



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KAROLIINA MOILANEN
KÄSITELLYN YHDYSKUNTAJÄTEVEDEN HYGIENISOINTI
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Rintala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Luon-
nontieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 4. kesäkuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

MOILANEN, KAROLIINA: Käsitellyn yhdyskuntajäteveden hygienisointi

Diplomityö, 78 sivua, 8 liitesivua

Joulukuu 2014

Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Rintala

Avainsanat: Jätevesi, hygienisointi, patogeeni, indikaattoriorganismi, UV-desinfiointi, *Escherichia coli*, suolistoperäinen enterokokki, *Clostridium perfringens*, kolifagi

Jäteveden sisältämät mikrobit aiheuttavat vesivälitteisten tautien tartuntariskin, minkä vuoksi käsitellyn jäteveden hygieeniseen laatuun on kiinnitetty huomiota tavanomaisten jätevedenkäsittelyprosessien lisäksi. Joidenkin jätevedenpuhdistamoiden ympäristöluvuissa on esiintynyt hygienisointivaatimuksia. Käsitellyn jäteveden desinfiointikäsittelylaitteistoja on otettu käyttöön myös oma-aloitteisesti.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia UV-desinfiointin tehokkuutta käsitellyn jätevedeen Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla. Työssä esitetään puhdistetun jäteveden hygienisointivaihtoehtoja kirjallisuuden avulla ja selvitetään kokeellisesti, kuinka tehokkaasti UV-käsittely poistaa indikaattoriorganismeja Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon käsitellystä jätevedestä. Työn tarkoituksena oli määrittää suolistoperäisten enterokokkien, *Escherichia coli* – bakteerien, *Clostridium perfringens* – itiöiden sekä somaattisten ja F-spesifisten kolifagien pitoisuudet puhdistetusta jätevedestä lähtevän veden kanavasta ennen UV-koelaitteistoa ja heti sen jälkeen.

UV-pilotoinnissa käytettiin laskennallisia UV-annoksia 81,7–516,4 J/m². UV-pilotoinnin perusteella Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon vesi soveltuu UV-desinfioitavaksi. Normaalityönteissä UV-desinfiointi tuottaa hygieeniseltä laadultaan riittävän puhdasta jätevettä, mutta ohitusvesien käsittely-yksikön toiminnan aikana lähtevän jäteveden alhainen UV-transmittanssi huonontaa puhdistustulosta. UV-käsittely on turvallinen tapa desinfioida jätevedet, eikä sen käytössä muodostu haitallisia sivutuotteita. Lisäksi veteen ei jää kemikaalijäämiä. Täyden mittakaavan UV-desinfiointin energiankulutus olisi 192–736 MWh vuodessa riippuen tehonsäädöstä ja vuosittaisesta käyttöasteesta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

MOILANEN, KAROLIINA: The disinfection of the treated wastewater

Master of Science Thesis, 78 pages, 8 appendix pages

December 2014

Major: Water and waste management engineering

Examiner: Professor Jukka Rintala

Keywords: Wastewater, pathogen, indicator organism, UV disinfection, *Escherichia coli*, fecal enterococci, *Clostridium perfringens*, coliphage

The microbes in wastewater cause the risk of waterborne infections. The hygienic quality of the treated wastewater has been taken into account lately in addition to the conventional water treatment processes. Some wastewater treatment plants even have disinfection requirements in their environmental permit. Treated wastewater disinfection equipment has also been taken in use voluntarily in Finland recently.

The aim of this study is to investigate the effect of UV disinfection on tertiary wastewater in Kakolanmäki wastewater treatment plant, Turku. This work is divided into the literature review of wastewater disinfection methods and to the pilot test of experimental UV disinfection. The goal of this study was to determine the amount of fecal enterococci, *Escherichia coli*, spores of *Clostridium perfringens* and somatic and F-specific coliphages from the treated wastewater before and after the UV disinfection reactor in the outgoing wastewater channel.

In this study the calculated UV doses between 81,7 – 516,4 J/m² were tested. According to the UV pilot tests the water of Kakolanmäki WWTP is suitable for UV disinfection and yields water with hygienic limits in normal situations. However, during the use of by-pass water treatment unit the low UV transmittance of the water decreases the microbial reduction grades.

UV disinfection is a safe way to disinfect wastewater. The use of UV disinfection will not produce any harmful by-products and it does not leave residual in the treated water. The annual energy consumption in a full-scale UV disinfection implementation would be 192–736 MWh depending on the power adjustment and the annual degree of utilization.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Turun seudun puhdistamo Oy:lle Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla kesällä ja syksyllä 2014. Haluan kiittää ohjaajaani Mirva Levomäkeä ja Jarkko Laantia mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja työn ohjauksesta sekä neuvoista. Suuret kiitokset kuuluvat myös Kaj Piroselle koelaitteiston asennuksista ja säätämisestä koeajon aikana sekä Esa Malmikarelle koelaitteiston asennuksista sekä työtäni varten saamistani tiedoista ja kommentteista. Kiitos myös Jouko Tuomelle, Jyrki Haapasaarelle, Juha Nurmelle, Jarno Arfmanille sekä Janne Jortikalle avusta työhön. Kiitän myös muuta Turun seudun puhdistamo Oy:n ja Kemira Operon Oy:n projektiin osallistunutta henkilöstöä sekä koko puhdistamon henkilöstöä kannustavasta ja hyväntuulisesta työilmapiiristä kesän aikana.

Lisäksi haluan kiittää Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy:n Nina Leinoa, Heidi Ilmasta, Timo Yli-Kyynyä ja Reetta Räisästä neuvoista tutkimussuunnitelmaani liittyen, työn näytteenottojen suorittamisesta sekä muista työtäni varten tarvitsemistani tiedoista.

Hyödyllisiä neuvoja diplomityöprojektiini antoi myös Elina Antila, jota haluan kiittää mielenkiinnosta diplomityötäni kohtaan.

Diplomityöni tarkasti professori Jukka Rintala, jota haluan lämpimästi kiittää opastuksesta sekä arvokkaista kommentteista ja palautteesta työhöni liittyen.

Lopuksi haluan kiittää kihlattuani Mikkoa, siskoani Pauliinaa, vanhempiani ja ystäviäni kaikesta tuesta, jota olen diplomityön tekemisen ja opiskelujeni aikana saanut.

Tampereella, 22.12.2014

SISÄLLYS

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Jäteveden patogeeneit ja desinfiointitarve	3
2.1 Patogeeneit	3
2.1.1 Bakteerit	4
2.1.2 Alkueläimet	8
2.1.3 Virukset	9
2.1.4 Suolistomadot	10
2.2 Indikaattoriorganismit veden hygieenisen laadun arvioinnissa	11
2.3 Patogeenien selviytyminen ja lisääntyminen jäte- ja luonnonvesissä	12
2.4 Uimaveden laatuvaatimukset ja – suositukset	14
2.5 Asetus lannoitevalmisteista (MMMä 24/11)	16
3 Jäteveden desinfiointimenetelmien vertailu	17
3.1 Inaktivaation kinetiikka	19
3.2 Kloorikemikaalit	21
3.3 Peretikkahappo	21
3.3.1 Esiselkeytetyn jäteveden peretikkahappokokeilu Kakolanmäen puhdistamolla	22
3.4 Permuurahaishappo	22
3.5 Vetyperoksidi	23
3.6 Otsonointi	24
3.7 Kalvosuodatus	25
3.8 UV-käsittely	26
3.8.1 UV-annos	29
3.8.2 UV-lamput	32
3.8.3 UV-säteily väliaineessa ja UV-reaktorissa	35
3.8.4 UV-desinfiointin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä	37
3.9 Tehostetut hapetusprosessit (AOP-prosessit)	39
3.9.1 AOP+UV-käsittelyn vaikutus lääkeaineisiin	40
4 Aineisto ja menetelmät	43
4.1 Kohdepuhdistamo – Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo	43
4.1.1 Valtioneuvoston asetus 888/2006	47
4.1.2 Ympäristöluvat	48
4.1.3 HELCOMin suositukset	50
4.2 UV-käsittely	51
4.2.1 Käsiteltävän veden laatu UV-käsittelyn näkökulmasta	51
4.2.2 UV-laitteisto	52
4.2.3 Koejärjestelyt ja näytteenotto	53

5	Tulokset.....	54
5.1	Lähtevän jäteveden UV-transmittanssi ja UV-annokset.....	54
5.2	Enterokokkien ja <i>E. colien</i> vähenemät.....	55
5.3	Kolifagien vähenemät	56
5.4	<i>Clostridium perfringens</i> -itiöiden vähenemät.....	57
5.5	OVK:n vaikutus puhdistustuloksiin	57
6	Tulosten tarkastelu	59
6.1	UV-desinfiointin toteutus.....	60
6.2	Energiankulutus.....	63
7	Johtopäätökset.....	64
	Lähteet.....	66
	Liite 1: Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio	79
	Liite 2: Prosenttipisteiden laskeminen	80
	Liite 3: Turun merialueen tarkkailututkimuksen vedenlaadun havaintopaikat.....	81
	Liite 4: Mikrobien määrittäminen.....	82
	Liite 5: Merialueen, purkupaikan ja puhdistamon hygieenisyyttä koskevia tuloksia	83
	Liite 6: UV-pilotoinnin analyysitulokset	86

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

absorbanssi	näytteeseen imeytyvän säteilyn osuus
aerobinen	happea tarvitseva eliö
anaerobinen	eliö, joka ei käytä happea aineenvaihdunnassaan
AOC	assimiloituva orgaaninen hiili (<i>assimilable organic carbon</i>)
AOP	tehostettu hapetusmenetelmä (<i>Advanced Oxidation Process</i>)
AVL	asukasvastineluku
bakterisidi	bakteereita tappava
BDOC	biologisesti hajoava DOC
BOD _x	biologinen/biokemiallinen hapenkulutus (<i>Biological Oxygen Demand</i>) x päivän aikana
cfu	pesäkkeen muodostava yksikkö (<i>colony-forming unit</i>)
COD _{Cr}	kemiallinen hapenkulutus dikromaattimenetelmällä määritettynä
DBP	desinfiointin sivutuote (<i>disinfection by-product</i>)
desinfiointi	patogeenisten organismien tappaminen, poistaminen tai inhibointi
DNA	deoksiribonukleinihappo
DOC	liuennut orgaaninen hiili
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i> –bakteerisuku
eksoentsyymi	solun tuottama entsyymi, joka toimii solun ulkopuolella
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
emittoida	säteillä
enterobakteeri	<i>Enterobacteriaceae</i> -heimoon kuuluva bakteeri
enterokokki	<i>Enterococcus</i> -sukuun kuuluva tasalämpöisten eläinten suolen normaaliflooran bakteeri, veden hygieniaindikaattori
epidemia	kulkutauti, joka tarttuu suureen osaan jonkin alueen väestöstä; taudin merkittävä leviäminen
EU	Euroopan unioni
Evira	Elintarviketurvallisuusvirasto
fagi	bakteereita infektoiva virus
fakultatiivisesti anaerobinen	voi lisääntyä hapellisissa sekä hapettomissa olosuhteissa
Fe	rauta
Fe ²⁺	ferroioni
Fe ³⁺	ferri-ioni
FeSO ₄ ·7H ₂ O	ferrosulfaatti
fekaalinen	suolistoperäinen
fekaalinen streptokokki	suolistoperäisten enterokokkien aiempi nimitys, sisälsi <i>Enterococcus</i> - ja <i>Streptococcus</i> -suvut
FINAS	Suomen kansallinen akkreditointielin (<i>Finnish Accreditation Service</i>)

flagelli	bakteerien rihmamainen liikuntaelin
fotokatalyyysi	näkyvän valon tai UV-säteilyn sekä katalyytin hapetusvai- kutuksen avulla tapahtuva desinfiointi
fotoni	sähkömagneettisen säteilyn hiukkanen
fotoreaktivaatio	DNA-vaurioiden korjaantuminen prosessissa, jossa käy- tään näkyvää valoa tarvitsevaa entsyymiä
germisidinen	mikrobeja tuhoava
gram-negatiivinen	gramvärjäyksessä punaiseksi värjäytyvä bakteeri
gram-positiivinen	gramvärjäyksessä violetiksi värjäytyvä bakteeri
gramvärjäys	soluseinän rakenteeseen perustuva bakteerien erotusmene- telmä
hajakuormitus	useasta pienestä lähteestä peräisin oleva kuormitus
HELCOM	Itämeren suojelukomissio (<i>Helsinki Commission</i>)
heterotrofinen	toisenvarainen, ei kykene itse yhteyttämään
hygienisointi	ks. desinfiointi
inaktivointi	elinkyvyttömäksi tai tehottomaksi tekeminen
infektio	tartunta, taudinaiheuttajan tunkeutuminen tai kulkeutumi- nen elimistöön tai siirtyminen elimistön osasta toiseen
indikaattori	osoittava tekijä, ilmaisija
inhibitio	estäminen
karsinogeeninen	syöpää aiheuttava
kolifagi	fagi, joka käyttää isäntänään kolibakteeria
koliforminen	<i>Enterobacteriaceae</i> -sukuun kuuluva kolimuotoinen entero- bakteeri
kysta	alkueläinten kestävä lepomuoto
LED	valoa emittoiva diodi (<i>light-emitting diode</i>)
letaliteetti	tappavuus
lievealue	selviytymis- ja inaktivoitumiskäyrien taittumiskohta, jonka jälkeen muutos hidastuu
LPHO	matalapainelamppu, jolla on korkea intensiteetti (<i>low- pressure high-output lamp</i>)
LPLO	matalapainelamppu, jolla on matala intensiteetti (<i>low- pressure low-output lamp</i>)
LSVYT	Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy
MBR	membraanibioreaktori
mikrobi	mikro-organismi, pieneliö, mikroskooppisen pieni eliö
MP	keskipainelamppu, jolla on korkea intensiteetti (<i>medium- pressure lamp</i>)
mpn	todennäköisin lukumäärä (<i>most probable number</i>)
mutageeninen	mutaatioita aiheuttava
normaalifloora	ihmisten ja eläinten tavallinen mikrobikasvusto

nukleiinihappo	nukleotideistä koostuva perinnöllisen informaation säilytysmolekyyl
nukleotidi	nukleiinihapon osa, joka koostuu fosfaatti-, sokeri- ja emäsosasta
ookysta	alkueläinsolujen paksukuorinen kestromuoto
opportunistinen patogeeni	voi joissakin olosuhteissa aiheuttaa sairastumisen
orgaaninen peroksidi	yhdiste, jonka funktionaalisessa ryhmässä on yksinkertainen happi-happi-sidos
OVK	ohitusvesien käsittely-yksikkö
otsoni	hapen allotrooppinen muoto
parasiitti	loinen, joka aiheuttaa isäntäeliölleen vahinkoa
patogeeni	taudinaiheuttaja
pfu	infektoivien virusten määrän yksikkö (<i>plaque-forming unit</i>)
pmy	pesäkkeitä muodostava yksikkö, pesäkkeiden määrä
ppm	miljoonasosa (<i>parts per million</i>)
prokaryootti	esitumallinen (solusta puuttuu tuma, DNA on kiinni solukalvossa)
proteiinisynteesi	solun proteiinien valmistusprosessi, jossa tarvitaan aminohappoja, perustuu geenien emäsjärjestykseen
redox-potentiaali	hapetus-pelkistysreaktion potentiaali
reduktio	puhdistusteho, poistoteho
rekombinaatiokorjaus	solun vaurioiden korjautuminen DNA:n kahdentumisen jälkeen
ribosomi	soluelin, jonka pinnalla proteiinisynteesi tapahtuu
RNA	ribonukleiinihappo
serotyypit	vasta-aineiden avulla määritettävä bakteerien tai virusten alalaji
stationäärivaihe	vaihe, jossa elävien mikrobien lukumäärä säilyy vakiona
sterilointi	kaikkien elävien organismien tuhoaminen
STM	Sosiaali- ja terveysministeriö
sytoplasma	solulima
THL	Terveyden ja hyvinvoinnin laitos
TKUPUR	Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon purkupaikka
TOC	orgaaninen kokonaishiili
toksinen	myrkyllinen
transmittanssi	näytteen läpäisevän säteilyn osuus
trofotsoiitti	soluseinätön, ravinnonottoon kykenevä alkueläimen muoto
TSS	kokonaiskiintoaineen määrä (<i>total suspended solids</i>)
UV	ultraviolettivalo
UVT	UV-säteilyn transmittanssi
vegetatiivinen	kasvullinen, aineenvaihdunnallisesti aktiivinen

SYMBOLIT

A	spesifinen letaliteettikerroin, yksikkö riippuu n :stä
λ	säteilyn aallonpituus [nm]
μ	aritmeettinen keskiarvo
σ	standardipoikkeama
A	säteilyn absorbanssi
c	valon nopeus tyhjiössä = $2,99792 \cdot 10^8$ m/s
C	desinfiointikemikaalin pitoisuus, esim. [mg/l]
D	UV-annos [J/m^2] tai [mJ/cm^2]
E	fotonin energia [eV] tai [J]
f	säteilyn taajuus [Hz]
h	Planckin vakio, $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js = $4,136 \cdot 10^{-15}$ eVs
I	säteilyn intensiteetti [W/m^2]
I_0	säteilyn alkuperäinen intensiteetti [W/m^2]
k tai K	inaktivaation nopeusvakio
n	kokeellinen laimennuskerroin (dimensioton)
N	elävien organismien määrä ajanhetkellä t
N_0	elävien organismien alkuperäinen määrä
N_p	partikkelien suojaamien mikro-organismien määrä
t	kontaktiaika [s]

1 JOHDANTO

Jätevedenkäsittelyssä on tavallisesti keskitytty kiintoaineen ja ravinteiden kuten fosforin ja typen sekä happea kuluttavien yhdisteiden poistamiseen (VNa 12.10.2006/888). Tavanomaiset esi- ja jälkikäsittelyn sisältävät biologis-kemialliset jätevedenpuhdistusprosessit ovat tyypillisesti vähentäneet noin 90–99,9 % jäteveden mikrobimäärästä ilman desinfiointia. Myös tertiäärikäsittely, kuten hiekkasuodatus, parantaa jäteveden hygieenistä laatua. Käsitelty jätevesi sisältää vielä huomattavan määrän erilaisia mikrobeja. (Koivunen 2007)

Jätevedenpuhdistusprosessista kulkeutuvien patogeenien on luonnonvesiin laimentumisen (Darakas et al. 2009) lisäksi ajateltu inaktivoituvan esimerkiksi pH:n, lämpötilan, veden suolaisuuden, ravinnonpuutteen tai säteilyn ja hapettumisen vaikutuksesta (Rozen & Belkin, 2001). Tavoitteena on ollut, että yksittäiseltä jätevedenpuhdistamolta johdettu jätevesi olisi käsitelty niin hyvin, että purkuvesistön laimennus- ja virtaamaolosuhteet sekä vesistöä kuormittavat muut tekijät huomioon otettuna veden hygieeninen laatu säilyisi hyvänä. Etenkin pienissä ja matalissa vesistöissä, joissa laimentuminen on vähäistä ja asutus ympärillä tiheää, riski vesistön hygieenisen tilan huonontumiselle on olemassa.

Jäteveden patogeenit aiheuttavat terveys- ja epidemiariskin päätyessään luonnonvesiin. Uimarannat ja muu veden virkistyskäyttö, kuten kalastus, asettavat veden hygieeniselle laadulle edellytyksiä. Euroopan Unioni (EU) sekä Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö (STM) ovat asettaneet vaatimuksia uimarantojen veden laadulle ja valvonnalle. Monissa maissa on lisäksi asetettu raja-arvot jäteveden mikrobiologiselle laadulle, ja myös Suomessa jätevedenpuhdistamoilta on viime vuosina ympäristöluvassa edellytetty käsitellyn jäteveden hygienisointia. Lisäksi muutamat jätevedenpuhdistamot Suomessa ovat testanneet ja ottaneet jäteveden desinfioinnin vapaaehtoisesti käyttöön viime vuosina. (Luukkonen 2014).

Maailmalla puhdistettujen jätevesien uudelleenkäyttö ja kierrätys on vesipulan ja kasvavan vedentarpeen vuoksi yhä yleisempää. Käsiteltyä jätevettä käytetään uudelleen muun muassa kastelu- ja huuhteluvetena sekä teollisuudessa. (Luukkonen 2014). Jäteveden hygienisoinnilla halutaan lisäksi varmistaa, että talousvesilaitosten raakavedenotto olisi turvallista eikä riskiä saastumisesta olisi.

Viime vuosikymmeninä on tutkittu eri desinfiointivaihtoehtoja jäteveden klooraukselle, jossa muodostuu haitallisia sivutuotteita. Klooraus on vanhin ja käytetyin desinfiointimenetelmä, kunnes sen haitat 1970-luvulla havaittiin ja kloorauksen käyttö väheni merkittävästi. Suomessakin jätevesien desinfioinnista luovuttiin lähes kokonaan (Savolainen 1991).

Tämän työn tavoitteena on testata UV-desinfointia käsiteltyyn jäteveteen sekä arvioida muun muassa puhdistustulosten perusteella sen soveltuvuutta Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon mahdolliseksi hygienisointikäsitteilyksi.

2 JÄTEVEDEN PATOGEENIT JA DESINFIOINTITARVE

Yhdyskuntajätevesien mukana jätevedenpuhdistamoille kulkeutuu eri lähteistä peräisin olevia taudinaiheuttajia eli patogeeneja. Jätevedenkäsittelyprosessissa niiden määrä vähenee, mutta niitä on vielä merkittävästi käsiteltyssä jätevedessä.

2.1 Patogeenit

Yhdyskuntajätevesien sisältämät patogeenit voidaan luokitella seuraaviin pääkategorioihin: bakteerit, virukset, alkueläimet (niiden paksukuoriset kestromuodot eli ookystat ja kystat) sekä suolistomatojen munat (taulukko 1). Patogeenit voivat päätyä jätevesiin infektoituneen tai tautia kantavan ihmisen tai eläimen erittämänä. Jotkin organismit saattavat esiintyä vain jonkin tietyn taudin puhkeamisen tai epidemian aikaan, jolloin taudista johtuvien mikro-organismien määrä riippuu patogeenia erittävien ihmisten lukumäärästä sekä patogeenien erittymisen kestosta. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 140 ja 153)

Taulukko 1. Patogeeniryhmien rakenne ja ryhmien aiheuttamia tauteja.

Mikrobiryhmä	Sukuja ja heimoja	Rakenne	Esimerkkejä taudeista
Bakteerit	<i>Campylobacter</i> <i>Clostridium</i> <i>E. coli</i> <i>Enterococcus</i> <i>Listeria</i> <i>Salmonella</i> <i>Shigella</i> <i>Vibrio</i> <i>Yersinia</i>	Yksisoluisia, alkeistumallisia, pituus tyypillisesti 0,5-14 µm, joillakin lajeilla liikuntaelimiä, grampositiivisia ja gramnegatiivisia, voivat muodostaa itiöitä	suolisto- ja yleisinfektiot, salmonelloosi, lavantauti, pikkulavantauti, enteriitti (suolistotulehdus), shigelloosi (punatauti), ripuli, kolera, gastroenteriitti, listerioosi tetanus (jäykkäkouristus) virtsatietulehdukset
Alkueläimet	<i>Anopheles</i> <i>Ciliata</i> <i>Cryptosporidium</i> <i>Cyclospora</i> <i>Entamoeba</i> <i>Flagellata</i> <i>Giardia</i> <i>Plasmodium</i> <i>Sarcodina</i> <i>Sprozoa</i>	aitotumallisia, heterotrofisia mikroorganismeja, ei soluseinättömiä muodostavat tarvittaessa kestromuotoja, liikuntakykyisiä	amebiaasi, giardiaasi, malaria
Virukset	<i>Adenoviridae</i> <i>Caliciviridae</i> (norovirus) <i>Enterovirus</i> (polio-, echo-, coxsackievirus) <i>Hepatovirus</i> <i>Reoviridae</i> <i>Rotavirus</i>	nukleiinihappoydin, jota ympäröi proteiini- ja glykoproteiini kuori (kapsidi), sisältää DNA:ta tai RNA:ta, lisääntyy isäntäeliössä	ripuli, influenssa, aivokalvontulehdus, poliohalvaus, kuume, hengitystiesairaudet, sydänlihastulehdus, maksatulehdus
Suolistomadot	<i>Ancylostoma</i> <i>Ascaris</i> <i>Diphyllobothrium</i> <i>Enterobius</i> <i>Necator</i> <i>Schistosoma</i> <i>Strongyloides</i> <i>Trichuris</i>	selkärangattomia matoja, koko 1 mm – useita metrejä, muni- en koot 10->100 µm, kehitysvaiheet muna, toukka ja aikuinen	suolinkaistauti, trikurgiaasi, enterobiaasi eli kihomatoinfektio, askariaasi, ankylostomiaasi, ripuli, skistomiaasi

2.1.1 Bakteerit

Bakteerit ovat yksisoluisia alkeistumallisia eli prokaryoottisia organismeja, joiden pituus on tyypillisesti 0,5-14 µm. Yleisesti bakteerit luokitellaan niiden muodon

perusteella: pyöreät kokit, sauvamaiset sauvabakteerit eli basillit ja kierteiset vibriot, spirillit ja spirokeetat. Bakteerien rakennetta ympäröi jäykkä soluseinä, joka mahdollistaa suuren osmoottisen paineen solulimassa. Ilman vahvaa soluseinää solun rakenne hajoaisi helposti diffuusion tuodessa vettä sisälle soluun. (Sincero & Sincero, s. 149–150). Bakteerit hankkivat ravintonsa kuljettamalla liuennutta ravintoa ympäristöstään solun sisälle. Jos ravinto ei ole valmiiksi liuenneessa muodossa, on bakteerin ensin hajotettava se eksoentsyymeillä. Bakteerin elinympäristössä on siis oltava kosteutta, jotta se saa ravintoa (Sincero & Sincero 2003, s. 148). Jotkin bakteerit, kuten monet basillit ja spirillit ovat oikeassa lämpötilassa ja väliaineessa liikkumiskykyisiä rihmamaisen, yhden tai useamman liikuntaelimen eli flagellin ansiosta (Sincero & Sincero 2003, s. 149).

Bakteerit voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden soluseinän rakenteen perusteella: gram-negatiiviset ja gram-positiiviset bakteerit. Gramvärjäyksessä bakteeriviljelmää värjätään kristallivioletilla ja jodiliuoksella. Huuhtelun jälkeen gram-positiiviset bakteerit säilyttävät violetin värin, mutta gram-negatiivinen bakteeri muuttuu punaiseksi. (Sincero & Sincero 2003, s. 150)

Epäsuotuisissa olosuhteissa jotkin bakteerit kykenevät muodostamaan soluliman sisällä rakenteen, joka on vastustuskykyinen ympäristön bakteerin elinkykyä haittaaville vaikutuksille, kuten kuivuudelle, lämmölle ja säteilylle (Vaara et al. 2010, s. 32). Näitä bakteerin kestäviä lepomuotoja kutsutaan itiöiksi. Itiöt poikkeavat vegetatiivisesta eli lisääntyvästä solusta monin tavoin. Metabolisesti itiö on inaktiivinen, mutta sopivien olosuhteiden vallitessa se herää ja itää, ja itiön seinä hajoaa. (Vaara et al. 2010, s. 32)

Ihmisen normaaliin suolistoflooraan kuuluu lukuisia harmittomia ja hyödyllisiä bakteereita, joita erittyy ulosteen mukana jätevesiin. Jätevesissä esiintyy monimuotoinen patogeenisten ja ei-patogeenisten bakteereiden kanta. Bakteereita, jotka saattavat joissakin olosuhteissa aiheuttaa sairastumisia, kutsutaan ns. opportunistisiksi patogeenisiksi bakteereiksi (Brown et al. 2012).

Tavallisimmat ihmisen erittämät patogeeniset bakteerioorganismit aiheuttavat ruoansulatuskanavan sairauksia, kuten lavantautia, pikkulavantautia, punatautia, ripulia ja koleraa. Nämä patogeenit ovat erittäin tarttuvia, ja aiheuttavat tuhansia kuolemia vuosittain erityisesti trooppisen vyöhykkeen alueilla, joissa on heikkolaatuinen sanitaatio. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 151–153)

2.1.1.1 Enterobakteerit

Enterobacteriaceae-heimon tärkeimpiin bakteerisukuihin kuuluvat *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella* ja *Yersinia*. Heimon kaikki bakteerit ovat gram-negatiivisia sauvabakteereita, joilla on toisiaan muistuttavia kasvu- ja rakenneominaisuuksia. Ihmisen tai eläinten suolisto kuuluu useimpien *Enterobacteriaceae*-heimon lajien luonnolliseen kasvuympäristöön, minkä vuoksi niitä kutsutaan usein yhteisnimityksellä enterobakteerit. *Escherichia*-, *Salmonella*-, *Shigella*- ja *Yersinia*-sukujen bakteereista suuri osa kasvaa jätevesissä. Enterobakteereilla on vahva vastustuskyky monille antibiooteille niiden tehokkaan ulkomembraanin ansiosta. (Siitonen & Vaara 2010b, s. 177)

Escherichia coli (*E. coli*) eli kolibakteeri on ihmisen suoliston aerobisen normaaliflooran valtabakteeri, ja suolistossa sillä on lukuisia eri kantoja. *E. coli* on ihmisen suolistossa hyödyllinen, sillä se estää patogeenisempien mikrobien kolonisaation suolissa. *E. coli* pystyy aiheuttamaan infektioita, jos se pääsee suoliston ulkopuolelle limakalvojen vastustuskyvyn heikennyttyä tai vamman seurauksena. Jotkin kolibakteerikannat aiheuttavat lisäksi ripulia, mutta suoliston normaalifloorassa patogeeniset *E. coli* -bakteerit ovat harvinaisia. (Siitonen & Vaara 2010b, s. 177–179)

Salmonellat ovat jätevesien tavallisimpia bakteeripatogeeniä, ja ne aiheuttavat suolisto- ja yleisinfektioita. Niitä tunnetaan noin 2100 serotyyppiä. *Salmonella* leviää useimmiten ihmisen tai eläimen ulosteesta saastuneen elintarvikkeen tai veden välityksellä. Suomessa tärkein yleisinfektioita aiheuttava serotyyppi on Typhimurium ja ulkomailta saaduissa salmonellooseista yleisin on Enteritidis. *Salmonella* Typhi aiheuttaa kehitysmaissa esiintyvää lavantautia ja on yksi vakavimmista *Salmonellojen* aiheuttamista taudeista. Hoitamattomana lavantaudin kuolleisuus on noin 10 % potilailla. *Salmonella* Paratyphi A, B ja C puolestaan aiheuttavat lavantautia lievempää yleisinfektioita, pikkulavantautia. Salmonellat, jotka tarttuvat ravinnosta eivätkä tunkeudu verenkiertoon, aiheuttavat ns. enteriitin eli suolistotulehduksen. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 152–154; Terveystieteiden tutkimuskeskus; Siitonen & Vaara 2010b, s. 185–189)

Shigella-sukuun kuuluvat bakteerit kuuluvat ihmispatoogeneihin, eivätkä ne ole osa suoliston normaaliflooraa. Shigellat voidaan jakaa neljään eri lajiin: *Shigella dysenteriae*, *S. boydii*, *S. flexneri* ja *S. sonnei*, ja lajit jaetaan edelleen serotyyppeihin. Shigellat tunkeutuvat herkästi suolen seinämään, mutta joutuvat ainoastaan hyvin harvoin vereen. Shigelloosi eli punatauti on tyypillinen shigellojen aiheuttama suolistoinfektio.

Shigellat aiheuttavat infektion jo hyvin pienillä pitoisuuksilla: tarvitaan vain 10–500 solua, joten shigellat ovat helposti tarttuvia. Shigelloosi leviää myös kosketustartuntana toisin kuin esimerkiksi salmonellainfektiot, ja WHO (2005, s. 3) mukaan shigellatartunnan voi saada myös saastuneen ruoan ja juomaveden välityksellä. Suomessa shigellatartuntoja todetaan keskimäärin 100 kappaletta vuodessa, ja taudit ovat yleensä olleet lieväoireisia. (Siitonen & Vaara 2010b, s. 190–192)

Yersiniat ovat enterobakteereita, jotka esiintyvät eläimissä. Ihmisten infektioita aiheuttavista yersinioista merkittävimpiä ovat *Y. enterocolitica*, *Y. pseudotuberculosis* ja *Y. pestis*. *Y. enterocolitica* aiheuttaa esimerkiksi kuumeisia suolistoinfektioita ja kivuliasuoliston alueen imurauhastulehduksia. *Y. pseudotuberculosis* puolestaan aiheuttaa ihmisellä kuumeisen suolistoinfektion. (Siitonen & Vaara 2010b, s. 192–195)

2.1.1.2 Muut bakteerit

Enterobakteerien lisäksi erilaisia jätevesissä esiintyviä bakteeriryhmiä ovat vibriot, kamylobakteerit, listeriat ja klostridit. Näiden bakteerisukujen bakteereista osa kuuluu ihmiselle tauteja aiheuttaviin bakteereihin. Niiden lisäksi yleinen bakteeriryhmä on enterokokit, jota käytetään usein veden hygieenisen laadun mittarina.

Vibriot ovat gram-negatiivisia *Vibrio*-sukuun kuuluvia, käyriä sauvabakteereita, jotka esiintyvät tavallisesti esimerkiksi meri- ja murtovesissä. Useimmat vibriot eivät

aiheuta ihmisille tauteja, mutta saattavat elintarvikkeiden välityksellä levinneenä aiheuttaa tavanomaisen ripulitaudin. *V. cholerae* – lajin kaksi seroryhmää, O1 ja O139 voivat aiheuttaa koleraepidemian. Kolerabakteerien erittämä CT-toksiini aiheuttaa koleran oireet, joita ovat muun muassa voimakas vesiripuli. Hoitamattomana kuolleisuus tautiin on ollut yli 50 %. Suomessa kolera on erittäin harvinainen. (Siitonen & Vaara 2010a)

Kampylobakteerit ovat gram-negatiivisia *Campylobacter*-sukuun kuuluvia sauvabakteereita, jotka kuuluvat merkittäviin ihmisille suolistotulehduksia ja ripulia aiheuttaviin bakteereihin. Jaakola et al. (2014 s. 16) mukaan kampylobakteeri on yleisin suolistotulehduksia aiheuttava bakteeri Suomessa. Niistä tärkeimpiä ovat *C. jejuni*, *C. coli*, *C. lari*, *C. upsaliensis* ja *C. fetus*. Teollisuusmaissa kampylobakteerit aiheuttavat tavallisesti ruoansulatuskanavan tulehdusta. Kampylobakteeri-infektioita on 2000-luvulla Suomessa raportoitu noin 3 000–4 000 tapausta vuosittain, ja todellisuudessa tautitapauksia on vielä enemmän.

