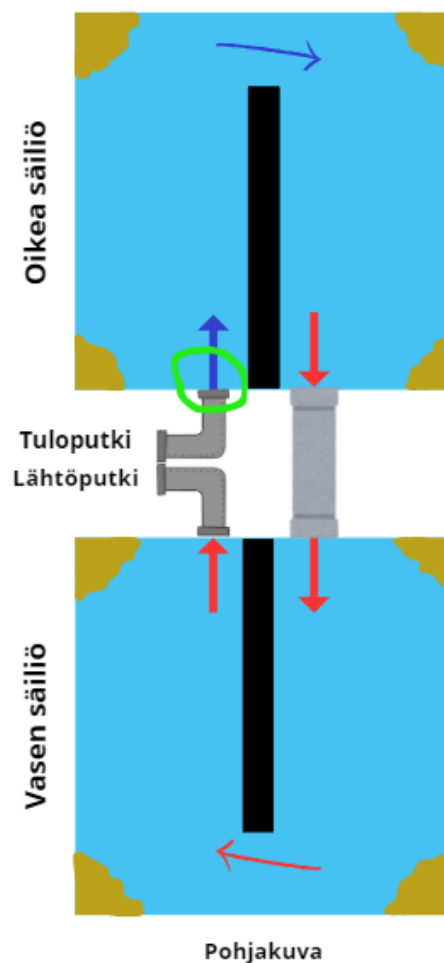
Alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan, tarkoituksena oli ottaa vesinäytteet suoraan säiliön kulmista, mutta rakennusteknisistä syistä johtuen näytteenottoa ei ollut mahdollista toteuttaa. Turun Yliopistonmäen vesitornissa on vain yksi näytteenottokohta, eikä säiliötilaa pääse kiertämään ympäri.

Käytännössä ainoa keino päästä käsiksi säiliön kulmiin olisi ollut steriilillä kumiveneellä soutaminen, kuten kuntotarkastuksissa on menetelty, ennen nykyaikaisten robottikameroiden käyttöönottoa. Tämä menetelmä kuitenkin hylättiin siitä aiheutuvan työturvallisuus- ja hygieniariskin takia.

Koska kyseistä tutkimusta ei ole aiemmin toteutettu ja vastassa olivat rajalliset menetelmävaihtoehdot sekä aikataulu, oli tutkimusta lähdettävä työstämään ideoinnin ja innovatiivisen tutkimuskehityksen myötä. Lähestymistavaksi valikoitui vesitornin kulmien toiminnan mallintaminen pienoismallin sekä vesitorniin asetettavien kellukkeiden avulla.

3.2 Turun Yliopistonmäen vesitorni

Tutkimuksen taustatiedot perustuivat vuonna 1941 valmistuneen Turun Yliopistonmäen vesitornin pohjapiirroksiin, joissa betonirakenteisen säiliön mitat ovat 16 x 12 x 6 m ja tilavuus 6000 m³. Tornin tulo- ja lähtöputket ovat halkaisijaltaan 400 mm. Putkien sijaintia ja veden virtaussuuntaa havainnollistettiin kuvan 7 avulla.



Kuva 7. Hypoteesi veden virtaussuunnista ja pysähtyneistä vyöhykkeistä Turun Yliopistonmäen vesitornin säiliöissä. Ruskeat alueet kuvastavat kulmissa hypoteettisesti seisovaa vettä ja nuolet veden virtaussuuntaa. Vihreä ympyrä kuvastaa näytteenottopistettä ja musta viiva ohjausseinää.

Turun Yliopistonmäen vesitorniin tulevan veden laskennallinen ikä on 0,0–27,7 h (Liite 1), mikä luokitellaan tuoreeksi vedeksi (Lindfors 2023, 26). Tornissa seisovan veden ja kuluttajalle lähtevän veden välistä viipymää on analysoitu Turun Vesihuollon vuonna 2019 tehdyn teoreettisen mallin avulla ja tulosten mukaan viipymä on tornissa jopa 150 tuntia. Taustatiedot perustuvat Turun Vesihuollon sisäisestä intranetistä saatuihin tietoihin.

3.3 Pienoismallin rakennus

Pienoismallia suunniteltaessa akvaario todettiin optimaalisimmaksi tavaksi mallintaa säiliötilaa, koska se vastasi muodoltaan suorakaiteen muotoisen vesitornin säiliötä. Pienoismallin toiminta suhteutettiin Turun Yliopistonmäen vesitornin kokoon ja toimintaperiaatteisiin. Akvaarion koko oli 81 x 35 x 39 cm. Akvaario käännettiin ylösalaisin ja liimattiin lasilevyjen reunasta akvaariosilikonilla tiiviisti kiinni akryylimuovista valmistettuun levyyn, johon porattiin kahdet 22 mm suuruiset reiät 20 mm kokoiselle tulo- ja lähtöputkelle. Koska mallissa keskityttiin säiliön ja pienoismallin kokojen suhteeseen, pystyttiin putken koko laskemaan yksinkertaistamalla säiliön sekä pienoismallin pituuksien suhde ja suhteuttamalla se kokojen suhteeseen. Putkien halkaisija suhteutettiin todelliseen säiliötilaan ja putkien kokoon seuraavan laskukaavan mukaisesti:

$$\frac{(\text{Altaan putkikoko} \times \text{akvaarion pituus})}{\text{altaan pituus}} = \text{akvaarion putkikoko} \quad (1)$$

$$\frac{(40 \times 81)}{1600} = 2,025 \text{ cm} \approx 20 \text{ mm}$$

Lasisäiliöön syötettävän veden tuloputki kiinnitettiin hanaan ja lähtöputki asennettiin viemäriin johdettavaksi. Putket kiinnitettiin lasisäiliöön O-renkaiden ja kaksoisnipan avulla. Tulo- ja lähtöputken väliin jäi 20 cm, joka vastasi vesitornin todellisuutta pienoismallin muodossa (Kuva 8).



Kuva 8. Pienoismalli vesitornin suorakaiteen muotoisesta säiliöstä.

Putkiin asennettiin painemittari kuvastamaan hanasta tulevan veden ja akvaarion sisällä olevan veden painetta. Painemittari ei kuitenkaan toiminut toivotulla tavalla, joten pienoismallissa vallinnutta painetasoa ei voitu verrata vesitornissa ja verkostossa vallitsevaan paineeseen. Koska akvaario käännettiin ylösalaisin, kanneksi muodostui akvaarion ”pohjalasi”, minkä seurauksena akvaarioon muodostui ylipaine vettä syöttäessä. Paine poistettiin poraamalla lasiterällä 6 mm kokoinen ilma-aukko kanteen.

Akvaarioon syötettävän veden määrä suhteutettiin vesitorniin tulevan veden mukaan, ja apuna käytettiin Turun Seudun Vesi Oy:ltä saatuja kyseisen tornin täyttöastetietoja vuoden 2023 ajalta tunnin tarkkuudella tilastoituna. Veden korkeus vaihtelee vesitornissa kulutuksen mukaan – vedenpinta on korkeimmillaan yöllä, jolloin torni täyttyy ja matalimmillaan päivällä suuren kulutuksen aikana. Veden enimmäiskorkeus tornissa oli keskiarvallisesti 5,2 m ja minimikorkeus 4,4 m.

Veden pinnanvaihtelu oli 20,5 % vuorokaudessa, minkä seurauksena akvaarioon syötettävän veden pinnankorkeus tuli olla taulukon 1 mukaan saatu keskiarvo 0,706 m³. Akvaarion veden korkeudesta 20 % poistettuna saatiin vuorokauden vaihtelu, ja kahden tunnin seurantajaksolla vettä tuli poistaa 10 % tunnissa, jotta kulutus vastasi vesitornissa seisovan veden vuorokauden mukaista kulutusnopeutta.

Taulukko 1. Vesitornin veden pinnankorkeustiedon perusteella laskettu tilavuuden keskiarvo.

V(säiliö, pinta korkeimmillaan)	0,771
V(säiliö, pinta matalimmillaan)	0,640
V(keskiarvo)	0,706

Akvaarioon syötettävien merkkiaineiden tarkoituksena oli mallintaa veden kulkua ja vaihtuvuutta kulmissa. Merkkiaineeksi valikoitui vihreä elintarvikeväriaine, joka ei kuitenkaan vastannut odotuksia sekoittuessaan siten, että säiliöön muodostui hetkessä homogeeninen seos, joka vaikeutti nesteen virtauksen mallinnusta. Seuraavaksi kehitettiin ABS-muovista 3D-tulostettuja 6 mm kokoisia palloja, joiden tiheydeksi saatiin palloon laskelmoidun ilmataskun myötä 10 °C veden tiheyttä vastaava tiheys 999,73 kg/m³ (RIL 124-1-2003, 198). Tavoitteena oli kehittää merkkiaine, joka kulkisi keskellä vesimassaa, ei kelluisi tai laskeutuisi pohjaan. Palloja syötettiin akvaarioon tuloputkesta talousveden seassa. Väriaine oli liukoisuutensa vuoksi lisättävä ilma-aukosta, jolloin merkkiaineen liikkeitä pienoismallissa seurattiin lähinnä veden vähenemisen yhteydessä.

Akvaarion suunnittelu aloitettiin syyskuussa 2023 suhteuttamalla akvaarion mittoja Turun Yliopistonmäen vesitornin säiliöiden pohjapiirrokseen. Akvaario asennettiin lokakuussa ja merkkiaineen kulkua testattiin tammikuussa 2024.

3.4 Veden virtaus vesitornissa

Veden virtausta ja vaihtuvuutta vesitornin säiliön kulmissa tutkittiin tammikuussa 2024 aloitetulla vuorokauden mittaisella seurantajaksolla. Tutkimuksessa vesitornin säiliön veden pinnalle asetettiin kaksi kelluketta, joiden liikettä seurattiin kameran taltioimilla kuvilla 24 tunnin ajalta. Tavoitteena oli nähdä, kulkeeko veden virtausta kuvastava kelluke vain tuloputkesta lähtevään putkeen vai näkykö myös säiliön kulmissa virtausta. Kellukkeina toimivat uimapatjat sekä naru desinfioitiin ja tutkimuksen aikana noudatettiin tarkasti hygieniaturvallisuutta, jolloin kontaminaatiovaaraa ei syntynyt.

3.5 Näytteenotto vesitornissa

Veden ikää ja kerrostuneisuutta tutkittiin Turun Yliopistonmäen vesitornista otettujen kerrosvesinäytteiden avulla, aikavälillä 20.11.2023–24.1.2024. Otannassa oli yhteensä viisi näytteenottokertaa. Näytteet otettiin tulevasta ja lähtevästä putkesta sekä säiliöstä tuloputken kohdalta (Kuva 7) neljästä eri syvyydestä: pinnasta, 1 m syvyydestä, 2 m syvyydestä sekä 4 m syvyydestä (pohjanäyte). Tutkimuksessa tarkasteltiin koko vesipatsasta sekä lämpötilaerojen vaikutusta veden laatuun eri syvyyksissä. Tutkimushypoteesina oli heikosta vaihtuvuudesta johtuva kerrostuneisuus, ja sen myötä ilmenevät erot säiliön vedenlaadussa. Vesitornin säiliötilassa näytteenottovälineenä toimi kahden litran lasinen limnos-näytteenotin. Tulo- ja lähtöputkesta otetuissa näytteissä hanat steriloidtiin bunsen-polttimella, minkä jälkeen vettä juoksutettiin niin kauan, että lämpötila tasaantui. Veden klooripitoisuus mitattiin ja näytteet otettiin suoraan näytepulloihin lämpötilan tasaantumisen jälkeen.

3.6 Seisovan veden seurantajakso

Seisovan veden seurantajaksolla saavista saatuja vedenlaatutuloksia suhteutettiin Yliopistonmäen vesitornin kulmissa ja muissa virtaamattomissa kohdissa seisovan veden laatuun. Tulokset eivät olleet täysin verrattavissa vesitornin kulmien mahdolliseen vedenlaatuun, koska tutkimuksessa käytetty vesi oli peräisin vesilaitoksen hanasta eikä vastannut vesitornissa seissyttä vettä, jossa jo säiliön pintamateriaali voi vaikuttaa esimerkiksi veden mikrobiologiseen laatuun. Tulokset antoivat kuitenkin tietoa seisovan veden laadun viikoittaisesta vaihtelusta.

Tutkimusjakso aloitettiin lokakuussa 2023, jolloin otettiin lähtötilanteen vesinäytteet Turun Vesihuollon toimitilojen hanasta. Ennen näytteenottoa hanan poresuodatin poistettiin ja hana steriloitiin bunsen-polttimella, jotta näytteisiin ei päätyisi mahdollisia hanassa kasvavia mikrobeja. Rakennuksen putkistoissa seissyttä vettä juoksutettiin, kunnes lämpömittarilla luettu lämpötila oli tasaantunut. Samassa täytettiin desinfioitu 80 litran vesisaavi (Kuva 9), jota säilytettiin 10 °C:ssa jääkaapissa.



Kuva 9. Saavissa toteutettu seisovan veden seurantajakso.

Saavista otettiin näytteitä syys-joulukuussa viikon välein, yhteensä yhdeksän kertaa. Ensimmäiset näytteet otettiin viikko saavin täytön jälkeen.

