

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2021

Joakim Keihäs

ULTRAVIOLETTITEKNIikkaAN  
PERUSTUVAN  
PUHDISTUSYKSIKÖN  
SUUNNITTELU  
PAINOLASTIVEDEN  
KÄSITTELYJÄRJESTELMÄÄN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Energia- ja ympäristötekniikka

2021 | 36 sivua, 1 liitesivu

Joakim Keihäs

# ULTRAVIOLETTIVALOON PERUSTUVAN PUHDISTUSYKSIKÖN SUUNNITTELU PAINOLASTIVEDEN KÄSITTELYJÄRJESTELMÄÄN

Työ toteutettiin osana Langh Tech Oy Ab:n tuotekehitysprojektia. Yritys valmistaa ja suunnittelee järjestelmiä meritekniikan alalla, ja sen päätuotteita ovat rikkipesurit ja niiden oheisjärjestelmät.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten ultravioletivalolla puhdistetaan painolastivettä ja mitkä asiat vaikuttavat puhdistusyksikön mikrobiologiseen suorituskykyyn. Lisäksi tarkoitus oli tuottaa tähän selvitykseen pohjautuen suunnitelma UV-puhdistusyksiköstä.

Työn viitekehiksenä ovat kansainvälisen merenkulkujärjestön vuonna 2017 voimaan astuneet säädökset painolastiveden puhdistuksesta. Säädösten myötä tulee pakolliseksi varustaa kaikki tietyn kokoluokan merialukset painolastiveden käsittelyjärjestelmällä. Tämä tapahtuu liukuvasti välillä 2019–2024 riippuen aluksen sertifiointikierrosta. Myös työn merkitys toimeksiantajayritykselle kytkeytyy kyseisten säädösten voimaantulon myötä tuleviin hankinta- ja asennusprojekteihin.

Työssä tarkastellaan syvällisemmin ultraviolettisäteilyyn perustuvan painolastiveden käsittelytekniikan teoriaa ja tutkimusaineistoa sekä suunnittelua ohjaavia säädöksiä ja käydään läpi ultraviolettijärjestelmän tärkeimmät komponentit. Lisäksi arvioidaan mitä vaatimuksia markkinoille tähtäävälle järjestelmälle tulisi asettaa, jotta se täyttäisi järjestelmille tyypillisyyskriteerit ja myöntävien luokituslaitosten kriteerit.

Lopuksi esitellään tutkimusaineiston pohjalta tehty laskentataulukko ja suunnittelussuunnitelma apuna käytettyä iteratiivista virtausmallinnusta.

## ASIASANAT:

Painolastiveden käsittely, ultraviolettisäteily, vedenpuhdistus, meritekniikka, virtausmallinnus, numeerinen virtausdynamikka

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy- and environmental engineering

2021 | 36 pages, 1 page as an appendix

Joakim Keihäs

# DESIGNING AN ULTRAVIOLET LIGHT BASED DESINFECTATION UNIT FOR A BALLAST WATER TREATMENT SYSTEM

The thesis was done as a part of a product development project at Lanh Tech Oy Ab. The company designs and develops marine technology systems, with sulphur oxide scrubbers and related auxiliary systems as their main product.

The purpose of the thesis was to find out how ultraviolet light is used in ballast water purification and which are the key aspects that affect the microbiological performance of a treatment unit. In addition, a prototype plan for UV-desinfection unit would be made based on this information.

Framework of the thesis is based on the 2017 regulations for ballast water management by the International Maritime Organization. According to the regulations, it is mandatory to equip existing vessels with a ballast water treatment system between 2019–2024, depending on their certificate renewal period. The significance of the thesis is connected to new procurement and installation projects for the company resulting from the forementioned regulations.

The thesis takes a detailed look on the theory and research of ultraviolet based water treatment, the main components of the system and which regulations are in place that affect the design process. In addition, the requirements set by the classifications societies for systems aiming for commercial production are discussed from a design point of view.

Lastly, a research based calculation table is presented along with iterative flow simulation models that were utilized in the design process.