Vaikka kampylobakteeritartunnat ovat usein yksittäistapauksia, myös epidemioita on tavattu. Suomessa saastuneen juomaveden välityksellä levinneitä laajoja kampylobakteeriepidemioita on ollut useita. Vuonna 2007 Suomessa Nokialla tapahtuneessa vesiepidemiassa merkittävimpiä infektion aiheuttajia olivat kampylobakteerit (Lumio 2013).

Listeria-suvun bakteereista vain *L. monocytogenes* on merkittävä ihmisille infektioita aiheuttava laji. Se kykenee lisääntymään laajalla lämpötilavälillä (0 °C – 45 °C) ja on yleinen ympäristön bakteeri, jota esiintyy myös elintarvikkeissa ja 1-5 %:lta väestön ulosteen normaalifloorasta. Listerioosi on tartuntatauti, jonka itämisaika on 7-70 vuorokautta, mutta usein taudin oireet alkavat parin päivän sisällä infektiosta. Tartunnan lähde on usein elintarvike, jossa on *L. monocytogenes* – bakteeria. (Lyytikäinen & Siitonen 2010)

Clostridium-suvun bakteerit eli klostridit kuuluvat ihmisen ja eläinten suoliston normaaliflooraan. Niitä esiintyy paljon maaperässä, jätevesissä ja vesistöjen sedimenteissä niiden kestävien itiöiden ansiosta. *Clostridium*-suvun yli 200 lajista vain muutama aiheuttaa infektioita ihmiselle. Klostridien aiheuttamissa taudeissa merkittäviä ovat neurotoksiinien, kuten botulinum- ja tetanusneurotoksiinin muodostaminen, ja jo pienet annokset voivat olla tappavia. *C. botulinum* aiheuttaa harvinaista, tappavaa botulismia, ja *C. tetani* aiheuttaa tetanusta eli jäykkäkouristusta, joka on Suomessa harvinaistunut rokotusohjelman ansiosta. *C. perfringens* on yleisimpiä ruokamyrkytyksen aiheuttajia, ja sen lähteenä on usein huonosti kypsennetty ruoka. Lisäksi se voi aiheuttaa kudostai kaasukuoliota. Samalla *C. perfringens* kuuluu suoliston normaaliflooraan. *C. difficile* on yleinen antibioottihoidon liittyvän ripulitaudin aiheuttaja, ja se kuuluu myös suoliston normaaliflooraan. (Rautio 2010)

Enterococcus-sukuun kuuluvat bakteerit eli enterokokit ovat kasvuvaatimuksiltaan joustavia bakteereita. Ne lisääntyvät myös suolaisessa ympäristössä (6,5 % NaCl), laajalla lämpötila-alueella (10–45 °C) sekä korkeissa pH-olosuhteissa (pH 9,6). Enterokokit kuuluvat ihmisten ja eläinten suolen normaalimikrobistoon, ja sukuun kuuluu yli 20 lajia. Taudinaiheuttajina enterokokit ovat tyypillisiä opportunisteja, jotka aiheuttavat

infektioita isännän immuniteetin heikentyessä. Tavallisimpia enterokokkien aiheuttamia infektioita ovat virtsatietulehdukset. (Rantakokko-Jalava & Anttila 2010, s. 126)

2.1.2 Alkueläimet

Alkueläimet ovat yksisoluisia aitotumallisia, heterotrofisia mikro-organismeja, joilla ei ole soluseiniä. Soluseinättömiä, ravinnonottoon kykeneviä muotoja kutsutaan trofotsoiiteiksi. Tarvittaessa alkueläimet kykenevät muodostamaan paksukuorisia kestromuotoja eli kystoja suojaamaan muuttuneilta ympäristöoloilta, kuten lämpötilan tai suolapitoisuuden muutoksilta tai kuivuudelta. Alkueläimet ovat yleisiä makeissa ja suolaisissa vesissä, mutta ne kykenevät kasvamaan myös maaperässä. Joidenkin alkueläinten pariutuneista sukusoluista muodostuvia uusia parasiitin alkuja sisältäviä rakenteita kutsutaan ookystiksi (Siikamäki 2010, s. 339).

Alkueläimen koko riippuu muun muassa sen fysiologisesta tilasta. Esimerkiksi *Giardia lamblia* kystien koko on noin 6-14 µm ja sen trofotsoiittien koko on noin 6-16 µm, ja *Cryptosporidium parvum* ookystien koko on noin 3-6 µm ja sen sporozoiittien (liikkumiskykyinen, infektoiva muoto) 1-8 µm (Tchobanoglous et al. 2014, s. 154; Leitch & He 2011).

Suurin osa alkueläimistä on aerobisia, mutta niihin kuuluu myös anaerobisia ja happea sietäviä lajeja. Alkueläimet ovat liikuntakykyisiä, ja ne liikkuvat esimerkiksi valejalkojen eli pseudopodien, värekarvojen tai flagellien avulla. Liikkumisominaisuksiensa perusteella alkueläimet on jaoteltu seuraaviin ryhmiin: valejalkojen avulla liikkuvat juurijalkaiset (*Sarcodina*, amebat), flagellojen avulla liikkuvat siimaeläimet (*Flagellata*), ripsien avulla liikkuvat ripsieläimet (*Ciliata*) ja itiöeläimet (*Sporozoa*). (Siikamäki, 2010, s. 339)

Siikamäki et al. (2010) mukaan alkueläintaudit ovat epäyhtenäinen tautiryhmä. Infektio voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun alkueläinten kystia tai ookystia sisältävää vettä niellään (Leitch & He 2011). Patogeenisista alkueläimistä merkittävimpiä ovat *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* ja *Entamoeba histolytica*, sillä ne ovat voivat olla erittäin vahingollisia henkilöille, joiden vastustuskyky on heikko (Tchobanoglous et al. 2014, s. 154). *Entamoeba histolytica* aiheuttaa maailmanlaajuisesti esiintyvää amebiaasia (Siikamäki et al. 2002). *Giardia lamblia* puolestaan aiheuttaa giardiaasia, jota esiintyy noin 200 miljoonalla ihmisellä yleisimmin trooppisilla ja subtrooppisilla alueilla. Giardiaasiepidemiat ovat saaneet alkunsa muun muassa pinta-veden käyttämisestä juomavetenä. Giardiaasi tarttuu ruoansulatuskanavaan joutuneiden kystien välityksellä, ja aiheuttaa muun muassa ripulia, väsymystä ja laihtumista. (Siikamäki et al. 2002; Sincero & Sincero 2003, s. 165) Malaria puolestaan kuuluu maailman merkittävimpiin infektioauteihin mitattuna sekä sairastuvuudella että kuolleisuudella. Se tarttuu ihmisestä toiseen *Anopheles*-suvun hyttysen piston välittämänä ja sen aiheuttaa itiöeläimiin kuuluva alkueläinlajin, *Plasmodium* eli horkkalajin. (Siikamäki et al. 2010, s. 363)

2.1.3 Virukset

Virukset ovat solunsisäisiä tartunnan välittäjiä, jotka kykenevät ohjaamaan isäntäsolun aineenvaihduntajärjestelmän kopioimaan viruksen omaa molekyyliarakennetta. Virukset sisältävät kopiointiin tarvittavan geneettisen informaation joko DNA:n tai RNA:n muodossa, minkä lisäksi ne tarvitsevat isäntäsolun lisääntyäkseen.

Virukset koostuvat nukleiinihappoytimestä, jota ympäröi proteiini- ja glykoproteiiniukuori, jota kutsutaan kapsidiksi. Virus voi esiintyä myös solunulkoisessa olomuodossa, jolloin se on aineenvaihdunnallisesti eloton. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 140, 142)

Tavallisesti DNA-virusten perintöaines eli genomi kulkeutuu isäntäsolun tumaan ja RNA-virusten genomi jää sytoplasmaan. Viruksilla ei ole omaa proteiinisynteesikoneistoa, vaan kaikki viruksen tarvitsemat proteiinit tuotetaan ribosomien avulla sytoplasmassa kuten solun omatkin proteiinit. (Hyypiä et al. 2010)

Suolistoperäiset virukset kykenevät lisääntymään ainoastaan ihmisisännässä ja lisääntymisen jälkeen ne päätyvät infektoituneiden ihmisten ulosteeseen. Infektoivia ja tauteja aiheuttavia ihmisten erittämiä suolistoperäisiä viruksia on yli 100 erilaista tyyppiä. Niistä merkittävimpiä ovat enterovirukset (polio-, echo- ja coxsackie-virus) sekä kalikivirukset, norovirukset, rotavirukset, reovirukset, adenovirukset sekä hepatiitti A –virus. Ripulia aiheuttavista viruksista ainoastaan noro- ja rotavirusten on todettu leviävän veden välityksellä merkittävässä määrin. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 59 ja 156). Enterovirukset ovat saaneet nimensä siitä, että ne lisääntyvät pääasiallisesti suolistossa (kreikan enteron = suoli), ja infektoitunut ihminen erittää viruksia usein viikkokausia tartunnan jälkeen (Ooi et al. 2010).

Useat virukset voivat aiheuttaa infektion suoliston kautta ja erityy ulosteen mukana uusiin isäntiin ravinnon tai hengityksen kautta. Yksi gramma terveinkin ihmisen ulostetta voi sisältää jopa 10^9 infektoivaa viruspartikkelia, vaikka henkilö ei olisi havainnut tautia. Jätevesissä on raportoitu olevan 10^5 infektoivaa viruspartikkelia litrassa raakaa jätevettä, ja erittyneitä viruksia on helppo erottaa maaperästä ja luonnonvesistä, jotka ovat altistuneet ulostesaastumiselle. (WHO 1979, Feachem et al. 1983, s. 9 mukaan).

Enteroviruksista poliovirus saattaa johtaa lievään influenssamaiseen virusaivokalvontulehdukseen tai poliohalvaukseen, joka voi johtaa pysyvään vammaan tai kuolemaan. Echo- ja coxsackie-virusinfektiot voivat aiheuttaa monia erilaisia sairauksia ja oireita, kuten kuumetta, aivokalvontulehdusta, hengitystiesairauksia, halvauksia, sydänlihastulehduksia ja muita oireita. (Feachem et al. 1983, s. 9)

Erytisesti rotavirukset ovat merkittävä ripulia aiheuttavia viruksia. Hepatiitti A –virus puolestaan aiheuttaa maksatulehdusta (Feachem et al. 1983, s. 9). Adenoviruksista osa aiheuttaa hengitystieinfektioita, osa suolisto-, silmä- tai muita infektioita (Jaakola et al. 2014).

Bakteriofagit tai fagit ovat jätevesissä yleisinä esiintyviä viruksia, jotka infektoivat bakteereja. Tunnetuimpia fageja ovat kolifagit, jotka ovat koliformisia bakteereita

vastaan hyökkäviä viruksia. Ne voidaan luokitella joko F-spesifisiksi tai somaattisiksi niiden infektiotavan perusteella. F-spesifiset virukset hyökkäävät *E. coli* -bakteerien värekarvojen kautta ja somaattiset virukset bakteerin soluseinän kautta. Somaattiset kolifagit kykenevät infektoimaan kaikkia bakteereita, mutta F-spesifiset ainoastaan bakteereita, joilla on värekarvoja. (EPA 821-R-01-029)

2.1.4 Suolistomadot

Loisivia matoja kutsutaan suolistomadoiksi. Ne kuuluvat selkärangattomien eläinten alajaksoon ja ovat yleensä pitkulaisia, litteitä tai pyöreitä. Suolistomatojen kolme kehitystasetta ovat muna, toukka ja aikuinen. Suurin osa suolistomadoista voidaan jakaa kolmeen pääjaksoon: sukkulamadot, laakamadot ja nivelmadot. Niistä ihmisille eniten tauteja aiheuttavat suolistomadot kuuluvat sukkulamatoihin ja laakamatoihin, kun taas nivelmadot ovat yleensä ulkoloisia. Suuri osa sukkulamatojen ryhmään kuuluvista madoista on ihmiselle vaarattomia.

Suolistomadot on merkittävä tauteja aiheuttava ryhmä maailmanlaajuisesti (Tchobanoglous et al. 2014, s. 155), ja erityisesti kehittyvissä maissa, joissa huono sanitaatio on yleistä, suolistomadot ovat terveysongelma (Jimenez 2007).

Patogeenisten suolistomatojen infektion aiheuttava kehitysmuoto voi olla muna, toukka tai aikuinen lajista riippuen, mutta pääasiassa munat toimivat taudinaiheuttajina. Suolistomatojen munat, jotka ovat kooltaan noin 10–100 µm tai suurempia, poistuvat jätevedenpuhdistusprosesseissa suhteellisen helposti. Jotkin suolistomatojen munat ovat melko vastustuskykyisiä ja selviävät tavallisista jäteveden tai lietteen desinfiointiprosesseista, kuten kloorauksesta. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 156)

Ihmisiä infektioiva suolistomatojen kehitysvaihe vaihtelee, sillä joillakin lajeilla infektion aiheuttaa aikuinen tai toukka, kun taas toisilla lajeilla pääasiallisena infektion aiheuttajana ovat suolistomaton munat (Tchobanoglous et al. 2014, s. 156). Suolistomatosairaudet leviävät saastuneiden sadon tai lihan, ulosteen tai jätevesisaastumisen kautta (Jimenez 2007).

Suolistomatojen koko vaihtelee 1 mm kokoisesta madosta usean metrin mittaisiin matoihin. Vaikka suolistomadot eivät kuulu mikrobeihin, niiden munat ovat mikroskooppisia (Jimenez 2007). Suolistomatojen munien koko on 10 - >100 µm, ja niistä suurin osa poistuu tavallisissa jätevedenkäsittelyprosesseissa kuten laskeutuksessa. Kuitenkin monet suolistomatojen munat kestävät esimerkiksi desinfiointikäsittelyn (Tchobanoglous et al. 2014, s. 156). Suolistomadot eivät elä jätevedessä tai lietteessä, sillä ne tarvitsevat elääkseen isännän. Sen vuoksi suolistomatojen munien poistaminen esimerkiksi jätevedestä olisi tärkeämpää kuin suolistomatojen poistaminen. (Jimenez 2007). Suolistomatojen munat voivat elää vedessä, maaperässä ja esimerkiksi viljassa pitkään. Suolinkaisen munat voivat elää maaperässä jopa useita vuosia. (Feachem et al. 1983, s. 61).

Madot eivät muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta tartu suoraan ihmisestä toiseen, vaan niillä on välivaihe joko maaperässä tai väli-isännissä. Suolistomadot eivät *Strongyloides*-matoa lukuun ottamatta lisäänty ihmisen elimistössä. (Siikamäki 2002)

Afrikassa, Latinalaisessa Amerikassa sekä Kaukoidässä yleisin suolistomatojen aiheuttama tauti on suolinkaistauti. Suurin osa infektion saaneista on alle 15-vuotiaita lapsia. (Jimenez 2007) Suolinkaistautia esiintyy myös Suomessa (Siikamäki et al. 2002).

Trikuriaasi on noin 30 mm pituisen *Trichuris trichiuran* aiheuttama tauti, jonka oireita ovat vatsavaivat, anemia ja laihtuminen. Enterobiaasi eli kihomatoinfektio on *Enterobius vermicularis* – madon aiheuttama tauti, jonka levinneisyys maailmalla on laaja, ja tartunta leviää helposti ihmisestä toiseen. Askariaasia aiheuttaa *Ascaris lumbricoides*, ja tartunnan arvioidaan saaneen ainakin miljardi ihmistä. Trooppisten ja subtrooppisten maiden yleisin matotauti on ankylostomiaasi, jota aiheuttavat *Ancylostoma duodenale* ja *Necator americanus*. Strongyloidiaasia aiheuttaa parin millimetrin pituinen *Strongyloides stercoralis*, jota esiintyy tropiikin lisäksi Etelä-Euroopassa, ja oireellisenä se aiheuttaa muun muassa vatsakipua, ripulia, oksentelua sekä imeytymishäiriöitä. Skistosomiaasia sairastaa maailmassa arviolta 200 miljoonaa ihmistä, ja sitä aiheuttavat *Schistosoma mansoni* sekä *S. japonicum*. Lapamato eli *Diphyllobothrium latum* esiintyy runsaasti maissa, joissa syödään raakaa kalaa sekä Suomessa. Lapamatoinfektio voi aiheuttaa anemian, sillä se käyttää suoliston B₁₂-vitamiinia.

Matoinfektioiden oireita kehittyy yleensä vain, kun matoja on runsaasti, ja usein matoinfektiot ovat oireettomia tai lieväoireisia kroonisia infektoita. (Siikamäki et al. 2002)

2.2 Indikaattoriorganismit veden hygieenisen laadun arvioinnissa

Taudinaiheuttajamikrobien määrittäminen jätevedestä on monesti vaikeaa ja kallista, joten jäteveden mikrobiologista laatua tutkitaan usein määrittämällä siitä niin sanottuja indikaattoriorganismeja, jotka ovat yleisempiä ja helpommin määritettävissä kuin tarkasteltavat taudinaiheuttajamikrobit. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 157–159)

Ideaalisen indikaattoriorganismien ominaisuuksiin kuuluu sen esiintyminen ulosteperäisesti saastuneessa vedessä. Lisäksi jätevedessä olevien indikaattoriorganismien määrän olisi oltava yhtä suuri tai suurempi kuin tarkasteltavan taudinaiheuttajaorganismien. Indikaattoriorganismien tulee selvitä ympäristössään vähintään yhtä hyvin kuin taudinaiheuttaja. Ideaalisen indikaattoriorganismien määrittäminen on nopeampaa, helpompaa ja halvempaa kuin tarkasteltavan taudinaiheuttajan. Lisäksi indikaattoriorganismien olisi oltava osa tasalämpöisen ihmisen tai eläimen normaalia suolistoflooraa. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 157–158)

Ulosteperäisen saastumisen indikaattoreina on yleisesti käytetty kokonaiskoliformeja, fekaalisia koliformisia bakteereita, *Klebsiella*-suvun bakteereja, *E. coli*- ja *Bacteroides*-bakteereja, fekaalisia streptokokkeja, enterokokkeja, *Clostridium perfringens* – bakteereita sekä *Pseudomonas aeruginosa* – ja *Aeromonas hydrophila* -bakteereita. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 158) Lisäksi bakteriofageja, kuten kolifageja, käytetään

usein virusindikaattoreina, kun halutaan esimerkiksi tutkia eri käsittelymenetelmien vaikutuksia viruksiin (Tyrrel et al. 1995; Koivunen et al. 2005).

2.3 Patogeenien selviytyminen ja lisääntyminen jäte- ja luonnonvesissä

Patogeenien pitoisuus tavallisesti vähenee tai niiden kyky infektoida katoaa niiden erittymisen jälkeen. Virusten ja alkueläinten määrä vähenee runsaasti erittymisen jälkeen, mutta esimerkiksi bakteerit voivat lisääntyä, jos ne löytävät ravinteikkaan ympäristön, jossa on vähän kilpailua. Esimerkiksi *E. coli* voi lisääntyä klooratussa jätevedessä, josta muut bakteerit on poistettu, mutta bakteeripatogeenien lisääntyminen on harvinaista. Laakamatoja lukuun ottamatta suolistomadot alkavat vähentyä heti erittymisen jälkeen. Jäteveden käsittelyprosesseissa patogeenit poistuvat ajan kuluessa myös siksi, että jätevesi ei ole niille suotuisa ympäristö, eikä käsittelyprosessilla aina ole vähemmän suurta vaikutusta. Kuitenkin esimerkiksi aktiivilieteprosessi edistää monien patogeenien kuolemaa (taulukko 2). (Feachem et al. 1983, s. 59–60)

Taulukko 2. Bakteripitoisuudet jäteveden käsittelyprosessin eri vaiheissa. (muokattu lähteestä Salkinoja-Salonen, 2002, s. 439)

	Bakteerimäärä				Elävien bakteerien osuus (%)
	Näytteissä: lkm/ml, biomassassa: lkm/g				
	Kokonaismäärä	Elävät	Kokonaismäärä	Elävät	
Selkeytetty jätevesi	$6,8 * 10^8$	$1,4 * 10^7$	$3,2 * 10^{12}$	$6,6 * 10^{10}$	2,0
Aktiiviliete	$6,6 * 10^9$	$5,6 * 10^7$	$1,4 * 10^{12}$	$1,2 * 10^{10}$	0,85
Biologisesti käsitelty jätevesi	$5,2 * 10^7$	$5,7 * 10^5$	$4,3 * 10^{12}$	$4,7 * 10^{10}$	1,1
Tertiäärisesti käsitelty jätevesi	$3,4 * 10^7$	$4,1 * 10^4$	$3,4 * 10^{12}$	$4,1 * 10^{10}$	0,12

Myös jätevesien laimentuminen vaikuttaa mikrobimääriin. Darakas et al. (2009) mukaan fekaalisten indikaattoribakteerien pitoisuudet pienenevät heti laimentumisen jälkeen merivedessä nopeammin kuin jätevedenkäsittelyn biologisessa prosessissa. Tärkeimpiä patogeenien olemassaoloa rajoittavia ympäristötekijöitä jätevedessä ovat lämpötila ja aika. (Feachem et al. 1983, s. 59).

Eri mikrobilajeilla on ominainen kasvulämpötila-alue, ja optimilämpötilalla tarkoitetaan mikrobin nopeimman kasvun lämpötilaa. Suomen viileissä olosuhteissa parhaiten kykenevät kasvamaan bakteerit, joiden optimilämpötila on 4 °C – 20 °C. Suolistomikrobien, kuten kampylobakteerien on todettu säilyvän paremmin viileässä kuin lämpimässä vedessä. (Thomas et al. 1999; Hokajärvi 2008)

Suotuisissa olosuhteissa patogeenit lisääntyvät ympäristössään, mutta lisääntyminen vedessä on harvinaista ja rajoitettua verrattuna esimerkiksi lisääntymiseen ruoas-

sa. Virukset ja alkueläimet tarvitsevat isäntäeliön lisääntyäkseen. Patogeenin elinkelpoisuus eli – kykyisyys kertoo, kuinka kauan patogeeni säilyy hengissä sen jälkeen, kun se on erittynyt (taulukko 3). Patogeenin, jonka elinkyky ihmisen ruumiin ulkopuolella on heikko, on löydettävä nopeasti uusi isäntä, eikä se välttämättä selviä pitkistä jätevedenpuhdistusprosessista. (Feachem et al. 1983, s. 25) Bakteerit ja virukset selviävät todennäköisesti pidempään pohjavedessä kuin pintavedessä, sillä pohjavesi on viileämpää, se ei altistu auringon UV-säteilylle ja siellä on vähemmän mikrobiologista ja biologista aktiivisuutta (Feachem et al. 1983, s. 112).

Taulukko 3. Erittyneiden patogeenien selviytymisaikoja makeassa vedessä ja jätevedessä (20–30 °C) (Feachem et al. 1983, s. 60).

Patogeeni	Selviytymisaika (päivää)
Virukset^a	
Enterovirukset ^b	< 120, tavallisesti < 50
Bakteerit	
Fekaaliset koliformit ^a	< 60, tavallisesti < 30
<i>Salmonella</i> spp. ^a	< 60, tavallisesti < 30
<i>Shigella</i> spp. ^a	< 30, tavallisesti < 10
<i>Vibrio cholerae</i> ^c	< 30, tavallisesti < 10
Alkueläimet	
<i>Entamoeba histolytica</i> –kystat	< 30, tavallisesti < 15
Suolistomadot	
<i>Ascaris lumbricoides</i> –munat	Useita kuukausia

^a. Merivedessä virusten selviytyminen on hieman vähäisempää ja bakteerien selviytyminen on paljon vähäisempää kuin makeassa vedessä.

^b. Käsittää polio-, echo- ja coxsackievirukset.

^c. *V. cholerae* -bakteerin selviytymisestä vesiympäristössä on vaihtelevia tutkimustuloksia.

Wéry et al. (2008) tutkivat patogeenisten bakteerien, *Salmonella* spp.:n ja *C. jejuni* sekä kahden indikaattoribakteerin, *E. coli* ja *C. perfringens*in selviytymistä yhdyskuntajätevesien käsittelystä ja lietteen kompostoinnista. Tutkimuksessa patogeeniset bakteerit selviytyivät paremmin puhdistusprosessista kuin indikaattoribakteerit. Lisäksi patogeeniset bakteerit käyttäytyivät eri tavalla toisiinsa verrattuna biologisessa käsittelyssä, mutta fysikaalisessa käsittelyssä selviytymistaso oli yhtenevämpää. *C. jejuni* oli tutkituista bakteereista kestävin.

Hänninen et al. (2005) tutki muun muassa *Cryptosporidium*in ja *Giardia*in kystia ja ookystia Suomessa Vantaanjoesta jätevedenpuhdistamoiden purkupaikkojen alajuoksulta sekä neljältä jätevedenpuhdistamolta. Kummankin alkueläimen kystia ja ookystia havaittiin esiintyvän pieninä määrinä säännöllisesti joen näytteenottopisteissä, ja niiden todennäköisenä alkuperänä pidettiin joen varrella olevia jätevedenpuhdistamoita.

Organismien kasvua säätelevä tekijä on ravinnon saatavuus. Kaikki ihmisen patogeenit ovat heterotrofeja eli ne käyttävät orgaanisia yhdisteitä hiilen- ja energianläh-

teenään. Kuitenkin vain osa liuenneesta orgaanisesta hiilestä on bakteereille valmiiksi käytettävässä muodossa (Vital et al. 2007 ja 2008). Vital et al. (2010) tutkimuksessa selvitettiin patogeenisten bakteerien (*E. coli O157*, *Vibrio cholerae* ja *Pseudomonas aeruginosa*) kasvupotentiaalia ja siihen vaikuttavia tekijöitä erilaisista vesinäytteistä. Tarkasteltujen patogeenien kasvu ei korreloinut liuenneen orgaanisen hiilen (DOC, *dissolved organic carbon*) määrän kanssa ja kasvu korreloi vain heikosti mikrobeille käytökelpoisen, ns. assimiloituvan orgaanisen hiilen (AOC, *assimilable organic carbon*) pitoisuuden kanssa. Lisäksi pääteltiin, että patogeenien kasvun suuruus on riippuvaista ravintona käytettävän orgaanisen hiiliyhdisteen pitoisuuden lisäksi hiiliyhdisteen rakenteesta.

Erilaisten hapetusprosessien vaikutuksessa vesissä muodostuu AOC:ta ja biologisesti hajoavaa DOCia (BDOC). Esimerkiksi otsonointi hapettaa vesinäytteiden hiiliyhdisteitä ja lisää AOC:n määrää, jolloin patogeenien kasvupotentiaalia vedessä lisääntyy. (Vital et al. 2010)

Salkinoja-Salonen (2002, s. 199) mukaan mikrobien kasvuun vesiympäristössä vaikuttaa lisäksi pH, sillä useimpien mikrobien kasvu loppuu pH laskiessa alle 3,5. Yhtään happamissa olosuhteissa lisääntyvää taudinaiheuttajaa ei tunneta. Useimmat suolisto-peräiset taudinaiheuttajat kasvavat pH-alueella 6-8 (ESR, 2001, Hokajärven 2008 mukaan). Luonnonvesissä mikrobien kasvuun vaikuttaa suoraan ja epäsuorasti UV-säteily. Epäsuorana vaikutuksena on UV-säteilyn vaikutus humushappoihin, jolloin voi muodostua mikrobeja hapettavia ja inaktiivisia yhdisteitä (Kohn & Nelson 2007). mukaan UV-säteily lyhentää muun muassa *Cryptosporidiumin*, *Giardian*, *Salmonellan* ja polioviruksen selviytymisaikaa merivedessä (Johnson et al. 1997, Hokajärven 2008 mukaan).

2.4 Uimaveden laatuvaatimukset ja – suositukset

Terveysturvallisuuslaki (763/1994) ja – asetus (1280/1994) koskevat veden laatua ja valvontaa yleisillä uimarannoilla (Hokajärvi et al. 2008). Suomessa Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö (STM) on antanut asetuksen (STMa 177/2008) yleisten uimarantojen uimaveden laatuvaatimuksista ja valvonnasta 28.3.2008. Asetusta sovelletaan uimaveden laadun seurantaan, valvontaan, luokitukseen ja hallintaan sekä uimaveden laadusta tiedottamiseen yleisillä uimarannoilla. STM on antanut pienille yleisille uimarannoille ja niiden uimaveden laatuvaatimuksille sekä valvonnalle asetuksen 354/2008.

STM asetuksen 177/2008 mukaan uimavedestä ei saa aiheutua terveysturvallisuutta uimareille, ja uimaveden laadun tulee täyttää vähintään tyydyttävän uimavesiluokan vaatimukset (taulukko 4). Lyhenteellä pmy/mpn/100 ml tarkoitetaan elinkykyisten pesäkkeitä muodostavien yksikköjen (pmy) todennäköisintä lukumäärää (*most probable number*) 100 ml:ssa näytettä, ja siihen ei lasketa kuuluvaksi kuolleita mikrobisoluja. MPN-menetelmässä käytetään laimennettuja viljelmiä ja todennäköisyyslaskentaa elinkykyisten solujen määrän laskemiseen tilavuusnäytettä kohden. (SFS-EN ISO 7899-1)

Taulukko 4. STM:n asetuksen 177/2008 laatuvaatimukset ja -suositukset uimavedelle. (STMa 177/2008).

Sisämaan uimavedet					
Muuttuja	Yksikkö	Erinomainen laatu	Hyvä laatu	Tyydyttävä laatu	
Suolistoperäiset enterokokit ¹⁾	pmy/mpn/100 ml	200*	400*	330**	
<i>Escherichia coli</i> ²⁾	pmy/mpn/100 ml	500*	1000*	900**	
Rannikon uimavedet					
Muuttuja	Yksikkö	Erinomainen laatu	Hyvä laatu	Tyydyttävä laatu	
Suolistoperäiset enterokokit ¹⁾	pmy/mpn/100 ml	100*	200*	185**	
<i>Escherichia coli</i> ²⁾	pmy/mpn/100 ml	250*	500*	500**	

*perustuu 95. prosenttipisteeseen (liite 2)

** perustuu 90. prosenttipisteeseen (liite 2)

¹⁾ Määrittämenetelmänä SFS-EN ISO 7899-1 tai SFS-EN ISO 7899-2

²⁾ Määrittämenetelmänä SFS-EN ISO 9308-3, SFS-EN ISO 9308-1 tai Colilert® Quantiray –menetelmä

Laatuvaatimusten ja – suositusten lisäksi yksittäisille valvontatutkimustuloksille ja syanobakteerihavainnoille on määritetty toimenpiderajat (taulukko 5).

Taulukko 5. Yksittäisen valvontatutkimustuloksen tai syanobakteerihavainnon toimenpiderajat.

Muuttuja	Yksikkö	Toimenpideraja	
		Sisämaan uimavedet	Rannikon uimavedet
Suolistoperäiset enterokokit	pmy/mpn/100 ml	400	200
<i>Escherichia coli</i>	pmy/mpn/100 ml	1 000	500
Syanobakteerit (sinilevät)		Havaittu uimavedessä tai uimarannalla	

Uimaveden on oltava myös muuten käyttötarkoitukseensa soveltuvaa, millä tarkoitetaan sitä, että uimavedessä ei ole aistinvaraisesti havaittavaa haitallista esiintymää makroleväää tai kasviplanktonia tai aistinvaraisesti havaittavaa esiintymää jätteistä, kuten öljymäisiä tai tervamaisia aiheita tai erilaisia kelluvia materiaaleja, kuten muovia.

STM asetuksen 177/2008 mukaan uimarannalle on laadittava uimavesiprofiili, jolla tarkoitetaan kuvausta uimaveden ominaisuuksista sekä laatuun haitallisesti vaikut-

tavista tekijöistä ja niiden merkityksestä. Uimavesiprofiili on uimarannan riskinarviointi, jonka laatimiseen osallistuvat uimarannan omistaja tai haltija sekä kunnan terveydensuojeluviranomainen yhteistyössä. Profiili tehdään kaikille asetuksen 177/2008 soveltamisalaan kuuluville yleisille uimarannoille, ja sen sisältöön kuuluvat muun muassa uimaveden maantieteelliset, fysikaaliset ja hydrologiset ominaisuudet, tiedot uimaveden laatuun ja terveyteen vaikuttavista tekijöistä, tiedot mahdollisesta lyhytkestoisesta saastumisesta, levien esiintyminen ja uimaveden laadun valvonta. Lisäksi uimavesiprofiilissa kerrotaan tieto vallitsevasta tuulen suunnasta sekä sateiden ja tuulen suunnan mahdollinen vaikutus uimaveden laatuun sekä tietoa uimarannan palveluista ja varustelutasosta.

Euroopan Unioni (EU) on antanut direktiivin 2006/7/EY uimaveden laadun seurannasta ja luokituksesta, laadun hallinnasta ja uimaveden laatua koskevasta tiedottamisesta yleisölle. Laatuvaatimukset ovat samat kuin STM asetuksen 177/2008 laatuvaatimusten arvot. (Direktiivi 2006/7/EY)

Asetuksen 177/2008 mukaan uimakauteen kuuluu 15.6. ja 31.8. välinen ajanjakso, paitsi Lapin läänissä ja Kuusamon sekä Taivalkosken kunnissa, joissa uimakaudella tarkoitetaan 25.6. ja 15.8. välistä ajanjaksoa. (STMa 177/008)

2.5 Asetus lannoitevalmisteista (MMM 24/11)

Suomessa Maa- ja metsätalousministeriö on antanut asetuksen 24/11 lannoitevalmisteista, jossa on määritelty lannoitevalmisteissa sallitut taudinaiheuttajien ja indikaattorieliöiden enimmäismäärät (taulukko 6).