Kontaminaatoriskin välttämiseksi saavista otettujen näytteiden yhteydessä käytettiin desinfioitua pullonoudinta, steriileitä näytepulloja sekä käsineitä ja näytteet käsiteltiin aseptisesti. Näytteet otettiin keskeltä vesimassaa ja vettä sekoitettiin pullonoutimella ennen näytteenottoa, jotta mikrobiologinen tarkkuus säilyisi edustavana.

3.7 Vesinäytteiden analyysimenetelmät

Tutkimuksen toistettavuuden mahdollistamiseksi tässä kappaleessa esitellään lyhyesti tutkimuksessa käytetyt analyysimenetelmät ja niihin perustuvat standardit sekä mittalaitteet määritysrajoineen. Vesitornista otetut kerrosvesinäytteet sekä saavinäytteistä liuennut happi (O_2) tutkittiin Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy:n (LSVSY) FINAS-akkreditoidussa laboratoriossa. R2A:n ja ATP:n määritykset suoritettiin Turun Vesihuollon laboratoriossa. Mikrobiologiset määritykset suoritettiin samana päivänä kuin näytteenotto oli tapahtunut. Fysikaalis-kemiallisissa määrityksissä näytteet analysoitiin 1–3 vuorokauden kuluessa näytteenotosta.

Klooripitoisuuden määrittäminen

Klooripitoisuuden mittaukset suoritettiin HACH DR300 taskukolorimetri-kenttämittarilla heti näytteenoton jälkeen. Mittaus perustuu SFS-EN ISO 7393-2/2018 standardiin. Laitteen määritysraja oli vapaan kloorin osalta 0,02–2,0 mg/l ja kokonaisen kloorin osalta 0,01–8,0 mg/l (HACH n.d.). Ennen määrittäystä kenttämittari nollattiin pelkällä näytevedellä, jota kaadettiin vapaalle ja kokonaiselle kloorille osoitettuihin 10 ml:n näytekyvetteihin. Nollauksen jälkeen kyvetteihin lisättiin DPD-kloorireagenssit (HACH n.d.), jotka näyteveden kanssa reagoidessaan muuttivat veden vaaleanpunaiseksi tai kirkkaan pinkiksi riippuen klooripitoisuudesta.

pH:n määrittäminen

Vesinäytteiden pH-arvot mitattiin SFS 3021/1979 standardiin perustuen HACH SL 1000 -mittalaitteella, johon asennettiin HQD-sarjan IntelliCal™ -sensori. Ennen mittausta pH-mittari kalibroitiin kahdella puskuriliuoksella, pH-arvoiltaan 7 ja 10. Laitteessa pH:n määrittämisraja oli 0–14. (HACH 2023.)

Sähkönjohtokyvyn määrittäminen

Vesinäytteiden sähkönjohtokyky mitattiin SFS-EN 27888/1994 standardiin perustuen VWR PHenomenal CO 3100L johtokykymittarilla, jonka määrittämisraja oli 0,001 µS/cm–1000 mS/cm (VWR 2014). Sähkönjohtokykyä mitattaessa mittaria ei tarvinnut kalibroida.

Sameuden määrittäminen

Vesinäytteiden sameus mitattiin SFS-EN ISO 7027/2016 standardiin perustuen HACH 2100Q IS-sameusmittarilla, jossa määrittämisraja oli 0–1000 NTU (HACH 2021). Laite kalibroitiin ennen mittausta kolmella standardiliuoksella (20 NTU, 100 NTU, 800 NTU) ja tarkistettiin lisäksi 10 NTU:n liuoksella. Kyvetin ulkopintaan levitettiin HACH-silikoniliuosta parantamaan kyvetin mittaustarkkuutta. Näyte kaadettiin kyvetiin siten, ettei virhetulosta aiheuttavia ilmakuplia ilmaantunut kyvetin reunoihin.

Raudan määrittäminen

Rautapitoisuus määritettiin SFS 3028/1976 standardiin perustuen HACH SL 1000 -mittalaitteella, jolla myös pH-arvo määritettiin. Laitteeseen liitettiin Chemkey®-reagenssiliuos (Fe, Dissolved Iron), joka asetettiin näytevetä sisältävään alustaan. Laite mittasi rautapitoisuuden automaattisesti kuudessa minuutissa. Laitteen määrittämisraja oli 0,05–3,00 mg/l Fe. (HACH 2023.)

Liuenneen hapen määrittäminen

Saavista otetuissa näytteissä näytteenotto suoritettiin LSVSY:n näytteenotto-ohjeiden mukaisesti siten, ettei näytteeseen liuennut happea ilmasta eikä näytteessä oleva happi siirtynyt ilmaan. Näytteenoton yhteydessä happinäyte kestävästiin välittömästi pipetoimalla näytteen nestepinnan alapuolelle 1 ml mangaani(II)reagenssia sekä 1 ml alkalista jodidireagenssia. Mangaani(II)reagenssi sisälsi 435 g mangaani(II)kloriditetrahydraattia ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 1 litrassa vettä. Alkalisen jodidireagenssin liuos sisälsi 320 g natriumhydroksidia (NaOH) ja 600 g natriumjodidia (NaJ) 1 litrassa vettä. Happinäytteiden määrittäminen suoritettiin vain LSVSY:n laboratoriossa SFS-EN 25813/1993 standardiin perustuen.

***Escherichia coli*- ja koliformisten bakteerien määrittäminen**

Vedestä analysoidut *E. coli*- ja koliformiset bakteerit tutkittiin kaikista vesinäytteistä kalvosuodatusmenetelmällä, joka perustuu SFS-EN ISO 9308-1:2014/A1:2017 standardiin. Näyte kerättiin hioskorkilliseen lasipulloon, joka sisälsi klooria sitovaa natriumtiosulfaattia. Bakteerit määritettiin Vesihuollon laboratoriossa Quanti-Tray Sealer Plus -laitteella, jossa 100 ml:n vesinäyte sekoitettiin Colilert-18-reagenssin kanssa ja kaadettiin määrittäsalustaan, joka suljettiin laitteen avulla. Tulokset valmistuivat 18 tunnissa ja mahdolliset positiiviset tulokset olisivat näkyneet alustalla keltaisina kohtina. (IDEXX 2023a; IDEXX 2023b.)

Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C – määrittäminen TH-maljaväli- ja R2A-pintaviljelymenetelmällä

Jokaisella näytteenottokerralla tutkimuskohteesta riippumatta tutkittiin myös veden heterotrofinen pesäkeluku. Vesinäyte kerättiin samaiseen natriumtiosulfaattia sisältävään hioskorkilliseen lasipulloon kuin koliformisten bakteerien osalla. Vesinäytteistä tutkittavan heterotrofisen pesäkeluvun (22 °C)

määritys perustui SFS-EN ISO 6222/1999 standardimenetelmään, mikä suoritettiin luvussa 2.5.1 osoitetulla tavalla.

Heterotrofinen pesäkeluku määritettiin myös niukkaravinteisella R2A-pintaviljelymenetelmällä. Menetelmän ansiosta saatiin suurempia ja luotettavampia pesäkelukumääriä kuin TH-maljavalumenetelmällä. R2A-menetelmä on akkreditoitu pätevyysalueella talousvesi, ja se määritettiin vain Turun Vesihuollon laboratoriossa. (THL 2023b.)

ATP-pitoisuuden määrittäminen

Vesinäytteistä tutkittava ATP-pitoisuus määritettiin Turun Vesihuollon laboratoriossa. ATP-pitoisuuden määrittämisessä käytössä oli Quench-Gone Aqueous Complete kit -mittaussarja (LuminUltra 2014), jolla näytteen analyysi valmistettiin sekä mikroluminometri (LuminUltra 2024), jonka avulla valmis analyysi määritettiin. Määrittäminen tehtiin LuminUltran protokollan mukaisesti, jossa mikrobit suodatettiin filtterin läpi kuvastamaan näyteveden mikrobiologista laatua. Tulokset valmistuivat välittömästi mikroluminometrin avulla.

ATP-pitoisuus laskettiin LuminUltran mittaussarjan protokollan mukaisesti seuraavasti:

$$ATP_{Näyte} \left(\frac{pg \text{ ATP}}{mL} \right) = \frac{RLU_{Näyte}}{RLU_{Standardi}} \times \frac{10\,000 \text{ (pg ATP)}}{V_{Suodatettu \text{ näyte (mL)}}}, \quad (2)$$

ja jotta tulokset voitiin osoittaa samoin perustein kuin heterotrofisen pesäkeluvun tulokset, tuli ATP-pitoisuus muuntaa mikrobiekvivalentiksi (ME) seuraavan kaavan mukaisesti:

$$ATP_{Näyte} \left(\frac{ME}{ml} \right) = ATP_{Näyte} \left(\frac{pg \text{ ATP}}{ml} \right) \times \frac{1 \text{ ME}}{0,001 \text{ pg ATP}}, \quad (3)$$

jossa laskelma perustuu oletukseen, että yksi E. coli -bakteeri sisältää keskiarvallisesti yhdessä solussa esiintyvän 0,001 pg eli 1 femtogramman verran ATP:tä. (LuminUltra 2014).

4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

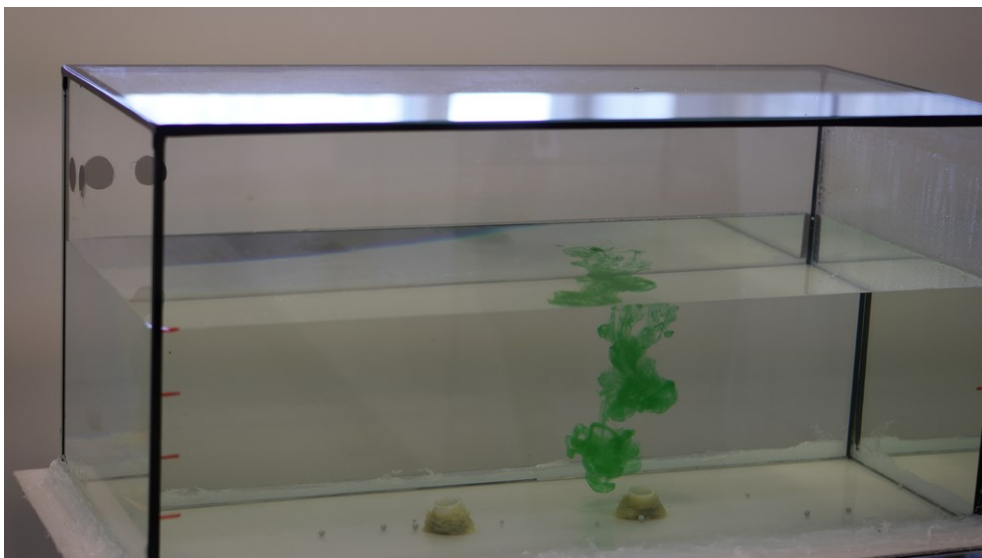
Tässä kappaleessa syvennyttään tutkimuksessa saatuihin tuloksiin ja niiden tarkasteluun. Tulosten tarkastelu on yhdistetty tuloksia käsittelevään osioon, jotta tuloksia ja niiden yhteyksiä toisiinsa on helpompi hahmottaa laajassa kokonaiskuvassa.

Opinnäytetyössä tutkittiin Yliopistonmäen vesitornin kulmissa seisovan veden laatua ja ikää erilaisten testien myötä. Tutkimushypoteesina oli, että veden kierto ja virtaus ovat suorakaiteen muotoisissa vesitorneissa heikkoa, minkä vuoksi veden laatu olisi heikompaa säiliön kulmissa kuin keskellä. Tulosten pohjalta luotiin kokonaiskuvaa säiliön kulmien toiminnasta, jotta Turun Vesihuolto ja muut vesilaitokset pystyvät tarkastelemaan talousveden jakelun riskienhallintaa uudesta näkökulmasta ja luomaan uusia ratkaisuja veden laadun parantamiseksi.

Vesitornin kerrosvesinäytteiden tuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että kyseiset tulokset eivät ole täysin verrattavissa säiliön kulmissa seisovan veden laatuun, koska kyseiselle alueelle ei ollut mahdollista päästä ottamaan näytteitä. Tulokset ovat siis säiliön keskiosasta tuloputken kohdalta, yleisestä näytteenottopisteestä otettuja, jossa veden laatu on oletettavasti parempaa. Tuloksia pyrittiin soveltamaan kulmiin sopiviksi mallintamalla vesitornin veden liikkeitä akvaarion sekä vesitorniin asetettavien kellukkeiden avulla. Lisäksi vesitornissa mahdollisten pysähtyneiden vyöhykkeiden, kuten kulmien vedenlaatua osoitettiin seisovan veden seurannasta eli saavista saatujen tulosten kautta. Tuloksissa tarkasteltiin myös vuodenaikaisten lämpötilaerojen vaikutusta laatutuloksiin. Veden laatua koskevien tutkimustulosten väliset korrelaatiot laskettiin Excelissä lineaarisella regressioanalyysillä ja tilastollista merkitsevyyttä arvioitiin p-arvon kautta. Tulokset normalisoitiin, sillä logaritminen muoto auttaa tasoittamaan tulosten eroja eri skaalatasoilla olevien muuttujien välillä.