## KEYWORDS:

Ballast water treatment, ultraviolet radiation, water purification, marine technology, flow simulation, computational fluid dynamics

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 MIKSI PAINOLASTIVETTÄ PUHDISTETAAN</b>	<b>8</b>
<b>3 ULTRAVIOLETTISÄTEILY VEDENPUHDISTUKSESSA</b>	<b>11</b>
3.1 Ultravioletisäteilyn määritelmä	12
3.2 UV-säteilyn biologiset vaikutukset	13
3.3 Ultravioletisäteilyn eteneminen	14
<b>4 UV-JÄRJESTELMÄN PÄÄKOMPONENTIT</b>	<b>18</b>
4.1 Järjestelmän toimintaperiaate	19
4.2 Suodatinyksikkö	19
4.3 Reaktoriyksikkö	20
4.4 UV-lamput	21
4.5 Järjestelmän mittalaitteet	22
4.6 Sähköjärjestelmä	23
4.7 Käsittely-yksikön puhtauden vaikutus järjestelmän energiatehokkuuteen	24
4.8 UV-järjestelmän energiankulutus	24
<b>5 REAKTORIYKSIKÖN LASKENNALLINEN ARVIOINTI</b>	<b>26</b>
5.1 Laskennassa käytetyt lähtöarvot	27
5.2 Iteratiivisen prosessin aloitus	30
5.3 Iteratiivisen prosessin eteneminen	31
5.4 Prosessin lopputulokset	32
<b>6 UV-JÄRJESTELMIEN KEHITYS TULEVAISUUDESSA</b>	<b>33</b>
<b>7 POHDINTA</b>	<b>34</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>35</b>

## LIITTEET

Liite 1. UV-reaktorin laskentaan käytetty taulukko

## KAAVAT

Kaava 1. Käänteisen neliön laki (Georgia State University 2021).	14
Kaava 2. Veden absorbanssin laskenta (Water Aps 2021).	15
Kaava 3. Veden läpäisevyyden laskenta (Water Aps 2021).	16
Kaava 4. Säteilyannoksen laskenta (Templeton 2021).	20
Kaava 5. Keitzin yhtälö (Sasges ym. 2012).	26

## KUVAT

Kuva 1. Asennettujen painolastivesijärjestelmien tyyppinä painolastikapasiteetin mukaan (American Bureau of Shipping 2019).	10
Kuva 2. Valon aallonpituusjakauma (Glasco UV 2021).	12
Kuva 3. Käänteisen neliön laki havainnollistettuna (Georgia state university 2021).	14
Kuva 4. Esimerkki sylinterimäisen säteilylähteen säteilyprofiilista.	15
Kuva 5. Eri satamissa mitattuja %UVT-arvoja (Alfa-Laval 2021).	17
Kuva 6. UV-painolastivesijärjestelmän esimerkkikokoonpano (Alfa-Laval 2021).	18
Kuva 7. Havainnollistus keskipainelampun (vas.) ja matalapainelampun (oik.) säteilyjakaumasta (Trojan Technologies 2021).	22
Kuva 8: Ensimmäisiä iteraatiomallinnuksia.	30
Kuva 9: Analyysin pohjalta tehtyjen muutosten tarkastelua.	31
Kuva 10: Kuvankaappauksia joistakin iteraatioprosessin aikana käytettyjen geometrioiden poikkileikkauksista.	32

## TAULUKOT

Taulukko 1. Indikaattorimikrobedein raja-arvot puhdistetussa vedessä (IMO 2021).	10
Taulukko 2. Erityyppisten elohopealamppujen ominaisuuksia (muokattu lähteestä Cotton ym. 2006).	21
Taulukko 3. Laskentataulukossa käytetyt lähtöarvot (esimerkki, muutettu todellisista).	29