Taulukko 6. *Tautia aiheuttavien tai niitä indikoivien mikro-organismien sallitut enimmäismäärät lannoitevalmisteissa (MMM 1.9.2011/24).*

Taudinaiheuttaja	Enimmäismäärä
<i>Salmonella</i>	Ei todettavissa 25 grammassa näytettä.
<i>Escherichia coli</i>	1000 pmy/g ja alle 100 pmy/g ammattimaiseen kasvihuoneviljelyyn tarkoitetuissa kasvualustoissa, joissa syötävät kasvinosat ovat suoraan kosketuksissa kasvualustaan.
Juuripoltesieni (mm. <i>Fusarium</i> ; todettu viljelytestillä)	Ei todettavissa taimituotannossa käytetyissä kasvualustoissa.

3 JÄTEVEDEN DESINFIOINTIMENETELMIEN VERTAILU

Tässä luvussa esitellään desinfiointin teoriaa sekä lyhyesti eri jäteveden desinfiointimenetelmiä. Lisäksi UV-käsittelyä käsitellään laajemmin, koska sitä testataan työssä kokeellisesti.

Jäteveden desinfiointilla tarkoitetaan patogeenisten organismien poistamista tai inaktivoimista jätevedestä hyväksytylle tasolle. Steriloinnissa kaikki elävät organismit tuhoetaan. Desinfiointimenetelmät perustuvat eri mekanismeihin, joita ovat mikrobin soluseinän vahingoittaminen, solun läpäisykyvyn muuttaminen, solun soluliman ominaisuuksien muuttaminen, organismin DNA:n tai RNA:n muuttaminen tai solunsisäisen entsyymiaktiivisuuden estäminen eli inhiboiminen. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1296)

Jätevedestä poistuu mikrobeja myös normaalissa jätevedenpuhdistusprosessissa (Koivunen 2007), ja vähemmän riippuu puhdistamon yksikköoperaatioista sekä puhdistamon prosessien toiminnasta. (Pajukallio 1987, Savolaisen 1991 mukaan)

Jätevedet desinfioidaan perinteisesti joko kemiallisilla aineilla tai ei-ionisoivalla säteilyllä (taulukko 7). Kemiallisiin menetelmiin kuuluvat kloori ja sen yhdisteet sekä otsoni ja muut kemialliset yhdisteet, kuten orgaaniset peroksidit. Puhdistetun jäteveden ei-ionisoivan säteilyn käsittelymenetelmistä yleisin on UV-säteilytys, joka kuuluu fysikaalisiin menetelmiin. Myös kalvosuodatus luokitellaan kuuluvaksi fysikaalisiin menetelmiin (Madaeni 1999). Pastörinti on laajasti käytetty lietteen desinfiointimenetelmä Euroopassa. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1295)

Taulukko 7. Jäteveden eri desinfiointimenetelmien toimintaperiaatteet sekä menetelmien etuja ja haittoja.

Menetelmä	Toimintaperiaate	Edut	Haitat
Kloorikemikaalit	Hapettavat mikrobin soluseiniä, inhiboivat entryymiaktiivisuutta, vahingoittavat DNA:ta ja RNA:ta	Tehokkuus	Haitalliset sivutuotteet, syövyttäviä, myrkyllisiä ihmisille ja vesieläimille, jäänökset jäteveteen
Peretikkahappo	Hapetusreaktiot	Turvallisuus, ei muodostu merkittäviä määriä haitallisia sivutuotteita	
Permuurahaishappo	Hapetusreaktiot	Turvallisuus, ei muodostu merkittäviä määriä haitallisia sivutuotteita	
Vetyperoksidi	Hapetusreaktiot	Hajoamistuotteet haitattomia	Tehottomuus
Otsonointi	Mikrobien soluseinien hajottaminen hapettamalla, otsonin hajoamisessa muodostuvien sivutuoteradikaalien reaktiot, nukleiinihappojen vauriot, hiilivetyäsidosten katkaiseminen	Tehokkuus	Annoksen määrittäminen hankalaa
Kalvosuodatus	Mikrobit suodatetaan jätevedestä pois	Huokoskoosta riippuen pidättää myös viruksia (ultra-suodatus)	Suodattimien tukkeutuminen, ei voida taata tehokasta hygienisointia
UV-käsittely	Mikrobin DNA:n ja RNA:n vaurioituminen, jolloin mikrobi inaktivoituu, sillä se ei kykene lisääntymään	Tehokkuus, turvallisuus, ei haitallisia sivutuotteita, ei yliannostuksen riskiä	Jäteveden laadusta ja UV-läpäisevyydestä riippuvainen
AOP	Hapetusreaktiot ja hapettavien hydroksyyli-radikaalien muodostuminen	Tehokkuus, hajottaa myös esimerkiksi lääkeaineita	Täytyy yhdistää monia menetelmiä

Mikrobien vähenemä ilmoitetaan yleensä logaritmisena vähenemänä. Esimerkiksi 1-logaritminen vähenemä tarkoittaa mikrobien 90-prosenttista vähenemää ja 2-logaritminen vähenemä 99-prosenttista vähenemää. (EPA 815-R-06-007).

Tehokas desinfiointitulokset tulee saavuttaa siten, että samalla ei muodostu toksisia, mutageenisia tai karsinogeenisiä desinfiointin sivutuotteita (*disinfection by-products*, DBP) tai pysyviä desinfiointiainejäämiä, joilla voi olla haitallinen vaikutus ympäristöön

tai ihmisten terveyteen (Koivunen 2007). Sivutuotteiden muodostumiseen vaikuttavat käytettävän desinfiointiaineen tai –menetelmän lisäksi annos ja kontaktiaika sekä jäteveden orgaanisen aineen tyyppi ja määrä (Monarca et al. 2000) sekä käsiteltävän jäteveden pH, lämpötila ja esimerkiksi bromiyhdisteet (EPA 815-B-06-002).

Desinfiointin tehokkuuteen yleisesti vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa kontaktiaika, lämpötila, mahdollisesti käytettävän kemiallisen aineen pitoisuus ja luonne, fysikaalisen toimenpiteen intensiivisyys ja luonne, mikro-organismien määrä sekä niiden tyypit. Desinfiointin tehokkuuteen vaikuttavat myös organismien kanta, sillä jotkin saman lajin kannat, kuten *E. coli* -kannat, voivat olla esimerkiksi UV-sietokyvyltään erilaisia. Lisäksi organismien fysiologisella tilalla eli kasvuvaiheella on merkitystä ympäristön stressitekijöiden sietokykyyn. (Hijnen 2009)

3.1 Inaktivaation kinetiikka

Desinfiointin kinetiikalle ja mikrobien inaktivaationopeuksille on kehitetty erilaisia malleja. Näitä ovat esimerkiksi Chick'n, Watsonin ja Chick-Watsonin lait. Chick'n lailla kuvataan organismien lukumäärä ajan funktiona (yhtälö 1).

$$\frac{dN_t}{dt} = -KN_t \quad (1)$$

jossa

dN_t/dt = organismien määrän muutosnopeus ajan suhteen

K = inaktivaation nopeusvakio (T^{-1})

N_t = organismien lukumäärä ajanhetkellä t

t = aika

(Chick 1908)

Chick'n lain mukaan organismien inaktivaatio noudattaa ensimmäisen kertaluvun reaktiokinetiikkaa. Yhtälöä 1 integroimalla saadaan

$$N = N_0 e^{-kt} \quad (2)$$

jossa

N = elävien mikro-organismien määrä ajanhetkellä t

N_0 = mikro-organismien alkuperäinen määrä

k = $k_1 C$, ensimmäisen kertaluvun reaktionopeusvakio, joka on riippuvainen desinfiointiannoksesta, mikro-organismien tyypistä ja veden ominaisuuksista

t = jäteveden ja desinfiointikemikaalin kontaktiaika

Herbert Watsonin mukaan (Watson, 1908) kemiallisessa desinfioinnissa inaktivaation nopeusvakio on riippuvainen desinfiointikemikaalin pitoisuudesta (yhtälö 3)

$$K = \Lambda C^n \quad (3)$$

jossa

- K = inaktivaation nopeusvakio, T^{-1} , e-kantainen
 Λ = spesifisen letaliteettikerroin, jonka yksikkö riippuu n :stä
 C = desinfiointikemikaalin pitoisuus [mg/l]
 n = kokeellinen laimennuskerroin (dimensioton)

Laimennuskerrointa n on selitetty seuraavasti:

$n = 1$, sekä pitoisuus että aika ovat yhtä tärkeitä

$n > 1$, pitoisuus on tärkeämpi kuin aika

$n < 1$, aika on tärkeämpi kuin pitoisuus

Chick'n ja Watsonin esittämät yhtälöt yhdistämällä saadaan Chick-Watsonin laki (yhtälö 4):

$$\frac{dN_t}{dt} = -\Lambda C^n N_t \quad (4)$$

josta integroimalla saadaan

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\Lambda_{e\text{-kantainen}} C^n t \text{ tai } \log \frac{N_t}{N_0} = -\Lambda_{10\text{-kantainen}} C^n t \quad (5)$$

Chick-Watsonin mallin on todettu pätevän desinfiointikemikaalien inaktivaatiokinetiikan lisäksi UV-desinfiointin inaktivaatiokinetiikkaan (Hassen et al. 2000).

Desinfiointikemikaalien vertailussa voidaan käyttää Chick-Watsonin lain pohjalta muodostettuja ns. CT-arvoja. CT-arvossa desinfiointikemikaalin pitoisuus on kerrottuna kontaktiajalla, ja yksikkönä on esimerkiksi (mg/l)*min. Ei-ionisoivassa säteilyssä kuten UV-säteilyssä inaktivaation kinetiikkaan vaikuttaa kontaktiaika ja UV-säteilyn intensiteetti (UV-annos). Eri desinfiointimenetelmien tehokkuutta voidaan verrata myös niiden ns. suhteellisella letaliteettikertoimella, joiden perusteella otsoni ja UV-käsittely kuuluvat tehokkaimpiin desinfiointimenetelmiin (taulukko 8).

Taulukko 8. Spesifisiä letaliteettikertoimia eri desinfiointimenetelmille eri mikrobien inaktivaatiolle suodatetussa sekundäarisessä jätevedessä (pH noin 7,5; lämpötila noin 20 °C) a, (muokattu lähteestä Tchobanoglous et al. 2014, s. 1321).

Desinfiointiaine tai -menetelmä	Yksikkö	Letaliteettikerroin ^b , $\Lambda_{(10\text{-kantainen})}$			
		Kokonaiskoliformit ^c	Virukset	Alkueläimet <i>Cryptosporidium</i>	Alkueläimet <i>Giardia lamblia</i> -kystat
Kloori (vapaa)	l/(mg*min)	2	1,2	0,00044	0,04
Kloramiini	l/(mg*min)	0,016	0,0052	0,00022	0,0024
Klooridioksidi	l/(mg*min)	2	0,38	0,008	0,2
Otsoni	l/(mg*min)	44	7,27	0,24	4,21
UV-säteilytys	cm ² /mJ	5,7	0,0215	0,31	0,33

^aPerustuu yhtälöön 2.

^bSpesifiset letaliteettikertoimen arvot annoksen vastekäyrän lineaariselle osuudelle

^cRaportoidut spesifiset letaliteetti-arvot fekaalisille koliformeille ja *E. coli* -bakteereille poikkeavat toisistaan.

3.2 Kloorikemikaalit

Klooraus on vanhin ja käytetyin jätevesien desinfiointimenetelmä. Sitä on käytetty Euroopassa ja Yhdysvalloissa jätevedenpuhdistamoilla 1890-luvulta alkaen, mutta vasta 1900-luvun alussa laitteistojen kehittymisen myötä siitä tuli yleisempi. Klooria käytettiin jäteveden hajunpoistoon pitkään ennen kuin sen germsidinen eli mikrobeja tappava vaikutus havaittiin. (White 1972) Kloorauksen haitallisia vaikutuksia ja riskitekijöitä osoittavat tutkimukset saivat aikaan jätevesien desinfioinnin merkittävän vähenemisen 1970-luvulla. Kloorikemikaaleille on etsitty turvallisempia ja haitattomampia vaihtoehtoja, jotta niiden käyttöä jätevesien desinfioinnissa voitaisiin välttää.

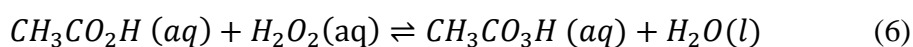
Kloorikemikaalit täyttävät jäteveden desinfiointiaineina tarvittavat vaatimukset: niiden toksisuus mikro-organismeille on suuri laajalla lämpötilavälillä, ne hapettavat orgaanista ainetta ja tekevät jäteveden hajuttomaksi. Kloorikemikaaleilla on kuitenkin monia haitallisia ominaisuuksia, kuten niiden syövyttävyys, myrkyllisyys ja mutageenisuus vesieliöille ja ihmisille, sekä erityisesti niiden taipumus muodostaa orgaanisten yhdisteiden kanssa haitallisia desinfioinnin sivutuotteita, kuten trihalometaaneja (THM), halogenoituja happoja, haloketoneja sekä kloorifenoleita. Esimerkiksi trihalometaanit ja kloorifenolit ovat karsinogeenisiä yhdisteitä. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1312–1313)

Jätevedenkäsittelyssä ensisijaisesti käytetyt kloorikemikaalit ovat olleet kloorikaasu (Cl_2), natriumhypokloriitti (NaOCl) sekä klooridioksidi (ClO_2). Lisäksi kalsiumhypokloriittia ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) on käytetty pienissä jätevedenpuhdistamoissa. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1312–1313)

3.3 Peretikkahappo

Peretikkahappo ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$, peracetic acid, PAA) on voimakas hapetin ja kuuluu orgaanisiin peroksidiin. Sen käyttöä jäteveden desinfioinnissa on alettu tutkia 1980-luvulla (Luukkonen et al. 2014). Peretikkahapon käyttöä jätevesien desinfioinnissa pidetään melko turvallisena (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1379–1380), eikä sen käytössä ole havaittu syntyvän merkittäviä määriä haitallisia sivutuotteita. Dell'Erba et al. (2007) mukaan peretikkahapon käytössä syntyi vähäisiä määriä aldehydejä, jotka peretikkahappo hapettaa karboksyylihapoiksi ja edelleen hiilidioksidiksi.

Peretikkahappoa on saatavilla ainoastaan etikkahapon, vetyperoksidin, peretikkahapon ja veden tasapainoliuoksena (tasapainoyhtälö 6).



Liuoksen dissosioitumatonta peretikkahappoa on pidetty liuoksen mikrobeja tappavana osana, mutta myös vetyperoksidi H_2O_2 toimii desinfioivana tekijänä. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1379–1380)

Peretikkahappo desinfioi tehokkaasti suolistomatoja (De Velasquez et al. 2008). Lisäksi sillä on tehokas hiivoja ja itiöitä tuhoava vaikutus (Baldry 1983). Peretikkahapon desinfiointiteho on riippuvaisempi annoksen suuruudesta kuin kontaktiajasta (Az-zellino et al. 2011). Peretikkahapon annoksilla 1,5–2 mg/l on saavutettu riittävä *E. coli* – ja kokonaiskoliformivähenemä 10–15 minuutin kontaktiajalla ja kolifagivirusvähenemä 60 minuutin kontaktiajalla (Luukkonen et al. 2014).

Suomessa täysimittainen peretikkahappodesinfiointi on käytössä esimerkiksi Mikkelin Kenkäveronniemen puhdistamolla poistuvan jäteveden desinfiointiin (Luukkonen et al. 2014).

3.3.1 Esiselkeytetyn jäteveden peretikkahappokokeilu Kakolanmäen puhdistamolla

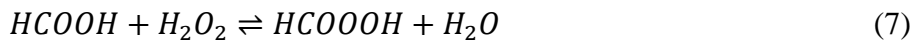
Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla esiselkeytetylle jätevedelle tehtiin desinfiointikokeet peretikkahapolla sekä permuurahaishapolla. Tulosten perusteella Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla suoritettiin koeajot esiselkeytetylle jätevedelle peretikkahapolla marraskuussa 2012. Koeajossa selvitettiin peretikkahapon soveltuvuus esiselkeytetyn jäteveden desinfiointiin tulva- ja ohitustilanteissa, joissa puhdistamon kapasiteetti ei riitä käsittelemään kaikkea saapuvaa jätevettä. Kemikaalina koeajossa käytettiin peretikkahapon 15-prosenttista tasapainoliuosta (Kemirox WT 15) ja annosmääriä noin 50, 100 ja 250 ppm. Näytteistä määritettiin kokonaisaerobibakteerit, kokonaiskoliformit, *E. coli* ja enterokokit.

Kokeiden perusteella peretikkahapon jäännöspitoisuus 5–10 ppm vähensi *E. coli* – ja enterokokkipitoisuudet esiselkeytetyssä jätevedessä samaan pitoisuuteen kuin käsitellyssä jätevedessä. Suuremmilla peretikkahapon annoksilla ohitusvesi oli mikrobiologisesti puhtaampaa kuin käsitelty jätevesi. Laboratoriokokeiden perusteella peretikkahappojäännösmäärä 5–10 ppm vastaa noin 100–200 ppm suuruista annosta Kemirox WT 15 – kemikaalia. (Savolainen 2012)

Esiselkeytetyn jäteveden peretikkahappodesinfiointia ei jatkettu, sillä desinfiointiin tarvittavat peretikkahappomäärät olivat suuria ja esiselkeytetyn jäteveden ohituksia on myöhemmin tapahtunut vain hyvin poikkeuksellisissa tapauksissa.

3.4 Permuurahaishappo

Permuurahaishappo (CHO_3H , performic acid, PFA) kuuluu peretikkahapon tavoin orgaanisiin peroksidiin ja on voimakas hapetin. Sillä on kyky inaktivoida viruksia, bakteereita ja sen itiöitä sekä mikroskooppisia sieniä. Permuurahaishappoa lisätään tavallisesti liuoksena, jossa on permuurahaishappoa, vettä, vetyperoksidia ja muurahaishappoa (yhtälö 7) rikkihapon katalysoimana.



Liuoksen desinfioivina tekijöinä on pidetty permuurahaishappoa PFA yksin tai yhdessä vetyperoksidin kanssa. Liuoksen hajoamistuotteita ovat muun muassa hiilidioksidi, happi sekä happi- ja hydroksyyliiradikaalit, joista mikään ei ole desinfiointiin käytettävissä pitoisuuksissa vesieliöstölle haitallista (Gehr et al. 2009). Permuurahaishapon sivutuotteiden muodostamista on tutkittu laboratorio-olosuhteissa synteettisellä vedellä ja suurilla bromidikonsentraatioilla (101 mg/l) (Veijalainen et al. 2009, Ragazzo et al. 2013 mukaan), mutta normaaleilla bromidipitoisuuksilla sivutuotteiden, kuten bromaatin tai aldehydien, muodostumista ei ole tutkittu jätevedestä. Orgaanisten haihtuvien yhdisteiden määrä ei lisääntynyt merkittävästi tutkituissa näytteissä permuurahaishappoa käytettäessä.

Permuurahaishappo on peretikkahappoa tehokkaampi täyden mittakaavan kokeissa (Ragazzo et al. 2013). WHO:n maatalouskäyttöön kierrätettävän jäteveden *E. coli* – raja saavutettiin kontaktiajalla 19 minuuttia ja annoksella 1,2 mg/l. Gerh et al. (2009) mukaan permuurahaishapon annoksella noin 3,4 mg/l ja 45 minuutin kontaktiajalla saavutettiin 3-log-vähennelmä fekaalisista koliformeista ja lähes täydellinen desinfiointitaso saavutettiin annoksella 6 mg/l.

Permuurahaishapon muodostamia sivutuotteita ovat vetyperoksidi ja muurahaishappo CHOOH. Muiden permuurahaishapon sivutuotteiden muodostamista ja myrkyllisyysvaikutuksia eläimistölle ei ole tutkittu (Gehr et al. 2009).

Heinonen-Tanski & Miettinen (2010) tutkimuksessa permuurahaishappoannoksella 3-4 mg/l ja 5 minuutin kontaktiajalla permuurahaishapon vaikutukselle herkemmat bakteerit (*C. jejuni*, *L. monocytogenes* ja *S. Typhimurium*) poistuivat, mutta vastustuskykyisemmät bakteerit (*E. coli* O157:H7) poistuivat vasta annoksella 20 mg/l. Lisäksi permuurahaishapolla havaittiin olevan kynnyspitoisuus (1-3 mg/l), jonka ylityksen jälkeen tapahtui nopeaa, pitoisuusriippuvaista mikrobivähennemää.

Suomessa permuurahaishappoa käytetään JVP-Eura Oy:n jätevedenpuhdistamolla ohitusvesien desinfioinnissa ja Oulussa Taskilassa puhdistetun jäteveden desinfioinnissa (Luukkonen 2014). Epästabiilisuutensa vuoksi PFA tuotetaan paikan päällä. (Ragazzo et al. 2013)

3.5 Vetyperoksidi

Vetyperoksidi H_2O_2 kuuluu peretikkahapon tavoin peroksideihin. Sen desinfiointitehokkuus on alhainen (Wagner et al. 2002), ellei sen kanssa käytetä esimerkiksi hopeaa (Liberti et al. 2000).

Vesiliuoksessa vetyperoksidi on melko stabiili eri pitoisuuksina, mutta sen hajoamista edistää merkittävästi metalliepäpuhtauksien, kuten raudan, kuparin, mangaanin, nikkelin tai kromin läsnäolo (Snell & Etre 1971, Wagner et al. 2002 mukaan).

Ksibi et al. (2006) tutkimuksessa fekaalisten koliformien 3-logaritmiseen vähennemään tarvittiin vetyperoksidiannos 2,5 mg/l ja 120 minuutin kontaktiaika.

Vetyperoksidi on ei-spesifinen bakterisidi, jonka on todettu desinfioiden tehokkaammin gram-positiivisia kuin gram-negatiivisia bakteereita (Schumb et al. 1955, Wagner et al. 2002 mukaan).

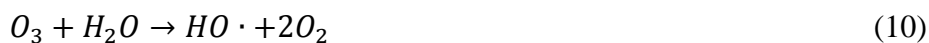
3.6 Otsonointi

Otsoni (O_3) on hapen kolmiatominen allotrooppinen muoto. Otsonia muodostuu luonnossa ilmakehässä esimerkiksi ultravioletti säteilyn vaikutuksesta sekä salamoinnin yhteydessä (Betz et al. 2009 s. 529; Tchobanoglous et al. 2014, s. 1367). Otsoni on väritön kaasu, joka ärsyttää silmiä ja limakalvoja, ja suurena pitoisuutena otsoni saa sinertävän värin. Otsoni on voimakas hapetin, ja sen hapetuspotentiaali on suurempi kuin suurimmalla osalla kemikaaleista, joita vedenkäsittelyssä käytetään.

Otsonia on käytetty vesihuollossa desinfiointiin 1900-luvun alusta lähtien. Nykyisin Euroopassa otsonointia käytetään lähinnä juomaveden ja lietteiden käsittelyssä vaikuttamaan veden makua, hajua ja väriä muodostaviin yhdisteisiin. Otsonointia voidaan käyttää myös jäteveden käsittelyssä vähentämään hajua ja liukoisten pysyvien orgaanisten yhdisteiden määrää jätevedessä. Otsoni valmistetaan käyttöpaikalla, sillä se on epästabiili ja hajoaa helposti lyhyessä ajassa (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1367; EPA 832-F-99-063)

Otsonin desinfioiden vaikutus perustuu mikrobin soluseinän hapettamiseen ja hajottamiseen, otsonin hajoamisessa syntyvien radikaalien reaktioihin, nukleiinihappojen vaurioihin sekä hiilivetysidosten hajoamiseen. (EPA 832-F-99-063; Tchobanoglous et al. 2014, s. 1369)

Otsoni reagoi veden kanssa osareaktioiden 8–11 mukaisesti, joissa piste (\cdot) tarkoittaa paritonta elektronia.



Desinfiointiprosessissa aktiivisina hapettajina ovat erityisesti HO_2 ja $HO \cdot$, jotka hapettavat vedestä muitakin epäpuhtauksia. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1368)

Otsonia valmistetaan syöttämällä lähtöaineena esikäsiteltyä, kuivaa ja jäähdytettyä happea tai ilmaa voimakkaan sähkökentän läpi. Sähkökentän vaikutuksesta happi ionisoituu ja osa siitä muodostaa otsonia. (Karttunen et al. 2004, s. 157)

Otsonoinnin avaintekijöitä ovat annos, sekoitus ja kontaktiaika. Tavoitteena on saada jätevetteen liukenemaan maksimimäärä otsonia. Vakiolämpötilassa liukenevan

otsonin määrä on suoraan verrannollinen kaasumaisen otsonin osapaineeseen veden yllä tai kaasunsyöttövirtaamassa. (EPA 832-F-99-063)

Otsonia lisätään jäteveteen tavallisesti lisäämällä otsonikaasua kuplittamalla jätevetettä tai lisäämällä sitä jäteveden sivuvirtaan ja ohjaamalla otsonoitu vesi kontaktisäiliöön. Käyttämällä hienokuplailmastimia parannetaan otsonin liukenemista jäteveteen. Kontaktisäiliössä käytetään yleensä sarjassa olevia labyrinttierottimia rajoittamaan oikovirtausten määrää ja pidentämään viipymää kontaktisäiliössä (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1297). Veteen liukenematon otsoni ohjataan pois (Karttunen et al. 2004, s. 158).

Otsonoinnin etuina desinfiointissa ovat sen tehokkuus virusten ja bakteerien desinfiointissa sekä lyhyet kontaktiajat (noin 10–30 minuuttia). Otsonoinnista ei jää veteen vesieliöstölle myrkyllistä jäännösotsonia, sillä otsoni hajoaa nopeasti. Otsonoinnin jälkeen vedessä ei synny uudestaan mikrobikasvustoa, paitsi mahdollisesti otsonoinnilta suojautuneiden partikkeleiden sisällä. Lisäksi otsonin kuljetus ja käsittely eivät ole ongelmallisia, sillä otsoni tuotetaan paikan päällä. Otsonointi lisää myös veteen liuenneen hapen määrää ja samalla purkuvesistön hapen määrää. (EPA 832-F-99-063)

Pienet otsoniannokset eivät riitä inaktivoimaan joitakin viruksia, itiöitä tai kystia. Otsonointitekniologia on monimutkaisempi kuin esimerkiksi UV-käsittelyssä, joten otsonointi vaatii tehokkaan kontaktointijärjestelmän. Otsoni on reaktiivista ja syövyttävää, joten sen kanssa kosketuksissa olevien materiaalien täytyy kestää korroosiota. Otsonoinnin tehokkuus heikkenee, jos jäteveden kiintoaine-, BOD-, COD tai orgaanisen hiilen kokonaismäärä eli TOC-pitoisuus on suuri. Otsonikaasun ärsyttävyyden ja mahdollisen toksisuuden vuoksi kontaktorista päässeet otsonikaasut on käsiteltävä, jotta laitteiston huoltohenkilökunta ei altistuisi otsonille (EPA 832-F-99-063). Otsonin käytössä ei synny trihalometaaneeja tai haloetikkahappoja (HAA), mutta esimerkiksi aldehydejä, erilaisia happoja, aldo- ja ketohappoja tai erilaisia bromin yhdisteitä saattaa syntyä jäteveden laadusta riippuen. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1374)

Otsonointi tulee pilotoida ja kalibroida ennen laitteiston asennuksia, jotta käyttöön saadaan vedelle optimaalinen otsoniannos (EPA 832-F-99-063). Otsonin desinfiointitehokkuuteen vaikuttavat monet jätevesien yhdisteet, kuten orgaaniset yhdisteet ja nitraatti.

3.7 Kalvosuodatus

Kalvosuodatuksessa jätevesi ohjataan paine-eron avulla puoliläpäisevän kalvon läpi, ja kalvo erottelee jäteveden epäpuhtauksia fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Epäpuhtauksien pitoisuus kasvaa sivuvirtaan, josta se voidaan ohjata uudelleen tai erikseen käsiteltäväksi. (Lehmonen 2012)

Kalvosuodatusprosesseihin kuuluvat mikrosuodatus, ultrasuodatus, nanosuodatus sekä käänteisosmoosi (Sano et al. 2006; Farahbakhsh & Smith 2004; Hu et al. 2003; Lazarova et al. 1999). Kalvosuodatus on tehokas mikrobien poistamisessa, eikä sen käy-

tössä muodostu haitallisia sivutuotteita. Kalvosuodatuksessa kalvomembraaniin suodatuu sen huokoskokoaa suuremmat partikkelit. Suodatuksen tehokkuuteen vaikuttavat veden paine, läpäisyn vaihtelevuus sekä kalvon tukkeutuminen. (Hu et al. 2003; Sano et al. 2006; Niemelä 2010)

Mikrosuodatuksessa huokoskoko on 0,05-3 μm , ja se pidättää jätevedestä bakteerit. Ultrasuodatuksessa käytetään huokoskokoja 0,003-0,1 μm , jolloin jätevedestä pidättyy viruksia (Niemelä 2010). Aktiivilieteprosessiin yhdistettyä kalvosuodatusta kutsutaan membraanibioreaktoriksi (MBR) (Lehmonen 2012).

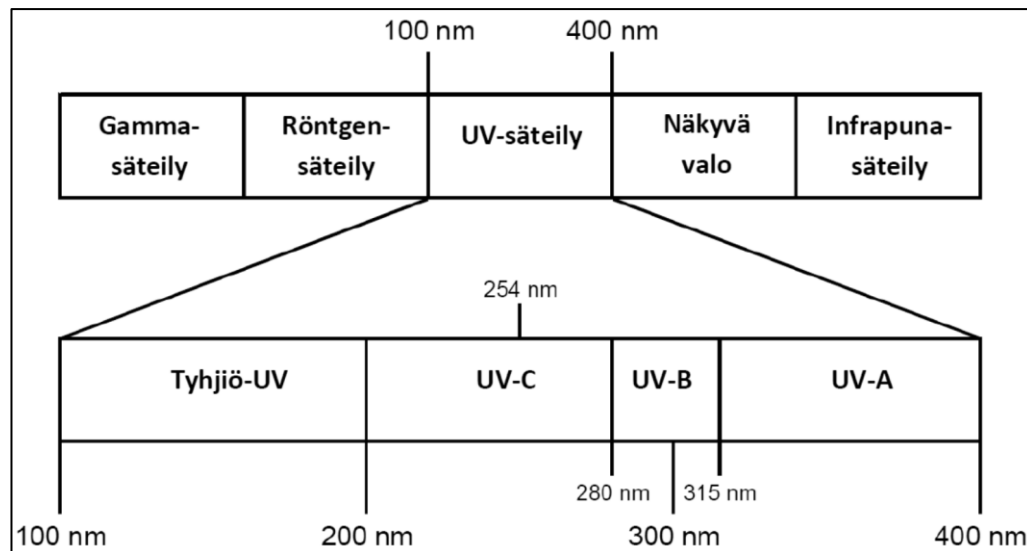
Gómez et al. (2006) tutkivat eri suodatustekniikoita ja niiden vaikutuksia jäteveden sukkulamatojen munien, fekaalisten koliformien, *E. coli*n ja somaattisten kolifagien määrään. Tutkimuksessa mikro- ja ultrasuodatuksella jätevedestä poistui bakteereita, eikä hygieeninen laatu ollut tulevan jäteveden mikrobikonsentraatiosta riippuvaista. Mikrosuodatuksessa kolifagivähennemä oli parempi kuin ultrasuodatuksessa, mutta kokonaisuudessa ultrasuodatuksen mikrobivähennemä oli parempi. Makrosuodatuksella (kiekkosuodatin ja painehiekkasuodatin) jätevedestä poistui sukkulamatojen munat, mutta jäteveden hygieenistä laatua ei voitu taata, ja lisäksi suodattuneen veden laatu oli riippuvainen puhdistettavan jäteveden laadusta.

Käänteisosmoosin on todettu olevan tehokas menetelmä virusten poistamiseen jätevedestä, sillä virusvähennemä oli lähellä 100 prosenttia. Poliovirusvähennemäksi saatiin 7-logaritminen arvo ja kolifagien vähennemä oli 5-logaritminen. (Cooper ja Straube (1979, Madaenin 1999 mukaan)

Kalvosuodatusprosessit ovat teknisesti vaativia prosesseja, ja niiden toimintaa häiritsee membraanien tukkeutuminen. Kalvosuodatusteknologia on tällä hetkellä suhteellisen kallista (Niemelä 2010, Koivunen 2007).

3.8 UV-käsittely

Ultraviolettisäteilyn avulla jätevedestä saadaan vähennettyä tehokkaasti mikrobeja. Ultraviolettisäteily eli UV-säteily on ionisoimatonta sähkömagneettista säteilyä, joka on aallonpituudeltaan 100–400 nm eli näkyvää valoa lyhyempää ja se luokitellaan optiseksi säteilyksi. Aallonpituudeltaan pisintä UV-säteilyä, 315–400 nm säteilyä eli UVA-säteilyä kutsutaan ns. lähiultraviolettisäteilyksi. Aallonpituudeltaan 280–315 nm säteilyä eli UVB-säteilyä kutsutaan keskiultraviolettisäteilyksi ja aallonpituudeltaan 200–280 nm säteilyä eli UVC-säteilyä kutsutaan kaukoultraviolettisäteilyksi (kuva 1). Aallonpituuksien 100–200 nm ultraviolettisäteily on ns. tyhjiö-UV-säteilyä (VUV), joka absorboituu yläilmakehän eli stratosfäärin otsonikerrokseen. Otsonikerros absorboi myös suurimman osan UVB-säteilystä ja kaiken UVC-säteilyn, joten suurin osa maahan asti tulevasta UV-säteilystä on UVA:ta (EPA 430-F-10-025).



Kuva 1. UV-säteily sähkömagneettisen säteilyn spektrissä (muokattu lähteestä EPA 815-R-06-007).