4.1 Pienoismallin toiminta ja tulokset

Vesitornin säiliötä mukailevan pienoismallin (Kuva 10) toiminta osoittautui tutkimuksessa monelta osin haasteelliseksi. Merkkiaineena käytetyn elintarvikeväriin vesiliukoisuuden vuoksi se ei soveltunut kuvaamaan veden virtausta tasaisesti, vaan sekoittui veteen ennen kuin nesteen virtauksia voitiin tutkia loppuun asti. Pallojen toiminta ei vastannut odotuksia, sillä kaikissa palloissa tiheys ei vastannut täysin 10 °C:n veden tiheyttä ja suurempien pallojen ilmatasku saattoi täyttyä vedellä, minkä myötä pallot laskeutuivat pohjaan. Ainoastaan yhden pallon rakenne toimi tutkimukseen soveltuvalla tavalla ja kellui akvaarion pinnassa. Tutkimusta kuvattiin ja kuvista koostettiin video, jonka myötä tuloksia analysoitiin.



Kuva 10. Merkkiaineen kulku pienoismallissa.

Pienoismallin toimintaa tarkasteltaessa todettiin merkkiaineena toimineen pallon liikkeiden sijoittuvan vain akvaarion keskiosaan, tulo- ja lähtöputken kohdalle, jossa virtaus oli voimakkainta. Vihreä elintarvikeväri toimi merkkiaineena vain osan tutkimusajasta, mutta pysytteli sen ajan myös putkien kohdalla, liueten säiliön keskiosan pohjalle, josta se päätyi lähtöputkeen virtauksen mukana.

Merkkiaine ei kuitenkaan levittäytynyt säiliön kulmiin, mikä osoitti kulmissa seisovan veden virtauksen ja veden sekoittuvuuden olevan melko olematonta.

4.2 Veden virtaus vesitornissa

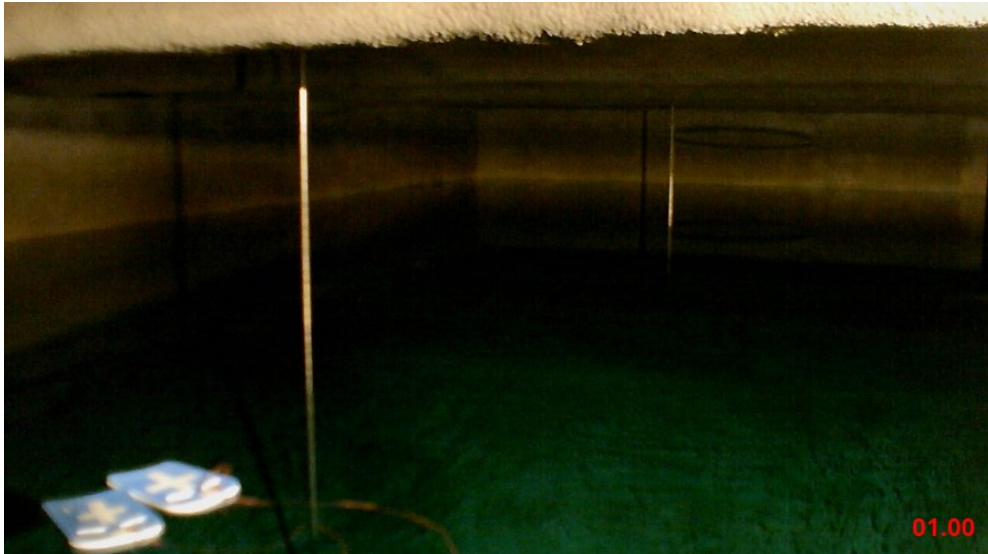
Turun Yliopistonmäen vesitornissa toteutettu veden virtausta mallintava tutkimus (Kuvat 11 ja 12) onnistui odotetusti. Tutkimus aloitettiin klo 13.00, jolloin taltioitiin ensimmäinen kuva (Kuva 11). Kuvista koostettiin video, josta oli havaittavissa kellukkeiden liikehdintää säiliön keskiosassa ja tuloputken kohdalla. Päivän ja illan aikana, vedenkulutuksen ollessa suurinta havaittiin, kuinka kellukkeet liikkuvat kohti tuloputkea. Yöllä, vedenkulutuksen hidastuessa ja tornin täyttyessä kellukkeet liikkuivat takaisin säiliön keskiosaan.

Kuvista 11. ja 12. voidaan todeta, että kellukkeilla olisi ollut pitkän narun puolesta liikkumavaraa koko säiliön mitalle, mutta liikkeen havaittiin vain kiertävän kehää säiliön keskiosassa.



Kuva 11. Veden virtausta mallintavat kellukkeet Turun Yliopistonmäen vesitornissa.

12 tunnin kuluttua, klo 01.00 kellukkeet olivat siirtyneet kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Veden virtausta mallintavat kellukkeet Turun Yliopistonmäen vesitornissa.

Vuorokauden mittaisen tutkimuksen perusteella todettiin, että veden virtaus painottui säiliön keskiosaan ja ilman kulutusvaihteluita vesi ei olisi liikkunut säiliön pinnalla lainkaan. Kulutusvaihteluiden tasaantuessa kellukkeiden liikettä oli havaittavissa ainoastaan lievän pintavirtauksen ansiosta, jota syntyi säiliötilan kattoon kondensoituneiden vesipisaroiden pudotessa säiliöön.

Pienoismallilla saadut tulokset ovat verrattavissa tornissa tapahtuvaan veden liikkeeseen ja näin ollen molemmat tulokset tukevat tutkimushypoteesia kulmien veden vähäisestä vaihtumisesta. Mallinnusten toimintaa tarkasteltaessa on havaittavissa pienoismallin ja kellukkeiden samansuuntainen toiminta. Veden poistuessa, torniin sijoitetut kellukkeet sekä pienoismallin sisältämät merkkiaineet keskittyivät kummassakin tutkimuksessa tuloputken kohdalle. Vesitornin ja pienoismallin vedenpinnan noustessa kellukkeiden sekä merkkiaineiden havaittiin keskittyvän säiliön keskiosaan. Tutkimuksen myötä voidaan todeta, että sekä pienoismallilla ja kellukkeiden liikkeiden perusteella tulokset tukevat tutkimushypoteesia, jonka mukaan vesi ei vaihdu suorakaiteen muotoisen vesitornin säiliön kulmissa.

4.3 Fysikaalis-kemialliset parametrit

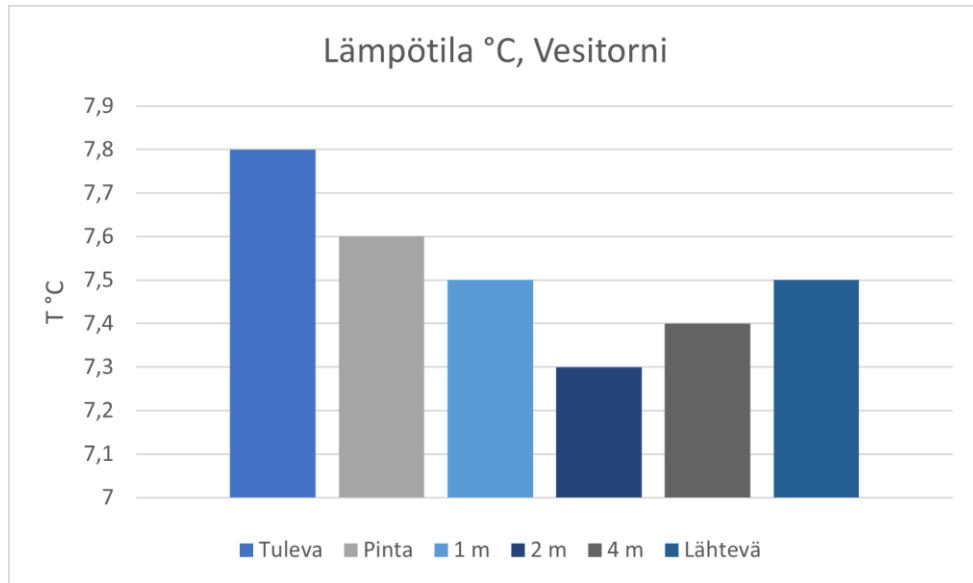
Seuraavissa kappaleissa käsitellään vesinäytteiden fysikaalis-kemiallisia parametreja. Kappaleiden alussa tulokset keskittyvät vesitornista otettujen vesinäytteiden analysoituihin parametreihin sekä tulosten tulkintaan, ja jälkimmäisissä kappaleissa seisovan veden seurantajaksolla analysoituihin parametreihin ja tulosten tulkintaan.

Vesitornin veden fysikaalis-kemiallisia tuloksia tarkasteltaessa ei havaittu merkittäviä eroja näytteenottokertojen tai -pisteiden välillä. Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioda, että kausivaihtelut vaikuttavat veden lämpötilaan ja mikrobiologiseen aktiivisuuteen, koska talvella veden laatu on yleisesti parempaa kuin kesällä (Delahaye ym. 2003).

4.3.1 Lämpötila

Näytteenotto vesitornissa

Vesitornin kerrosvesinäytteenoton tutkimusjaksolla mitattujen lämpötilojen tulokset (Kuvio 1) olivat tyypillisiä vuodenaikaan nähden. Lämpötila oli tornissa korkeimmillaan 8,0 °C tuloputkesta mitattuna ja matalimmillaan 6,9 °C samaisella näytteenottokerralla säiliöstä 1 m syvyydestä mitattuna.



Kuvio 1. Yliopistonmäen vesitornin mediaanilämpötilat.

Veden ikää tarkasteltaessa torniin tulevan veden ja säiliön pinnassa olevan veden välillä oli talven alhaisista lämpötiloista huolimatta havaittavissa lieviä lämpötilaeroja. Veden kerrostuneisuutta tarkasteltaessa eri syvyyksistä mitattujen lämpötilojen välillä ei ilmennyt suurta heittoa, mutta niiden lämpötilaeroja verrattaessa torniin tulevaan veteen havaittiin suurempia vaihteluita. Suurimmillaan ikää kuvaava lämpötilaero kerrosvesinäytteiden ja tulevan veden välillä oli +/- 1,1 °C.

Lievistä lämpötilavaihteluista huolimatta lämpötilaprofiili oli säiliön vesipatsaassa melko tasainen, mikä kertoi säiliön onnistuneesta sekoittuvuudesta kyseisellä näytteenottopisteellä (GNL 2011, 24). Lämpötilaerot tulevan ja lähtevän sekä kerrosvesinäytteiden välillä eivät talviaikana mitattuina olleet merkittäviä. Säiliön pintakerroksen veden matala lämpötila selittyi talvella kovien pakkasten ja kylmien rakenteiden vuoksi. Tornista mitatuissa lämpötiloissa oli havaittavissa talven selkeä vaikutus korkeassa vesitornissa, jossa lämpötila laskee kylmällä ilmalla lähes nollaan verrattuna maan alla sijaitseviin kylmyydeltä suojattuihin vesijohtoverkostoihin, joissa veden lämpötila on korkeampi.

Seisovan veden seurantajakso

Seisovan veden seurannassa saavista mitattu lämpötila pysyi tasaisena 13 °C:ssa läpi tutkimusjakson, joten sen osalta ei voitu päätellä yhteyksiä muihin vedestä seurattaviin parametreihin.

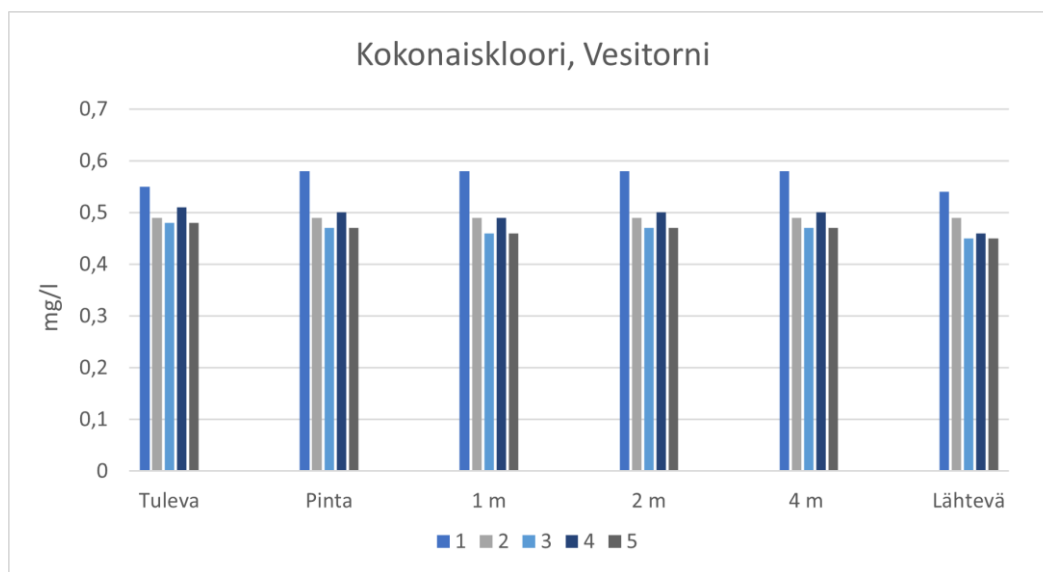
4.3.2 Kloori

Veden klooripitoisuus tutkittiin vesitornista sekä saavista otetuista vesinäytteistä. Klooripitoisuudella on selkeä korrelaatio veden mikrobiologisen laadun kanssa, koska liian alhaiset klooripitoisuudet voivat heikentää desinfiointitehoa ja heikentää veden mikrobiologista laatua. Turussa vähäisen klooripitoisuuden on havaittu korreloivan heikompana mikrobiologisena laatuna ja kertovan osittain veden iästä.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että HACH DR300 -taskukolorimetrim määrittäysraja on 0,02–2,0 mg/l, jonka vuoksi mittaustulokset, jotka ovat alhaisemmat kuin 0,02 mg/l sijoittuvat herkkyysrajan alueelle, joka lisää virheen määrää (HACH n.d.).