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

ABS	American Bureau of Shipping
BWTS	Ballast Water Treatment System
BWMS	Ballast Water Management System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFU	Colony Forming Unit
CMFDA/FDA	5-Chloromethylfluoresceindiacetate/Fluorescein diacetate
DNA	Deoksiribonukleiinihappo
DNV	Det Norske Veritas
IMO	International Maritime Organization
IOPP	International Oil Pollution Prevention Certificate
kW	Kilowatti
LED	Light Emitting Diode
MEPC	Marine Environment Protection Committee
MPN	Most Probable Number
RNA	Ribonukleiinihappo
USCG	United States Coast Guard
UV	Ultravioletti
UVT	Ultraviolet Transmission
YK	Yhdistyneet kansakunnat
$\alpha$	Alfa
m <sup>3</sup> /h	Kuutiometriä tunnissa
mJ/cm <sup>2</sup>	Millijoulea per neliösentti

# 1 JOHDANTO

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO:n asettamien säädösten myötä painolastiveden käsittelylaitteisto on tullut pakolliseksi asentaa kaupallisessa käytössä oleviin merialuksiin sekä tuleviin uudisrakennuksiin (IMO 2021). Koska säädökset mahdollistavat laivanomistajille siirtymäajan jälkiasennettuihin laitteistoihin, tulee laitteistojen kysyntä todennäköisesti kulminoitumaan vuoden 2022 loppupuolella (ClassNK 2018). Vaikka laitteistojen toimittajia on markkinoilla useita kymmeniä, voi tämä johtaa tilanteeseen jossa laitteistoja ei pystytä toimittamaan tarpeeksi, jotta kaikki tarvittavat alukset saataisiin varustettua.

Koska laitteistoja on myös käytössä jo jonkin verran ja niistä on olemassa käyttäjiltä sekä laitteiston hankkijoilta saatua tietoa, voidaan suunnittelua tarkoituksenmukaisesti ohjata huomioimaan kilpailullisesti tärkeitä ominaisuuksia laitteistoissa. Amerikkalaisen merenkulun luokituslaitoksen ABS:n mukaan ongelmallisimpia puolia ovat laitteistojen hankala asennettavuus olemassaoleviin laivoihin, joissa on jo valmiiksi ahtaat tilat, sekä järjestelmän operointiin käytettävän energian järjestäminen lastioperaatioiden aikana (American Bureau of Shipping 2019). Kompakti koko ja pieni energiankulutus ovat siis järjestelmien tärkeimpiä kilpailuvaltteja.

Tämä opinnäytetyö pyrkii tarjoamaan lukijalle kattavasti tietoa ultravioletitekniikkaan perustuvasta vedenkäsittelystä ja sen käytöstä painolastivesien puhdistuksessa. Teorian lisäksi käsitellään painolastiveden käsittelyjärjestelmien toimintaa ohjaavia säädöksiä ja viralliseen hyväksyntään tähtäävälle laitteistolle asetettuja vaatimuksia. Lopuksi esitellään toimeksiantajalle tehty puhdistusyksikön suunnitteluprosessi ja siihen liittyvä laskenta sekä mallinnukset.

## 2 MIKSI PAINOLASTIVETTÄ PUHDISTETAAN

Painolastivedellä tarkoitetaan vettä, jota käytetään aluksissa säätelemään vakautta ja ohjattavuutta. Painolastiveden määrä ja vaihtotarve ovat verrannollisia aluksesta poistettavan tai alukseen lisättävän kuorman painoon; kun kuormaa siirretään pois aluksesta, otetaan tilalle painolastivettä ja kun taas alukseen otetaan kuormaa, painolastivettä pumpataan ulos aluksesta. Vaikka painolastivettä pääasiallisesti vaihdetaan satamissa rahtia käsiteltäessä, mahdollistaa painolastivesijärjestelmä aluksen käsiteltävyyteen liittyvien parametrien muuttamisen myös ajon aikana esimerkiksi sääolosuhteiden muuttuessa. Painolastiveden käsittely on uusien säädöksien mukaan tehtävä aina kun veden vaihtoa suoritetaan lajistoltaan erilaisten merialueiden välillä, eli kun esimerkiksi painolastiveden sisäänotto tapahtuu merialueella A ja ulospumppaus merialueella B. (IMO 2021)

Painolastivettä siirtyy arvioiden mukaan jopa seitsemän miljardia tonnia ja käsittelemättömän painolastivesi voi sisältää jopa 7 000 erilaista organismia. Vieraslajit voivat aiheuttaa mittavaa ekologista haittaa syrjäyttämällä paikallisia alkuperäislajeja ja lisäksi terveydellisiä haittoja ihmisille, sillä veden mukana siirtyy myös bakteereita, viruksia ja myrkyllisiä leviä. Terveydelliset ja ekologiset vahingot tarkoittavat myös taloudellisia vahinkoja, joiden on arvioitu yksinomaan Euroopassa olevan jopa kymmeniä miljardeja euroja. (Wärtsilä 2012).