Mitä lyhyempi aallonpituus säteilyllä on, sitä suurempi säteilyn taajuus ja fotonin eli sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkasen energia on (yhtälö 12). (Ikäheimonen 2002, s. 14)

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (12)$$

jossa

E = fotonin energia, $1 \text{ eV} = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

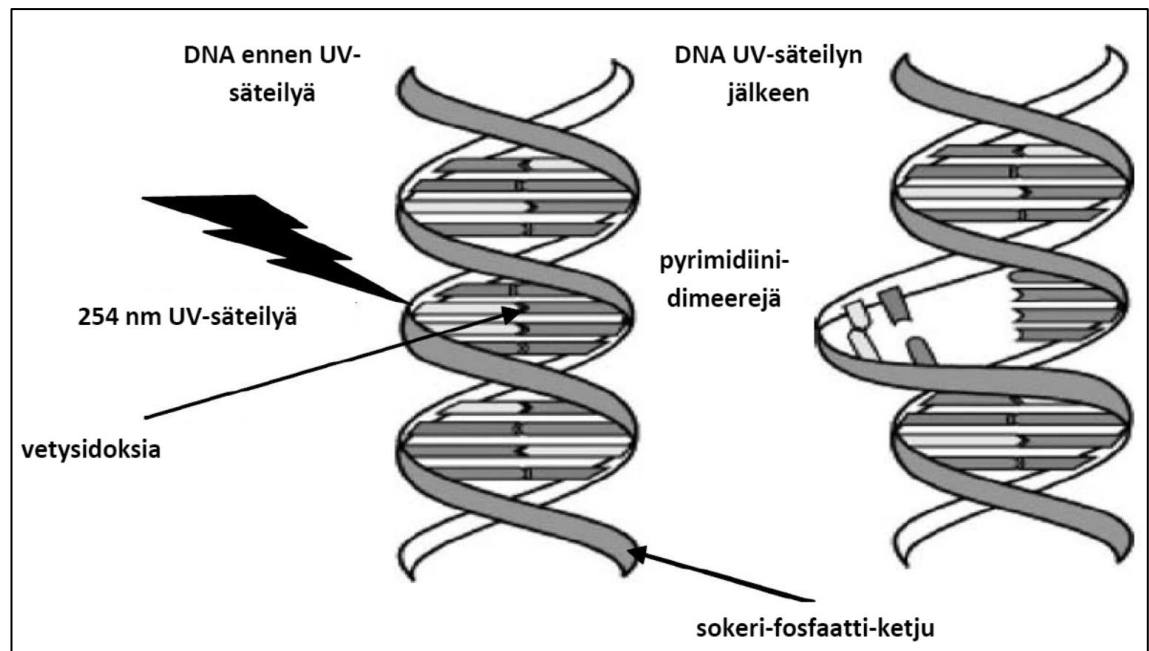
h = Planckin vakio = $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$

f = säteilyn taajuus [Hz]

c = valon nopeus tyhjiössä = $2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

λ = säteilyn aallonpituus [m]

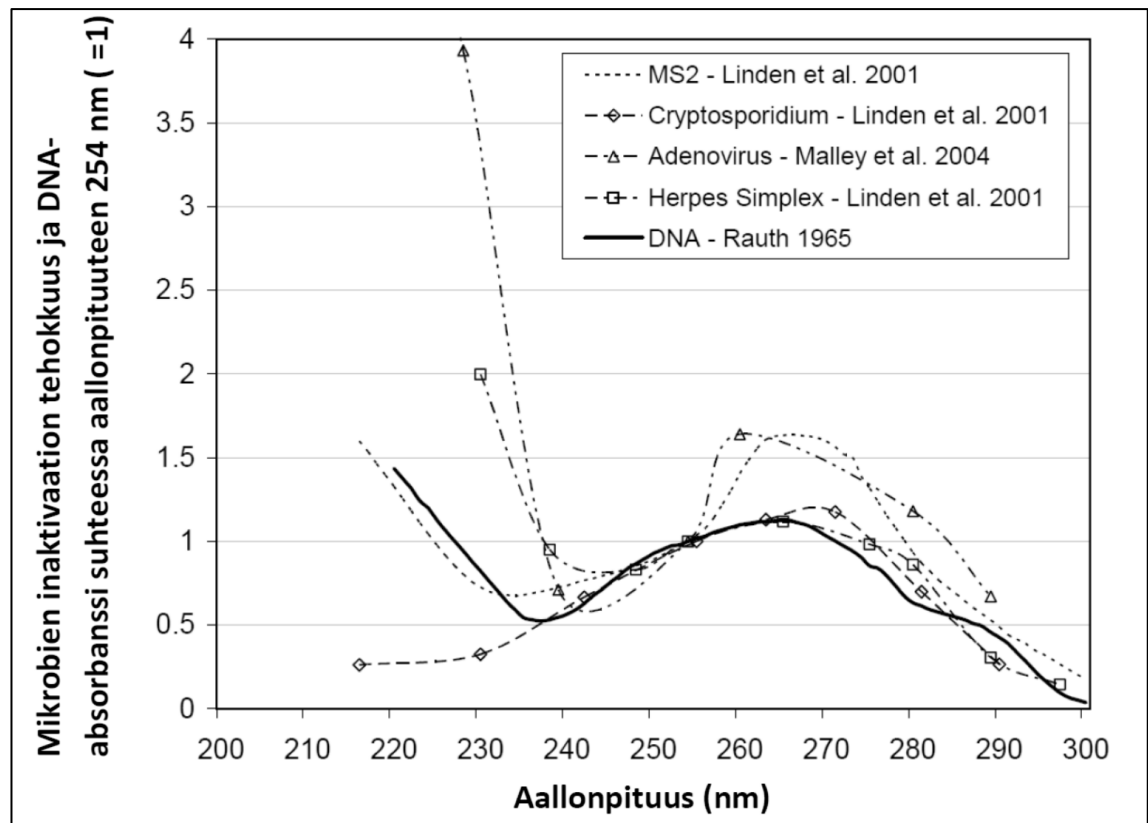
Ultraviolettisäteilyn lyhyttä aallonpituutta ja suurta energiaa voidaan hyödyntää desinfioinnissa, sillä se vahingoittaa organismien solujen ja virusten perimää. Desinfiointivaikutus ei perustu hapetusreaktioihin, vaan deoksiribonukleiinihappojen eli DNA:n ja ribonukleiinihappojen eli RNA:n vaurioihin (kuva 2). DNA ja RNA ovat yleisimpiä nukleiinihappoja, ja niitä tarvitaan esimerkiksi elävien solujen aineenvaihduntaan ja lisääntymiseen (Koutchma et al. 2009, s. 69). Organismien perimän nukleiinihappoissa, kuten DNA:n tyymiinissä ja RNA:n urasiilissä, tapahtuu emäksen muutos niiden absorboidessa ultraviolettisäteilyä, jolloin nukleiinihapon kahdentuminen estyy. Inaktivoitunut mikrobi ei kykene jakautumaan eikä siten infektoimaan. UV-säteilyä kestävä parhaiten organismit, jotka ovat aktiivisessa kasvuvaiheessaan tai stationäärivaiheessa eli silloin, kun organismien lukumäärä pysyy likimäärin vakiona (Hijnen 2009).



Kuva 2. DNA:n rakenne ennen ja jälkeen UV-säteilyn absorboimista (muokattu lähteestä Koutchma et al. 2009, s. 70)

UV-desinfiointi tehoaa myös *Cryptosporidiumiin* ja *Giardiaan*, joihin muut menetelmät eivät ole tehonneet. Lisäksi UV-käsittely on tehokas useimpien virusten, itiöiden ja kystien inaktivoinnissa. (EPA 815-R-06-007) UV-desinfiointi eliminoi tehokkaasti suolistoperäisiä bakteereita, viruksia, bakteerien itiöitä ja loisien kystia, mutta mikrobien herkkyys UV-läpäisevyydelle vaihtelee (Koivunen et al. 2007).

Mikrobiologinen UV-säteilyn vaste ja inaktivaation tehokkuus vaihtelee UV-säteilyn aallonpituuden funktiona (Kneissl et al. 2010). DNA absorboi aallonpituuksia 200–300 nm, ja bakteerit absorboivat eniten säteilyä aallonpituuksilla 260–270 nm (Gates 1930). Saman aallonpituusalueen absorboituminen on suurinta myös muilla organismeilla, mutta eri organismien UV-absorbanssin välillä on myös vaihtelua (kuva 3).



Kuva 3. Mikrobien vaste UV-säteilylle ja DNA:n UV-absorbanssi aallonpituuden funktiona (muokattu lähteistä Linden et al. 2001, Malley et al. 2004 & Rauth et al. 1965, EPA 815-R-06-007:n mukaan)

Jotkin elävät organismit kykenevät korjaamaan UV-säteilyn aiheuttamia vaurioita DNA:ssa. Näistä korjauskeinoista merkittävin on fotoreaktivaatio (reaktivaatio = palautuminen), joka vaatii toimiakseen valoa. Mekanismissa UV-säteilyn tuottamia tyymiinidimeerejä korjataan spesifisen fotoreaktivaatiota edistävän entsyymien katalysoimana. Esimerkiksi *E. coli* – bakteerilla on fotoreaktivaatio-ominaisuus. Myös viruksilla esiintyy korjausmekanismeja, sillä ne kykenevät korjaamaan säteilyvaurioita yksijuosteisesta DNA:sta. Muita korjausmekanismeja ovat esimerkiksi poistokorjaus ja rekombinaatiokorjaus. Poistokorjauksessa heti säteilytyksen jälkeen käynnistyy entsyymaattinen reaktio, joka ei tarvitse valoa ja jossa korjaantuu erilaisia emäsvirheitä. Rekombinaatiokorjauksessa DNA-ketjun vauriot korjaantuvat rekombinaatioprosessin avulla, joka tapahtuu DNA:n kahdentumisen jälkeen. (Vuoriranta 1974 ja EPA 625-1-86-021, Savolaisen 1991 mukaan) Solujen korjausmekanismien ongelmana on mutatoituneiden mikrobien päätyminen ympäristöön (Hassen et al. 2000) tai mikrobien elinkyvyn palautuminen auringon säteilyn vaikutuksesta.

3.8.1 UV-annos

UV-käsittelystä ei jää käsiteltävään veteen jäännöstä, jota voitaisiin hyödyntää määritettäessä optimaalista UV-annosta. UV-annos riippuu UV-intensiteetistä, jota UV-sensorit mittaavat, veden UV-läpäisevyydestä ja virtausnopeudesta (EPA 815-R-06-007), joka puolestaan vaikuttaa kontaktiaikaan. UV-intensiteettimittarien lukemat vastaavat muu-

toksiin lampun tehonsäädössä, lamppujen ikääntymiseen, lampun suojaputken ikääntymiseen sekä suojaputkien likaantumiseen ja mahdollisesti käsiteltävän veden UV-transmittanssiin.

UV-intensiteetillä tarkoitetaan UV-säteilyn tehoa pinta-alayksikköä kohti, ja sen yksikkönä käytetään esimerkiksi W/m^2 tai mWs/cm^2 . UV-annos puolestaan lasketaan UV-intensiteetin ja kontaktiajan avulla (yhtälö 13)

$$D = I * t \quad (13)$$

jossa D = UV-annos, säteilyteho tietyssä altistusajassa [J/m^2]. UV-annokselle käytetään erilaisia yksiköitä lähteestä riippuen.

I = mikrobin saama UV-intensiteetti [W/m^2]

t = altistusaika [s]

UV-annoksen suuruutta voidaan vaihdella säätämällä joko intensiteettiä tai kontaktiaikaa. Tarvittavan UV-annoksen suuruuteen vaikuttaa muun muassa veden laatu ja organismin UV-sietokyky (taulukko 9).

Taulukko 9. Eri organismien inaktivoimiseen tarvittavia UV-annoksia (J/m^2) (muokattu lähteestä Hijnen & Medema 2010, s. 90, Koivistoisen 2014 mukaan)

Organismi	J/m^2			
	1-log (90 %)	2-log (99 %)	3-log (99,9 %)	4-log (99,99 %)
Bakteerit				
Bacillus subtilis	560	1 110	1 670	2 220
Clostridium perfringens	450	950	1 450	-
Streptococcus feacalis	90	160	230	300
Legionella pneumophila	80	150	230	300
Shigella sonnei	60	130	190	260
Salmonella typhi	60	120	170	510
Escherichia coli	50	90	140	180
Campylobacter jejuni	30	70	100	140
Yersinia enterocolitica	30	70	100	130
Shigella dysenteriae	30	50	80	110
Vibrio cholerae	20	40	70	90
Virukset				
Adenovirus (tyyppi 40)	560	1 110	1 670	-
Adenovirus (tyypit 2, 15, 40, 41)	420	830	1 250	1 670
Adenovirus (ei tyyppi 40)	250	500	-	-
Kalikivirus canine	100	210	310	410
Kalikivirus feline	90	190	280	380
Kalikivirus bovine	50	110	160	210
Coxsackie virus B5	80	170	250	340
Rotavirus SA-11	100	200	290	390
Poliiovirus (tyyppi 2)	70	150	220	300
Hepatiitti A -virus	60	110	170	220
Alkueläimet				
Acanthamoeba	400	710	1 190	1 670
Cryptosporidium	30	60	120	-
Giardia	20	50	110	-

Mikro-organismien kuolleisuus säteilytykselle voidaan laskea yhtälön 14 avulla.

$$N = N_0^{-kIt} \quad (14)$$

jossa

N = mikro-organismien määrä desinfioidin jälkeen. Yleisesti on käytössä kokonais- tai fekaalisten koliformisten bakteerien määritys, jolloin yksikkönä käytetään mpn/100 ml (tai cfu/100 ml (*colony forming unit*)).

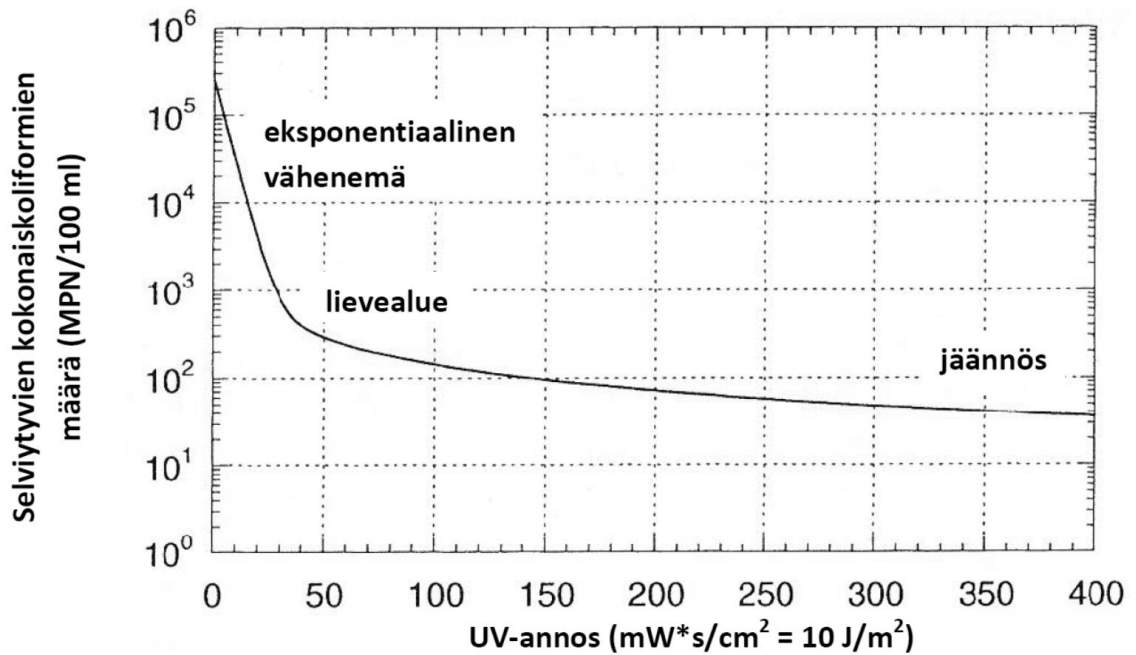
N_0 = alkuperäinen mikro-organismien määrä

- k = kuolleisuusvakio [m^2/Ws], joka on kulmakerroin suoralle, jossa suhde $\ln(N/N_0)$ esitetään annoksen funktiona
 I = UV-energian intensiteetti [W/m^2]
 t = säteilytusaika [s]
 It = UV-annos [W/s]

Partikkelien suojaamien mikro-organismien määrä (N_p) voidaan esittää yhtälön 15 avulla:

$$N = N_0^{-kIt} + N_p \quad (15)$$

Kuvassa 4 on esitetty UV-säteilytyksestä selviytyvien kokonaiskoliformisten bakteerien määrä UV-annoksen funktiona. Kuvasta nähdään, että kun inaktivaatioon tarvittava UV-annos on saavutettu (ns. lievealue), UV-annoksen lisääminen ei enää aktivoi enempää koliformisia bakteereita. (Emerick et al. 1999)



Kuva 4. Tyypillinen UV-annoksen ja koliformisten bakteerien inaktivaation suhde (muokattu lähteestä Emerick et al. 1999).

3.8.2 UV-lamput

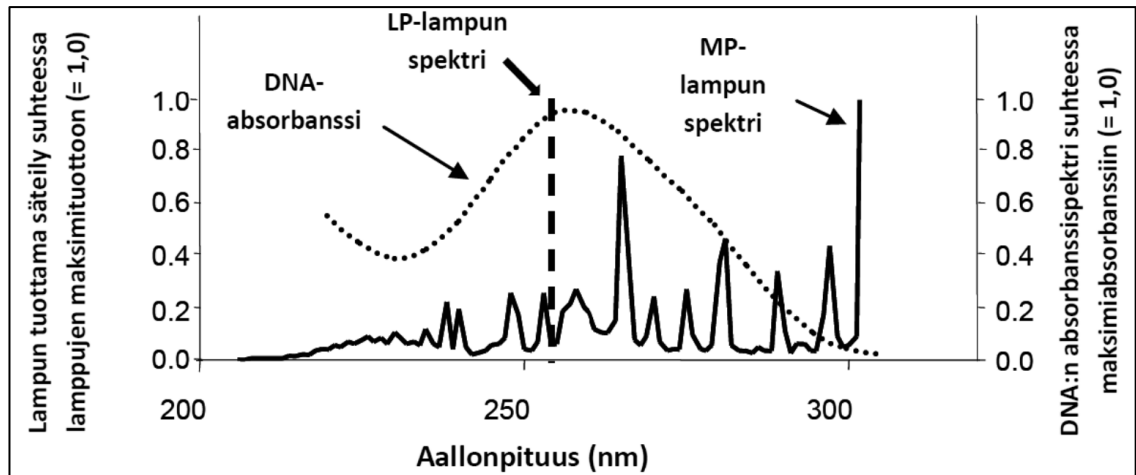
UV-säteilyä tuotetaan tavallisesti aiheuttamalla jännite-ero kahden elektrodin välille lampuissa, jotka sisältävät nestemäistä elohopeaa sekä erilaisia kaasuseoksia. Elohopean virittämisenä tuotettu energia saa aikaan elohopean höyrystymisen. Elohopea virittää lampun elektroneja, jolloin syntyy ultraviolettisäteilyn aallonpituuden (noin 100–400 nm) fotoneja. Elohopeahöyrystä muodostuu tehokkaasti 253,7 nm säteilyä, joka on lähellä mikrobien tehokkainta inaktivaation aallonpituutta 260 nm (kuva 5) (Tchobanoglo- us et al. 2014, s. 1384).

Elektrodityyppiset UV-lamput voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: matalapainelamput, joilla on matala intensiteetti (LPLO, low-pressure low-output lamp), matalapainelamput, joilla on korkea intensiteetti (LPHO, low-pressure high-output lamp) sekä keskipainelamput, joilla on korkea intensiteetti (MP, medium-pressure) (taulukko 10 ja kuva 5). Lisäksi on olemassa muita nopeasti kehittyviä menetelmiä, jotka eivät vielä ole täyden mittakaavan käytössä, kuten xenon-lamput ja UV-valoa emittoivat diodilamput eli LED-lamput (light emitting diodes). (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1384–1386, EPA 815-R-06-007)

Taulukko 10. UV-elohopeahöyrylamppujen tyypillisiä käyttöominaisuuksia (muokattu lähteistä Tchobanoglous et al. 2014, s. 1384; Bell & da Silva 2013; EPA 815-R-06-007)

Lampun ominaisuus	Lampputyyppi		
	LPLO	LPHO	MP
Mikrobeja tappava spektri	monokromaattinen 254 nm:ssa (kuva 5)	monokromaattinen 254 nm:ssa (kuva 5)	polykromaattinen, sisältää aallonpituusalueen 200–300 nm (kuva 5)
Energiankulutus (W)	40–100	200–1 200	1000–13 000
Lampun virta (mA)	350–550	Vaihtelee	Vaihtelee
Lampun jännite (V)	220	Vaihtelee	Vaihtelee
Lampun teho aallonpituudella 254 nm (W)	25–27	60–400	100–2 000
Lampun toimintalämpötila (°C)	35–50	100–150	600–800
Paine (mm Hg)	0,007	0,01–0,8	100–10 000
Hyötysuhde sähköenergian muuntamisesta mikrobeja tappavaksi UV:ksi (%)	35–38	30–35	10–20
Lampun arvioitu käyttöikä (h)	8 000–12 000	8 000–15 000	3 000–8 000
Tarvittavien lamppujen suhteellinen määrä UV-annoksen saavuttamiseksi	suuri	keskitaso	matala

Jätevesien ja veden desinfiointiin tarkoitettujen UV-lampujen on useimmiten eristetty suorasta vesikontaktista suojaputkilla. Suojaputken materiaalina käytetään yleensä lasimaista kvartssia sen korkean UV-säteilyn läpäisevyyden vuoksi ja koska se kestää korkeita lämpötiloja. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1384)



Kuva 5. UV-elohopeahöyrylamppujen säteilyspektri suhteessa DNA:n UV-absorbanssiin (muokattu lähteestä Bolton Photosciences, Inc., EPA 815-R-06-007:n mukaan).

UV-reaktorien valmistajat ovat kehittäneet erilaisia puhdistusjärjestelmiä lamppujen suojaputkille. Puhdistus voi tapahtua irrallisena tai toiminnassa olevaan laitteeseen kemiallisesti tai mekaanisesti. Mekaanisessa puhdistusjärjestelmässä pyyhkijät ovat kiinni moottoreissa tai paineilmamännissä. Pyyhkijä poistaa lampun suojaputkesta likaa liikumalla pitkin sitä edestakaisin säännöllisin väliajoin. (EPA 815-R-06-007)

Toisin kuin perinteiset UV-desinfiointilamput, jotka perustuvat höyrystyneen elohopean valokaaren tuottamaan valoon, valoa emittoivat diodit eli LEDit (light emitting diodes) tuottavat valoa luomalla jännitteen kiinteän olomuodon puolijohteeseen, jolloin energiaa emittoituu fotonien muodossa (Bell & da Silva 2013).

UV-säteilyä emittoivia puolijohdemateriaaleja on monia. Lupaavimpiin UV-B- ja UV-C- säteilyä tuottaviin LED-materiaaleihin kuuluvat galliumnitridi (GaN), ja alumiiniinitridi (AlN). (Kneissl et al. 2010)

UV-LED-lamppujen etuihin verrattuna elohopeahöyrylamppuihin kuuluu niiden helpompi käsittely, sillä ne eivät sisällä haitallista elohopeaa. LED-lamput ovat myös pienikokoisempia ja muotoilultaan kestävämpiä. Ne eivät sisällä lasia tai hehkulankoja, joten ne ovat kestävämpiä myös kuljetuksessa ja käsittelyssä. UV-LED-lamput myös käynnistyvät nopeammin kuin elohopeahöyrylamput ja niiden sytyttämisen ja sammuttamisen voi tehdä elohopeahöyrylamppuja tiheämmillä aikaväleillä. UV-LED-lamppujen käytössä on myös pienemmät tehovaatimukset, ja tulevaisuudessa niillä voidaan saavuttaa korkea energiatehokkuus ja UV-desinfiointin pienempi energiankulutus. UV-LED-lamppujen pitkä käyttöikä, jopa 20 000 - 100 000 käyttötuntia, vähentää tulevaisuudessa myös niiden vaihtovälin tiheyttä. (Kneissl et al. 2010, Close et al. 2006). UV-LEDien käyttö jäteveden desinfiointissa on antanut lupaavia desinfiointituloksia (Chevremont et al. 2012 & 2013, Würtele et al. 2011), mutta se on tällä hetkellä vielä kehitystasolla.

3.8.3 UV-säteily väliaineessa ja UV-reaktorissa

UV-säteily on vuorovaikutuksessa ympäristönsä materiaalien kanssa absorption, taittumisen, heijastumisen ja sironnan muodossa. Desinfiointikäytössä emittoituva UV-säteily on vuorovaikutuksessa esimerkiksi UV-reaktorin komponenttien, kuten lampun suojaputkien ja reaktorin seinämien sekä puhdistettavan jäteveden kanssa. UV-transmittanssin eli –läpäisevyyden avulla voidaan arvioida muun muassa absorption ja siroamisen määrää jätevedessä. Heijastumisessa, taitumisessa ja sironnassa UV-säteilyn suunta muuttuu ja UV-säteily voi vielä desinfioida mikrobeja, mutta absorboitunut UV-säteily ei enää käytettävissä desinfiointiin. (EPA 815-R-06-007) Myös vesi absorboi UV-säteilyä siten, että absorptio kasvaa merkittävästi UV-säteilyn aallonpituuden pienentyessä arvosta 400 nm arvoon 200 nm (Smith & Baker 1981, Morrisin 2012 mukaan).

Absorptiossa säteilyenergia muuttuu muiksi energiamuodoiksi sen imeytyessä johonkin aineeseen. UV-reaktorissa sekä reaktori että sen läpi kulkeva jätevesi absorboivat UV-säteilyä eri materiaalien ja jäteveden yhdisteiden koostumuksesta riippuen.

UV-transmittanssilla (UVT) tarkoitetaan sitä säteilyn osuutta, joka läpäisee tarkasteltavan väliaineen, kuten esimerkiksi jäteveden (yhtälö 16).

$$\% UVT = 100 * \frac{I}{I_0} \quad (16)$$

jossa

UVT = UV-transmittanssi eli –läpäisevyys määritetyllä aallonpituudella (esimerkiksi 254 nm)

I = Näytteen läpi kulkenut säteilyn intensiteetti (W/m^2)

I_0 = Säteilyn alkuperäinen intensiteetti (W/m^2)

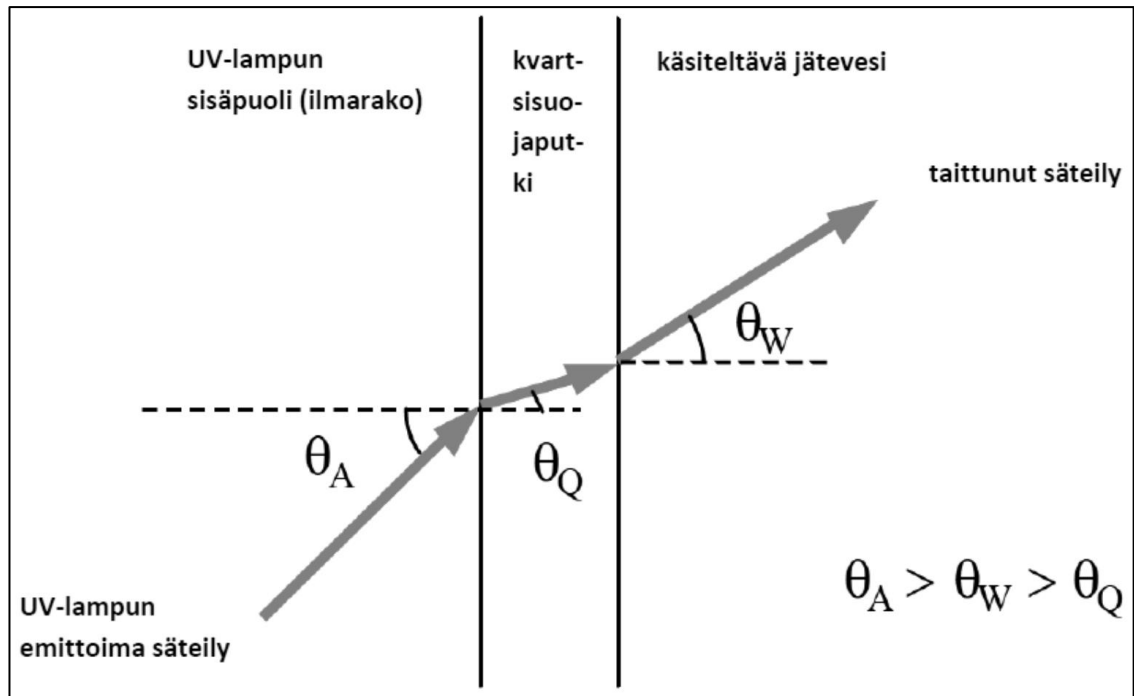
UV-transmittanssi voidaan laskea myös absorbanssin avulla (yhtälö 17)

$$\% UVT = 100 * 10^{-A} \quad (17)$$

jossa

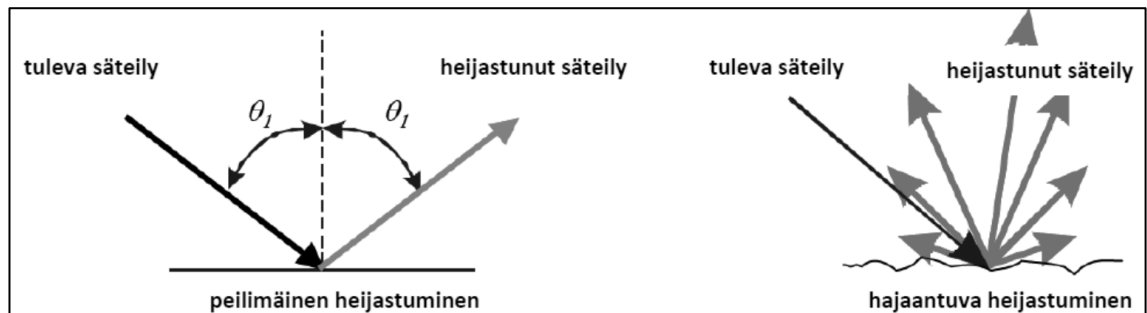
A = UV-absorbanssi määritellyllä aallonpituudella (esimerkiksi 254 nm aallonpituudella ja 1 cm matkalla)

Säteilyn taitumisella tarkoitetaan säteilyn suunnan muuttumista sen läpäistessä kahden väliaineen rajapinnan. UV-reaktorissa UV-säteily taittuu, kun säteily kulkeutuu UV-lampusta ilmaaraon kautta lampun suojaputkeen ja suojaputkesta käsiteltävään jäteveteen (kuva 6).



Kuva 6. UV-säteilyn taittuminen (kuva muokattu lähteestä EPA 815-R-06-007).

Säteilyn heijastumisella tarkoitetaan säteilyn suunnan muutosta, kun se taipuu kohdattuaan jonkin pinnan. Heijastuminen voi olla peilimäistä tai hajaantuvaa heijastuspinnan materiaalista ja laadusta riippuen, sileät pinnat heijastavat säteilyä peilimäisesti ja karkeat hajaantuvasti. UV-reaktorissa UV-säteily heijastuu muun muassa pinnoilta, jotka eivät läpäise säteilyä, kuten reaktorin seinämistä, sekä UV-säteilyä läpäiseviltä rajapinnoilta, kuten suojaputken sisäpuolelta (kuva 7). (EPA 815-R-06-007)

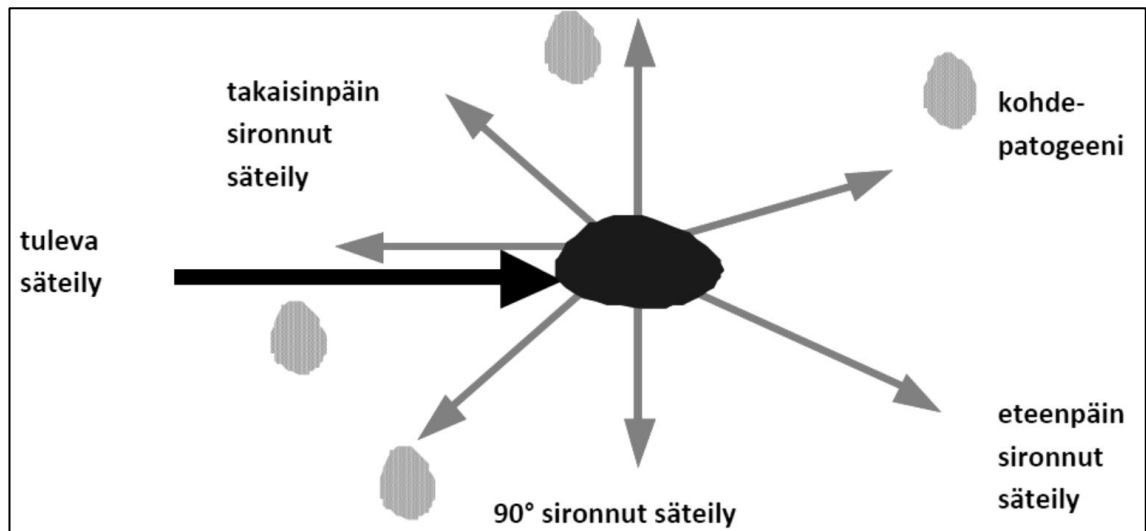


Kuva 7. UV-säteilyn heijastuminen pinnoilta (kuva muokattu lähteestä EPA 815-R-06-007).

Sommer et al. (1996) tutkimuksessa määritettiin heijastuvan UV-säteilyn bakteereita tuhoavaa vaikutusta kaupallisissa desinfiointilaitteissa ja todettiin, että noin 40 % bakteerien vähenemää aiheuttavasta UV-säteilystä johtui heijastumisesta laitteen sisällä, kun reaktorin sisäpintaan oli lisätty heijastava alumiinipäällyste. Pelkästä ruostumattomasta teräksestä koostuvassa reaktorissa bakteereita tuhoavan UV-säteilyn määrä väheni, kun sisäpintaan lisättiin musta lakkaus. Kun heijastuminen reaktorin sisällä estettiin lisäämällä musta heijastamaton pinta, havaittiin bakteereita tuhoavan UV-annoksen ole-

van lisäksi veden UV-läpäisevyydestä riippuvainen, mikä selittyy säteilyn moninkertaisesta heijastumisesta reaktorissa veden UV-transmittanssin ollessa korkea.