Näytteenotto vesitornissa

Vesitornista mitattujen kerrosvesinäytteiden klooripitoisuuksia tarkasteltaessa (Kuvio 2) oli havaittavissa tasaisia lukemia vapaan kloorin mittauksissa, jotka vaihtelivat 0,1–0,3 mg/l välillä. Klooripitoisuuksia tarkasteltaessa oli havaittavissa vain pieniä eroavaisuuksia torniin tulevan veden ja säiliön veden välillä. Poikkeuksena ensimmäisellä mittauskerralla 4 m syvyydessä vapaa kloori oli vain 0,01 mg/l. Tällä ei kuitenkaan ollut havaittavissa korrelaatiota mikrobien määrään, eikä muihin parametreihin.



Kuvio 2. Yliopistonmäen vesitornin kokonaisklooripitoisuuksien mediaanitulokset. Näytteenottokerrat 1–5 on värikoodattu.

Kokonaisklooria tarkasteltaessa vaihteluväli oli mediaaniltaan 0,45–0,58 mg/l. Alhaisimmillaan kokonaisklooripitoisuus oli lähtevässä vedessä 0,45 mg/l, mutta tällöin tulevan veden kokonaisklooripitoisuus oli myös alhainen, 0,48 mg/l.

Vesitorniin tulevan veden ja säiliön pintaveden kokonaisklooripitoisuuksissa oli vain lieviä eroja. Tulokset olivat joko samoja tai pintaveden kokonaisklooripitoisuus oli yhden asteen matalampi kuin tulevan veden. Tulevan ja lähtevän veden kokonaisklooripitoisuuksissa ei myöskään ollut merkittäviä eroja, lukuun ottamatta neljättä mittauskertaa, jolloin tulevan veden kokonaisklooripitoisuus oli 0,51 mg/l kun taas lähtevän 0,46 mg/l.

Suurin mitattu arvo oli pinnasta mitattuna 0,58 mg/l. Tällöin tulevassa vedessä kokonaiskloorin arvo oli vain 0,55 mg/l. Ero oli kuitenkin häviävän pieni ja on mahdollista, että se johtui mittausvirheestä. On myös mahdollista, että kyseessä olisi vanhempaa vettä ajalta, jolloin tulevan veden kokonaisklooripitoisuus olisi ollut yli 0,58 mg/l. Mediaaniltaan torniin tulevan veden kokonaisklooripitoisuus oli suurempi kuin lähtevässä vedessä. Tämän myötä voitiin todeta, että kokonaisklooritasot laskivat säiliössä klooria kuluttavan selittämättömän tekijän vuoksi. Veden kerrostuneisuutta tarkasteltaessa ei kuitenkaan havaittu merkittäviä eroja klooripitoisuuksissa.

Tulokset vapaan ja kokonaisen kloorin osalta pysyivät kuitenkin talousvesiasetuksen (STM 2023) klooripitoisuutta koskevien laatuvaatimusten sisällä. Klooritasojen puolesta veden todettiin olevan laadullisesti hyvää kyseisellä näytteenottopisteellä.

Seisovan veden seurantajakso

Saavista mitatun vapaan ja kokonaisen kloorin esiintyvyydessä oli huomattavia eroja veden seisottuessa pitkään. Vapaa kloori oli lähtötilanteessa 0,02 mg/l ja kloorin todettiin haihtuneen kokonaan pois viiden viikon kuluessa.

Kokonaiskloorin osalta lähtötilanne oli vain 0,04 mg/l ja kloorin todettiin haihtuneen kokonaan pois kahden viikon kuluessa. Viikon kuluessa kokonaisklooritaso oli 0,01 mg/l. Lukema ei ollut enää HACH DR300 taskukolorimetrin määrittämisrajojen sisäpuolella, jonka vuoksi tulosta ei voitu pitää täysin luotettavana (HACH n.d.).

Saavi täytettiin Turun Vesihuollon omasta hanasta, jonka tonttijohto on johtokartan perusteella suhteellisen pitkä ja vanha. Lisäksi tonttijohdossa klooritasot ovat verkoston keskiarvoon nähden matalat. Näiden seurauksena saavista otettujen näytteiden vapaan- ja kokonaiskloorin tulokset olivat selvästi matalampia kuin muualla verkostossa ja tutkittavassa vesitornissa. Seurantajaksosta voitiin kuitenkin päätellä, että saavissa klooripitoisuus laski mahdollisesti kloorin vapautuessa ilmaan sekä mikrobiologisen aktiivisuuden myötä.

4.3.3 pH

Näytteenotto vesitornissa

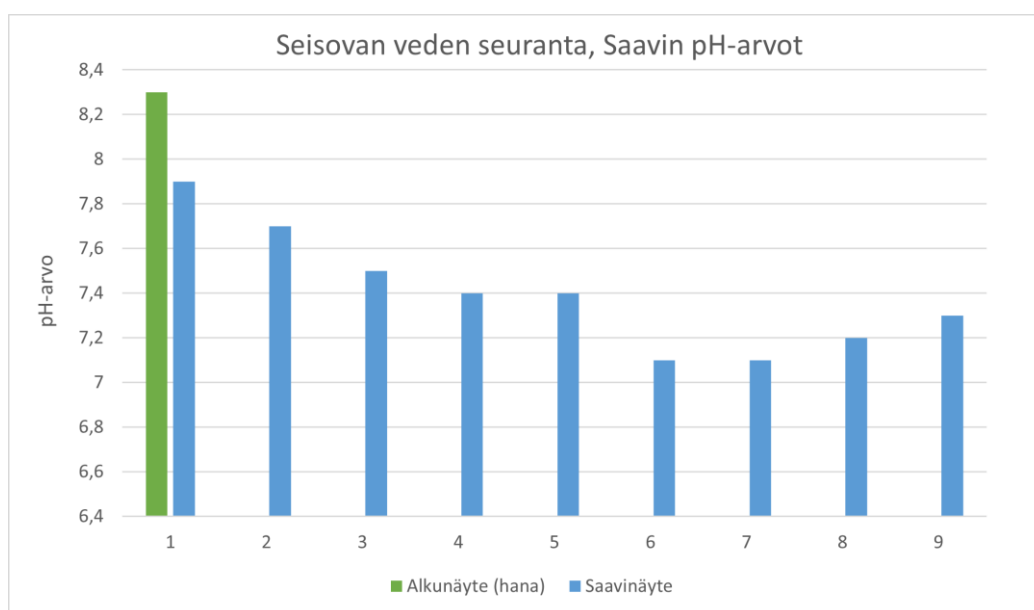
Vesitornin kerrosvesinäytteitä tarkasteltaessa pH-arvo säilytti selkeän linjan, lähes poikkeuksetta arvolla 8,5, joka täytti talousvesiasetuksen (STM 2023)

mukaiset laatuvaatimukset. Ainoastaan yhdellä näytteenottokerralla lähtevän veden pH oli 8,4.

pH-taso on Turussa jo luontaisesti korkea. Korkeassa pH-tasossa (yli 7,5) kloorin desinfiointiteho heikkenee ja putkien korroosioriski kasvaa. (TSV 2021.) Tämän myötä pH:lla saattoi olla yhteys heikentyneeseen vedenlaatuun tulevan veden mikrobiologisessa laadussa.

Seisovan veden seurantajakso

Saavista mitatulla pH:lla oli havaittavissa selkeä lasku viikkojen kuluessa (Kuvio 3). Korkeimmillaan veden pH oli ensimmäisellä näytteenottokerralla hanasta mitattuna 8,3. Viikon kuluttua saavissa seisseen veden pH oli 7,9. Matalimmillaan veden pH oli 6. viikolla mitattuna 7,1.



Kuvio 3. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden pH-arvot.

Keskiarvoltaan viikon seisseen veden pH-arvo laski asteikolle 7,8. Lukema oli vielä laatuvaatimusten (6,5–9,5) sisällä (STM 2023), mutta tutkimuksen perusteella veden iän kasvaessa pH-arvo lähti tällöin nopeasti laskuun ja miltei happamoitui.

4.3.4 Sähkönjohtokyky

Sähkönjohtokyvyn osalta ei ilmennyt poikkeamia yhdessäkään vesinäytteessä. Vesitornista mitattuna sähkönjohtokyky oli säiliön veden kaikissa syvyyksissä sekä tulevassa ja lähtevässä vedessä $140 \mu\text{S}/\text{cm}$, joka oli huomattavasti alle talousvesiasetuksen määrittelemän laatutavoitteen enimmäislukeman $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Myös saavista mitatuissa tuloksissa sähkönjohtokyky pysyi samana $140 \mu\text{S}/\text{cm}$, huolimatta mikrobiologisen laadun radikaalista heikkenemisestä.

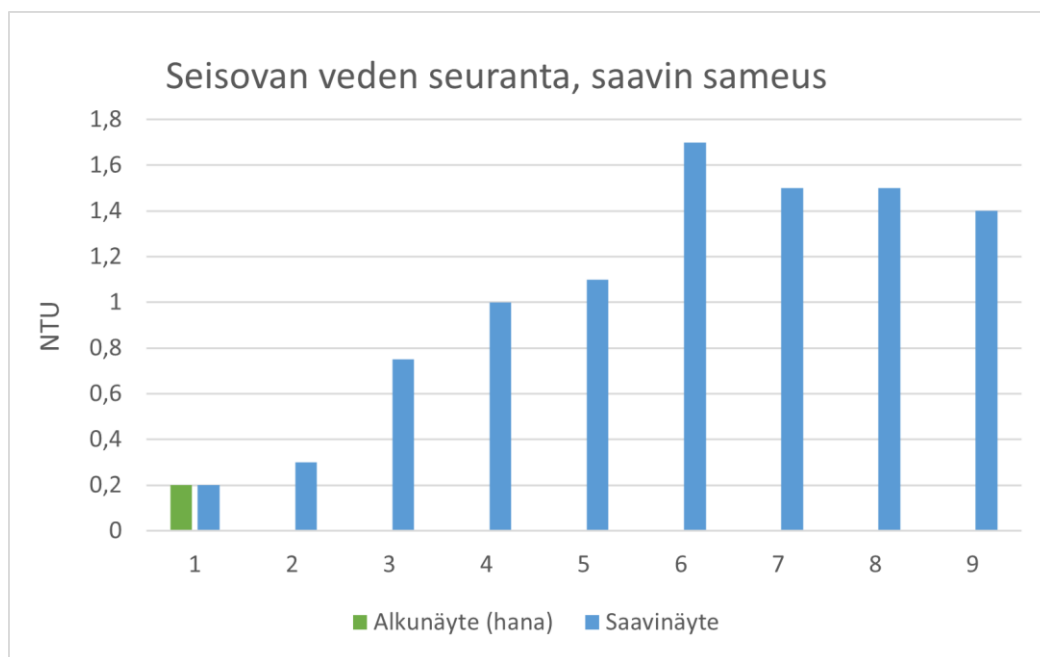
4.3.5 Sameus

Näytteenotto vesitornissa

Vesitornista mitattujen kerrosvesinäytteiden välillä sameudessa ei ilmennyt suuria eroavaisuuksia. Sameus vaihteli $<0,1\text{--}0,2 \text{ NTU}$ välillä. Torniin tulevan veden ja säiliön kerrosvesinäytteiden välillä ei havaittu selkeää yhteyttä sameuden osalta. Toisinaan tuleva vesi oli säiliön vettä sameampaa, ja toisinaan pintakerroksen vesi oli tulevaa sameampaa, mutta merkittäviä päätelmiä sameudesta ei voitu tehdä. Suurimmillaan tornista mitattuna sameus oli arvoltaan $0,2 \text{ NTU}$, joka pysyi laatutavoitteiden sisällä ja oli tyypillinen tulos Turun verkostoon verrattaessa.

Seisovan veden seurantajakso

Saavista otetuissa sameusnäytteissä oli havaittavissa selkeä nousu viikkojen kuluessa (Kuvio 4).



Kuvio 4. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden sameusarvot.

Sameus oli matalimmillaan lähtötilanteessa tuloksella 0,1 NTU, mutta arvot nousivat saavissa viidennellä viikolla 1,1 NTU, ylittäen talousvesiasetuksen (STM 2023) laatutavoitteen 1 NTU. Suurimmillaan sameus oli kuudennella viikolla mitattuna 1,7 NTU. Kuudennen viikon jälkeen tuloksissa oli havaittavissa tasaista laskua. Äkillisen sameuden nousun katsottiin tapahtuneen yhdessä mikrobiologisten muutosten kasvaessa, koska sameuden ja veden mikrobiologista laatua kuvaavan ATP:n välillä havaittiin selkeä lineaarinen yhteys ($R^2 = 0,5$, $p = 0,02$). Tutkimusten perusteella voidaan todeta mikrobiologisen laadun heikkenemisen vaikuttavan fysikaalis-kemialliseen laatuun.