Edellämainitut ongelmat tunnistettiin YK:n alaisen kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n puolesta jo vuonna 1973. Säännösten ja viitekehyksen luominen kesti kuitenkin suhteellisen pitkään ja vasta 2004 Lontoossa pidetty kokous loi standardit painolastivesien käsittelylle. Sopimus määritettiin astumaan voimaan kun 30 jäsenvaltiota, jotka edustaisivat vähintään 35 % kaupallisten alusten vetoisuudesta, ratifisioisi sopimuksen. Vetoisuus on yksikkö, jota käytetään kuvaamaan aluksen rungon tilavuutta. Tämä tapahtui lopulta syyskuussa 2017. Sopimuksen mukaan kaikki painolastivesien käsittelyjärjestelmät tulee hyväksyä kansallisten viranomaisten toimesta niin, että ne täyttävät IMO:n säädöksissä määritetyt raja-arvot. Yhdysvaltain aluevesillä kulkevien alusten täytyy tämän lisäksi täyttää Yhdysvaltain rannikkovartioston (USCG) asettamat määräykset. (Gollasch & Matej 2018).

Sopimuksen myötä tuli pakolliseksi ottaa käyttöön painolastivettä sopimuksen mukaisesti puhdistava järjestelmä. Tämä pätee kaikkiin painolastivettä vaihtaviin kaupallisessa

käytössä oleviin yli 400 tonnin vetoisiin aluksiin ja tuli uudisrakennuksille voimaan välittömästi (Wärtsilä BWMS booklet 2012). Käytössä oleville aluksille järjestelmän jälkiasennus eli niin sanottu retrofitting sidottiin aluksissa uusittavan IOPP-sertifikaatin yhteyteen. Sertifikaatti on uusittava viiden vuoden sykleissä. Siirtymäajan pidentämiseksi laivanomistajat pystyivät kuitenkin halutessaan irrottamaan IOPP-sertifikaatin (IOPP deharmonization) aluksen normaalista sertifikaattikierrosta ja täten saamaan sertifikaatin uusintavälin verran lisäaikaa painolastiveden puhdistusjärjestelmän asennukselle (Indian Register of Shipping 2016). Tästä johtuen viimeinen takaraja hyväksytyyn painolastiveden käsittelyjärjestelmän asentamiselle olemassaoleviin laivoihin voi olla viimeistään 8. syyskuuta 2024. Isolle osalle laivoista takaraja tulee vastaan jo ennen tätä vuosien 2022 ja 2023 aikana. (Offshore Energy 2021).

Kuitenkin COVID-19 pandemian aiheuttamat vaikeudet ja viivästykset järjestelmien asennuksiin ja käyttöönottoihin saattavat pahimmillaan johtaa siihen, että sekä järjestelmiä toimittavien yritysten tuotanto- että kuivatelakoiden asennuskapasiteetti on riittämätön, jotta kaikkiin aluksiin olisi edes teoreettisesti mahdollista saada järjestelmä asennettua ennen annettua päivämäärää. Esimerkiksi loppuvuodesta 2018 ison korealaisen luokituslaitos ClassNK:n rekisterissä olevista 7315:sta aluksesta vain 1915 alusta oli asennanut painolastiveden käsittelyjärjestelmän. (ClassNK 2018).