Säteilyn sironnalla tarkoitetaan säteilyn etenemisen suunnan muutosta, joka aiheutuu vuorovaikutuksesta väliaineen jonkin partikkelin kanssa. Partikkelit voivat aiheuttaa säteilyn suunnan muutosta jokaiseen suuntaan (kuva 8). Jos partikkelin koko on pienempi kuin säteilyn aallonpituus, sirontaa kutsutaan Rayleigh'n sironnaksi.

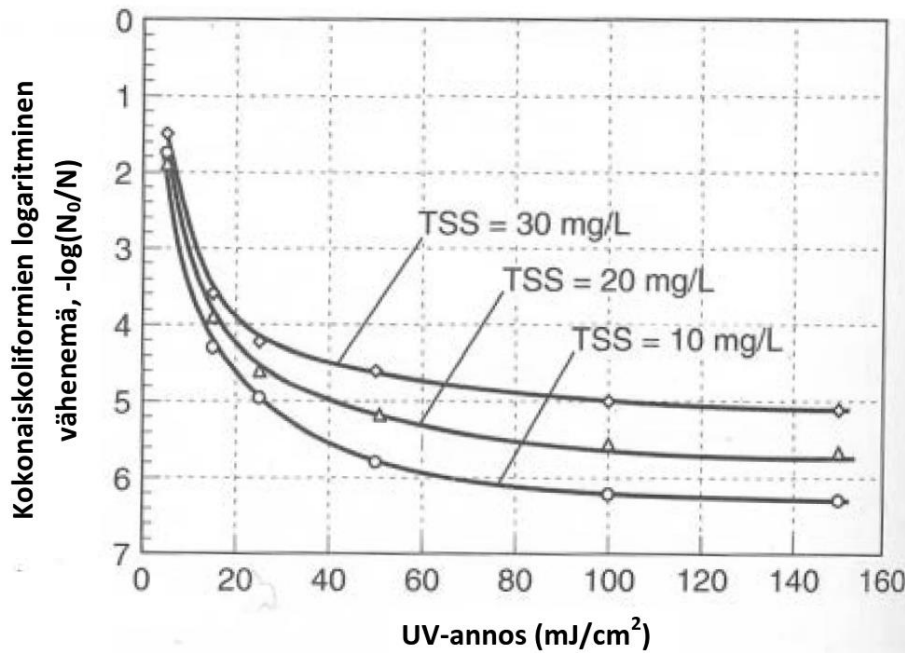


Kuva 8. UV-säteilyn sironta partikkelista (kuva muokattu lähteestä EPA 815-R-06-007).

3.8.4 UV-desinfiointin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Ultraviolettikäsittelyn toiminta desinfiointimenetelmänä perustuu säteilyn vedenläpäisykykyyn, joten puhdistettavan jäteveden laadulla on suuri merkitys puhdistustulokseen (taulukko 11).

Merkittävimpiin UV-käsittelyn tehoon vaikuttaviin parametreihin kuuluu kiintoaineen määrä ja koko jätevedessä, sillä ne lisäävät veden sameutta ja huonontavat veden UV-säteilyn läpäisevyyttä. Lisäksi mikrobit kiinnittyvät kiintoainepartikkelien pinoille ja pysyvät siten suojassa UV-säteilyltä, sillä UV-säteily ei pysty tunkeutumaan partikkeleihin. Kiintoainepartikkelit aiheuttavat absorption lisäksi säteilyn heijastumista, taittumista sekä sirontaa. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1396). Eloanjääneiden bakteerien lukumäärä korreloi karkeasti kiintoainepartikkelien lukumäärän kanssa, kun partikkelien koko on suurempi kuin 40 μm , sillä suuremmat partikkelit suojaavat mikrobeja paremmin säteilyltä. (Qualls et al. 1985). Madge & Jensen (2006) mukaan partikkelien koko vaikuttaa UV-desinfiointin tehokkuuteen. Tutkimuksen mukaan $<5 \mu\text{m}$ olevat partikkelit tutkitussa vedessä saivat aikaan merkittävästi nopeamman desinfiointitason kuin $>20 \mu\text{m}$ kokoiset partikkelit. Lievealue saavutettiin ainoastaan $>20 \mu\text{m}$ partikkelikoolla. Wang et al. (2006) mukaan UV-desinfiointiprosessia varten erityisesti partikkelikoon $\geq 10 \mu\text{m}$ pitoisuuden kontrollointi on tärkeää. Partikkelin koon lisäksi kiintoainepitoisuus vaikuttaa tarvittavaan UV-annokseen ja mikrobien vähenemään (kuva 9)



Kuva 9. Kokonaiskoliformien logaritminen vähenemä jäteveden eri kiintoainepitoisuuksilla ja UV-annoksilla (muokattu lähteestä Tchobanoglous et al. 2014, s. 1404).

Laitetoimittajien vaatimuksena desinfioitavan jäteveden kiintoainepitoisuudelle voi olla esimerkiksi < 5 mg/l, ja myös hiukkaskoolle voi olla annettu maksimiarvo, jotta haluttu desinfiointitaso saavutettaisiin.

UV-lamppujen kvartsisuojaputkiin saostuu helposti joitakin aineita, kuten rautaa, kalsiumia tai mangaania, jolloin UV-intensiteetti pienenee ja lampun teho heikkenee. Etenkin lämpötilan kohotessa veden kovuutta nostavat kalsium, magnesium ja muut suolat voivat muodostaa saostumia kvartsiputkeen. Lamppujen likaantumiseen vaikuttavat usein monet yhdisteet yhdessä, ja Karim (2001) mukaan lamppujen suoja-putkien likaantumiseen vaikuttivat eniten rauta, kalsium, fosfori, NOM, valon intensiteetti ja mikrobikasvusto.

UV-desinfiointitehoon vaikuttavat myös monet yhdisteet, jotka absorboivat UV-säteilyä itseensä ja heikentävät siten desinfiointitehoa. UV-säteilyä absorboivat muun muassa seuraavat yhdisteet: rautayhdisteet $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ja Fe^{2+} , vetyperoksidi H_2O_2 , hypokloriitti-ioni ClO^- , permanganaatti-ioni MnO_4^- , otsoni O_3 , sulfiitti-ioni SO_3^{2-} sekä erilaiset orgaaniset yhdisteet kuten humus- ja fulvohapot sekä jotkin aromaattiset yhdisteet. (Orava et al. 2003, EPA 815-R-06-007). Esimerkiksi veden liukoinen rauta heikentää UV-läpäisevyyttä noin 9 %, kun liukoisen raudan pitoisuus kasvaa arvosta 0 mg/l arvoon 1 mg/l (California Water Technologies). Siten jätevedenkäsittelyssä käytettävät rautayhdisteet vaikuttavat myös UV-desinfiointin tehoon.

Taulukko 11. Jäteveden ominaisuuksien vaikutus UV-desinfointiin (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1395)

BOD, COD, TOC	Ei vaikutusta tai vähäinen vaikutus, ellei merkittävä osa BO-Dista ole humuspitoista
NOM (natural organic matter)	Absorboi tehokkaasti UV-säteilyä
Öljyt ja rasvat	Voi kerääntyä UV-lamppujen kvartsiputkiin, voi absorboida UV-säteilyä
Kiintoaine (TSS)	Absorboi UV-säteilyä, voi suojata partikkelien sisällä olevia mikrobeja
Ammoniakki	Ei vaikutusta tai vähäinen vaikutus
Nitriitti	Ei vaikutusta tai vähäinen vaikutus
Nitraatti	Ei vaikutusta tai vähäinen vaikutus
Rauta	Absorboi tehokkaasti UV-säteilyä, voi saostua UV-lamppujen kvartsiputkiin, voi tunkeutua kiintoaineeseen ja suojata mikrobeja absorboimalla säteilyä
Mangaani	Absorboi tehokkaasti UV-säteilyä
pH	Voi vaikuttaa metallien ja karbonaattien liukoisuuteen
Liennut kiintoaine (TDS)	Voi vaikuttaa saostumien muodostumiseen
Teollisuuden päästöt	Jäteveden koostumuksesta riippuen saattaa vaikuttaa lyhytkestoisesti tai kausiluontoisesti veden läpäisykykyyn

UV-käsittelyn tehokkuuteen ja UV-annoksen optimaalisuuteen vaikuttavat myös virtauksen tasaisuus. Oikovirtauksissa jätevesi kulkeutuu desinfiointilaitteiston läpi lyhintä mahdollista reittiä, jolloin saavutettu UV-annos jää liian pieneksi, eikä desinfioinnin tavoitetasoa saavuteta. Jätevesi voi myös ohjautua UV-yksiköiden ylä- tai alaosaan tai katvealueisiin, jolloin jätevesi ei altistu UV-säteilylle riittävästi.

3.9 Tehostetut hapetusprosessit (AOP-prosessit)

Tehostettujen hapetusprosessien eli AOP-prosessien (Advanced Oxidation Process) avulla voidaan hajottaa yhdisteitä, jotka eivät hapetu perinteisillä hapettimilla. AOP-prosessissa hyödynnetään voimakkaan hapettimen, hydroksyyli-radikaalin (OH·) pitoisuuden nousua jätevedessä. Hydroksyyli-radikaali kykenee hapettamaan useimmat orgaaniset yhdisteet hiilidioksidiksi, vedeksi ja mineraalihapoiksi, esimerkiksi vetykloridihapoksi (HCl). Hydroksyyli-radikaalit kykenevät hapettamaan myös mikro-organismeja jätevedestä.

Hydroksyyli-radikaaleja voidaan muodostaa AOP-prosesseissa eri menetelmillä. Näitä menetelmiä ovat otsonin ja UV-säteilyn hyödyntäminen yhdessä (ns. fotolyttinen otsonointi), otsonin O₃ ja vetyperoksidin H₂O₂ yhdistäminen sekä vetyperoksidin ja UV-säteilytyksen yhdistäminen. Lisäksi on olemassa muutamia muita hydroksyyli-radikaalia tuottavia menetelmiä, kuten vetyperoksidin, UV-säteilyn ja Fentonin reagenssin eli rauta(II)-ionin ja vetyperoksidin yhdistelmä. AOP-prosesseihin kuuluvat myös esimerkiksi UV-säteilyn tai näkyvän valon ja puolijohdemetallien oksidien, kuten TiO₂ katalysoimat reaktiot (fotokatalyyysi). Lisäksi AOP-prosesseiksi luokitellaan myös ultra-

äänitekniikka, märkähapetus ja mikroaallot (Klavarioti et al. 2009). AOP-prosesseihin kuuluu myös peretikkahapon (PAA) ja permuurahaishapon (PFA) yhdistäminen UV-käsittelyyn, jolloin desinfiointiteho paranee verrattuna pelkkään peretikkahappo- tai permuurahaishappokäsittelyyn ja voidaan käyttää pienempiä kemikaaliannoksia (Koi-vunen & Heinonen-Tanski 2005; Caretti & Lubello 2003; Tchobanoglous et al. 2014, s. 1380).

Muihin hydroksyyli-radikaaleja hyödyntäviin hapetusmenetelmiin verrattuna AOP-prosessissa ei tarvita esimerkiksi korkeaa lämpötilaa tai painetta. Lisäksi hapetusreaktiot ole spesifisiä jonkin tietyn yhdisteen suhteen, vaan prosessi hapettaa monia yhdisteitä. (Tchobanoglous et al. 2014, s. 510, 512) AOP-prosessin tehokkaan hapetusvai- kutuksen vuoksi jätevedestä voidaan hajottaa myös erilaisia mikropollutanteja, kuten lääkeainejäämiä (Klavarioti et al. 2009).

3.9.1 AOP+UV-käsittelyn vaikutus lääkeaineisiin

Viime vuosina lääkeaineita (PhACs, *pharmaceutically active compounds*) on pidetty yhä suurempana ympäristöongelmana muun muassa jatkuvan vapautumisen, pysyvyyden ja ympäristöön kertymisen vuoksi. Lääkeaineiden käytön seurauksena lääkeaineet tai niiden aineenvaihduntatuotteet päätyvät ihmisen erittämänä jätevedenpuhdistamoille (Vieno et al. 2005). Vaikka lääkeaineyhdisteet esiintyvät suhteellisen pienissä pitoi- suuksissa (ng/l ja µg/l), ne voivat vaikuttaa ympäristössä haitallisesti muun muassa aiheuttamalla vesieliöille lisääntymishäiriöitä ja häiritsemällä muuten niiden hormonitoi- mintaa. Laboratoriokokeissa lääkeaineille altistuneiden vesieliöiden käyttäytymisessä on havaittu muutoksia (De Lange et al. 2006) ja kaloilla on havaittu solumuutoksia (Mehinto et al. 2010).

Koska AOP-prosessit kykenevät hapettamaan pysyviä, myrkyllisiä ja biohajoa- mattomia yhdisteitä haitattomiksi yhdisteiksi, niiden käyttöä on sovellettu myös vesien lääkeaine- ja hormonijäämien vähentämiseen (Klavarioti et al. 2009).

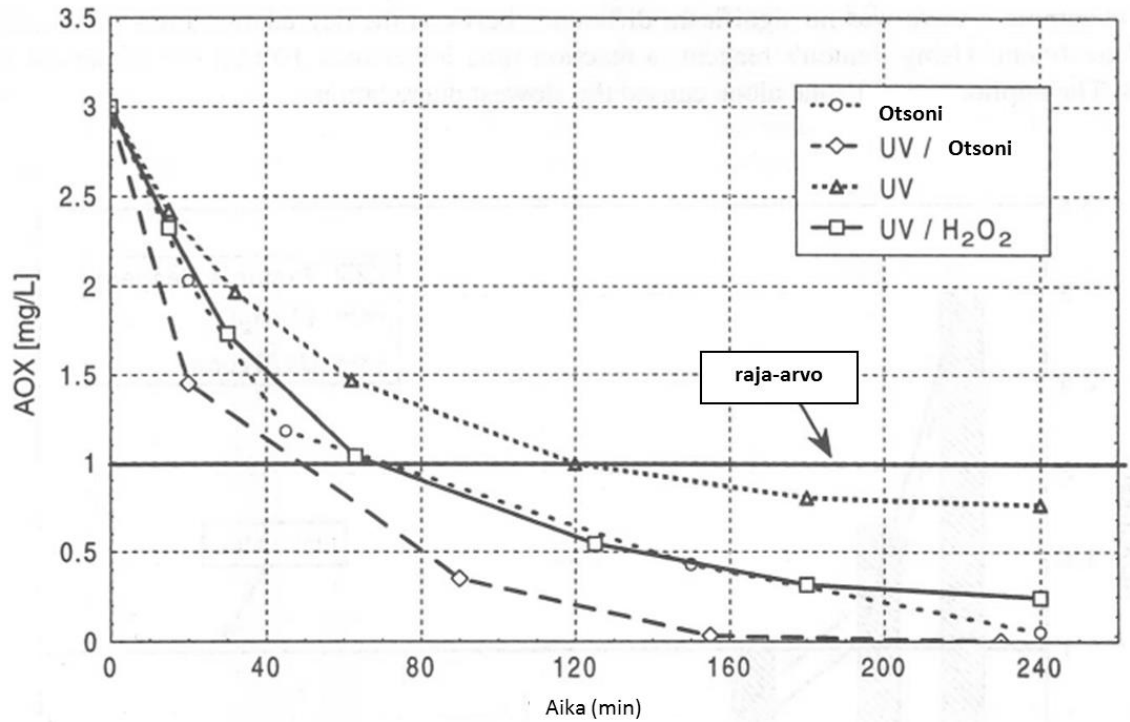
Pereira et al. (2007) tutkivat UV-käsittelyn ja vetyperoksidin yhdistämistä kuu- den eri lääkeaineen käsittelyssä puhtaasta vedestä ja pintavedestä. Kohtalaisen lää- keainevähenemän saavuttamiseksi joidenkin lääkeaineiden poistamiseen tarvittaisiin samansuuruisia UV-annoksia, joita UV-desinfioinnissakin käytettäisiin, mutta useimmi- ten käytetyt UV-annokset olivat suurempia (taulukko 12). UV+H₂O₂-käsittelyn todettiin voivan poistaa laajan valikoiman erilaisia lääkeaineita, ja sovelluksia voisi olla myös jätevedenkäsittelyssä.

Taulukko 12. Tarvittavat UV-annokset (J/m^2) 50 %:n, 90 %:n ja 99 %:n lääkeainepoistumien saavuttamiseksi pinta- vedestä ja puhtaasta vedestä käyttämällä LP- ja MP-UV-fotolyysiä ja UV/H₂O₂-hapetusta, LP-tulokset lähteestä Pereira et al. 2007 ovat suluisissa (muokattu lähteestä Pereira et al. 2007).

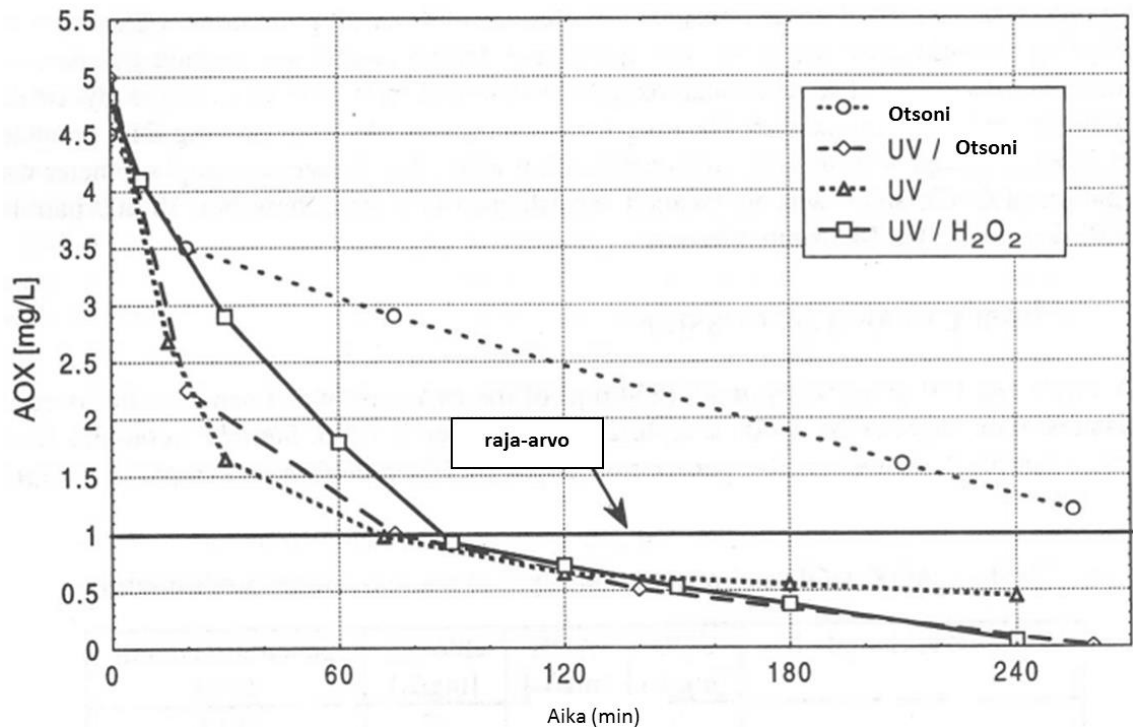
Lääkeaine	50 % vähenemä		90 % vähenemä		99 % vähenemä	
	0 mg/l H ₂ O ₂	10 mg/l H ₂ O ₂	0 mg/l H ₂ O ₂	10 mg/l H ₂ O ₂	0 mg/l H ₂ O ₂	10 mg/l H ₂ O ₂
Carbamazepine	34 660 (231 050)	2 570 (2 570)	115 130 (767 530)	8 530 (8 530)	230 260 (1 535 060)	17 060 (17 060)
Naproxen	2 770 (13 860)	1 260 (2 310)	9 210 (46 050)	4 190 (7 680)	18 420 (92 100)	8 370 (15 350)
Clofibric acid	1 030 (5 330)	910 (4 080)	3 440 (17 710)	3 030 (13 540)	6 870 (35 420)	6 060 (27 090)
Iohexol	2 770 (1 200)	1 610 (1 080)	9 210 (3 970)	5 350 (3 600)	18 420 (7 840)	10 710 (7 200)
Ciprofloxacin ^a	6 930 (11 550)	ei määritetty	23 030 (38 380)	ei määritetty	46 050 (76 750)	ei määritetty
Ketoprofen ^a	340 (390)	ei määritetty	1 120 (1 290)	ei määritetty	2 250 (2 590)	ei määritetty

a. Määritettiin ultrapuhtaasta vedestä

Höfl et al. (1997) vertailivat kolmen eri AOP-prosessin (H₂O₂/UV, O₃/UV ja H₂O₂/Fe²⁺) vaikutusta lääkeainejätevesien orgaanisiin halogeeniyhdisteisiin (AOX) ja kemialliseen hapenkulutukseen (COD) laboratorio-olosuhteissa. Tutkimuksen perusteella kaikki menetelmät hajottivat tarkasteltavia yhdisteitä, ja etenkin H₂O₂/UV ja O₃/UV hajottivat täydellisesti AOX-yhdisteet ja suuren osan CODista, mutta käytettyjä UV-annoksia ei mainittu. Tutkitut reaktioajat olivat kuitenkin kohtalaisen suuria, jopa 240 minuuttia (kuvat 10 ja 11).



Kuva 10. AOX:n hajoaminen jätevesinäytteestä menetelmillä UV, H₂O₂/UV, O₃ ja O₃/UV. Alkuperäinen vetyperoksidipitoisuus: 2,1 g/l, otsoninsyöttö: 4,60 mg/min O₃-menetelmään ja 5,22 mg/min O₃/UV-menetelmään (muokattu lähteestä Höfl et al. 1997).



Kuva 11. AOX:n hajoaminen jätevesinäytteessä menetelmillä UV, H₂O₂/UV, O₃ ja O₃/UV. Alkuperäinen vetyperoksidipitoisuus: 2,1 g/l, otsoninsyöttö: 4,60 mg/min O₃-menetelmään ja 5,22 mg/min O₃/UV-menetelmään (muokattu lähteestä Höfl et al. 1997).

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa on esitetty kohdepuhdistamo (Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo) ja sen puhdistustuloksia koskevat lupamääräykset sekä puhdistamolla suoritetun UV-pilotoinnin koejärjestelyt. Koeajon tarkoituksena oli tutkia UV-desinfiointin vaikutusta veden mikrobiologiseen parantumiseen.

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistetun jäteveden testattavaksi desinfiointimenetelmäksi valittiin UV-käsittely erityisesti sen tehokkuuden ja turvallisuuden vuoksi. Jäteveden UV-käsittelyn seurauksena ei muodostu merkittäviä määriä yhdisteitä, jotka vaikuttaisivat haitallisesti purkuvesistön eliöstöön (Reckhow et al. 2010). Lisäksi UV-käsittelyssä ei ole mukana ihmiselle haitallisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi otsonoinnissa. Jäteveden UV-desinfiointista on saatavilla myös yhä enemmän viitteitä Suomessa ja maailmalla viime aikoina käyttöön otetuista UV-desinfiointilaitoksista, jolloin myös laitteistojen käyttökokemuksista on saatavilla tietoa.

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistettu jätevesi soveltuu ainakin teoriassa UV-desinfiointiin (ks. kappale 4.2.1). Kiintoainespitoisuudet ovat laitoksen tavallisessa käytössä alhaiset ja jätevesi on kulkeutunut hiekkasuodatusprosessin läpi. UV-desinfiointiin vaikuttava raudan määrä ei myöskään ylitä niitä määriä, joiden on todettu merkittävästi pienentävän UV-käsittelyn tehokkuutta, vaikka puhdistamon yksikköprosesseissa käytetäänkin ferrosulfaattia. Lisäksi puhdistamolle on rakennusaikana jätetty tilavaraus kanavamalliselle UV-laitteistolle.

4.1 Kohdepuhdistamo – Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo

Turun seudun puhdistamo Oy:n Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on kallioperään louhittu ja joulukuussa 2008 käyttöön otettu jätevesienkäsittelylaitos. Puhdistamolla käsitellään kaikki Turun seudun yhdyskuntajätevedet, lähes 300 000 Turun seudun asukkaan jäteveden sekä alueen pienten ja keskisuurten teollisuusyritysten jätevedet. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on korvannut 9 entistä puhdistamoa, muun muassa Turun entisen keskuspuhdistamon. Laitoksen toiminta-alueeseen kuuluu yhteensä kymmenen kuntaa: Turku, Raisio, Kaarina, Lieto, Naantali, Paimio, Masku, Mynämäki, Nousiainen ja Rusko. Puhdistusprosessi käynnistyi täysipainoisesti vuoden 2009 alussa.

Jätevedenpuhdistamo on nelilinjainen biologis-kemiallinen aktiivilietelaitos (puhdistamon prosessikaavio, liite 1), jonka toimintaa on tehostettu hiekkasuodattimissa tapahtuvalla jälkisuodatuksella. Jätevedestä saostetaan fosforia rinnakkaissaostuksella ferrosulfaatilla, jota syötetään prosessin alussa karkeavälppäyksen jälkeen. Jälkiselkeytyksen alussa veteen annostetaan ferrosulfaattia hiekkasuodatuksen tehostamiseksi. Jäl-

kiselkeytykseen menevään veteen lisätään myös polymeeriä, jotta kiintoaineen karkaaminen estettäisiin. Puhdistamon kokonaistypenpoisto tapahtuu ilmastuksen denitrifikaatio-nitrifikaatio – prosessissa (DN-prosessi). Alkaliteetin ja pH:n nostamiseksi ilmastukseen menevään veteen voidaan tarvittaessa lisätä kalkkia. Lisäksi ilmastukseen menevään jäteveeteen on mahdollista annostella lisähiililähdettä denitrifikaatioprosessille.

Hiekkasuodatusaltaiden ja mereen johtavan putken väliin on jätetty tilavaraus UV-desinfiointikäsitteilylle. Puhdistettu jätevesi johdetaan Turun Linnanaukon satamaltaaseen.

Laitoksella on käsittelyvarmuuden lisäämiseksi myös kaksilinjainen ohitusvesien käsittely-yksikkö (OVK), jonka tarkoitus on käsitellä kemiallisesti esiselkeytetty ohitusvesi virtaamahuippujen aikana, kun biologisen prosessin kapasiteetti ylittyy. OVK:ssa jätevedet käsitellään kemiallisesti 2-linjaisessa Actiflo®-yksikössä, jonka maksimivirtaama on noin 7 000 m³/h. Prosessissa käytetään ferrisulfaattia, mikrohiekkaa sekä polymeeriä. Prosessin lopussa on lamelliselkeytys, josta käsitelty vesi ohjataan hiekkasuodattimiin tai suoraan poistokanavaan. Ohitusvesien käsittely-yksikkö otettiin käyttöön vuonna 2010.

Puhdistusprosessissa erotettu liete kuivataan lingoilla ja kuljetetaan säiliöautolla Topinojan jätekeskuksessa sijaitsevalle Biovakka Suomi Oy:n biokaasulaitokselle, missä liete käsitellään mädättämällä ja jälkikypsytyksellä. Lietteenkäsittelyn rejektivedet ohjataan viemäriverkoston kautta takaisin Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle.

Puhdistamon mitoitus (taulukko 13) on tehty vuoden 2030 osakaskuntien asukasmäärä- ja jätevesiennusteiden perusteella. Puhdistamon mitoituksessa on huomioitu myös muiden Turun seudun kuntien mahdollinen liittyminen Kakolanmäen jätevedenpuhdistamoon. (Leino 2014)

Taulukko 13. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon mitoitusarvot. Mitoitusajankohtana on käytetty vuotta 2030 (Leino 2014).

Parametri	Arvo	Laatu
Keskivirtaama (Q_{ka})	120 000	m ³ /d
Keskivirtaama (q_{ka})	5 000	m ³ /h
Mitoitusvirtaama (q_{mit})	6 000	m ³ /h
Maksimivirtaama (Q_{max})	275 000	m ³ /d
Maksimivirtaama biologiseen käsittelyyn (Q_{max})	173 000	m ³ /d
Maksimivirtaama esikäsittelyyn (q_{max})	13 750	m ³ /h
Maksimivirtaama biologiseen käsittelyyn (q_{max})	7 700	m ³ /h
Maksimivirtaama hiekkasuodatukseen (q_{max})	13 750	m ³ /h
Maksimivirtaama Actiflo [®] ohitusvesien käsittely-yksikköön (q_{max})	8 000	m ³ /h
BOD ₇ -kuorma	22 000	kg/d
COD _{Cr} -kuorma	52 000	kg/d
Fosforikuorma	760	kg/d
Typpikuorma	4 200	kg/d
Kiintoainekuorma	33 000	kg/d
Asukasvastineluku AVL	315 000	asukasta

Tässä käsitellyllä jätevedellä tarkoitetaan ilmastuksessa, jälkiselkeytyksessä ja hiekkasuodatuksessa käsiteltyä jätevettä ja suurten virtaamien aikana ohitusvesien käsittely-yksikössä ja sen jälkeen hiekkasuodatuksessa käsiteltyä tai poistokanavaan johdettua jätevettä. (taulukko 14).

Jätevedenpuhdistamon vesistölle aiheuttamaa hygieenistä kuormitusta on seurattu vuodesta 2010 alkaen. Turun merialueen hygieenisen tilan havaintopaikkoja on 37 kappaletta (liite 3).

Turun merialueen ympäristövaikutusten tarkkailu toteutetaan yhteistarkkailuna alueen teollisuuden ja yhdyskuntapistekuormittajien kesken. Turun merialueiden vuosien 2010–2014 velvoitetarkkailut alkoivat maaliskuussa ja jatkuivat avovesikauden tutkimuksilla touko–lokakuussa. Havaintopaikoilta tutkitaan lämpökestoisten ja fekaalisten kolimuotoisten, *E. coli*- ja enterokokkibakteerien määrää (liite 4). Puhdistamolle tulevan jäteveden hygieenistä laatua on seurattu vuoden 2014 helmikuusta alkaen (liite 5).

Taulukko 14. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle tulleet jätevesimäärät, käsitellyt ja ohitukseen ohjatut jätevesimäärät vuosina 2010–2013 (Levomäki 2011; Leino 2012–2014).

	Yksikkö	2010	2011	2012	2013
Tuleva jätevesi	m ³ /a	28 538 449	34 312 374	32 685 892	30 278 272
Tuleva jätevesi	m ³ /d	78 200	94 000	89 300	83 000
Käsitelty jätevesi	m ³ /a	28 528 581	34 257 420	32 591 593	30 260 811
Käsitelty jätevesi	m ³ /d	78 200	93 900	89 000	82 900
Puhdistamolle tulevan jäteveden ohitukset	m ³ /a	9 868	54 953	94 299	17 461
Esiselkeytetyn jäteveden ohitukset	m ³ /a	9 868	50 964	5 599	0
OVK:ssa käsitelty jätevesi	m ³ /a	1 173 350	1 589 594	683 828	1 175 006

Muun muassa Turun, Raision, Kaarinan, Paimion ja Ruskon viemäriverkostojen alueella sijaitsee teollisuuslaitoksia, joilta pumpataan viemäriverkoston asumavedestä laadultaan tai määrältään poikkeavaa jätevettä, esimerkiksi elintarviketuotannon, huoltamotoiminnan ja lääketeollisuuden jätevesiä sekä pintakäsittelylaitosten metallipitoisia jätevesiä (Etelä-Suomen AVI 167/2014/2).

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla on käytössä päästötarkkailuohjelma, joka on toimitettu Varsinais-Suomen ELY-keskukselle. Tarkkailuohjelmassa seurataan puhdistamon toimintaa sekä vesistöön johdettavien jätevesien laatua ja määrää. Tarkkailuohjelman osa A on puhdistamon tarkkailuohjelma (Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy, 18.3.2011, nro 306-11-108) ja osa B on viemäriverkoston tarkkailuohjelma (Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy, 18.3.2011, nro 306-11-109), jonka tarkoituksena on seurata Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon viemäriverkoston johdettavaa kuormitusta. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon toiminnasta tehdään vuosittain tarkkailututkimuksen vuosiraportti. (Leino 2014)

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon purkuvesistö on tyypillistä Saaristomeren sisäsaaristoa, ja Linnanaukon purkupiste on kapeiden salmien ympäröimä. Purkuveden laimenemis- ja sekoittumisalueella Linnanaukolla on matkustajasatama, jossa on laivaliikennettä. Linnanaukon purkualue on syvyydeltään melko matalaa, noin 6-8 metriä ja satama-altaan suulla noin 10 metriä. (Etelä-Suomen AVI 167/2014/2)

Linnanaukon purkupiste on sama paikka, johon entisen Turun puhdistamon jätevedet ohjattiin. Purkuvesistön kuormituksesta suurin osa on Aurajoen kautta tulevaa hajakuormitusta. Kuormitusten vuoksi alueen vesistön ekologinen luokka on salmien kohdalla välttävä ja kauempina laajempien vesialueiden luona tyydyttävä. Jätevedenpuhdistuksen käyttöönotto ja keskittäminen Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle on vähentänyt Turun merialueen jätevesikuormitusta merkittävästi. Vuosien 2005–2008 tasosta vuosien 2009–2012, jolloin uusi puhdistamo on ollut käytössä, biologinen hapenkulutus on vähentynyt noin 50 %, fosforin määrä noin 60 % ja typen määrä noin 25 %. Jätevesikuormitus Turun merialueella on vähentynyt, vaikka Turun puhdistamon puhdistettujen jätevesien osuus kaikista merialueelle tulevien jätevesien biologisen hapenkulutuksen ja fosforikuormituksesta on kasvanut noin 50 %:sta noin 70 %:iin ja typ-

pikuormituksesta 50 %:sta yli 90 %:iin. Merialueella ei kuitenkaan ole tapahtunut merkittäviä muutoksia vedenlaadussa, sillä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon kuormitusosuus Aurajoen kuormitukseen verrattuna on pieni. Aurajoen jokiveden laatu poikkeaa kuitenkin jätevesien ravinteista, sillä jätevesien ravinteet ovat käyttökelpoisempia esimerkiksi leville kuin jokivesien ravinteet. (Etelä-Suomen AVI 167/2014/2)

Aurajoen hajakuormituksen ja Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon lisäksi vähäistä pistekuormitusta Turun merialueelle tulee Paraisten jätevedenpuhdistamolta sekä ja teollisuuden jäte-, lauhde- ja hulevesistä (Etelä-Suomen AVI 167/2014/2).