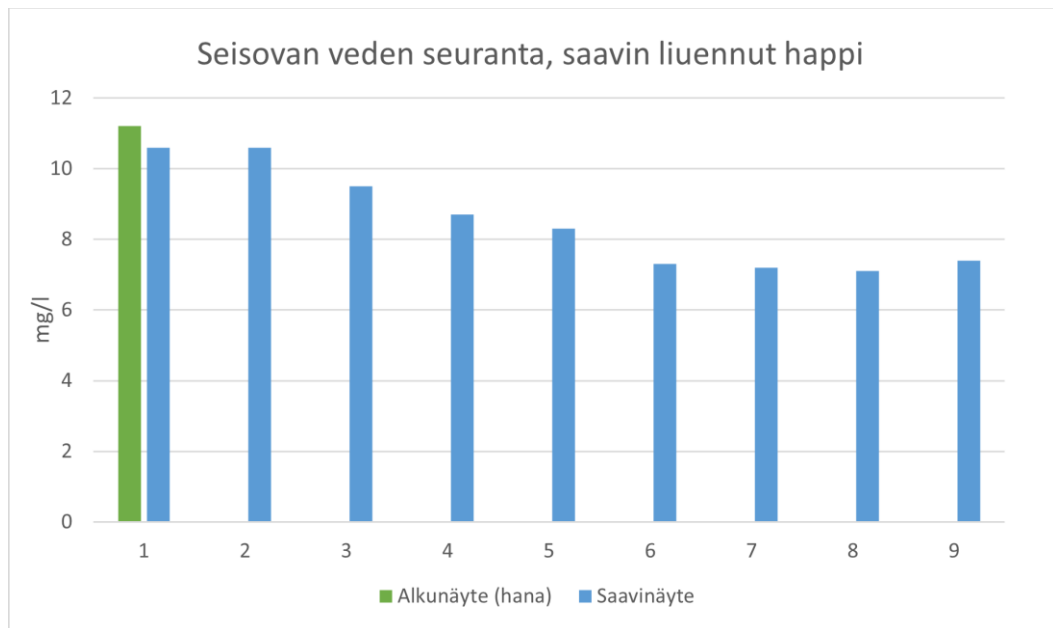
4.3.6 Rauta

Veden rautapitoisuuksissa ei tapahtunut muutoksia vesitornista eikä saavista mitattuna. Kummassakin tapauksessa rautapitoisuus oli $<10 \mu\text{g/l}$ eli $<0,01 \text{ mg/l}$. Täten raudan ja muiden parametrien välistä korrelaatiota ei ollut havaittavissa.

4.3.7 Liuenut happi

Seisovan veden seurantajakso

Veteen liuenutta happea tutkittiin vain seisovan veden seurannassa saavinäytteistä. Saavista mitatun hapen osalta havaittiin selkeä lasku viikkojen kuluessa (Kuvio 5).



Kuvio 5. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden veteen liuenut happi.

Liuenut happi oli hanasta mitattuna 11,2 mg/l ja viikon saavissa seisseenä tulos oli 10,6 mg/l. Pienimillään liuenneen hapen pitoisuus saavissa oli 8. viikolla mitattuna 7,1 mg/l. Liuenneen hapen väheneminen tapahtui tasaisesti, mutta sen vähenemistä ei selittänyt lämpötila, koska 13 °C:ssa vedessä liuenneen hapen pitoisuus on 10,5 mg/l (RIL 124-1-2003, 215). Veden mikrobiologisen laadun heikentyminen tapahtui samassa suhteessa liuenneen hapen vähenemisen kanssa, jolloin voitiin olettaa mikrobien käyttäneen happea lisääntyäkseen (Zwietering ym. 1990). Virhetarkastelussa huomioitiin myös näytteenoton ja näytteen kestävöinnin virhemarginaali, joka voi selittää tuloksia.

4.4 Mikrobiologiset parametrit

Tutkimuksissa veden mikrobiologista laatua kuvaavat TH-maljavalu-, R2A- sekä ATP-menetelmän tulokset poikkesivat toisistaan. Aiempien Turun vesijohtoverkostosta tehtyjen tutkimusten valossa ATP-pohjaisen menetelmän on osoitettu olevan herkempi kuin TH-maljavalu menetelmän (Saukkonen 2021; Lindfors 2023). Tulosten tarkastelussa keskitytään lähinnä ATP:n muutoksiin, sillä menetelmä reagoi laadun pienimpiinkin muutoksiin.

4.4.1 *Escherichia coli*- ja koliformiset bakteerit

Vesitornista sekä saavista tutkittuna vesinäytteissä ei todettu *E. colia* tai koliformisia bakteereita. Tulokset olivat kaikissa näytteissä 0 PMY/100 ml, joten talousvesiasetuksen (STM 2023) laatuvaatimukset täyttyivät niiden osalta.

4.4.2 Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C TH-maljavalu menetelmällä

Näytteenotto vesitornissa

Vesitornin kerrosvesinäytteistä analysoidut heterotrofiset pesäkeluvut vaihtelivat lievästi torniin tulevan veden ja säiliössä olevan veden välillä. Suurimmillaan tulevasta vedestä todettiin pesäkkeitä 11 PMY/ml ja pienimmillään 0 PMY/ml. TH-maljavalu menetelmällä ilmeneviä pesäkkeitä oli kuitenkin useimmiten havaittavissa vesipatsaan keskiosassa tai lähellä pintakerrosta.

Kerrosvesinäytteistä tehtiin suurimmillaan 9 PMY/ml pesäkelöydös läheltä pintaa, yhden metrin syvyydestä mitattuna. Pienimmillään arvo oli kyseisessä syvyydessä 0 PMY/ml. Kerrosvesinäytteistä oli kuitenkin havaittavissa selkeä yhtäläisyys heterotrofisten bakteerien pesäkeluvun ilmenemisessä – jokaisella näytteenottokerralla jostakin vesipatsaan osasta saatiin positiivinen tulos.

Talvella suoritettulla tutkimusjaksolla vesitorniin tuleva vesi oli lämpimämpää kuin säiliössä seissyt vesi. Lämpötilaerot selittävät osittain myös

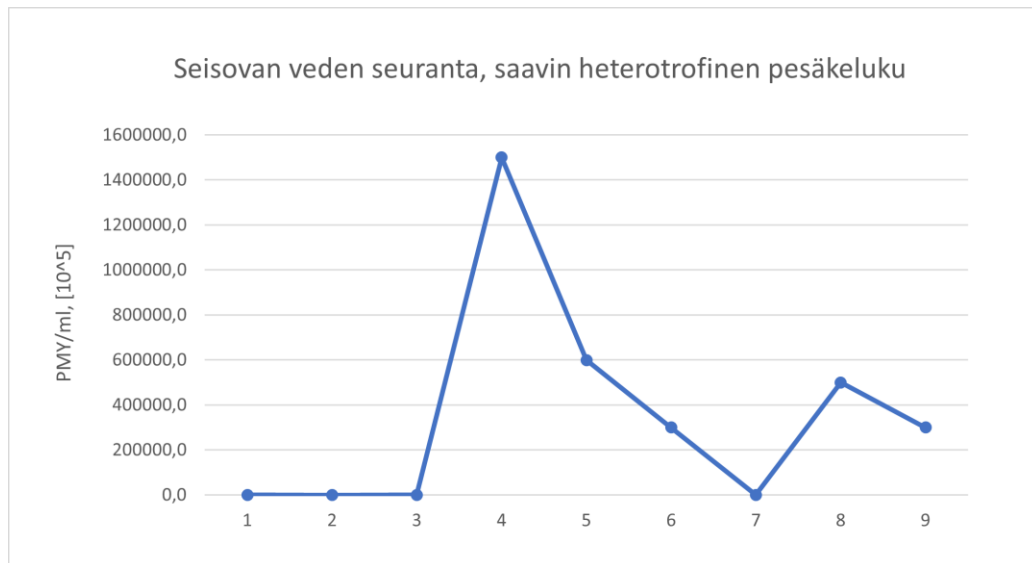
mikrobiologisen laadun eroavia tuloksia, koska veden korkea lämpötila altistaa mikrobien kasvulle (Valvira 2020c, 50). Mikäli tutkimus olisi toistettu kesällä, olisivat tulokset voineet poiketa merkittävästi ja kerrostuneisuus olisi ollut selkeämmin havaittavaa lämpimien olosuhteiden vuoksi. Kerrostumisen seurauksena veden virtaus on hitaampaa ja säiliöön kehittyy vyöhykkeitä, joissa vesi ei liiku. Tämä mahdollistaa mikrobeille alttiin kasvuympäristön heikentäen verkostoon virtaavan veden laatua. (WHO 2004, 49.)

Mikäli tornissa olevan veden lämpötila olisi ollut korkeampi kuin torniin tulevan veden, on mahdollista olettaa, että säiliö olisi toiminut otollisempana alustana heterotrofisten bakteerien ja biofilmien kehittymiselle. Tulokset eivät tältä osin tukeneet tutkimushypoteesia, jossa säiliön veden oletettiin olevan laadultaan heikompaa kuin tulevan veden.

Heterotrofisten pesäkkeiden osalta laatutavoitteena pidetään tuloksia, joissa ei ole epätavallisia muutoksia (Valvira 2020c, 11). Tämän vuoksi pelkästään pesäketuloksien perusteella ei voitu tehdä suoria johtopäätöksiä veden laadusta. Tuloputkesta otetut mikrobiologiset vesinäytteet olivat vuositasolla muuhun verkostoon nähden matalia, mutta Turun Vesihuollon sisäisten Yliopistonmäen vesitornia koskevien laatutaulukoiden perusteella kesäisin saatuihin arvoihin nähden arvot olivat talvella 2023–2024 suoritettuna tutkimusjakson aikana korkeampia kuin aikaisemmin (TVH 2024).

Seisovan veden seurantajakso

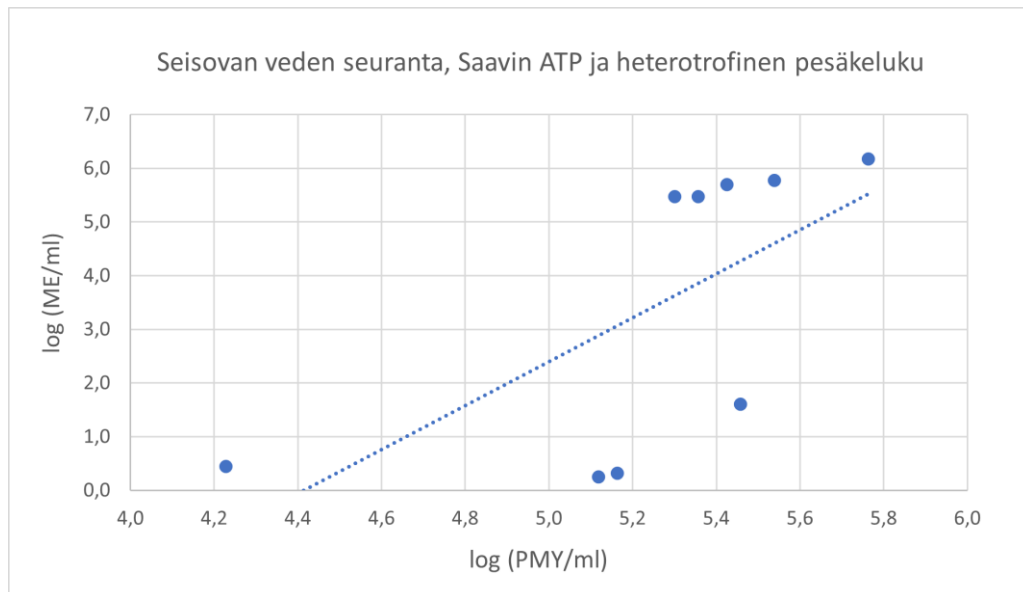
Saavin heterotrofisten pesäkkeiden tuloksista (Kuvio 6) havaittiin pesäkkeiden määrän kääntyvän jyrkkään nousuun neljännellä viikolla.



Kuvio 6. Seisovan veden seuranta. Saavinäytteiden heterotrofinen pesäkeluku 22 °C.

Lähtötilanteessa hanasta otetussa vesinäytteessä todettiin pesäkkeitä vain 2 PMY/ml. Viikon kuluttua saavin täytön jälkeen saavista otetussa vesinäytteessä pesäkkeitä todettiin jo 280 000 PMY/ml ja kolmannella viikolla 4 000 000 PMY/ml. Suurimmillaan pesäkkeitä todettiin neljännellä viikolla 15×10^{10} PMY/ml. Selkeä notkahdus pesäkeluvuissa tapahtui seitsemännellä viikolla, jolloin pesäkeluvut laskivat niin, että niitä todettiin 210 000 PMY/ml.

Suurten pesäkelukemien vuoksi graafia tarkasteltaessa näytteenottokerrat 1, 2, 3 ja 7 näyttävät kuviossa, ettei kasvua olisi, vaikka tulokset olivat hälyttävästi suurempia kuin normaalit verkostoarvot. Heterotrofisen pesäkeluvun analysointi saavista mitattujen suurten lukemien vuoksi oli haastavaa, joten luotettavampana tarkastelukohteena käytettiin saavista mitattuja ATP-tuloksia, jotka olivat kuvion 7. mukaisesti verrannollisia pesäkkeiden kehitykseen.