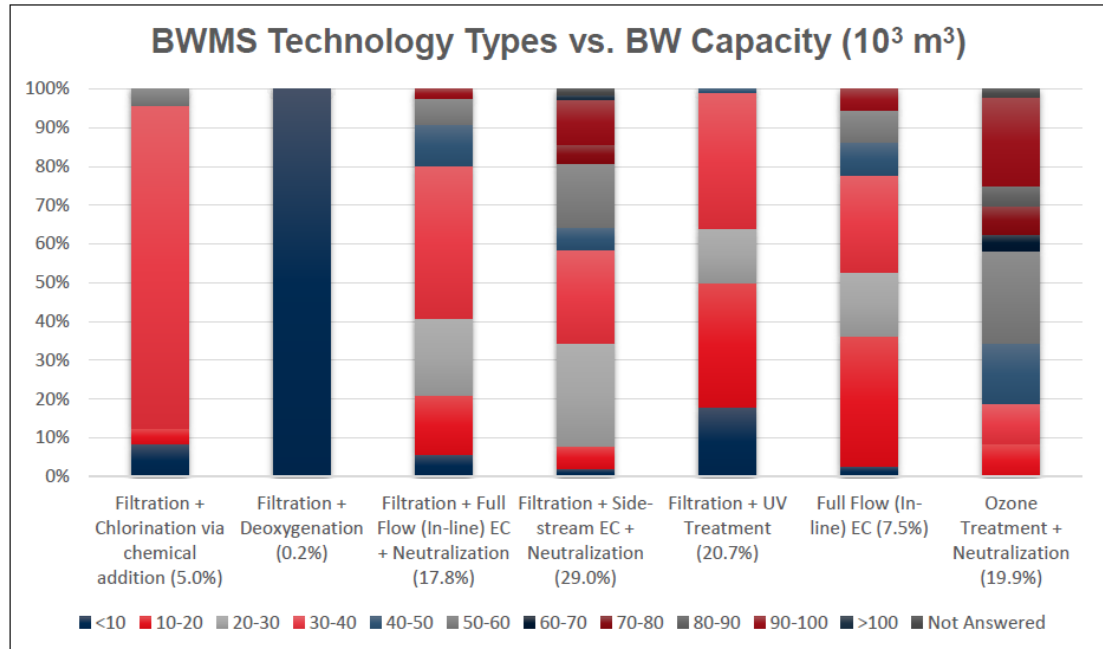
Jotta järjestelmää voidaan käytännössä käyttää laivaympäristössä, vaatii se riippumattoman luokituslaitoksen tyyppihyväksynnän. Suurimpia hyväksyntöjä myöntäviä luokituslaitoksia ovat esimerkiksi American Bureau of Shipping (ABS), Det Norske Veritas (DNV) ja Lloyd's Register. Tyyppihyväksyntäprosessissa varmistetaan, että järjestelmä pystyy mekaanisesti suoriutumaan laivaympäristössä, on toimintavarmuudeltaan riittävä ja täyttää raja-arvot puhdistetun veden organismien määrissä asetusten mukaisesti (IMO 2021).

Sallittujen eliömäärien raja-arvot puhdistetussa vedessä on määritetty indikaattorimikrobeilla IMO:n painolastivesiasetuksessa. Raja-arvot on esitetty taulukossa 1.

Organismi	Raja-arvo puhdistetussa vedessä
Plankton > 50µm	< 10 Elinkelpoista organismia per m <sup>3</sup>
Plankton 10-50µm	< 10 Elinkelpoista organismia per ml
Kolerabakteeri	< 1 CFU per 100 ml
Kolibakteeri	< 250 CFU per 100 ml
Enterokokki	< 100 CFU per 100 ml

Taulukko 1. Indikaattorimikrobedein raja-arvot puhdistetussa vedessä (IMO 2021).

Painolastivettä voidaan puhdistaa monella erilaisella tekniikalla ja tekniikoiden yhdistelmällä, jotka jakaantuvat pääasiallisesti mekaanisiin ja kemiallisiin menetelmiin. Eniten käytetyt tekniikat ovat UV-käsittely (36 %) ja elektroklooraus (36 %) (Vorkapić et al. 2018). UV-käsittely on paremmin soveltuva käytettäväksi pienemmän kapasiteetin aluksissa joissa tilavuusvirta < 1500 m<sup>3</sup>/h ja elektroklooraus isomman kapasiteetin aluksissa joissa tilavuusvirta > 1500 m<sup>3</sup>/h (Desmi Oceanguard 2019). Käytettyjen eri teknologioiden jakautuminen eri painolastikapasiteetin aluksille esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Asennettujen painolastivesijärjestelmien tyyppejä painolastikapasiteetin mukaan (American Bureau of Shipping 2019).