4.1.1 Valtioneuvoston asetus 888/2006

Valtioneuvosto on asettanut vaatimuksia yhdyskuntajätevesien puhdistustuloksille asetuksessaan 888/2006. Asetus tuli voimaan 1.11.2006 kumoten samalla valtioneuvoston päätökset 365/1994 ja 757/1998. Asetusta sovelletaan ympäristönsuojelulain (86/2000) 28 §:n mukaista ympäristölupaa edellyttävään yhdyskuntajätevesien käsittelyyn ja johtamiseen. (VNa 2006/888)

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on asukasvastineluvultaan yli 100 000 asukkaan jätevedenpuhdistamo, joten sille on voimassa VNa 888/2006 mukaiset tiukimmat ravinteiden poistovaatimukset (taulukko 15). Pitoisuuden ja poistotehon vaatimukset voivat olla vaihtoehtoisia, ja poistoteho lasketaan puhdistamolle tulevasta kuormituksesta. Arvot eivät sisällä puhdistamo- eivätkä verkosto-ohituksia.

Taulukko 15. Valtioneuvoston asetuksen 888/2006 mukaiset puhdistusvaatimukset sekä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon kokonaisfosforin ja typen puhdistustulokset vuosilta 2010–2013 (VNa 2006/888).

	Yksikkö	2010	2011	2012	2013	VNa 888/2006 pitoisuus
Kokonaisfosfori	mg/l	0,15	0,12	0,13	0,13	1
Kokonaistyyppi	mg/l	12	9,1	15	13	10
						VNa 888/2006 poistoteho
Kokonaisfosfori	%	98	98	98	98	80
Kokonaistyyppi	%	79	81	74	77	70

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on täyttänyt VNa 888/2006 mukaiset vaatimukset vuosina 2010–2013 kokonaisfosforin ja – typen vähentämisessä, kun huomioidaan, että vaatimuksissa pitoisuus ja puhdistusteho voivat olla vaihtoehtoisia (taulukko 15).

BOD_{7ATU}:n, COD_{Cr}:n ja kiintoaineen puhdistustulokset on annettu tarkkailukertakohtaisesti. VNa 888/2006 mukaisesti 172 tarkkailunäytteestä 14 kertanäytettä on sallittu enimmäismäärä niille näytteille, jotka eivät täytä raja-arvoja, 199 tarkkailunäytteestä 15 ja 249–250 tarkkailunäytteestä 18 kertanäytettä. BOD_{7ATU}:n, COD_{Cr}:n ja kiintoaineen pitoisuudet ja poistotehot on esitetty raja-arvot saavuttaneiden tarkkailunäytteiden lukumääränä kaikkien tarkkailukertojen määrän suhteen (taulukko 16). Pitoisuuden ja

poistotehon vaatimukset voivat olla vaihtoehtoisia, ja poistoteho lasketaan puhdistamolle tulevasta kuormituksesta. Arvot eivät sisällä puhdistamo- eivätkä verkosto-ohituksia.

Taulukko 16. Valtioneuvoston asetuksen 888/2006 mukaiset puhdistusvaatimukset sekä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon BOD_{7ATU} :n ja COD_{Cr} :n puhdistustulokset vuosilta 2010–2013 (VNa 2006/888).

	Pitoisuus alitettu tarkkailukerralla / vuoden tarkkailukerrat				VNa 888/2006 pitoisuus (mg/l)
	2010	2011	2012	2013	
BOD_{7ATU}	172/172	253/254	249/249	250/250	30
COD_{Cr}	199/199	254/254	249/249	250/250	125
Kiintoaine	197/199	252/254	249/249	250/250	35
	Teho saavutettu tarkkailukerralla / vuoden tarkkailukerrat				VNa 888/2006 poistoteho (%)
	2010	2011	2012	2013	
BOD_{7ATU}	172/172	253/254	248/248	250/250	70
COD_{Cr}	198/199	251/254	248/248	250/250	75
Kiintoaine	197/199	249/254	248/248	250/250	90

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on täyttänyt VNa 888/2006 mukaiset vaatimukset vuosina 2010–2013 myös BOD_{7ATU} :n, COD_{Cr} :n ja kiintoaineen vähentämisessä (taulukko 16). (Leino 2014, VNa 2006/888)

4.1.2 Ympäristöluvut

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on saanut ensimmäisen ympäristölupansa Länsi-Suomen ympäristölupavirastolta vuonna 2003. Lupaa täydennettiin vuonna 2008 muun muassa laajentamalla osakaskuntien määrää. Vuonna 2014 Etelä-Suomen aluehallintovirasto antoi uuden ympäristölupapäätöksen, jossa ympäristölupaan lisättiin muun muassa puhdistetun jäteveden hygienisointivaatimus.

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle myönnettiin ympäristönsuojelulain 28 §:n mukainen ympäristölupa 22.9.2003 (Länsi-Suomen ympäristölupavirasto 47/2003/4). Ympäristölupa myönnettiin jätevesien johtamiseen puhdistamolta Linnanaukon satama-altaaseen.

Länsi-Suomen ympäristölupavirasto muutti 5.6.2008 antamallaan päätöksellä (25/2008/1) vuonna 2003 antamaansa lupapäätöstä siten, että ympäristölupapäätös koskee suuremman alueen yhdyskuntajätevesien käsittelyä ja johtamista puhdistamolta Linnanaukon satama-altaaseen. Alueeseen lisättiin Raisio, Naantali, Masku, Nousiainen, Mynämäki, Askainen, Lemu, Merimasku, Rymättylä ja Vahto.

Länsi-Suomen ympäristölupaviraston antamien päätösten mukaan jätevedet on käsiteltävä biologis-kemiallisesti jälkisuodatuksen käsittävässä puhdistamossa tai vähintään vastaavalla tavalla siten, että mereen johdettava päästö ja muut ympäristöpäästöt

jäävät mahdollisimman vähäisiksi. Puhdistamon kapasiteetin on riitettävä kaikissa olosuhteissa. Lisäksi mereen johdettava jätevesi ei saa sisältää haitallisessa määrin raskasmetalleja tai muita ympäristölle vaarallisia aineita. Käsitellyn jäteveden pitoisuusarvojen ja käsittelytehojen on oltava ohijuoksuksineen, ylivuotoineen ja poikkeustilanteineen ympäristöluvan mukaiset. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on täyttänyt ympäristöluvan mukaiset vaatimukset vuosina 2010–2013 (taulukko 17).

Taulukko 17. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ympäristöluvien 2003 ja 2014 mukaiset puhdistusvaatimukset ja puhdistustulokset vuosilta 2010–2013. Suluissa oleviin tuloksiin ei ole huomioitu jätevedenkäsittelyn ohituksia. (Levomäki 2011; Leino 2012–2014; Länsi-Suomen ympäristölupavirasto 47/2003/4 ja 25/2008/1; Etelä-Suomen AVI 167/2014/2)

	Yksikkö	2010	2011	2012	2013	Pitoisuuden enimmäisarvo (mg/l)	
						Y.lupa 2003	Y.lupa 2014
BOD ₇ _{ATU}	mg/l	5,6 (4,4)	5,5 (4,3)	4,4 (3,5)	4,9 (4,5)	10	10
COD _{Cr}	mg/l	42 (40)	41 (38)	38 (36)	42 (41)	125	60
Kokonaisfosfori	mg/l	0,19 (0,15)	0,15 (0,12)	0,16 (0,13)	0,14 (0,13)	0,3	0,3
Kokonaistyyppi	mg/l	12 (12)	9,1 (9,2)	15 (15)	13 (13)	-	-
Kiintoaine	mg/l	7,3 (5,6)	7,2 (5,3)	4,4 (3,1)	4,0 (3,3)	15	15
						Käsittelyn vähimmäisarvo (%)	
						Y.lupa 2003	Y.lupa 2014
BOD ₇ _{ATU}	%	98 (98)	98 (98)	99 (99)	98 (99)	95	95
COD _{Cr}	%	94 (94)	94 (94)	94 (94)	93 (94)	75	90
Kokonaisfosfori	%	98 (98)	98 (98)	98 (98)	98 (98)	95	95
Kokonaistyyppi	%	78 (79)	81 (81)	73 (74)	77 (77)	70	75
Kiintoaine	%	98 (98)	98 (98)	99 (99)	99 (99)	90	95

Puhdistamolietteen jatkokäsittelystä Etelä-Suomen aluehallintovirasto myönsi 9.12.2010 Biovakka Suomi Oy:lle ympäristösuojelulain 28 §:n mukaisen ympäristöluvan Topinojan biokaasulaitoksen toiminnalle ja sen muutokselle (Etelä-Suomen AVI 92/2010/2). (Leino 2014)

Etelä-Suomen aluehallintovirasto antoi 1.10.2014 päätöksen (167/2014/2) ympäristöluvan uusimisesta. Päätöksen mukaan puhdistamolle johdettavat jätevedet on käsiteltävä biologis-kemiallisesti ympäristölupahakemuksessa esitetyllä tai puhdistusteholtaan vähintään sitä vastaavalla tavalla. Kokonaistypellä käsitteletuloksissa vaaditaan tulosten saavuttaminen vuosikeskiarvona ja muilla parametreilla neljännesvuosikeskiarvon on täytettävä vaatimukset. Poikkeustilanteet, ohijuoksuksukset ja ylivuodot puhdistamolla sekä viemäriverkostoissa lasketaan mukaan puhdistustulokseen (taulukko 17).

Päätöksen mukaan mereen johdettavat jätevedet on varauduttava hygienisoimaan vuoden 2018 alusta alkaen ainakin 1.5.–31.10. välisenä aikana, ja hygienisoinnista on esitettävä suunnitelma Varsinais-Suomen ELY-keskukselle 30.6.2016 mennessä.

Jätevedet on käsiteltävä siten, että toiminnassa täytetään yhdyskuntajätevesistä annetun valtioneuvoston asetuksen (888/2006) liitteen taulukon 1 mukaiset biologisen käsittelyn vähimmäisvaatimukset (BOD_7 ATU, COD_{Cr} ja kiintoaine) tarkkailtuna siten kuin asetuksessa ja tämän päätöksen tarkkailumääräyksissä on edellytetty.

Lisäksi mereen johdettavassa jätevedessä ei saa olla valtioneuvoston vesiympäristölle vaarallisista aineista antaman asetuksen (1022/2006) liitteen 1 A mukaisia vaarallisia aineita, ja liitteissä 1 C ja 1 D olevia vaarallisia tai haitallisia aineita saa olla vain pitoisuuksina, jotka eivät voi johtaa ympäristölaatumien ylittymiseen pintavedessä tai kaloissa. (Etelä-Suomen AVI 167/2014/2)

4.1.3 HELCOMin suositukset

Itämeren suojelukomissio eli HELCOM (Helsinki Commission) on Itämeren alueen merellisen ympäristön suojelusopimuksen allekirjoittaneiden valtioiden perustama hallitusten välinen järjestö. Komission tehtävänä on seurata Itämeren tilaa, antaa neuvoa Itämeren ympärysvaltioille Itämeren suojeluun liittyen, tarkkailla Helsingin sopimuksen soveltamista ja antaa suosituksia sopimusmaiden hallituksille.

Vuonna 1992 allekirjoitettiin Itämeren merellisen ympäristön suojelua koskeva yleissopimus, johon sisältyy myös luonnon ja sen monimuotoisuuden suojelu. Itämeren suojelusopimus on muiden voimaansaatettujen kansainvälisten sopimusten tavoin sitova, mutta HELCOMin suositukset eivät sido lupaviranomaisia oikeudellisesti, vaan niiden painoarvo on poliittinen ja moraalinen. (Itämeriportaali 2010; Helsinki Convention 2014)

Itämeren suojelusopimuksessa on annettu vaatimukset yhdyskuntajätevesien purkamisesta Itämeren valuma-alueelle koskien jätevesien käsittelyssä käytettäviä menetelmiä sekä $BOD_{5:n}$, kokonaisfosforin ja kokonaistypen pitoisuuksia ja puhdistusvaatimuksia. Vaatimukset riippuvat jätevedenpuhdistamon asukasvastineluvusta. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo purkaa käsitellyt jätevedet suoraan tyypelle herkälle merialueelle ja sen asukasvastineluku on suurempi kuin 100 000 asukasta, joten puhdistustuloksia tarkastellaan HELCOMin suosituksen 28E osan B kohdan 5 raja-arvojen mukaisesti (taulukko 18). Pitoisuus- ja puhdistustehovaatimukset voivat olla vaihtoehtoisia. Puhdistamon tai verkoston ohitukset eivät sisälly taulukon arvoihin. (HELCOM 2007)

Taulukko 18. HELCOMin suositukset jäteveden BOD_{5ATU} , kokonaisfosforin ja -typen pitoisuuksille ja puhdistustehoille sekä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tulokset vuosikeskiarvoina vuosilta 2010–2013. Taulukossa vaatimukset ylittäneet arvot on lihavoitu. (HELCOM 2007; Levomäki 2011; Leino 2012–2014)

						HELCOM 28E/5, B 5 pitoisuusvaatimus (mg/l)
	Yksikkö	2010	2011	2012	2013	
BOD_{5ATU}	mg/l	3,8	3,7	3,0	3,9	15
Kokonaisfosfori	mg/l	0,15	0,12	0,13	0,13	0,5
Kokonaistyyppi	mg/l	12,0	9,1	15,0	13,0	10
						HELCOM 28E/5, B 5 puhdistustehovaatimus (%)
BOD_{5ATU}	%	98,0	98,0	99,0	99,0	80
Kokonaisfosfori	%	98,0	98,0	98,0	98,0	90
Kokonaistyyppi	%	79,0	81,0	74,0	77,0	70

Kaikki HELCOMin suositusten mukaiset puhdistusvaatimukset on saavutettu vuosina 2010–2013, kun huomioidaan, että vaatimuksissa pitoisuus ja puhdistusteho voivat olla vaihtoehtoisia (taulukko 18).

4.2 UV-käsittely

UV-koeajon tavoitteena on tutkia, kuinka tehokkaasti UV-desinfiointi poistaa jätevedestä erilaisia veden laadun indikaattoriorganismeja. Lisäksi koeajossa testataan, kuinka suuria UV-annoksia jäteveden desinfiointiin tarvitaan. UV-koeajoissa käsiteltiin jätevedenpuhdistamon lähtevän veden kanavasta pumpattua vettä. Koeajot tehtiin 20.8.–15.10.2014 välisenä aikana.

Lähtevän veden kanavasta jätevesi pumpattiin (Grindexin uppopumppu) UV-laitteistoon DN 80 muoviletkuja pitkin ja takaisin lähtevän veden kanavaan. UV-annosta säädettiin vaihtamalla pumpatun veden virtaamaa uppopumpun taajuusmuuttajalla (ABB), sillä UV-laitteistossa ei ollut tehonsäätöä. Virtaama mitattiin laitteistoon asennetulla Danfossin MAGFLO-virtausmittarilla. Ennen laitteiston käyttöönottoa sitä ilmastettiin päästämällä ilmaa pois näytteenottoventtiilien kautta.

4.2.1 Käsiteltävän veden laatu UV-käsittelyn näkökulmasta

Puhdistamon jätevesien käsittelyyn kuuluu hiekkasuodatusprosessi. Hiekkasuodatuksen on todettu vähentävän merkittävästi kiintoaineen määrää jätevedestä, joten samalla kuin se vähentää jo itsessään mikrobien määrää jätevedessä, se parantaa myös UV-käsittelyn desinfiointitehokkuutta (Koivunen et al. 2003). Kiintoaineen pitoisuus käsitellyssä lähtevässä jätevedessä on 1.1.2013–31.10.2014 ollut 1–19 mg/l (mediaani 2,4 mg/l). Vesistöön johdettu kiintoainepitoisuus on ollut 1–44,8 mg/l (mediaani 2,4 mg/l), sillä siihen lasketaan mukaan myös ohitusvesien käsittelystä jäljelle jäänyt kiintoainepitoisuus. (Tuomi 2014)

OVK:n käyttö puhdistamolla on poikkeustilanne, jolloin UV-käsittelyn tehokkuus ei riitä. OVK:n käyttö saattaa vaikuttaa puhdistamolta lähtevän veden laatuun esimerkiksi kokonaistypen ja kiintoaineen määrään. (Leino 2014).

Käsitellyn jäteveden liukoisen raudan pitoisuus puhdistamolla on 1.1.2013–31.10.2014 ollut 0,086–0,87 mg/l (mediaani 0,16 mg/l) ja käsitellyn jäteveden kokonaisraudan pitoisuus on ollut 0,14–5,3 mg/l (mediaani 0,4 mg/l) (Tuomi 2014). Ferriraudan (Fe^{3+}) kynnyspitoisuutena jäteveden UV-absorbanssissa on 0,057 mg/l ja ferroraudan (Fe^{2+}) 9,6 mg/l (Tchobanoglous et al. 2014, s. 1395). Suuremmat pitoisuudet heikentävät UV-desinfiointia absorboimalla UV-säteilyä. Vaikka puhdistamolla käytetään saostuskemikaalina ferrosulfaattia, sitä ei ole käsitellyssä jätevedessä liikaa UV-desinfiointiin suhteen.

4.2.2 UV-laitteisto

Jäteveden desinfiointi vaatii UV-desinfiointilaitteistolta soveltumista UV-säteilyä heikosti läpäisevien vesien käsittelyyn. Koejärjestelyssä käytettiin putkimallista UV-koelaitetta (Wedeco LBX20L, toimittaja Hyxo), jonka U-mallisen reaktorin tilavuus on noin 21 litraa ja ulkoiset mitat ovat 930*323*245 mm (kuva 12). UV-reaktorin materiaali on ruostumatonta terästä (SS316L).



Kuva 12. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle asennettu UV-koelaitteisto (28.8.2014).

UV-koelaitteiston sylinterimäiset lamput (Wedeco XL10 Spektrotherm®) sisälsivät amalgaami-indium-seosta. Yhden UV-lampun teho on 80 W, ja käytetyssä UV-reaktorissa oli yhteensä 6 lamppua. Yhden lampun UV-C-säteilyä tuottava teho aallonpituudella 254 nm oli 33 W. UV-lampuilla oli kvartsisuojaputket, joiden toinen pää oli avoin. UV-koelaitteistossa oli lisäksi mukana UV-säteilyn intensiteettiä mittaava anturi, jonka antama lukema kirjattiin ylös näytteenottohetkillä.

4.2.3 Koejärjestelyt ja näytteenotto

Tässä UV-pilotoinnissa määritettiin suolistoperäisten enterokokkien, *Escherichia coli* –bakteerien, *Clostridium perfringens* – itiöiden sekä F-spesifisten ja somaattisten kolifagien määrä yhteensä yhdeksän viikon ajan Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistetusta jätevedestä lähtevän veden kanavasta. Mikrobinäytteet otettiin ennen UV-reaktoria ja heti sen jälkeen. Tarkasteltavat mikrobit valittiin UV-pilotoinnin näytteenottoon muun muassa siksi, että ne ovat tunnettuja veden hygieenisen laadun indikaattoriorganismeja. Niistä löytyy kirjallisuudessa referenssejä muun muassa jäteveden desinfiointiin ja UV-desinfiointiin liittyen, joten tulosten vertailu myös muihin tutkimuksiin on mahdollista. *C. perfringens* – itiöt ovat lisäksi UV-sietokyvyltään kestäviä (Jalangelo et al. 2003), joten myös UV-desinfioinnille vastustuskykyisempiä mikrobeja saatiin tarkasteltua. Myös kolifagien on todettu sopivan veden laadun indikaattoriksi (Dutka et al. 1987). Kolifagien ottaminen mukaan näytteenottoon mahdollisti lisäksi virusten tutkimisen näytteenottojen aikana. Suolistoperäiset enterokokit ja *E. coli* – bakteerit kuuluvat myös Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon pidempiaikaiseen hygieeniseen käyttö-tarkkailuun.

Mikrobinäytteenottojen lisäksi reaktorin läpi kulkevasta vedestä mitattiin näytteenottohetkellä veden UV-läpäisevyys (%).

Näytteenoton suoritti koejakson aikana Timo Yli-Kyyny Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy:stä. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T101, joka täyttää laboratorioden testauksia, kalibrointeja ja näytteenottoa määrittelevän standardin ISO/IEC 17025 vaatimukset. Mikrobitutkimuksissa käytetyt määrittymenetelmät on esitetty liitteessä 4. *E. coli* –bakteerit ja suolistoperäiset enterokokit sekä jäteveden UV-läpäisevyys analysoitiin Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy:ssä ja *Clostridium perfringens* –itiöt sekä kolifagit lähetettiin analysoitavaksi THL:n Vesi- ja terveys yksikköön Kuopioon.

Näytteenottoventtiilejä suihkutettiin 70 % etanolilla ennen näytteenottoa. UV-reaktorin pohjassa olevasta puhdistusventtiilistä päästettiin silloin tällöin pilotoinnin aikana vettä ulos, sillä reaktorin pohjalle kertyi pieniä määriä hiekkaa.

Muutamissa mikrobitutkimuksissa määrityksessä käytettiin liian suurta laimennuskerrointa (<) tai liian pientä laimennuskerrointa (>), jolloin tarkkaa tulosta pesäkkeiden määrästä ei saatu (liite 6).

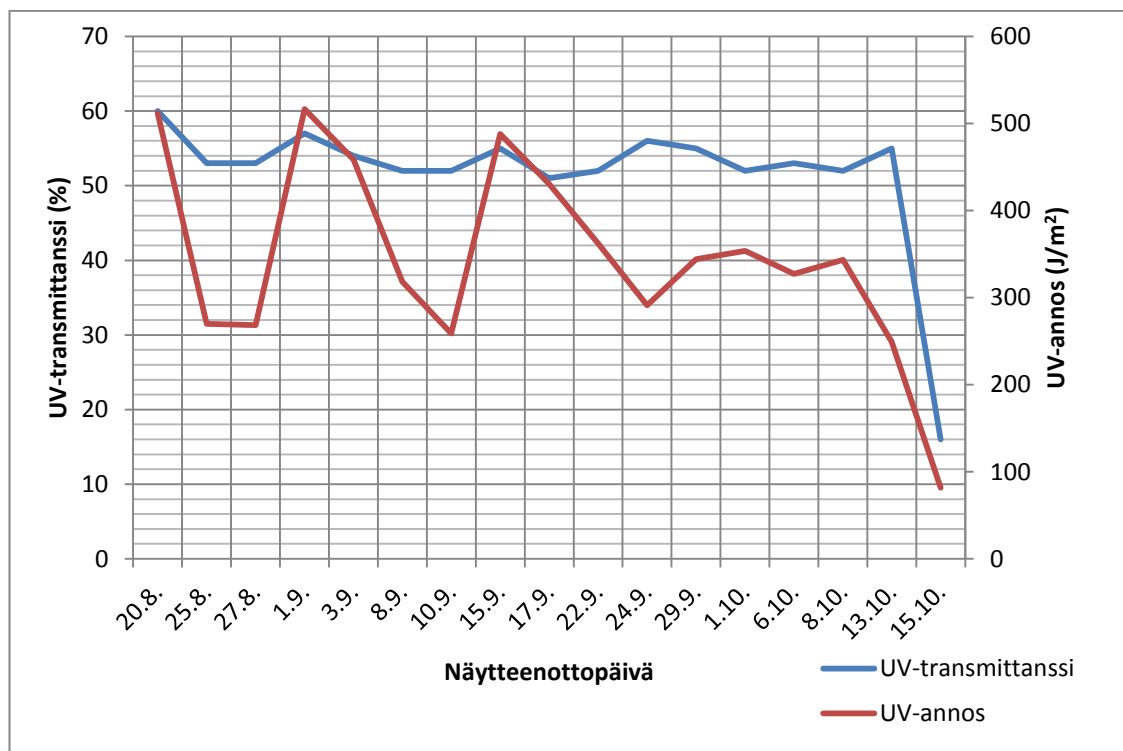
Koeajossa käytetyt UV-annokset määritettiin laskennallisesti UV-intensiteetin ja näytteenottohetken virtaaman avulla.

5 TULOKSET

Tässä luvussa on esitetty Turun merialueen hygieenisen tilan tietoja ja puhdistamalla tehdyn UV-pilotoinnin tulokset. UV-pilotoinnin tuloksissa esitetään lähtevän jäteveden UV-transmittanssi ja koeajon UV-annokset sekä UV-käsittelyn aiheuttamat suolistope- räisten enterokokkien, *E. coli* -bakteerien, F-spesifisten ja somaattisten kolifagien sekä *Clostridium perfringensin* itiöiden vähenemät.

5.1 Lähtevän jäteveden UV-transmittanssi ja UV-annokset

Näytteenottojen aikana lähtevän jäteveden UV-transmittanssi (UV-aallonpituutena 254 nm) oli normaalitilanteissa 51–60 %. OVK:n ollessa käynnissä veden UV-transmittanssi laski arvoon 16 % desinfioitavan veden laadun huonontuessa (kuva 11 ja liite 6).



Kuva 13. Lähtevän jäteveden UV-transmittanssi (%) ja pilotoinnin aikana käytetyt laskennalliset UV-annokset (J/m²).

Näytteenottojen aikana virtaamat UV-laitteiston läpi olivat 7,2–14,0 m³/h ja UV-annokset 81,7–516,4 J/m² (kuva 11 ja liite 6). UV-annos oli pilotoinnin alussa korkeimmillaan (511,9 J/m²), kun UV-intensiteetti oli korkeimmillaan (50,9 W/m²). UV-

intensiteetti laski pilotoinnin aikana, ja UV-annos oli koejakson puolivälin jälkeen alle 400 J/m².

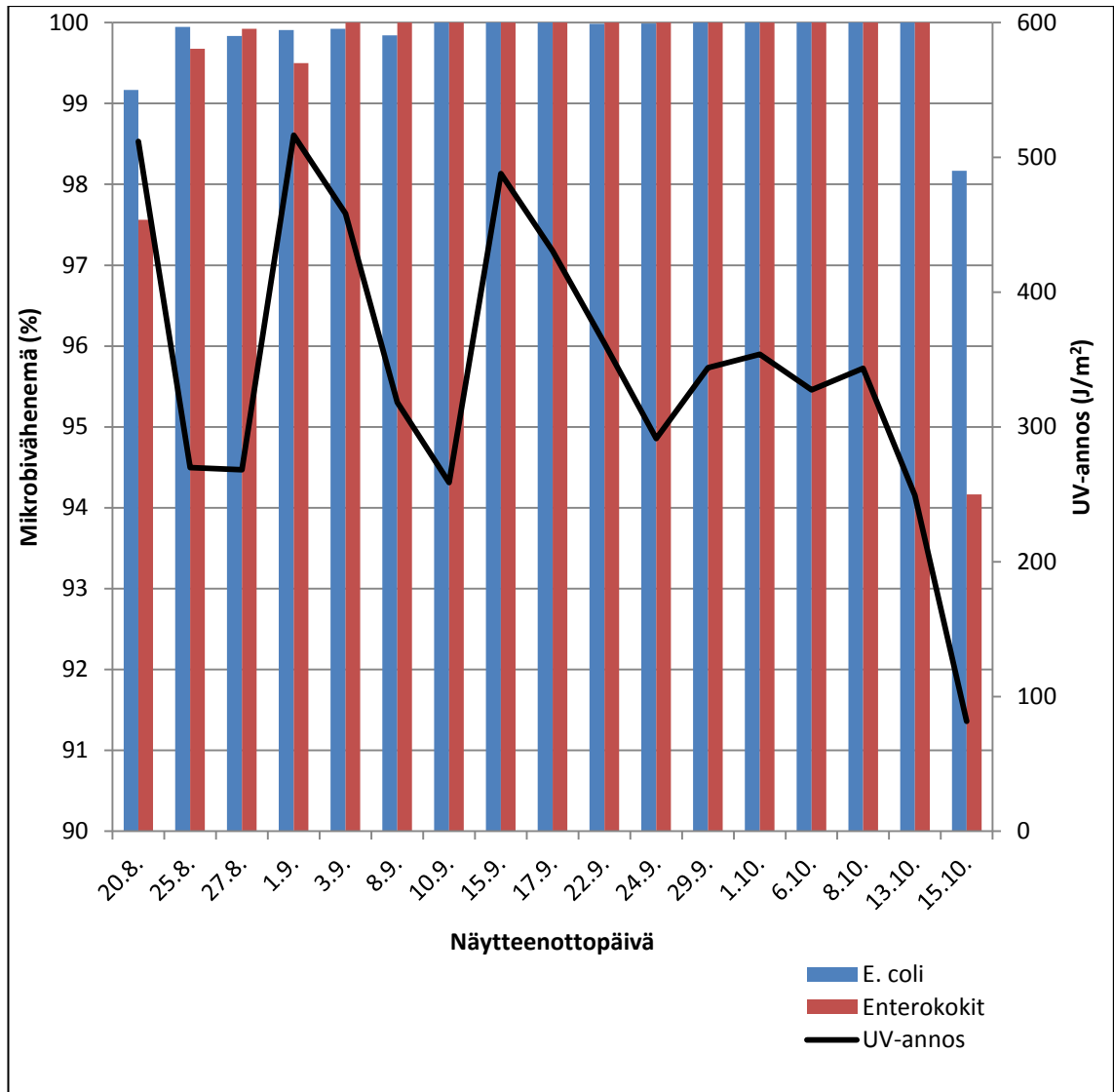
Koeajon viimeisenä päivänä (15.10.2014) UV-annos oli minimissään (81,7 J/m²) OVK:n huonontaman vedenlaadun vuoksi. Normaalitilanteessa, jolloin OVK ei ollut käytössä, UV-annos oli alhaisimmillaan 249,2 J/m².

5.2 Enterokokkien ja *E. colien* vähenemät

Koeajojen aikana suolistoperäisten enterokokkien ja *E. colien* vähenemät jätevedestä olivat vähintään 1-logaritmisia (> 90 %) (liite 6 ja kuva 12) ja suurimman osan 2-3-logaritmisia ja jopa 100 %.

UV-reaktoriin tulevien enterokokkien määrä oli normaalitilanteissa 200 - 6 500 pmy/100 ml ja OVK:n ollessa käynnissä 4 100 - > 24 000 pmy/100 ml. UV-käsittelyn jälkeen enterokokkien määrä oli normaalitilanteissa 0 - < 100 pmy/100 ml ja OVK:n ollessa käynnissä < 100 - 1 400 pmy/100 ml. Enterokokkien vähenemät olivat normaalitilanteissa 99,5–100 % ja OVK:n ollessa käynnissä 94,2–97,6 %.

UV-reaktoriin tulevien *E. coli* -bakteerien määrä oli normaalitilanteissa 1 800–66 000 pmy/100 ml ja OVK:n ollessa käynnissä 12 000 - > 240 000 pmy/100 ml. UV-käsittelyn jälkeen enterokokkien määrä oli normaalitilanteissa 0 - 110 pmy/100 ml ja OVK:n ollessa käynnissä 100 - 4 400 pmy/100 ml. *E. coli* -bakteerien vähenemät olivat normaalitilanteissa 99,8 - 100 % ja OVK:n ollessa käynnissä 98,2 - 99,2 %.



Kuva 14. *E. colien* ja enterokokkien vähenemät (%) ja UV-annokset (J/m²).

5.3 Kolifagien vähenemät

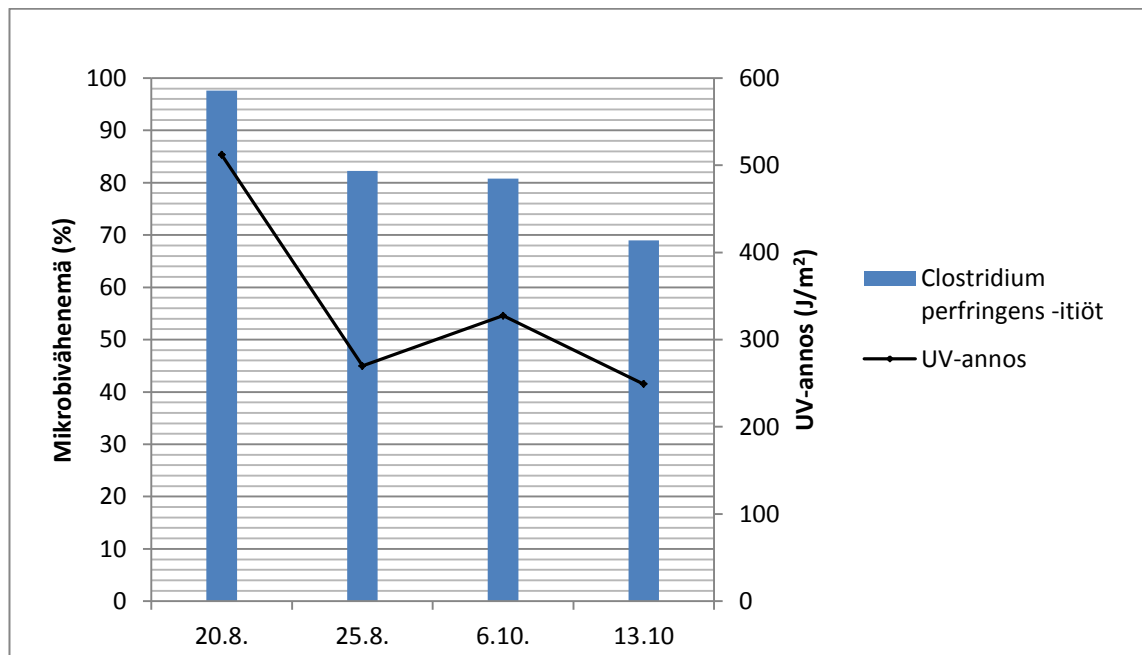
F-spesifisten ja somaattisten kolifagien pitoisuudet määritettiin lähtevästä jätevedestä koeajon alku- sekä loppuvaiheessa. Kumpaakaan kolifagia ei suurimmassa osassa näytteitä todettu UV-reaktorin jälkeisestä vedestä (taulukko 19). Näytteenottojen aikana UV-annos oli 249,2–511,9 J/m² ja UV-transmittanssi oli 53–60 % (liite 6).