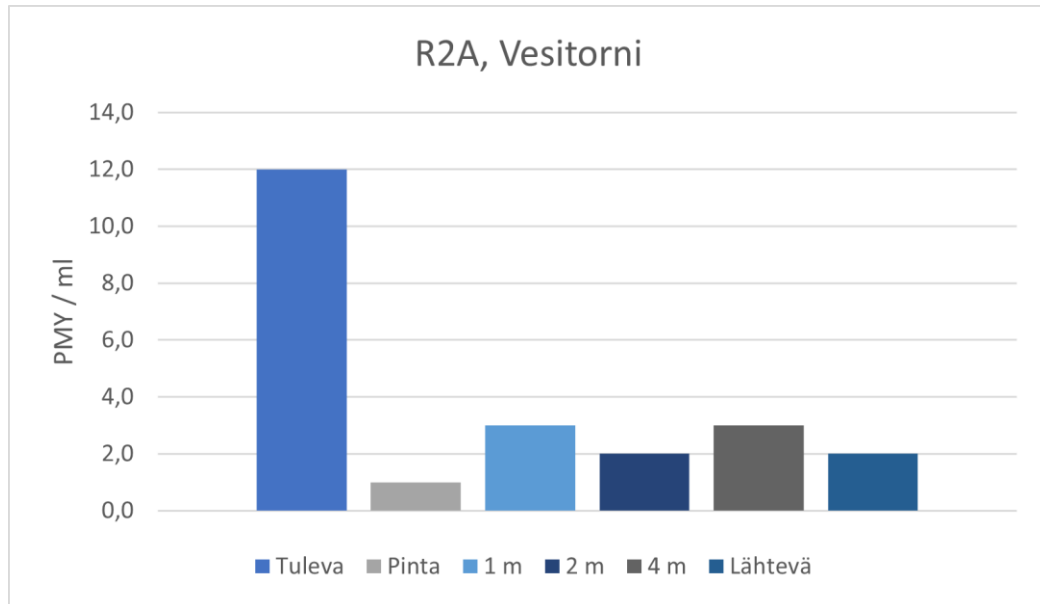
Kuvio 7. Seisovan veden seuranta. Saavista mitatun ATP:n ja heterotrofisten pesäkkeiden välinen korrelaatio.

ATP-tulokset nousivat samassa suhteessa heterotrofisten pesäkelukemien kanssa ja niiden välillä havaittiin kohtalainen lineaarinen yhteys ($R^2 = 0,4$, $p = 0,05$).

4.4.3 Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C R2A-pintaviljelymenetelmällä

Näytteenotto vesitornissa

Vesitornista mitattujen kerrosvesinäytteiden pesäkelukujen tulokset olivat huomattavasti korkeampia R2A-pintaviljelymenetelmällä (Kuvio 8) mitattuina kuin TH-maljavalumenetelmällä. Tulevasta vedestä mitattuna R2A-tulokset olivat suurimmillaan 25 PMY/ml ja pienimmillään 8 PMY/ml.



Kuvio 8. Yliopistonmäen vesitornin heterotrofinen pesäkeluku 22 °C -mediaanitulokset R2A-pintaviljelymenetelmällä.

Kerrosvesinäytteitä tarkasteltaessa koko vesipatsaassa oli pesäkkeitä tasainen määrä. Suurimmillaan tehtiin 11 PMY/ml pesäkelöydös läheltä pintaa yhden metrin syvyydestä mitattuna ja pienimmillään arvo oli 0 PMY/ml.

Lähtevässä vedessä pesäkkeitä havaittiin huomattavasti vähemmän kuin tulevassa vedessä. Enimmillään R2A-menetelmällä tehtyjä pesäkelöydöksiä oli 3 PMY/ml. R2A-tulokset olivat kuitenkin kokonaisuudessaan suurempia ja täten luotettavampia kuin TH-maljavalumenetelmällä saadut tulokset.

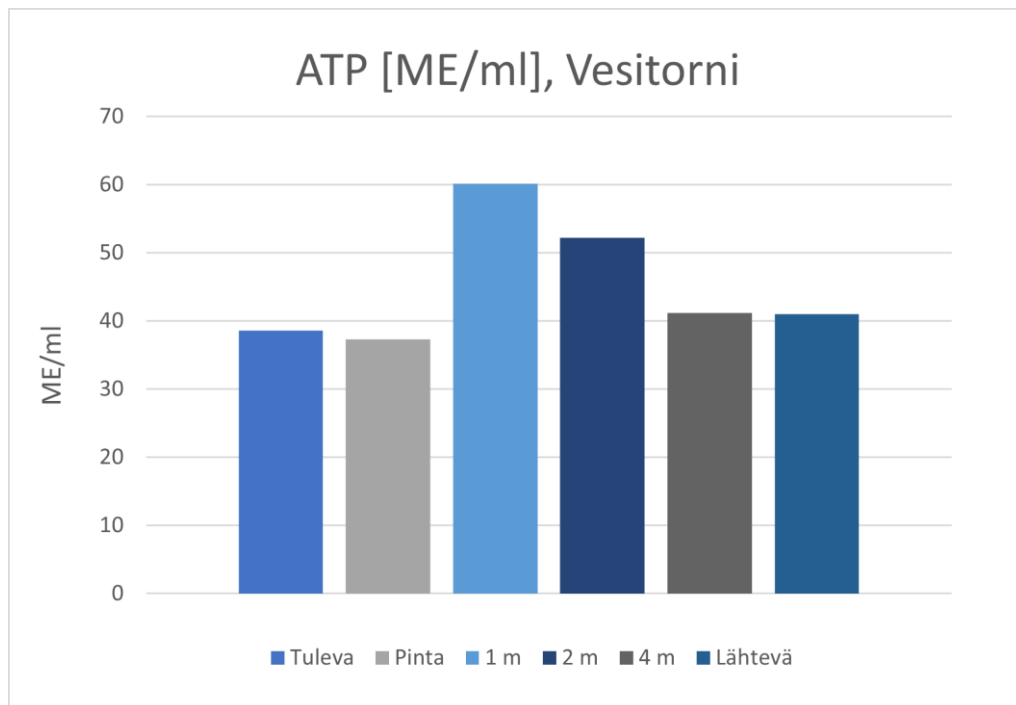
Seisovan veden seurantajakso

Seisovaa vettä tutkittaessa saavin vesinäytteistä ei suurten pesäkelukemien vuoksi tehty R2A-määrittäyksiä, koska tulokset olisivat olleet liian suuria käsiteltäväksi.

4.4.4 ATP

Näytteenotto vesitornissa

ATP-tulosten tarkasteltaessa (Kuvio 9) vesipatsaassa 1 metrin syvyydessä ilmeni koko tornin suurimmat tulokset, mediaaniltaan 0,06 pg/ml eli 60,1 ME/ml. Seuraavaksi suurimpia tuloksia ilmeni 2 metrin syvyydessä, mediaaniltaan 0,05 pg/ml eli 52,2 ME/ml.

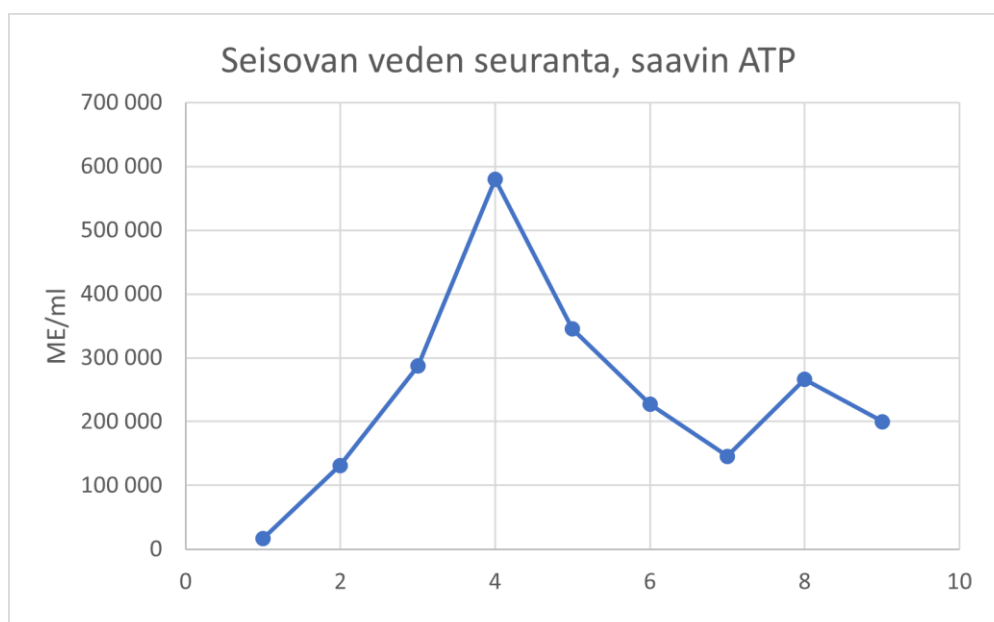


Kuvio 9. ATP-pitoisuuksien mediaanitulokset Yliopistonmäen vesitornista.

Tulevan veden ATP-pitoisuudet olivat mediaaniltaan 0,038 pg/ml eli 38,6 ME/ml. Lähtevästä vedestä mitattiin kuitenkin tulevaa vettä korkeampia lukemia, mediaaniltaan 0,04 pg/ml eli 41 ME/ml. Vaikka tulokset osoittivat veden ATP-pitoisuuden kasvavan säiliön eri vesikerroksissa, arvot eivät kuitenkaan olleet Turun verkoston keskiarvoollisiin ATP-tuloksiin nähden hälyttäviä.

Seisovan veden seurantajakso

Saavista mitatuissa ATP-pitoisuuksissa havaittiin selkeää kasvua neljällä ensimmäisellä viikolla, jonka jälkeen tulokset lähtivät laskuun (Kuvio 10). Viikkojen 7. ja 8. välillä tuloksissa havaittiin lievää nousua, minkä jälkeen pitoisuudet laskivat jälleen. Matalimmillaan ATP-pitoisuudet olivat hanasta mitattuna 16,92 pg/ml eli 16 920 ME/ml ja suurimmillaan mittausjakson 4. viikolla 579,38 pg/ml eli 579 381 ME/ml, jonka jälkeen pitoisuudet lähtivät selkeään laskuun. ATP-arvot olivat koko seurantajakson ajan hälyttävän korkeita.



Kuvio 10. Seisovan veden seuranta. Saavista mitattu ATP.

Samankaltaisuus tuloksissa ilmeni mikrobien kasvukäyrämallin kautta, jossa mikrobit lähtivät alkuvaiheessa lineaariseen kasvuun, jonka jälkeen ne saavuttivat neljännellä viikolla ”stationaarivaiheen” ja olivat hetken elossa. Viikoilla 5–7 havaittiin mikrobien väheneminen, kun ravintoaineet loppuivat. Viikolla kahdeksan kuolleista mikrobeista kehittyi mahdollisesti lisää mikrobien kasvuun tarvittavaa orgaanista ainetta, minkä seurauksena tuloksissa havaittiin selkeä nousu. (Zwietering ym. 1990.)

Saavista tehtyt vesianalyysit osoittivat veden mikrobiologisen laadun heikkenevän nopeasti viikkojen kuluessa. Saavin materiaalin puolesta tuloksia ei voitu täysin suhteuttaa vesitornin säiliössä seisovaan veteen, koska kuten Van der Merwe ym. (2013, 31) tutkimukset osoittavat, muovipohjaisista materiaaleista valmistetuissa vesisäiliöissä biofilmit kykenevät kiinnittymään seinämiin helposti. Toisaalta, kuten jo aiemmin todettuna myös vesitornien säiliön seinäminä toimiva betoni on karheen pintansa ansiosta biofilmeille otollinen kasvualusta (Li ym. 2023, 445–447).

Saavista otetut vesinäytteet ylittivät talousvesiasetuksen (STM 2023) mukaiset laatutavoitteet mikrobiologisen laadun osalta jo viikon seisseessä vedessä. Kuten torniin asetettujen pintakellukkeiden liikkeiden myötä todettiin, vesi ei vaihdu säiliön kulmissa ja riskitekijänä on, että veden laatu muuttuu kulmissa veden iän kasvaessa saavista saatujen tulosten mukaisesti.

4.5 Tuloksiin vaikuttavat epävarmuustekijät

Näytteenotto vesitornissa

Tulosten epävarmuustekijät linkittyivät haasteelliseen tutkimusasetelmaan. Vesitornin rakennusteknisten ominaisuuksien sekä hygienia- ja työturvallisuusriskein vuoksi tutkimusta oli mahdotonta toteuttaa perinteisellä tutkimusasetelmalla, jossa veden laatua analysoitaisiin ottamalla vesinäytteet suoraan säiliön kulmista sekä vertailunäytteenä keskiosasta.

Lopullinen tutkimusasetelma perustui mallinnukseen, jossa tarkasteltiin veden liikkeitä säiliön kulmissa. Mallinnuksessa akvaarioon lisättävät ABS-muovista 3D-tulostetut pallot eivät vastanneet täysin 10 °C:n veden tiheyttä, minkä seurauksena merkkiaineena toimi vain yksi kelluva pallo. Samaa tutkimusta pyrittiin toteuttamaan todellisessa ympäristössä Yliopistonmäen vesitornissa, laskemalla säiliöön naruun kiinnitettyjä kellukkeita ja kuvaamalla niiden liikettä yhden vuorokauden ajan. Kellukkeet toimivat merkkiaineena vedessä, jotta veden vaihtuvuus oli tarkemmin havaittavissa. Kellukkeita ei ollut mahdollista

asettaa säiliön kulmiin, joten tutkimusasetelmaa tuli tarkastella säiliön keskiosan virtausolosuhteiden mukaan. Kellukkeilla oli kuitenkin pitkän köyden puolesta mahdollista ajelehtia kulmiin, mikäli virtausolosuhteet olisivat olleet suotuisat.

Kerrosvesinäytteiden osalta mahdollisia virhelähteitä saattoi syntyä lähinnä näytteenoton tai näytteiden analysoinnin yhteydessä. Vesinäytteet otettiin hyviä näytteenottotapoja noudattaen edustavasta havaintopaikasta ja käytössä oli desinfioitu näytteenotin. Ainoa mahdollinen näytteenottopiste oli suoraan tuloputken kohdalla, minkä vuoksi kyseisistä tuloksista ei voitu tehdä suoria johtopäätöksiä säiliön kulmissa seisovan veden vaihtuvuudesta tai kerrostuneisuudesta, vaan tuloksia tuli tarkastella kriittisesti. Näytteet kuljetettiin asianmukaisesti, puhtaaseen kylmälaukkuun pakattuina suoraan laboratorioon analysoitavaksi, jolloin virhelähteet minimoituivat. Jokaisella näytteenottokerralla noudatettiin samoja näytesyvyyksistä, joista varmistuttiin limnoksen naruun luoduilla merkinnöillä. Klooripitoisuudet mitattiin välittömästi jokaisen näytteenoton jälkeen, jolloin tulos oli edustava. Tulevan veden laatutulokset poikkesivat merkittävästi verkoston keskiarvallisista tuloksista, jonka myötä on mahdollista olettaa, että tuloputkeen liitetty vanhempi hana oli likainen ja aiheutti desinfioinnista huolimatta kontaminaatiota sekä suurempia lukemia näytteissä verrattuna säiliöstä otettuihin vesinäytteisiin. Uuden hanan asentamisella varmistuttaisiin sen todellisista vaikutuksista veden laatuun. Teknisessä tilassa otetuissa vesinäytteissä on myös huomioitava ilman epäpuhtaudet, kuten pöly ja homeitiöt.

Seisovan veden seurantajakso

Saavista analysoituihin veden laatutuloksiin saattoi vaikuttaa korkean ATP-pitoisuuden omaava vesijohtolinja, josta saavi täytettiin. Saavi oli desinfioitu, mutta materiaalinsa puolesta altis biofilmien kerääntymiselle, jonka vuoksi tuloksia tuli tarkastella kriittisesti. Tulokset olivat kuitenkin muilta osin luotettavia ja vertailukelpoisia.

5 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten Turun Yliopistonmäen vesitornin suorakaiteen muotoisen säiliön kulmat vaikuttavat verkostoveden fysikaalis-kemialliseen ja mikrobiologiseen laatuun sekä vaihtuvuuteen. Tutkimuksen suunnitteluvaiheessa pohdittiin erilaisia vaihtoehtoja tutkimuksen realistiseen toteutukseen, koska rakennusteknisistä syistä johtuen näytteenotto säiliön kulmista oli mahdotonta. Kyseistä aihepiiriä ei ole tutkittu aiemmin miltei mahdottomien lähtökohtien vuoksi, jolloin vertailukelpoisuutta tai tarkkoja määrittämiä tutkimuksen suorittamiseen ei löytynyt. Koska vakiintunutta tutkimusmenetelmää ei ollut kehitetty, oli tutkimus toteutettava soveltavien ja innovatiivisten testausten kautta, jonka myötä kehittyi myös toimiva mallinnusmenetelmä.

Tutkimuksen tavoitteet täyttyivät ja tuloksista luotiin kokonaiskuvaa säiliön kulmien vaikutuksesta talousveden laatuun. Tutkimushypoteesissa veden oletettiin pysähtyvän säiliön kulmissa, jolloin veden ikä kasvaisi heikentäen samalla veden laatua. Pienoismallin ja vesitorniin asetettavien kellukkeiden avulla veden virtausta tarkasteltaessa todettiin, ettei veden kierto kulmissa vastannut säiliön yleistä kiertonopeutta pintavirtauksen kohdistuessa säiliön keskiosaan. Veden heikon vaihtumisen seurauksena voitiin tehdä oletus, että veden mikrobiologinen sekä fysikaalis-kemiallinen laatu heikkenee kulmissa enemmän kuin keskikohdissa. Seisovan veden seurantajakson aikana veden laadun havaittiin heikentyneen saavissa merkittävästi jo viikon sisällä, alittaen talousvesiasetuksen (STM 2023) määrittämät laatuvaatimukset. Veden kerrostuneisuutta tutkittaessa tulokset täyttivät laatuvaatimukset, eikä verkostoon lähtevän veden näytteissä ilmennyt hälyttäviä terveysriskeiksi luokiteltavia muutoksia. Kerrosvesinäytteitä otettiin tuloputken kohdalta, jossa havaittiin myös enemmän virtausta kellukkeiden perusteella. Pahimmassa tapauksessa veden laatu voi kuitenkin heiketä suorakaiteen muotoisen säiliön kulmissa saavista analysoitujen tulosten tavoin ja päätyä kuluttajille huonolaatuisena. On myös mahdollista olettaa, että kulmissa ilmenee enemmän kerrostuneisuutta olemattoman vaihtuvuuden myötä.

Tutkimuksen luotettavuutta arvioidessa on huomioitava, että seisovan veden seurantajaksolla saavista saadut tulokset eivät ole täysin verrattavissa veden laatuun vesitornien kulmissa. Kulmien toimintaa koskevasta tutkimuksesta saatuja tuloksia ei myöskään voi yleistää koskevan kaikkia suorakaiteen muotoisia vesitorneja, mutta tutkimus antaa kuitenkin useille vesilaitoksille tietoa tilanteen merkittävydestä. Tutkimus tulisi toistaa useissa suorakaiteen muotoisissa vesitorneissa luotettavuuden lisäämiseksi.

Kuten tutkimuksen yhteydessä todettiin, Turun Vesihuolto on vuonna 2019 tutkinut Yliopistonmäen tornissa seisovan ja lähtevän veden välistä viipymäaika, joka on keskimäärin jopa 150 tuntia. Vesitornin viipymäaika ei vastaa tavoiteltavaa 72 tunnin enimmäisaikaa, ja pysähtyneissä vyöhykkeissä, kuten kulmissa vesi voi viipyä pidempiäkin aikoja. Tämän seurauksena pitkään vedessä kehittyneiden mikrobien on mahdollista päätyä verkostoon esimerkiksi äkillisen kulutuspiikin seurauksena. Tornista lähtevän veden laatutulokset olivat miltei samanlaisia kuin säiliön veden, mikä osoittaa, että tornissa tapahtuvat muutokset näkyvät herkästi lähtevässä vedessä.

Tornin kulmissa seisovan veden sekoittuvuuteen tulisi kiinnittää enemmän huomiota. Sekoittuvuudella parannettaisiin veden homogenisoitumista, jolla on yhteys etenkin veden mikrobiologiseen laatuun. Suorakaiteen muotoisen vesitornin kulmissa seisovan veden laadun ja sekoittuvuuden parantaminen vaatii tarkkaa suunnittelua, ja veden virtaus tulisikin tornissa suunnitella siten, ettei pysähtyneitä vyöhykkeitä muodostuisi kulmiin. Veden vaihtuvuutta voitaisiin parantaa erilaisilla sekoitusjärjestelmillä, joilla estettäisiin pysähtyneiden vyöhykkeiden muodostumista kulmissa ja muissa vesipatsaan osissa. Energiaa vaativan, mutta toimivan sekoituksen ansiosta myös veden lämpötila pysyisi tasaisena, eikä veden kerrostuneisuutta olisi havaittavissa yhtä herkästi. Tutkimuksen alussa mainittu säiliön ilmastusjärjestelmä (Kuva 6) edistäisi veden sekoittuvuutta kierrättämällä vettä säiliön pohjasta ja suihkuttamalla sitä pintaan (GNL 2011, 16–17). Kyseisen ilmastusjärjestelmän voisi asentaa nimenomaan suorakaiteen muotoisen säiliön kulmiin, jotta hyöty olisi paras mahdollinen säiliön sekoittuvuuden kannalta.

Turun Yliopistonmäen suorakaiteen muotoisen vesitornin katon hyötykäyttö on vähäistä suhteessa sen tuomiin mahdollisuuksiin. Energiaa vaativien sekoitusjärjestelmien kohdalla katolle voisi asentaa aurinkopaneeleita tai pienen tuuliturbiinigeneraattorin tuottamaan tarvittavaa energiaa säiliön kulmiin asennettavalle pumpulle tai potkurille.

Säännöllisen vedenlaadun seurannan avulla veden laatuhäiriöiden esiintyvyyteen pystyttäisiin reagoimaan nopeasti. Veden mikrobiologisen laadun seurantaan automatisoitu teknologia ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä, mutta osaa veden fysikaalis-kemiallisista muutoksista voitaisiin seurata säiliön kulmiin asetettavilla jatkuvatoimisilla monitoreilla. Tämä edellyttäisi kuitenkin toimivaa pohjaratkaisua, jossa säiliö olisi mahdollista kiertää ympäri monitorin huolto- ja tiedonsiirtotoimenpiteiden varalta. Tulevaisuudessa suorakaiteen muotoisia vesitorneja rakennettaessa säiliötilan ympärille tulisi suunnitella käytäviä, jolloin kulmissa seisovan veden laadun seuraaminen olisi mahdollista. Tämä helpottaisi myös tornissa suoritettavia kuntotarkastus- ja puhdistustoimenpiteitä.

Vesitornien muotoja vertailtaessa pyöreissä vesitorneissa vedenlaatu on todennäköisesti parempaa, koska säiliössä ei esiinny stagnaatioalueita yhtä herkästi kuin suorakaiteen muotoisissa säiliöissä. Suorakaiteen muotoisen säiliön 90 asteisten kulmien pyöristäminen betonilla voisi lisätä veden virtausta. Muutostyö tulisi tehdä vesitornin puhdistuksen yhteydessä.

Vesilaitosten tulisi laatia tornin ylläpitosuunnitelma, jossa määritellään tarkastuksiin, huoltoihin ja puhdistuksiin selkeät ohjeistukset ja seuranta-aikataulut. Säiliön säännöllisesti suoritettavalla puhdistuksella huolehditaan seinämiin, erityisesti kulmiin kertyneiden mikrobien ja epäpuhtauksien poistaminen, ennen kuin ne päätyvät sakkamuodostumina kuluttajille.

Tutkimuksen edetessä opinnäytetyön aiheen havaittiin olevan erityisen mielenkiintoinen ja laaja-alainen, joten tutkimuskysymyksissä ja rajatun alueen sisällä pysyminen, olennaiset näkökulmat huomioiden oli haastavaa.

Opinnäytetyö antaa hyvän pohjan suorakaiteen muotoisten vesitornien jatkotutkimuksille. Kulmista ja seinä rakenteista olisi aiheellista tutkia esimerkiksi

biofilmien esiintyvyyttä, ja uusien mallinnusmenetelmien kehittäminen laadunvarmistamiseksi tukisi vesilaitosten riskienhallintaa. Lisäksi veden virtausta ohjaavien seinärakenteiden vaikutusta veden laatuun olisi tarpeellista tutkia kansallisten ja WHO:n näkemyserojen kannalta, koska seinämän materiaalit ja lisääntyneet kulmat voivat toimia potentiaalisena kasvualustana veden laatua heikentäville biofilmeille.

Tutkimus toi Turun Vesihuollolle uusia huomioon otettavia ja työstettäviä näkökulmia talousveden riskienhallintaan. Vesitornin kerrosvesinäytteiden tuloksia voidaan hyödyntää tulevilla tutkimuksilla vuodenaikaisena vertailukohteena. Turun Vesihuolto tulee jatkamaan Yliopistonmäen vesitornin kulmien tutkimusta kesällä 2024 veden lämpötilan kohotessa, jolloin vesinäytteistä voidaan havainnoida vuodenaikoihin liittyvää vedenlaadun vaihtelua eri vesikerroksissa.

Lähteet

Agteresch, H., Dagnelie, P., van den Berg, J. & Wilson, P. 1999. Adenosine Triphosphate. *Drugs* 58:211–232, 211.

Arola H., Arvola L., Huttula T., Juusela V., Kotkamäki N., Kotilainen H., Lindfors A., Linjama J., Mäkinen R., Näykki T., Sundberg L., Tattari S., Thessler S. 2012. Jatkuvatoinen sameusmittaus, hyvät mittauskäytännöt ja aineiston käsittely. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/12. Suomen ympäristökeskus, 9.

Delahaye, E., Welté, B., Levi, Y., Leblon, G. & Montiel, A. 2003. An ATP-based method for monitoring the microbiological drinking water quality in a distribution network. *Water research*, 37:3689–3696.