Taulukko 19. F-spesifisten ja somaattisten kolifagien mitatut pitoisuudet (pfu/100 ml) lähtevästä jätevedestä pilotoinnin aikana ennen UV-desinfiointia ja sen jälkeen.

Pvm	UV-annos (J/m ²)	Kolifagit (pfu/100 ml)					
		F-spesifiset			somaattiset		
		Ennen	Jälkeen	Vähennemä (%)	Ennen	Jälkeen	Vähennemä (%)
20.8.	511,9	774	0	> 99,9	934	0	> 99,9
25.8.	269,8	217	0	> 99,5	988	0	> 99,9
6.10.	327,4	76	0	> 98,7	1320	0	> 99,9
13.10.	249,2	211	1	99,5	2200	0	> 99,9

5.4 Clostridium perfringens –itiöiden vähennemät

Clostridium perfringens –itiöiden pitoisuudet määritettiin lähtevästä jätevedestä UV-pilotoinnin alku- sekä loppuvaiheessa. Itiöiden vähennemät olivat 69,0–97,6 % UV-annosten ollessa 249,2–511,9 J/m² ja jäteveden UV-transmittanssin ollessa 53–60 % (kuva 13). UV-reaktoriin tulevien *C. perfringens* –itiöiden määrä oli 290-580 pmy/100 ml. UV-käsittelyn jälkeen itiöiden määrä oli 14–90 pmy/100 ml.



Kuva 15. Clostridium perfringens –itiöiden vähennemät ja laskennalliset UV-annokset.

5.5 OVK:n vaikutus puhdistustuloksiin

Ohitusvesien käsittely-yksikkö oli käytössä kahtena näytteenottopäivänä näytteenottojen aikana: 20.8.2014 suuren tilapäisen tulovirtaaman vuoksi automaattisesti ja 15.10.2014 UV-laitteiston toiminnan testaamista varten (taulukko 20).

Taulukko 20. Ohitusvesien käsittely-yksikköön ohjatut ja esiselkeytyksen ohi ohjatut vesimäärät näytteenottopäivinä pilotoinnin aikana.

Pvm	Tuleva jätevesi, virtaama yhteensä (m ³ /d)	Virtaama esiselkeytyksen ohi (m ³ /d)	Ohitus esiselk. vesi, OVK-käsitelty vesi (m ³ /d)	OVK:n ohituspoistokanaavaan, virtaama (m ³ /d)	OVK ollut käynnissä (klo)
20.8.	160 774	35 679	10 050	266	7:35–11:15
15.10.	66 197	27 181	3 805	135	8:10–9:37

OVK:n käyttö huononsi lähtevän jäteveden UV-transmittanssia 15.10.2014, jolloin enterokokkien vähenemä (94,2 %) ja *E. coli* -bakteerien vähenemä (98,2 %) olivat pienempiä kuin normaalitilanteissa, jolloin ne olivat 99,5-100 % ja 99,8-100 % vastaavasti (liite 6). OVK:n käyttö ei heikentänyt jäteveden UV-transmittanssia ensimmäisenä näytteenottopäivänä 20.8.2014, jolloin se oli 60 %.

6 TULOSTEN TARKASTELO

Tämän työn perusteella UV-käsittely parantaisi Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon lähtevän jäteveden hygieenistä laatua ja jäteveden purkupisteen hygieenistä tilaa. UV-käsittely soveltuu laadultaan puhdistamon käsitellyn jäteveden desinfiointimenetelmäksi.

Koeajo suoritettiin lämpimänä kautena, loppukesän ja syksyn aikana, jolloin mikrobien, kuten kokonaiskoliformien, fekaalisten koliformien ja *E. colien* määrä puhdistamolle tulevassa jätevedessä on tavallisesti suurempi kuin kylmempinä kausina (Leino 2008).

UV-pilotoinnissa käytettiin UV-annoksia 81,7–516,4 J/m². Annokset vastaavat kirjallisuuden tutkimusten jäteveden desinfiointiin käytettyjä UV-annoksia (Emerick et al. 2009, Wang et al. 2006, Hijnen et Medema 2006, Gehr et al. 2003, Emerick et al. 2000). UV-annoksia vaihdeltiin säätelemällä koelaitteiston läpi kulkevaa virtaamaa.

Pilotoinnin aikana normaalitilanteissa lähtevän jäteveden UV-transmittanssiarvot olivat 51–60 %, ja ne vastaavat jälkikäsitellylle arvioitua jäteveden UV-transmittanssia (Rajala et al. 2003). UV-käsittelyä pidetään käytännöllisenä, kun UV-transmittanssi on vähintään 50 % (EPA Wastewater Technology Fact Sheet). OVK:n ollessa käynnissä pilotoinnin viimeisenä päivänä jäteveden UV-transmittanssi laski arvoon 16 %, jolloin UV-desinfiointi ei ole yhtä tehokasta kuin normaalitilanteissa.

UV-pilotoinnissa käsitellyn jäteveden hygieeninen taso ja mikrobivähenemät ovat uimaveden laatuvaatimusten mukaan riittäviä. Enterokokkien vähenemät olivat normaalitilanteissa 99,5–100 % ja OVK:n ollessa käytössä 94,2–97,6 %. *E. colien* vähenemät olivat normaalitilanteissa 99,8–100 % ja OVK:n ollessa käytössä 98,2–99,2 %. Somaattisten kolifagien vähenemät olivat > 99,9 % ja F-spesifisten kolifagien 99,5 - >99,9 %. *Clostridium perfringens* -itiöiden vähenemät olivat 69,0-97,6 %, joten niiden UV-sietokyky oli parempi kuin muilla pilotoinnissa tarkastelluilla mikrobeilla. Vähenemät saavutettiin normaalitilanteissa laskennallisilla UV-annoksilla, jotka olivat 249,2 J/m² tai suurempia.

OVK:n käyttö heikensi pilotoinnin viimeisenä päivänä 15.10. jäteveden UV-transmittanssia ja mikrobien vähenemää, minkä vuoksi UV-käsitellyn jäteveden puhdistustulokset eivät olleet uimaveden laatusuosituksen mukaisia.

Jäteveden virtaamaa ei pystytty nostamaan suuremmaksi kuin 14 m³/h, joten UV-annos ei laskenut viimeistä näytteenottopäivää (OVK käynnissä) lukuun ottamatta alle 249 J/m², minkä vuoksi enterokokkien tai *E. colien* vähenemässä ei ole hajontaa. Kolifagien vähenemät olivat merkittäviä UV-pilotoinnin aikana käytetyillä UV-

annoksilla. Sen sijaan UV-sietokyvyltään muita tarkasteltuja mikrobeita kestävämpien *C. perfringens* -itiöiden vähenemään saatiin hajontaa.

Bourrouet et al. (2001) tutkivat fekaalisten bakteerien ja bakteriofagien inaktiivaatiota täyden mittakaavan UV-desinfiointijärjestelmässä. UV-annokset olivat 100–400 J/m² ja 200–800 J/m². Alhaisemmilla UV-annoksilla saavutettiin 1,15–1,25-logaritminen vähenemä (92,9–94,4 %) kaikissa mikrobeissa. Suuremmilla UV-annoksilla kokonaiskoliformien vähenemä oli 3,1-logaritminen (99,9 %) ja fekaalisten koliformien 2,8-logaritminen (99,8 %). Somaattisten kolifagien vähenemä suuremmilla UV-annoksilla oli 2,6-logaritminen (99,7 %). Kokeen annoksilla 200–800 J/m² puhdistustulokset olivat yhtä suuria kuin Kakolanmäen UV-koeajojen puhdistustulokset annoksilla, jotka olivat 81,7–516,4 J/m².

Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy testasi kesällä 2007 jäteveden UV-käsittelyä 3 kuukauden ajan (Wedecon LBX90EWL-laitteisto) hieman suuremmilla UV-annoksilla (644–930 J/m²) kuin Kakolanmäen koeajoissa (81,7–516,4 J/m²). Desinfioitavan jäteveden UV-läpäisevyys oli 41,4–59,0 %, joten UV-läpäisevyys oli samaa luokkaa kuin Kakolanmäen UV-koeajojen aikana normaalitilanteissa (51–60 %). Jyväskylän mikrobimäärityksissä fekaalisten koliformien ja enterokokkien vähenemä oli 95–99 %. Testeissä käsitellyn jäteveden fekaalisten koliformien määrä oli 7–400 pmy/100 ml ja enterokokkien määrä 3–260 pmy/100 ml. (Tuominen 2010)

UV-lamppujen suojausputkien pinnalle ei pilotoinnin jälkeen ollut kertynyt likaa tai saostumia, vaikka laitteistossa ei ollut automaattista pyyhinjärjestelmää, joten lähtevän jäteveden saostumia aiheuttavat yhdisteet eivät heikentäneet tuloksia.

UV-pilotoinnin perusteella täysimittainen UV-desinfiointilaitteisto Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla luultavasti parantaisi puhdistamon purkupisteen veden hygieenistä laatua. Turun merialueen vedenlaatuun vaikuttaa voimakkaasti myös Aurajoen ja Raisiojoen hajakuormitus.

6.1 UV-desinfioinnin toteutus

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla on tilavaraus UV-käsittelylle lähtevän veden betonikanavassa. Mahdollinen UV-desinfiointi toteutettaisiin kanavaan asennettavalla UV-desinfiointilaitteistolla. Lähtevän veden kanava on kaksilinjainen, ja yhden kanavan leveys on noin 1,5 m ja syvyys 2,0 m.

UV-desinfiointilaitteiston puhdistusvaatimuksina käytettäisiin Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2006/7/EY antamia raja-arvoja suolistoperäisille enterokokeille ja *Escherichia coli* -bakteereille. Raja-arvoina käytettäisiin rannikon vesien hyvää laatua (taulukko 4).

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon lähtevän jäteveden UV-desinfiointilaitteiston mitoitusparametreina voidaan käyttää esimerkiksi taulukon 21 mukaisia arvoja.

Taulukko 21. *Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla mahdollisesti toteutettavan UV-desinfiointin mitoituksessa käytettäviä esimerkkiarvoja.*

Mitoitusparametri	Yksikkö	Arvo
Mitoitusvirtaama, jonka perusteella desinfiointituloksen takuu annetaan	m ³ /h	5 000
UV-laitteiston hydraulinen maksimivirtaama (suuremmilla virtaamilla moduulit nostetaan kanavasta ylös)	m ³ /h	10 000
UV-transmittanssi	%	50–60
TSS	mg/l	5

UV-lamput voidaan asentaa kanavaan pystysuoraan, vaakasuoraan tai 45° kulmaan veden virtaussuunnan suhteen. UV-desinfiointilaitteiston pituus olisi noin 7,5 m (Koskela 2014). Taulukossa 22 on esitetty UV-desinfiointijärjestelmään tarvittavat osat.

Taulukko 22. *UV-desinfiointijärjestelmän osat.*

Yksikkö	Käyttötarkoitus
UV-lamppuyksiköt	Desinfiointi
Sähkö- ja ohjausyksiköt	Laitteiston ohjaaminen ja säätö
Pinnankorkeuden säätöjärjestelmä	UV-lamput pysyvät veden pinnan alla virtaamavaihteluista riippumatta
UV-säteilyn mittausanturit	Halutun UV-minimiannoksen säätely
UV-lamppujen suojaputkien automaattinen puhdistusyksikkö	Puhdistus halutuin aikavälein. Mekaaninen pesu tai mekaanisen ja kemiallisen pesun yhdistelmä
Nostokisko/-järjestelmä lamppuyksiköille	Laitteiston nostaminen esimerkiksi huoltojen ajaksi
Muut apulaitteet, kuten UV-säteilyn tai veden UV-transmittanssin mittauslaitteet	Halutun UV-minimiannoksen säätely

Puhdistamon automaatioon pitäisi voida liittää esimerkiksi seuraavia tietoja UV-desinfiointin paikallisohjauskeskukselta:

- laitteiston tilan tiedot
- lamppujen tilan tiedot
- hälytystiedot
- UV-intensiteetin mittaustiedot
- virtaamatiedot

Ohjauskeskusten ja laitteiden tiiveysluokat valitaan tilaluokan mukaisesti erikseen prosessitilalle (IP54) ja tilalle, jossa voi olla syövyttäviä aineita ilmassa (IP67).

Mahdollisesti toteutettavan UV-desinfiointiyksikön takuuajojen tarkoituksena on varmistaa, että prosessi täyttää puhdistustavoitteet ja täyttää annetut takuuarvot (esimerkkejä taulukossa 23). Takuuajon aikana voidaan ottaa esimerkiksi 24 tunnin koomanäytteitä UV-laitteistolle tulevasta jätevedestä sekä siitä lähtevästä jätevedestä.

Taulukko 23. *Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla mahdollisesti toteutettavan UV-desinfioinnin takuuarvoesimerkkejä.*

Takuuparametri	Yksikkö	Takuuarvo (mikrobien kohdalla pitoisuus UV-käsittelyn jälkeen)
Suolistoperäiset enterokokit	cfu/100 ml	200*
<i>Escherichia coli</i>	cfu/100 ml	500*
Lamppujen vaihtoväli	h	14 000
Pyyhintälaitteiston pyyhinrenkaiden vaihtoväli	vuotta	3
Keskimääräinen UV-annos	J/m ²	500
UV-minimiannos (lampun käyttöään loppuvaiheessa)	J/m ²	300

* EU-direktiivi 2006/7/EY, rannikon vesien hyvä laatu

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon hiekkasuodattimien jälkeisessä lähtevän veden kanavan UV-tilavarauksessa on huomioitu 30 cm hydraulinen painehäviövara virtaamaohjainta varten ja pinnankorkeuden säädintä varten 5-10 cm, jotta jätevesi virtaisi vielä painovoiman avulla mereen (Leino 2008). Hydraulista häviötä aiheuttavat kanavaan asennettavat UV-laitteet ja pinnankorkeuden säätöratkaisut sekä pinnankorkeuden tasaus. Veden pinnankorkeuden säätö toteutettaisiin kanavaan asennettavalla liikkuvalla padolla, joka liikkuisi pystysuunnassa pinnankorkeusanturien tietojen mukaisesti. Jäteveden virtaaman tasaisuuden varmistamiseksi kanavaan asennettaisiin esimerkiksi säleikkö tai rei'itetty levy, jotta laitteiston UV-annos jakautuisi mahdollisimman tasaisesti.

UV-desinfioinnissa olisi käytettävä automaattisella tehonsäädöllä varustettuja UV-lamppuja. Elohopealamppuissa huomioon pitäisi ottaa ympäristöystävällisyys, esimerkiksi jos saatavilla on esimerkiksi vähemmän elohopeaa sisältäviä UV-elohopealamppuja, niin niiden valinta olisi suositeltavaa elohopean myrkyllisyyden vuoksi.

UV-anturit olisi hyvä sijoittaa tasaisesti UV-moduulien eri osiin, esimerkiksi jokaiselle riville vähintään yksi anturi, jotta laitteiston UV-intensiteetistä saadaan todennukaista tietoa. Lisäksi UV-antureilla pitäisi olla automaattinen puhdistus esimerkiksi integroituna UV-lamppujen suojauputkien pyyhintäjärjestelmään.

Suomessa on viime vuosina joillakin jätevedenpuhdistamoilla otettu käyttöön jäteveden UV-desinfointi, muun muassa taulukossa 24 esitetyissä käsittelykohteissa.

Taulukko 24. Suomessa käyttöönotettuja jäteveden UV-desinfiointilaitoksia (Koskela 2014).

Kohde	Kapasiteetti (m ³ /h)	Käyttöönottovuosi
Jämsän Vesi liikelaitos	750 (hydr. max. 1200)	2014
Iisalmen JVP	700 (hydr. max. 850)	2013
Levi Vesihuolto	200 (hydr. max. 250)	2008
Kyyjärven kunta	40	2007
Suomenniemen kunta	20	2007

6.2 Energiankulutus

UV-laitteistossa energiaa kuluttavat eniten UV-lamput (taulukko 25). Energiaa kuluu UV-lamppujen ja kuristinkorttien lisäksi myös datasähköön (PLC) sekä automaattisiin nostimiin.

Taulukko 25. UV-laitteiston energiankulutus, kun UV-lamppujen teho on 100 %.

Kohde	Lukumäärä	Energiankulutus (kW/kpl)	Energiankulutus yhteensä (kW)
UV-lamput (100 % teho)	120	0,6	72
Kuristinkortit	120	0,06	7,2
Datasähkö (PLC) ja automaattiset nostimet	1	4,8	4,8
YHTEENSÄ			84

Koko UV-laitteiston sähkönkulutus vuodessa on 192–736 MWh käyttöasteesta ja tehonsäädöstä riippuen (taulukko 26).

Taulukko 26. UV-laitteiston vuosittainen energiankulutus eri käyttöajoilla ja käyttötehoilla.

120 kpl 0,6 kW lamppuja + kuristinkortit 0,06 kW/kpl = 0,66 kW			
Käyttöaika	Käyttöteho (%)	Lamppujen ja kuristinkorttien sähkönkulutus (kWh)	Koko laitteiston sähkönkulutus yhteensä (kWh)
24 h/vrk, 365 d	100	693 792	735 840
24 h/vrk, 1.5.–30.10.	100	342 144	362 880
24 h/vrk, 1.5.–30.10.	75	256 608	277 344
24 h/vrk, 1.5.–30.10.	50	171 072	191 808

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tavanomaisten jätevedenpuhdistusprosessien lisäksi myös jäteveden hygieeniseen laatuun on alettu kiinnittää huomiota terveys- ja epidemiariskien vuoksi. UV-käsittely on todettu turvalliseksi menetelmäksi desinfioida jätevesiä, sillä sen käytössä ei muodostu merkittäviä määriä haitallisia sivutuotteita, eikä käsiteltävään jätevetteen jää kemikaalijäämiä.

Tässä diplomityössä esiteltiin jäteveden eri desinfiointimenetelmiä kirjallisuuden avulla ja testattiin kokeellisesti UV-desinfiointin tehokkuutta Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistettuun jäteveteen. Työn tarkoituksena oli määrittää suolistoperäisten enterokokkien, *Escherichia coli* –bakteerien, *Clostridium perfringens* –itiöiden sekä somaattisten ja F-spesifisten kolifagien pitoisuudet puhdistetusta jätevedestä lähtevän veden kanavasta ennen UV-koelaitteistoa ja sen jälkeen. Pilotoinnin aikana tarkasteltiin myös ohitusvesien käsittely-yksikön käytön vaikutusta UV-desinfiointin puhdistustuloksiin.

UV-koeajon perusteella Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon lähtevä jätevesi soveltuu UV-desinfiotavaksi normaalitilanteissa ja tuottaa hygieeniseltä laadultaan riittävän puhdasta jätevettä. Normaalitilanteissa UV-desinfiointi vähensi mikrobien määrää jätevedestä siten, että käsitelty jätevesi täytti uimaveden laatuvaatimukset. Ohitusvesien käsittely-yksikön toiminnan aikana lähtevän jäteveden heikko laatu ja huono UV-transmittanssi heikentävät UV-desinfiointin tehokkuutta. Normaalitilanteissa lähtevän jäteveden UV-transmittanssi oli 51–57 % (254 nm), mutta OVK:n käytön aikana se laskee jopa arvoon 16 %. UV-pilotoinnin aikana käytettiin laskennallisia UV-annoksia 81,7–516,4 J/m².

Suolistoperäisten enterokokkien ja *E. colien* vähenemä UV-käsittelyssä oli merkittävää. Normaalitilanteissa suolistoperäisten enterokokkien vähenemä oli 99,5–100 % ja *E. coli* –bakteerien 99,8–100 %. OVK:n käytön aikana suolistoperäisten enterokokkien puhdistustulos oli 94,2–97,6 % ja *E. colien* 98,2–99,2 %.

Somaattisia kolifageja ei todettu UV-käsittelyn jälkeisestä vedestä. Jäteveden somaattisten kolifagien määrä ennen UV-reaktoria oli 934–2200 pfu/100 ml.

F-spesifisiä kolifageja ei todettu UV-käsittelyn jälkeisestä vedestä viimeistä näytteenottoa lukuun ottamatta, jolloin OVK oli käynnissä ja jäteveden UV-transmittanssi oli alhainen (16 %). F-spesifisten kolifagien määrä ennen reaktoria oli näytteenottojen aikana 76–774 pfu/100 ml.

Tutkituista mikrobeista UV-käsittely vähensi huonoiten *Clostridium perfringens* –itiöitä, joilla on hyvä UV-sietokyky. *C. perfringens* –itiöiden vähenemä koeajojen ai-

kana oli 69,0-97,6 %. Itiöiden määrä ennen UV-reaktoria oli 130–580 pmy/100 ml, ja reaktorin jälkeen itiöiden lukumäärä oli 14–90 pmy/100 ml.

UV-desinfiointin energiankulutus on suuri. Toteutettavassa täyden mittakaavan UV-desinfiointiyksikössä vuosittainen energiankulutus olisi noin 192–736 MWh riippuen UV-lamppujen tehonsäädöstä ja laitteiston vuosittaisesta käyttöasteesta.

UV-desinfiointilla olisi todennäköisesti positiivinen vaikutus Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon purkupaikan hygieeniseen tilaan, mutta laajemmalla alueella merkittävä kuormittaja on myös Aurajoen hajakuormitus.

LÄHTEET

Azzellino, A., Antonelli, M., Canziani, R., Malpei, F., Marinetti, M. & Nurizzo, C. 2011. Multivariate modelling of disinfection kinetics: A comparison among three different disinfectants. *Desalination and Water Treatment* 29, 1-3. pp. 128-139.

Baldry, M. 1983. The bactericidal, fungicidal and sporicidal properties of hydrogen peroxide and peracetic acid. *Journal of Applied Bacteriology* 54, 3, pp. 417-423.

Bell, K. & da Silva, A. 2013. Innovations in wastewater disinfection technology. [Viitattu 20.10.2014] Saatavissa:

http://info.ncsafewater.org/Shared%20Documents/Web%20Site%20Documents/Annual%20Conference/AC13_TechnicalProgram/Wastewater/WW_Tues_PM_02.45_Bell_PAPER.pdf

Betz, H., Schumann, U. & Laroche, P. 2009. *Lightning: Principles, instruments and applications, Review of modern lightning research*. Dordrecht, Netherlands, Springer Science + Business Media. 641 p.

Brown, S., Cornforth, D. & Mideo, N. 2012. Evolution of virulence in opportunistic pathogens: generalism, plasticity, and control. *Trends in Microbiology* 20, 7, pp. 336-342.

California Water Technologies. Use of iron with UV disinfection. Technical Bulletin. [Viitattu 30.10.2014] Saatavissa:

<http://www.californiawatertechnologies.com/pdf/70200.pdf>

Caretti, C. & Lubello, C. 2003. Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study. *Water Research* 37, 10, pp. 2365-2371.

Chevremont, A., Farnet, A., Coulomb, B. & Boudenne, J. 2012. Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters. *Science of the Total Environment* 426, pp. 304-310.

Chevremont, A., Boudenne, J., Coulomb, B. & Farnet, A. 2013. Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil. *Water Research* 47, 6, pp. 1971-1982.

Chen, R., Craik, S. & Bolton, J. 2009. Comparison of the action spectra and relative DNA absorbance spectra of microorganisms: Information important for the determination of germicidal fluence (UV dose) in an ultraviolet disinfection of water. *Water Research* 43, 20 pp. 5087-5096.

- Chick, H. 1908. An investigation of the laws of disinfection. *Journal of Hygiene* 8, 1, pp. 92-158.
- Close, J. Ip, J. & Lam, K. 2006. Water recycling with PV-powered UV-LED disinfection. *Renewable Energy* 31, 11, pp. 1657-1664.
- Cooper, C. & Straube, D. 1979. Reverse osmosis reduces viral count in the influent stream. *Water and Sewage Works* R78, pp. 162-167.
- Darakas, E., Koumoulidou, T. & Lazaridou, D. 2009. Fecal indicator bacteria declines via a dilution of wastewater in seawater. *Desalination* 248, 1-3, pp. 1008-1015.
- De Lange, H., Noordoven, W., Murk, A., Lürling, M. & Peeters, E. 2006. Behavioural responses of *Gammarus pulex* (Crustacea, Amphipoda) to low concentrations of pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology* 78, 3, pp. 209-216.
- Dell'Erba, A., Falsanisi, D. Liberti, L., Notarnicola, M. & Santoro, D. 2007. Disinfection by-products formation during wastewater disinfection with peracetic acid. *Desalination* 215, 1-3, pp. 177-186.
- Direktiivi 2006/7/EY. 15.2.2006. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uimaveden laadun hallinnasta ja direktiivin 76/160/ETY kumoamisesta.
- Dutka, B., El Shaarawi, A., Martins, M. & Sanchez, P. 1987. North and South American studies on the potential of coliphage as a water quality indicator. *Water Research* 21, 9, pp. 1127-1134.
- Emerick, R., Loge, F., Thompson, D. & Darby, J. 1999. Factors influencing ultraviolet disinfection performance, part II. *Water Environment Research* 71, 6, pp. 1178-1187.
- Emerick, R., Loge, F., Ginn, T. & Darby, J. 2000. Modeling the inactivation of particle-associated coliform bacteria. *Water Environment Research* 72, 4, pp. 432-438.
- EPA Wastewater technology fact sheet – Disinfection for small systems. [Viitattu 30.10.2014] Saatavissa:
http://water.epa.gov/infrastructure/septic/upload/disinfection_small.pdf
- EPA 430-F-10-025. 2010. UV radiation. Air and radiation. USA 2010, United States Environmental Protection Agency. 2 p.
- EPA 625-1-86-021. 1986. Municipal wastewater disinfection. Design manual. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA. 247 p.

EPA 815-B-06-002. 2006. Initial distribution system evaluation guidance manual – For the final stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule – Appendix A. Washington D.C., USA 2006, United States Environmental Protection Agency. 12 p.

EPA 815-R-06-007. 2006. Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Washington D.C., USA 2006, United States Environmental Protection Agency. 436 p.

EPA 821-R-01-029. 2001. Method 1602: Male-specific (F^+) and somatic coliphage in water by single agar layer (SAL) procedure. Washington D.C., USA 2001, United States Environmental Protection Agency. 38 p.

EPA 832-F-99-063. 1999. Wastewater technology fact sheet, ozone disinfection. Washington D.C., USA 1999, United States Environmental Protection Agency. 7 p.

Etelä-Suomen AVI 167/2014/2. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Turku.

ESR, Institute of Environmental Science and Research Limited. 2001. Pathogen data sheets. (viitattu 11.10.2014) Saatavissa: <http://www.foodsafety.govt.nz/science-risk/hazard-data-sheets/pathogen-data-sheets.htm>

Farahbakhsh, K. & Smith, D. 2004. Removal of coliphages in secondary effluent by microfiltration – mechanism of removal and impact of operating parameters. *Water Research* 38, 3, pp. 585-592.

Feachem, R., Bradley, D., Garelick, H. & Mara, D. 1983. Sanitation and disease: Health aspects of excreta and wastewater management. New York, USA, John Wiley & Sons. 501 p.

Gates, F. 1930. A study of the bactericidal action of ultraviolet light: III. The absorption of ultraviolet light by bacteria. *The Journal of General Physiology* 14, 1, pp. 31-42.

Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P. & Payment, P. 2003. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research* 37, 19, pp. 4573-4586.

Gehr, R., Chen, D. & Moreau M. 2009. Performic acid (PFA): tests on an advanced primary effluent show promising disinfection performance. *Water Science & Technology* 59, 1, pp 89-96.

Gómez, M., de la Rúa, A., Garralón, G., Plaza, F., Hontoria, E. & Gómez, M. A. 2006. Urban wastewater disinfection by filtration technologies. *Desalination* 190, 1-3, pp. 16-28.

Hassen, A., Mahrouk, M., Ouzari, H., Cherif, M., Boudabous, A. & Damelin-court, J. 2000. UV disinfection of treated wastewater in a large-scale pilot plant and inactivation of selected bacteria in a laboratory UV device. *Bioresource Technology* 74, 2, pp. 141-150.

HELCOM recommendation 28E/5. 2007. Municipal wastewater treatment. Helsinki 2007, Helsinki Commission. 7 p.

Helsinki Convention. 2014. Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area, 1992. [Viitattu 29.7.2014] Saatavissa: http://www.helcom.fi/PublishingImages/about-us/convention/Helsinki%20Convention_July%202014.pdf

Hijnen, W. 2009. Elimination of micro-organisms in water treatment. Dissertation. Nieuwegein, The Netherlands. University Utrecht. 301 p.

Hijnen, W. & Medema, G. 2010. Elimination of Micro-organisms by Water Treatment Processes. London, UK, KWR Watercycle Research Institute. 160 p.

Hokajärvi, A., Pitkänen, T., Torvinen, E. & Miettinen, I. 2008. Suolistoperäisten taudinaiheuttajamikrobien esiintyminen luonnonvesissä. *Kansanterveyslaitoksen julkaisuja B 1/2008*. Kansanterveyslaitos, Ympäristöterveyden osasto, Ympäristömikrobiologian laboratorio, Helsinki. 77 s.

Hu, J., Ong, S., Song, L., Feng, Y., Liu, W., Tan, T., Lee, Y. & Ng, W. 2003. Removal of MS2 bacteriophage using membrane technologies. *Water Science & Technology* 47, 12, pp. 163-168.

Hyypiä, T., Ahola, T. & Söderlund-Venermo, M. 2010. Virusten lisääntyminen. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1*. Vol. 1. Helsinki, Duodecim, pp. 460–469.

Hänninen, M., Hörman, A., Rimhanen-Finne, R., Vahtera, H., Malmberg, S., Herve, S. & Lahti, K. 2005. Monitoring of *Cryptosporidium* and *Giardia* in the Vantaa river basin, southern Finland. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 208, 3, pp. 163-171.

Höfl, C., Sigl, G., Specht, O., Wurdack, I. & Wabner, D. 1997. Oxidative degradation of AOX and COD by different advanced oxidation processes: A comparative study with two samples of pharmaceutical wastewater. *Water Science & Technology* 35, 4, pp. 254-264.

Ikäheimonen, T., Salomaa, S., Pöllänen, R., Weltner, A., Pukkila, O., Wendla, P., Sandberg, J., Nyberg, H., Marttila, O., Lehtinen, J. & Karvinen, H. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja. Helsinki, Säteilyturvakeskus. 197 p.

Itämeriportaali, Itämerisanakirja. Päivitetty 12.5.2010. [Viitattu 17.6.2014] Saatavissa: http://www.itameriportaali.fi/fi/tietoa/sanakirja/fi_FI/helcom/

Jaakola, S., Lyytikäinen O., Rimhanen-Finne R., Salmenlinna, S., Savolainen-Kopra, C., Pirhonen, J., Vuopio J., Jalava, J., Toropainen, M., Nohynek, H., Toikkanen, S., Löflund J-E., Kuusi, M. & Salminen M. 2014. Tartuntataudit Suomessa 2013. Helsinki, Terveysten ja hyvinvoinnin laitos (THL). 73 p.

Jalangelo, J., Loughran, P., Petrik, B., Simpson, D. & McIlroy, C. 2003. Removal of enteric viruses and selected microbial indicators by UV irradiation of secondary effluent. *Water Science and Technology* 47, 9, pp. 193-198.

Jimenez, B. 2007. Helminths (worms) eggs control in wastewater and sludge. International Symposium on New Directions in Urban Water Management, Paris, France 12.-14.9-2007. Paris, UNESCO. 8 p.

Johnson, D., Enriquez, C., Pepper, I., Davis, T., Gerba, C. & Rose, J. 1997. Survival of *Giardia*, *Cryptosporidium*, poliovirus and *Salmonella* in marine waters. *Water Science and Technology* 35, 11-12, pp. 261-268.

Karim, S. 2001. Fouling of UV lamp sleeves: exploring inconsistencies in the role of iron. Montreal, Canada. McGill University, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics. 19 p.

Karttunen, E., Tuhkanen, T. & Kiuru, H. 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 684 p.

Keinänen, J., Räsänen, S., Peltovuori, M., Hanski, M., Santala, E., Rapala, J., Torkkeli-Pitkäranta, T., Kalso, S. & Zacheus, O. Soveltamisopas uimavesiasetukseen 177/2008 – Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 177/2008 yleisten uimarantojen uimaveden laatuvaatimuksista ja valvonnasta. [WWW]. STTV. 8.4.2008 [viitattu 6.11.2014] Saatavissa: http://www.valvira.fi/files/ohjeet/Uimavesiasetuksen_soveltamisopas_11032008.pdf

- Klavarioti, M., Mantzavinos, D. & Kassinos, D. 2009. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment international* 35, 2, pp. 402-417.
- Kneissl, M., Kolbe, T., Würtele, M. & Hoa, E. 2010. Development of UV-LED disinfection. *Techneau*, Report within WP2.5: Compact Units for Decentralised Water Supply. 36 p.
- Kohn, T. & Nelson, K. 2007. Sunlight-Mediated Inactivation of MS2 Coliphage via Exogenous Singlet Oxygen Produced by Sensitizers in Natural Waters. *Environmental Science & Technology* 41, 1, pp. 192–197.
- Koivistoinen, H. 2014. UV-LED-lamppujen soveltuminen laivojen painolastivesien käsittelyyn. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ympäristötekniikan koulutusohjelma. 105 p.
- Koivunen, J., Siitonen, A. & Heinonen-Tanski, H. 2003. Elimination of enteric bacteria in biological-chemical wastewater treatment and tertiary filtration units. *Water Research* 37, 3, pp. 690-698.
- Koivunen, J., Heinonen-Tanski, H. 2005. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. *Water Research* 39, 8, pp. 1519-1526.
- Koivunen, J. 2007. Effects of conventional treatment, tertiary treatment and disinfection processes on hygienic and physico-chemical quality of municipal wastewaters. Doctoral dissertation. Kuopio. University of Kuopio, Department of Environmental Science, Kuopio University Publications C. Natural and Environmental Sciences 215. 80 p.
- Koskela, A., Hyxo Oy. Sisäinen tiedonanto 9.6.2014 ja 3.10.2014.
- Koutchma, T., Forney, L. & Moraru, C. 2009. Ultraviolet light in food technology: principles and applications. *Contemporary Food Engineering*. USA, CRC Press. 296 p.
- Ksibi, M. 2006. Chemical oxidation with hydrogen peroxide for domestic wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal* 119, 2-3, pp. 161-165.
- Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M., Blatchley, E. & Pommepuy, M. 1999. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. *Water Science & Technology* 40, 4-5, pp. 203–213.

- Leino, N. 2008. Puhdistetun jäteveden patogeeneit ja desinfiointitarve. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötekniikan koulutusohjelma. 125 p.
- Leino, N. 2012. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus vuonna 2011. Turku, Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. 148 p.
- Leino, N. 2013. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus vuonna 2012. Turku, Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. 158 p.
- Leino, N. 2014. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus vuonna 2013. Turku, Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. 157 p.
- Leino, N. & Räisänen, R. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Sisäinen tiedonanto 2.-8.12.2014.
- Leitch, G. & He, Q. 2012. Cryptosporidiosis – an overview. *Journal of Biomedical Research* 25, 1, pp. 1-16.
- Levomäki, M. 2011. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus vuonna 2010. Turku, Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. 141 p.
- Liberti, L., Lopez, A., Notarnicola, M., Barnea, N., Pedahzur, R. & Fattal, B. 2000. Comparison of advanced disinfecting methods for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Science & Technology* 42, 1-2, pp. 215-220.
- Linden, K., Shin, G. & Sobsey, M. 2001. Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water. *Water Science and Technology* 43, 12, pp. 171-174.
- Lumio, J. Ruokamyrkytys [WWW]. Lääkärikirja Duodecim. 22.1.2013 [viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00608
- Luukkonen, T. 2014. Peretikkahappo jäteveden desinfiointissa. *Vesitalous* 1, pp. 26–29.
- Luukkonen, T., Teeriniemi, J., Prokkola, H., Rämö, J. & Lassi, U. 2014. Chemical aspects of peracetic acid based water disinfection. *Water SA* 40, 1, pp. 73-80.

Lyytikäinen, O. & Siitonen, A. 2010. *Listeria monocytogenes*. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol. 1. Helsinki, Duodecim, pp. 136–139.

Länsi-Suomen ympäristölupavirasto 25/2008/1, Dnro LSY-2008-Y-21, 5.6.2008, Helsinki.

Länsi-Suomen ympäristölupavirasto 47/2003/4, Dnro LSY-2002-Y-146, 22.9.2003, Helsinki.

Madaeni, S. 1999. The application of membrane technology for water disinfection. *Water Research* 33, 2, pp. 301-308.

Madge, B. & Jensen, J. 2006. Ultraviolet disinfection of fecal coliform in municipal wastewater: Effects of particle size. *Water Environment Research* 78, 3, pp. 294-304.

Malley, J., Ballester, N., Margolin, A., Linden, K., Mofidi, A., Bolton, J., Crozes, G., Cushing, B., Mackey, E., Laine, J. & Lanex, M. 2004. Inactivation of Pathogens with Innovative UV Technologies. *Scitech Book News* 28, 4.

Mehinto, A., Hill, E. & Tyler, C. 2010. Uptake and biological effects of environmentally relevant concentrations of the nonsteroidal anti-inflammatory pharmaceutical diclofenac in rainbow trout. *Environmental Science & Technology* 44, 6, pp. 2176–2182.

MMMä 1.9.2011/24. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista.

Monarca S., Feretti, D., Collivignarelli, C., Guzzella, L., Zerbini, I., Bertanza, G. & Pedrazzani, R. 2000. The influence of different disinfectants on mutagenicity and toxicity of urban wastewater. *Water Research* 34, 17, pp. 4261-4269.

Morris, J. 2012. Disinfection of *Bacillus Subtilis* spores using ultraviolet light emitting diodes. Master's thesis. The Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, Electrical Engineering. 101 p.

Niemelä, A. 2010. Jätevesien hygienisoinnin menetelmät – Jätevedet ja hygienia 14.1.2010. [Viitattu 29.9.2014] Saatavissa:
http://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Niemela_JVdesinfiointi.pdf

Ooi, M., Wong, S., Lewthwaite, P., Cardoso, M. & Solomon, T. 2010. Clinical features, diagnosis, and management of enterovirus 71. *The Lancet Neurology* 9, 11, pp. 1097-1105.

- Orava, M., Ala-Peijari, T. & Pan, H. 2003. Talousveden desinfiointi ultraviolettivalolla. *Vesitalous* 44, 1, pp. 10–14.
- Pajukallio, T. 1987. Jäteveden hygieniasta. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 26. Helsinki. 79 p.
- Pereira, V., Linden, K. & Weinberg, H. 2007. Evaluation of UV irradiation for photolytic and oxidative degradation of pharmaceutical compounds in water. *Water Research* 41, 19, pp. 4413-4423.
- Qualls, R., Ossof, S., Chang, J. Dorfman, M., Dumais, C., Lobe, D. & Johnson, J. 1985. Factors controlling sensitivity in ultraviolet disinfection of secondary effluents. *Journal Water Pollution Control Federation* 57, 10, pp. 1006-1011.
- Ragazzo, P., Chiucchini, N., Piccolo, V. & Ostoich, M. 2013. A new disinfection system for wastewater treatment: performic acid full-scale trial evaluations. *Water Science and Technology* 67, 11, pp. 2476–2487.
- Rajala, R., Pulkkanen, M., Pessi, M. & Heinonen-Tanski, H. 2003. Removal of microbes from municipal wastewater effluent by rapid sand filtration and subsequent UV irradiation. *Water Science and Technology* 47, 3, pp. 157-162.
- Rantakokko-Jalava, K. & Anttila, V. 2010. Muut streptokokit, enterokokit ja muita grampositiivisia kokkeja. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol 1.* Helsinki, Duodecim, pp. 122-129.
- Rauth, A. 1965. The physical state of viral nucleic acid and the sensitivity of viruses to ultraviolet light. *Biophysical Journal* 5, 3, pp. 257–273.
- Rautio, M. 2010. *Clostridium*-lajit. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol. 1.* Helsinki, Duodecim, pp. 233-238.
- Reckhow, D., Linden, K., Kim, J., Schemer, H. & Makdissy, G. 2010. Effect of UV Treatment on DBP Formation. *Journal – American Water Works Association* 102, 6, pp. 100-113.
- Rozen, Y. & Belkin, S. 2001. Survival of enteric bacteria in seawater. *FEMS Microbiology Reviews* 25, 5, pp. 513–529.

- Salkinoja-Salonen, M. 2002. Mikrobiologian perusteita. Mikrobiologian julkaisuja 49/2000. Helsingin yliopisto, Mikrobiologian osasto, Soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos. 760 p.
- Sano, D., Ueki, Y., Watanabe, T. & Omura, T. 2006. Membrane separation of indigenous noroviruses from sewage sludge and treated wastewater. *Water Science & Technology* 54, 3, pp. 77-82.
- Savolainen, J. 2012. Peracetic acid disinfection trial for by-pass waters in waste water treatment plant. Helsinki, Kemira Oyj, Customer Report. 10 p.
- Savolainen, R. 1991. UV-säteily rinnakkaissaostuslaitosten jätevesien desinfiointimenetelmänä. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto. 96 p.
- Schumb, W., Satterfield, C. & Wentworth, R. 1955. Hydrogen peroxide. Reinhold Publishing Corporation, New York.
- SFS-EN ISO 7899-1. Veden laatu. Suolistoperäisten enterokokkien havaitseminen ja laskeminen. Osa 1: Pienen mittakaavan MPN (todennäköisin lukumäärä) liuosmenetelmä pinta- ja jätevesille. Helsinki 1999, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 31 s.
- Siikamäki, H., Kyrönseppä, H. & Jokiranta, S. 2002. Suoliston parasiitti-infektiot. *Duodecim* 118, 12, pp. 1235–1247.
- Siikamäki, H., Jokiranta, S. & Meri, S. 2010. Alkueläimet. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol. 1.* Helsinki, Duodecim, pp. 338–381.
- Siitonen, A. & Vaara, M. 2010a. Vibriot. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol. 1.* Helsinki, Duodecim, pp. 213–216.
- Siitonen, A. & Vaara, M. 2010b. *Escherichia, Salmonella, Shigella ja Yersinia.* In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet, kirja 1. Vol. 1.* Helsinki, Duodecim, pp. 177-195.
- Sincero, A. & Sincero, G. 2003. *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater.* London, CRC Press. 856 p.

Smith, R. & Baker, K. 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Applied Optics* 20, 2, pp. 177-184.

Snell, F. & Ettore, L. 1971. *Encyclopedia of Industrial Chemical Analysis*. Vol 14, Interscience Publishers, New York.

Sommer, R., Cabaj, A. & Haider, T. 1996. Microbicidal effect of reflected UV radiation in devices for water disinfection. *Water Science and Technology* 34, 7-8, pp. 173-177.

STMa 28.3.2008/177. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus yleisten uimarantojen uimaveden laatuvaatimuksista ja valvonnasta.

Tchobanoglous, G., Stensel, H., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G. & Pfrang, W. 2014. *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. 5 painos. New York, McGraw-Hill Education. 2018 p.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL. Salmonella [WWW]. THL. Päivitetty 18.2.2013 [viitattu 3.9.2014]. Saatavissa: <http://www.thl.fi/fi/web/infektiotaudit/taudit-jamikrobit/bakteeritaudit/salmonella>

Thomas, C., Hill, D. & Mabey, M. 1999. Evaluation of the effect of temperature and nutrients on the survival of *Campylobacter* spp. in water microcosms. *Journal of Applied Microbiology* 86, 6, pp. 1024-1032.

Tuomi, J. Lähtevän veden laatu-tietoja laitoksen automaatiojärjestelmän raportointiohjelma VeRasta. 30.10.2014. Turku, Turun seudun puhdistamo Oy. Sisäinen tiedonanto.

Tuominen, P. Jätevesien hygienian parantaminen Jyväskylän Nenäinniemen jätevedenpuhdistamolla [WWW]. Jätevedet ja hygienia –iltaseminaari 14.1.2010. [viitattu 12.5.2014] Saatavissa: http://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Tuominen_Hygienisointi.pdf

Tyrrel, S., Rippey, S. & Watkins, W. 1995. Inactivation of bacterial and viral indicators in secondary sewage effluents, using chlorine and ozone. *Water Research* 29, 11, pp. 2483-2490.

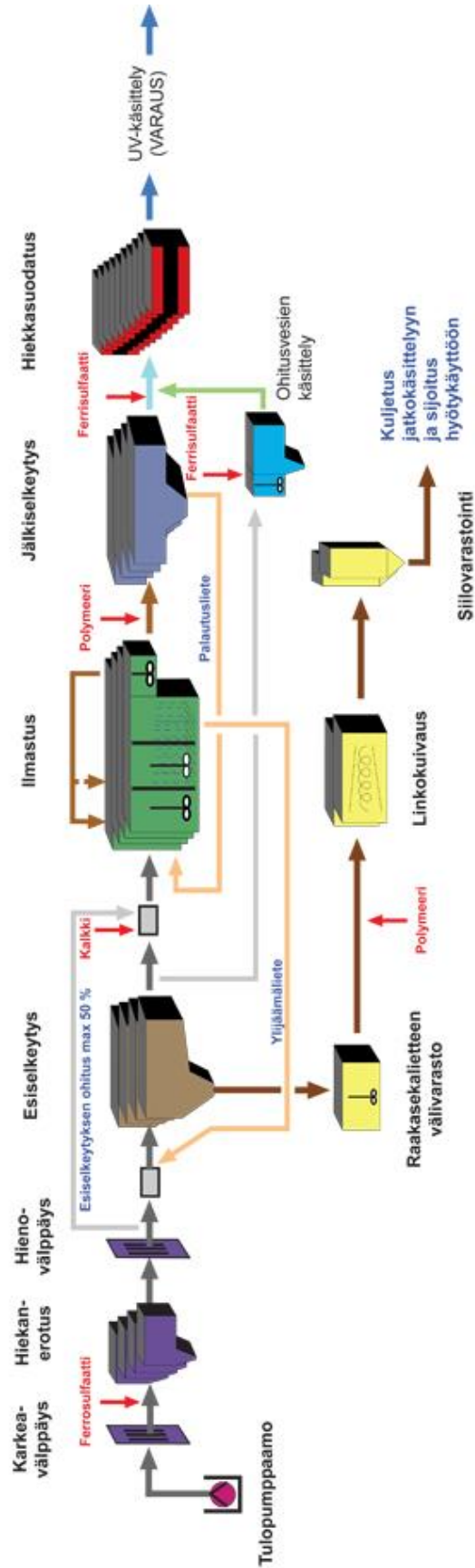
Vaara, M., Skurnik, M. & Sarvas, M. 2010. Bakterisolun rakenne ja toiminta. In: Hedman, K., Heikkinen, T., Huovinen, P., Järvinen, A., Meri, S., Vaara, M. *Mikrobiologia: Mikrobiologia, immunologia ja infektiosairaudet*, kirja 1. Vol. 1. Helsinki, Duodecim, pp. 14–40.

VNa 12.10.2006/888. Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä.

- Vieno, N., Tuhkanen, T. & Kronberg, L. 2005. Seasonal variation in the occurrence of pharmaceuticals in effluents from a sewage treatment plant and in the recipient water. *Environmental Science and Technology* 39, 21, pp. 8220-8226.
- Vital, M., Fuchsli, P., Hammes, F. & Egli, T. 2007. Growth of *Vibrio cholera* O1 Ogawa Eltor in freshwater. *Microbiology* 153, 7, pp. 1993-2001.
- Vital, M., Hammes, F. & Egli, T. 2008. *Escherichia coli* O157 can grow in natural freshwater at low carbon concentrations. *Environmental Microbiology* 10, 9, pp. 2387-2396.
- Vital, M., Stucki, D., Egli, T. & Hammes, F. 2010. Evaluating the growth potential of pathogenic bacteria in water. *Applied and Environmental Microbiology* 76, 19, pp. 6477-6484.
- Vuoriranta, P. 1974. Säteilyn vaikutuksesta mikrobeihin. Helsingin yliopiston Radio-kemian laitoksen julkaisuja. Helsinki. 11 p.
- Wagner, M., Brumelis, D. & Gehr, R. 2002. Disinfection of Wastewater by Hydrogen Peroxide or Peracetic Acid: Development of Procedures for Measurement of Residual Disinfectant and Application to a Physicochemically Treated Municipal Effluent. *Water Environment Research* 74, 1, pp. 33-50.
- Wang, J., Wang, L., Wang, B., Zhang, J. & Zou, Q. 2006. Impact of Suspended Particles and Enhancement Techniques on Ultraviolet Disinfection of a Secondary Effluent. *Journal of Ocea University of China* 5, 4, pp. 381-386.
- Watson, H. 1908. A note on the variation of the rate of disinfection with change in the concentration of the disinfectant. *Journal of Hygiene* 8, 4, pp. 536-542.
- Wéry, N., Lhoutellier, C., Ducray, F., Delgenès J. & Godon, J. 2008. Behaviour of pathogenic and indicator bacteria during urban wastewater treatment and sludge composting, as revealed by quantitative PCR. *Water Research* 42, 1-2, pp. 53-62.
- White, G. 1972. *Handbook of Chlorination*. 2, Van Nostrand Reinhold, New York, USA. 744 p.
- WHO, World Health Organization. 2005. Guidelines for the control of shigellosis, including epidemics due to *Shigella dysenteriae* type 1. Geneva, Switzerland. 72 p. Saata-vissa: http://whqlibdoc.who.int/publications/2005/9241592330_eng.pdf?ua=1

Würtele, M., Kolbe, T., Lipsz, M., Külberg, A., Weyers, M., Kneissl, M. & Jekel, M. 2011. Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes – UV LEDs – for water disinfection. *Water Research* 45, 3, pp. 1481-1489.

LIITE 1: KAKOLANMÄEN JÄTEVEDENPUHDISTAMON PROSESSIKAAVIO



Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon prosessikaavio. Kuvasta poiketen hiekkasuodatuksen menevään veteen syötetään ferosulfaatin sijaan ferrosulfaattia.

LIITE 2: PROSENTTIPISTEIDEN LASKEMINEN

Prosenttipiste perustuu uimaveden mikrobiologisten valvontatutkimustulosten kymmenkantaisen logaritmiarvon (log₁₀-arvon) normaalin todennäköisyysstiheysfunktion prosenttipisteen arviointiin. Prosenttipisteet lasketaan erikseen suolistoperäisille enterokokeille ja *E. coli* -bakteereille, ja ne johdetaan seuraavasti:

- i) Otetaan log₁₀-arvo kaikista valvontatutkimustuloksista. (Jos bakteeripitoisuus on nolla, log₁₀-arvo otetaan käytetyn määrittämenetelmän havaitsemisrajasta.)
- ii) Lasketaan log₁₀-arvojen aritmeettinen keskiarvo (μ).
- iii) Lasketaan log₁₀-arvojen standardipoikkeama (σ)

Prosenttipisteet saadaan seuraavista yhtälöistä:

$$90. \text{ prosenttipiste} = \text{antilog}(\mu + 1,282 \sigma) = 10(\mu + 1,282 \sigma)$$

$$95. \text{ prosenttipiste} = \text{antilog}(\mu + 1,65 \sigma) = 10(\mu + 1,65 \sigma)$$

Kaavojen antilogilla tarkoitetaan logaritmfunktion käänteisfunktiota.

Tarkasteltava uimavesi luokitellaan

- **erinomaiseksi**, jos 95. prosenttipisteet ovat samat tai pienemmät kuin erinomaista laatua osoittavat raja-arvot tai
- **hyväksi**, jos 95. prosenttipisteet ovat samat tai pienemmät kuin hyvää laatua osoittavat raja-arvot, mutta jos ne eivät kuitenkaan saavuta erinomaisen luokan raja-arvoja.

Jos 95. prosenttipisteet ovat suuremmat kuin hyvää laatua osoittavat raja-arvot, lasketaan tuloksista 90. prosenttipisteet sijoittamalla log₁₀-arvojen aritmeettinen keskiarvo (μ) ja log₁₀-arvojen standardipoikkeama (σ) 90. prosenttipisteen kaavaan.

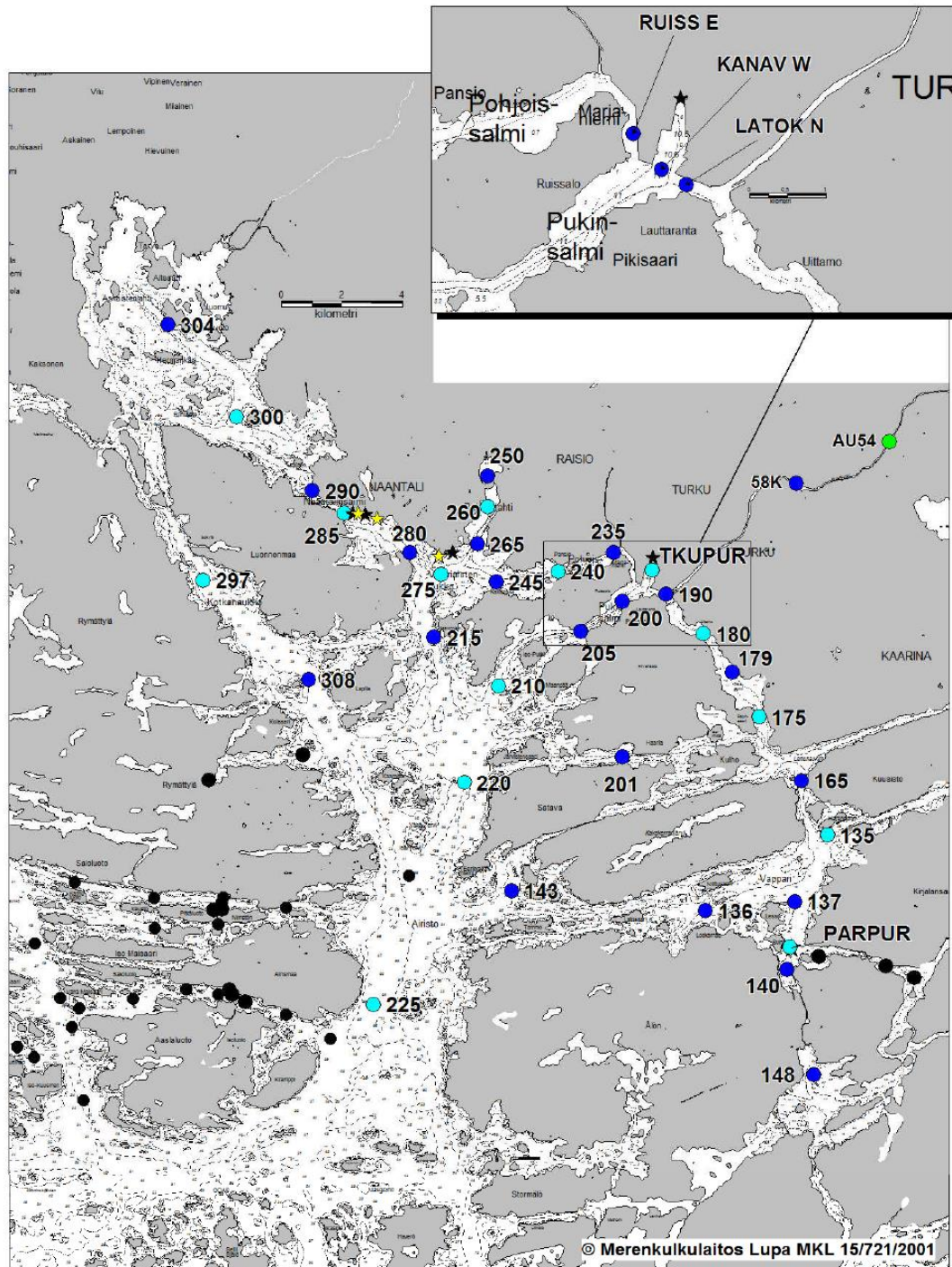
Tarkasteltava uimavesi luokitellaan

- **tydyttäväksi**, jos 90. prosenttipisteet ovat samat tai pienemmät kuin tyydyttävää laatua osoittavat raja-arvot tai
- **huonoksi**, jos 90. prosenttipisteet ovat suuremmat kuin tyydyttävää laatua osoittavat raja-arvot.

Logaritmin, aritmeettisen keskiarvon ja standardipoikkeaman sekä 95. ja 90. prosenttipisteen laskentaan voidaan käyttää tilastollisia laskentaohjelmia, kuten MS Exceliä.

(STMa 177/2008; Keinänen et al. 2008)

LIITE 3: TURUN MERIALUEEN TARKKAILUTUTKIMUKSEN VEDENLAADUN HAVAINTOPAIKAT



KUVA 1. Turun merialueen tarkkailututkimuksen vedenlaadun havaintopaikat.

- | | |
|--|------------------------------|
| ● vedenlaadun havaintopaikka | ★ jäteveden purkupaikka |
| ● intensiivipaikka | ★ jäähdytysveden purkupaikka |
| ● Aurajoen tarkkailututkimuksen havaintopaikka | |
| ● muiden tarkkailujen havaintopaikkoja | |

LIITE 4: MIKROBIEN MÄÄRITYSMENETELMÄT

Mikrobitutkimuksissa käytetyt määrittämenetelmät.

Määritettävä mikrobi	Määrittämenetelmä	Menetelmäkuvaus	Määrittäjä
Varmistetut enterokokit, jätevesi <i>Escherichia coli</i> , jätevesi	Enterolert® Quantitray sisäinen menetelmä A51 Colilert® Quantitray, sisäinen menetelmä A43	Menetelmässä eliminoidaan näytteen muu taustakasvu, pikamenetelmä	LSVYT, Turku
F-spesifiset kolifagit	EPA Method 1602, menetelmää ei ole akkreditoitu	Kvantitatiivinen plakkitekniikka.	
Somaattiset kolifagit	EPA Method 1602, menetelmää ei ole akkreditoitu		
<i>Clostridium perfringens</i> -itiöt	ISO 14189, menetelmää ei ole akkreditoitu	Määrittäminen TSC-alustalla anaerobisesti. Itiöiden testaamista varten näytettä lämpökäsitellään 60 °C:ssa 15 minuutin ajan. Sulfiittia pelkistävät klostridit kasvavat TSC-alustalla mustina pesäkkeinä. <i>C. perfringens</i> varmistetaan hapan fosfaattitestillä.	Vesi- ja terveys – yksikkö, THL, Kuopio

LIITE 5: MERIALUEEN, PURKUPAIKAN JA PUHDISTAMON HYGIENISIÄ TULOKSIA

Aika	Meri, Linnanaukko			Meri, purkupaikka		
	KANAV W	LATOK N	RUISS E			
	Fek. lämpökestoiset kolimuot. bakt. (44 °C)			Varm. Enterokokit		<i>E. coli</i>
	pmy/100 ml			pmy/100 ml		pmy/100 ml
15.-16.3.2010	440	90	160	840		
7.-8.6.2010	<10	10	10	220		
5.-6.7.2010	30	10	50	1 100		
4.8.2010	760	410	700	7 300		
4.-5.10.2010	330	90	370	2 200		
7.-8.3.2011	480	240	170	800		
7.6.2011	11	6	10	770		
5.7.2011	>1000	>1000	8200	>1000		
2.8.2011	280	110	280	90		
10.10.2011	910	1 300	640	2 200		
5.-7.3.2012	240	110	80	160		
4.6.2012	100	20	480	700	250	340
2.-3.7.2012	10	10	20	1 500	190	2 400
7.8.2012	230	400	270	9 500	1 700	9 200
1.-2.10.2012	1 100	490	850	3 400	890	5 200
4.-6.3.2013	20	10	20	80	110	200
3.-4.6.2013	510	80	20	80	4	220
1.-2.7.2013	50	90	80	2 700	230	4 900
3.7.2013						
22.7.2013						
24.7.2013						
30.7.2013						
6.8.2013	70	40	30	30	40	41
7.8.2013						
23.8.2013						
26.8.2013						
3.9.2013						
11.9.2013						
28.9.2013						
30.9.2013						
8.10.2013	710	450	240	>2000	400	1600
16.10.2013						
3.11.2013						
4.11.2013						
12.11.2013						
20.11.2013						
6.12.2013						
9.12.2013						
17.12.2013						
10.1.2014						
13.1.2014						
21.1.2014						
29.1.2014						
15.2.2014						
17.2.2014						
25.2.2014						
4.3.2014	270	30	310	1700	810	>2000
5.3.2014						
23.3.2014						

24.3.2014						
1.4.2014						
9.4.2014						
15.4.2014						
25.4.2014						
28.4.2014						
6.5.2014						
14.5.2014						
22.5.2014						
31.5.2014						
2.6.2014						
3.6.2014	10	40	<100	<10	0	40
10.6.2014						
2.7.2014	130	220	10	560	170	630
6.7.2014						
7.7.2014						
15.7.2014						
23.7.2014						
5.8.2014	270	180	320	400	140	1 500
8.8.2014						
11.8.2014						
19.8.2014						
27.8.2014						
13.9.2014						
15.9.2014						
23.9.2014						
1.10.2014						
7.10.2014	70	100	170	60	50	52
19.10.2014						
20.10.2014						
28.10.2014						
5.11.2014						
21.11.2014						
24.11.2014						
2.12.2014						

Aika	Kakolanmäen jvp, tuleva		Kakolanmäen jvp, lähtevä	
	Varm. Enterokokit	<i>E. coli</i>	Varm. Enterokokit	<i>E. coli</i>
	pmy/100 ml	pmy/100 ml	pmy/100 ml	pmy/100 ml
15.-16.3.2010				
7.-8.6.2010				
5.-6.7.2010				
4.8.2010				
4.-5.10.2010				
7.-8.3.2011				
7.6.2011				
5.7.2011				
2.8.2011				
10.10.2011				
5.-7.3.2012				
4.6.2012				
2.-3.7.2012				
7.8.2012				
1.-2.10.2012				
4.-6.3.2013				
3.-4.6.2013				
1.-2.7.2013				
3.7.2013			75	1 400
22.7.2013			14 000	98 000

24.7.2013			8 200	92 000
30.7.2013			1 600	24 000
6.8.2013				
7.8.2013			570	7 300
23.8.2013			85	5 600
26.8.2013			1 900	13 000
3.9.2013			1 200	33 000
11.9.2013			770	15 000
28.9.2013			170	3 500
30.9.2013			460	4 600
8.10.2013			1 700	16 000
16.10.2013			690	16 000
3.11.2013			2 800	9 200
4.11.2013			9200	>24000
12.11.2013			4 900	14 000
20.11.2013			1 200	4 400
6.12.2013			1 400	3 300
9.12.2013			1 400	1 700
17.12.2013			2 400	10 000
10.1.2014			570	2 200
13.1.2014			2 500	7 700
21.1.2014			2 600	5 500
29.1.2014			2 500	9 800
15.2.2014	1 000 000	2 000 000	3 100	5 600
17.2.2014	310 000	2 400 000	2 200	4 400
25.2.2014	860 000	2 300 000	1 900	7 700
4.3.2014				
5.3.2014	200 000	3 200 000	16 000	52 000
23.3.2014	750 000	4 900 000	8 600	12 000
24.3.2014	810 000	2 800 000	4 100	41 000
1.4.2014	790 000	34 000 000	2 000	8 600
9.4.2014	630 000	3 700 000	4 100	7 500
15.4.2014	110 000	3 000 000	3 000	4 100
25.4.2014	910 000	5 200 000	2 000	4 100
28.4.2014	1 300 000	3 400 000	2 000	5 200
6.5.2014	7 900 000	14 000 000	4 100	5 200
14.5.2014	960 000	5 500 000	<1000	12000
22.5.2014	1 600 000	4 400 000	<1000	1000
31.5.2014	990 000	5 800 000	2 000	85 000
2.6.2014	1 100 000	5 200 000	1 000	16 000
3.6.2014				
10.6.2014	1 400 000	5 800 000	4 100	41 000
2.7.2014				
6.7.2014	1 200 000	13 000 000	1 500	19 000
7.7.2014	1 200 000	4 900 000	3 500	25 000
15.7.2014	1 200 000	6 500 000	2 600	22 000
23.7.2014	1 200 000	5 500 000	410	4 800
5.8.2014				
8.8.2014	1 800 000	7 700 000	410	200 000
11.8.2014	1 300 000	8 700 000	3 200	26 000
19.8.2014	630 000	4 900 000	1 700	17 000
27.8.2014	610 000	3 300 000	1 500	26 000
13.9.2014	1 500 000	5 500 000	100	1 000
15.9.2014	1 300 000	5 800 000	410	5 200
23.9.2014	2 400 000	6 100 000	970	22 000
1.10.2014	2 600 000	8 700 000	770	9 900
7.10.2014				
19.10.2014	1 500 000	4 400 000	>24000	98000
20.10.2014	990 000	4 600 000	5 400	34 000
28.10.2014	630 000	2 700 000	290	58 000
5.11.2014	750 000	4 100 000	1 700	15 000
21.11.2014	2 400 000	3 900 000	3700	>2400000
24.11.2014	1 700 000	3 400 000	4100	31000
2.12.2014	1 100 000	2 700 000	1500	75000

(Leino & Räisänen 2014)

LIITE 6: UV-PILOTOINNIN ANALYYSITULOKSET

Pvm	Näytteen nimi	klo	Kolifagit (pfu/100 ml)		<i>Clostridium</i>	<i>Escherichia</i>	Varmistetut	UVT 254	Virtaama	UV-
			F-spesifiset	somaattiset	<i>perfringens</i> -itiöt	<i>coli</i>	enterokokit	nm		intensiiteetti
					pmy/100 ml	pmy/100 ml	pmy/100 ml	%UVT	m ³ /h	W/m ²
20.8.2014	lähtevä jv, UV tuleva	9:45	774	934	580	12000	4100	60	7,522	50,9
20.8.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	9:45	ei todettu	ei todettu	14	100	<100		7,517	50,9
25.8.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:25	217	988	490	19000	3100	53	12,52	43,2
25.8.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:25	ei todettu	ei todettu	87	10	<10		12,86	48,6
27.8.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:20				66000	6500	53	12,25	43,7
27.8.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:20				110	5		12,96	48,3
1.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:45				11000	200	57	7,602	52,3
1.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:45				<10	1		7,656	52,3
3.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:20				13000	1200	54	7,717	47,5
3.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:20				<10	0		7,834	47,5
8.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:30				6300	730	52	11,15	43,7
8.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:30				<10	0		10,32	43,2
10.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:25				6300	630	52	12,46	43,8
10.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:25				0	0		12,8	43,8
15.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:37				3100	500	55	7,285	47,7
15.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:37				0	0		7,383	47,6
17.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:35				7300	440	51	7,215	42,0
17.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:35				0	0		7,365	41,9
22.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:25				6300	1600	52	12,20	43,5
22.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:25				1	0		9,105	43,7
24.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:25				11000	970	56	10,05	41,0
24.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:25				1	0		10,82	42,4
29.9.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:35				1800	420	55	12,63	45,1
29.9.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:35				0	0		9,90	45,0
1.10.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:35				11000	1000	52	7,435	36,4
1.10.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:35				0	0		8,012	38,6
6.10.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:55	76	1320	130	6600	1200	53	7,485	41,1
6.10.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:55	ei todettu	ei todettu	25	0	0		9,652	42,5
8.10.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:50				25000	1800	52	13,32	41
8.10.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:50				0	0		9,082	41,5
13.10.2014	lähtevä jv, UV tuleva	8:25	211	2200	290	46000	1000	55	13,4	43,9
13.10.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	8:25	1	0	90	0	0		13,32	43,9
15.10.2014	lähtevä jv, UV tuleva	9:25				>240000	>24000	16	14,05	15,3
15.10.2014	lähtevä jv, UV lähtevä	9:25				4400	1400		13,98	14,9