GNL (Government of Newfoundland and Labrador, Department of Environment and Conservation Water Resources Management Division). 2011. Evaluation of Potable Water Storage Tanks in Newfoundland and Labrador and Effect on Drinking Water Quality, 10–12, 16–17, 20, 22, 24–25, 28.

HACH. n.d. Kanada. Taskukolorimetri DR300. Viitattu 15.1.2023.
https://www.hyxo.fi/assets/files/2020/09/HyXo_HACH_DR300_fin.pdf

HACH. 2021. Kanada. User manual: 2100Q and 2100Q_{is}. Viitattu 25.3.2024.
DOC0225380041_6ed.pdf (bflidr.com)

HACH. 2023. Kanada. SL 1000 Portable Parallel Analyzer (PPA). Viitattu 25.3.2024. DOC0525325007Mar23-SL1000.pdf (bflidr.com)

IDEXX. 2023. Quanti-Tray System - Take the guesswork out of bacterial counts. (IDEXX 2023a) Viitattu 22.12.2023.
<https://www.idexx.com/en/water/water-products-services/quant-tray-system/>

IDEXX. 2023. Colilert-18. (IDEXX 2023b) Viitattu 22.12.2023.
<https://www.idexx.com/en/water/water-products-services/colilert-18/>

Leppäranta M., Virta J., & Huttula T. 2017. Hydrologian perusteet. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos, 46–47.

Li, Y., Qu, Y., Yang, H., Zhou, X., Xiao, P. & Shao, T. 2023. Combatting biofilms in potable water systems: A comprehensive overview to ensuring industrial water safety. *Environmental Microbiology Reports*. 15:445–45, 445–447.

Lindfors, J. 2023. ATP:n havaitsemiseen perustuva menetelmä Turun vesijohtoverkoston mikrobiologisessa laadunvalvonnassa. Diplomityö. Turun Yliopisto, Bioteknologian laitos. Turku, 26, 44–47.

LuminUltra. 2024. LuminUltra PhotonMaster™ Luminometer. Viitattu 15.1.2024. <https://www.luminultra.com/shop/second-generation-atp/atp-equipment/photonmaster-luminometer/>

LuminUltra. 2014. Test Kit Instructions Quench-Gone™ Aqueous Test Kit Product #: QGA-25 / QGA-100. Viitattu 15.1.2024. <https://biotechnologysolutions.com/wp-content/uploads/2016/11/LuminUltra-Test-Kit-Instructions-QGA.pdf>

Maa- ja metsätalousministeriö. n.d. Vesihuollon tilastoja. Viitattu 13.11.2023. https://mmm.fi/vesi/vesihuolto_tilastot

Maa- ja metsätalousministeriö. n.d. Vesihuolto. Viitattu 13.3.2024. <https://mmm.fi/vesi/vesihuolto>

Pursiainen, A., Saarinen, R., Hokajärvi, A., Ikonen, J., Pitkänen, T. & Miettinen, I. 2018. Terveysten ja hyvinvoinnin laitos (THL). Vesitornien vaikutus talousveden laatuun. PDF-dokumentti. Viitattu 29.3.2024. https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/11/Vesitornien_Pursiainen.pdf

RIL 124-1-2003. 2003. Vesihuolto I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 41–42, 44–46, 63, 198, 225–226, 246.

RIL 124-2-2004. 2004. Vesihuolto II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 37, 336–337, 421.

RIL 264-2013. 2013. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Vesitornien ja alavesisäiliöiden kunnonhallinta, 21.

RIL ry. 2019. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Rakennetun omaisuuden tila 2019, 22.

Saukkonen, K., Rapala, J., Liikanen, R., Puttonen, M., Honkasalo, M., Heinonen, S., Nikulainen, A., Piirani, M., Lehtola, M., Rintamäki, K., Nyyssönen, P., Matilainen, H., Lahtinen, J., Antila, E., Rajajärvi, S. & Tiitta, S. 2021. Teollisuuden vesi. VERLA: Verkostotöiden vaikutus suomalaisten talousvesiverkostojen veden mikrobiologiseen laatuun, 1–24. Viitattu 26.3.2024.

SFS 3021/1979 Veden pH-arvon määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 14.12.2023.

SFS 3028/1976. Veden raudan määrittäminen. Fotometrinen menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 14.12.2023.

SFS-EN 25813: en. Water quality. Determination of dissolved oxygen. Iodometric method (ISO 5813:1983) Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 14.12.2023.

SFS-EN 27888/1994. Veden laatu. Sähkönjohtavuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 14.12.2023.

SFS-EN ISO 6222 Veden laatu. Viljeltävien mikro-organismien lukumäärän laskeminen. Pesäkelasku siirrostamalla agar-ravintoalustaan. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 15.12.2023.

SFS-EN ISO 7027-1/2016. Water quality. Determination of turbidity. Part 1: Quantitative methods. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 15.12.2023.

SFS-EN ISO 7393-2/2018: en. Water quality. Determination of free chlorine and total chlorine. Part 2: Colorimetric method using N,N-dialkyl-1,4-phenylenediamine, for routine control purposes (ISO 7393–2:2017). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 14.12.2023.

SFS-EN ISO 9308-1:2014/A1:2017. Veden laatu. Escherichia coli -bakteerin ja koliformisten bakteerien lukumäärän määrittäminen. Osa 1: Kalvosuodatusmenetelmä vesille, joissa on vähän taustabakteeristoa Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 21.3.2024.

Stanley, P. 1989. A review of bioluminescent ATP techniques in rapid microbiology. Journal of bioluminescence and chemiluminescence, 4:375–380, 375, 378.

STM (Sosiaali- ja terveysministeriö). n.d. Talousveden toimenpideohjelma – Water Safety Plan. Viitattu 6.2.2024.
<https://stm.fi/talousveden-toimenpideohjelma>

STM (Sosiaali- ja terveysministeriö). 2023. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laadusta ja valvonnasta sekä rakennusten vesilaitteistojen riskienhallinnasta. 3.1.2023/21. Yhteenveto talousveden laadusta ja häiriötilanteista. Viitattu 29.9.2023.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230002#Pidm46494958663648>

THL (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos). 2023. Rauta (THL 2023a). Viitattu 11.10.2023. <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/vesi/kaivovesi/kaivoveden-kemiallinen-laatu/kaivovedessa-luonnostaan-esiintyvät-kemialliset-aineet/rauta>

THL (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos). 2023. Analyysivalikoima – Indikaattorimikrobit (THL 2023b). Viitattu 24.11.2023.
<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/vesi/vesimikrobiologinen-analytiikka/analyysivalikoima>

THL (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos). n.d. Talousvesi. Viitattu 20.12.2023.
<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/vesi/talousvesi>

TSV (Turun Seudun Vesi Oy). 2020. Hiilidioksidia vesijohtoverkostoon - turvallinen menetelmä veden pH:n laskuun tehokloorausta vaativissa poikkeustilanteissa. Päivitetty 10.2.2021. Viitattu 21.12.2023.
<https://turunseudunvesi.fi/uutinen/hiilidioksiditesti/>

TSV (Turun Seudun Vesi Oy). n.d. Veden matka. Viitattu 20.12.2023.
<https://turunseudunvesi.fi/veden-matka/>

TVH (Turun Vesihuolto Oy). 2019. Tärkeää työtä vesitornin hiljaisuudessa. Viitattu 14.3.2024. <https://www.turunvesihuolto.fi/vesi-lehti/tarkeaa-tyota-vesitornin-hiljaisuudessa/>

TVH (Turun Vesihuolto Oy). 2024. Veden laatu – Vedenlaatutaulukko 2023. Viitattu 14.3.2024. <https://www.turunvesihuolto.fi/tietoa-vedesta/veden-laatu/>

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2002. Finished Water Storage Facilities, 1.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2006. Distribution System Indicators of Drinking Water Quality, 42.

Valve M. & Isomäki E. 2007. Klooraus – tuttu ja turvallinen? Vesitalous 4/2007: 6–11. Vol. 48. Viitattu 11.10.2023.

Valvira. 2020. Talousvesiasetuksen soveltamisohje: Osa 1 – Talousvettä koskevia säädöksiä, 7–8, 28, (Valvira 2020a). Viitattu 13.11.2023.
<https://valvira.fi/documents/152634019/172742999/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-1.pdf/2e22caff-7fe8-a9a8-9263-c4842c2ba30b/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-1.pdf?t=1692701251051>

Valvira. 2020. Talousvesiasetuksen soveltamisohje: Osa 2 – Säännöskohtaiset soveltamisohjeet, 6, 44, 92. (Valvira 2020b). Viitattu 13.10.2023.
<https://valvira.fi/documents/152634019/172742999/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-2.pdf/8cfe81ef-6544-088a-470e-07447efef7a0/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-2.pdf?t=1692701337760>

Valvira. 2020. Talousvesiasetuksen soveltamisohje: Osa 3 – Enimmäisarvojen perusteet, 11–12, 28, 32–34, 45–46, 50. (Valvira 2020c). Viitattu 10.11.2023.
<https://valvira.fi/documents/152634019/172742999/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-3.pdf/06944d2b-133f-32a6-b7dc->

c4aae3c75dee/Talousvesiasetuksen-soveltamisohje-osa-3.pdf?t=1692701391600

Van der Merwe, V., Duvenage, S. & Korsten L. 2013. Comparison of biofilm formation and water quality when water from different sources was stored in large commercial water storage tanks. *Water Health* (2013) 11 (1): 30-40, 31.

Vang, Ó., Corfitzen, C., Smith, C. & Albrechtsen, H. 2014. Evaluation of ATP measurements to detect microbial ingress by wastewater and surface water in drinking water. *Water research*, 64:309–320, 310.

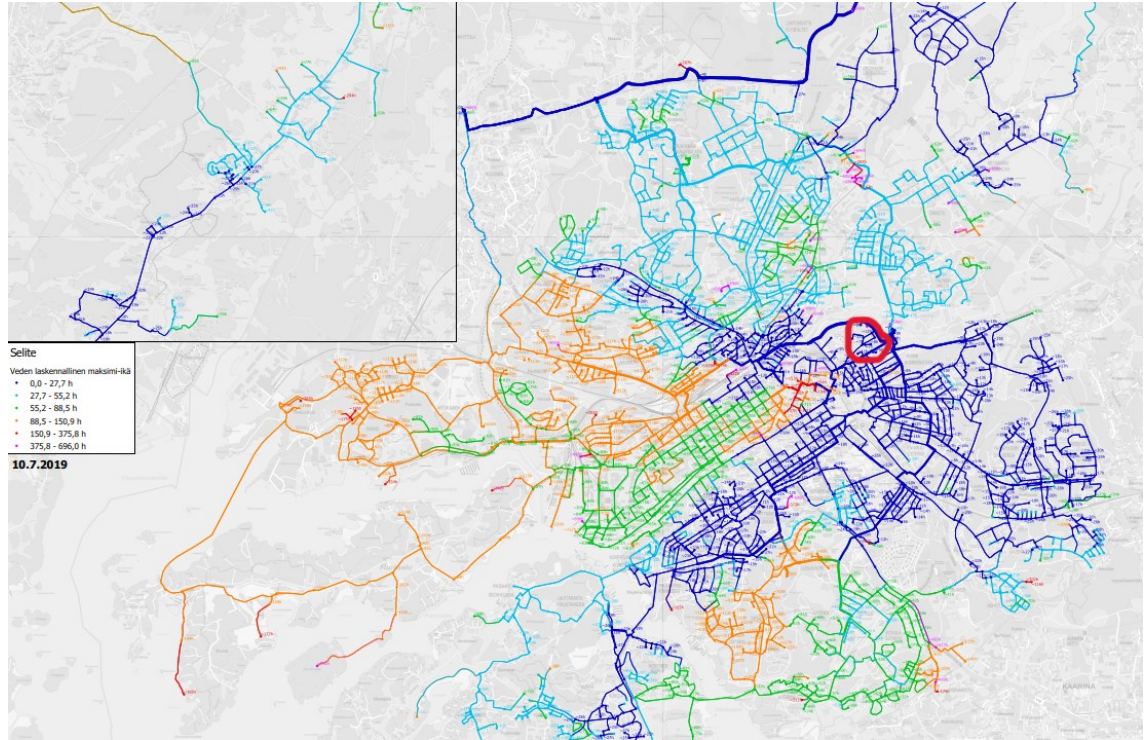
VWR. 2014. Conductivity meter CO 3100 L. Viitattu 25.3.2024.
Cond_3310_bk_en_VWR.book

WHO (World Health Organization). 2004. *Safe Piped Water – Managing Microbial Water Quality in Piped Distribution System*, 6, 47–48.

WHO (World Health Organization). 2017. *Guidelines for Drinking-water Quality: fourth edition incorporating the first addendum*, 172.

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M. & Van't Riet, K. 1990. Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6): 1875–1881.

Liitteet



Liite 1. Veden laskennallinen ikä värikoodattuna Turun vesijohtoverkostossa. Turun Yliopistonmäen vesitornin sijainti merkitty punaisella. Värikoodit veden viipymän mukaan: tummansininen 0,0–27,7 h, vaaleansininen 27,7–55,2 h, vihreä 55,2–88,5 h, oranssi 88,5–150,9 h, punainen 150,9–375,8 h, vaaleanpunainen 375,8–696,0 h. Viipymämallin perusteella vesitorniin kulkee tuoretta vettä. (Lindfors 2023, 26.)