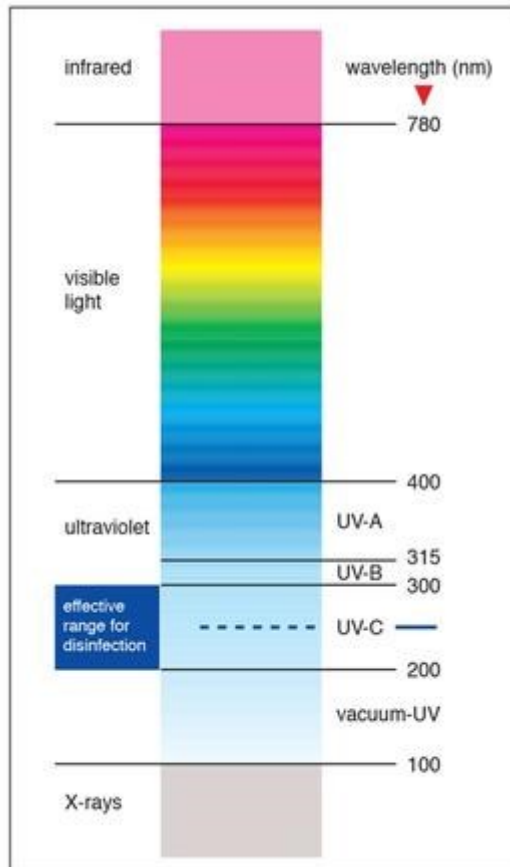
### 3 ULTRAVIOLETTISÄTEILY VEDENPUHDISTUKSESSA

Ultraviolettivalon käytöllä vedenpuhdistuksessa on pitkä historia. Vuonna 1877 A. Downes ja T. Blunt dokumentoivat Nature-lehdessä auringonvalon mikrobeja tuhoavasta vaikutuksesta. Ensimmäiset keinotekoisia UV-valoa tuottavat elohopealamput kehitettiin 1901. Muutamaa vuotta myöhemmin vuonna 1906 huomattiin UV-valon läpäisevän kvartsilasia ja ensimmäinen UV-valoa vedenpuhdistuksessa käyttävä käytännön sovellus otettiin käyttöön Ranskan Marseillessa vuonna 1910. (Cotton et al. 2006).

Vielä tässä vaiheessa ei tiedetty tarkkaa vaikutusmekanismia ja tutkimustyö jatkui erilaisten organismien ja aallonpituuksien testaamisella. Vuonna 1930 F. Gates julkaisi tarkempia analyttisiä tuloksia eri aallonpituuksien vaikutuksesta bakteereihin ja määrittä 265 nanometrin aallonpituudella olevan säteilyn optimaaliseksi bakteerien tuhoamiseen. Aallonpituus oli hyvin lähellä olemassaolevien UV-valoa säteilevien matalapainelamppujen 254 nanometrin spektriä ja löydökset todennettiin useammassa tutkimuksessa seuraavien vuosien aikana. Gates myös totesi lisätutkimuksia vaadittavan aineiden löytämiseksi, jotka mahdollistavat organismeja tappavan reaktion. Vuonna 1944 A. Hollaender ja J. Oliphant viittasivat vaikutusten saattavan johtua RNA:ta ja DNA:ta koodaavien nukleiinihappojen muutoksista valoaltistuksessa. Vuonna 1960 R. Beukers ja W. Berends raportoivat nukleiinihappo tyymiinissä tapahtuvasta reaktiosta UV-valossa ja pian myös muiden nukleiinihappojen reaktiot löydettiin. Johtopäätöksenä tutkimuksista todettiin nimenomaan nukleiinihappoissa tapahtuvien reaktioiden olevan pääroolissa UV-valon biologisissa vaikutuksissa. (Reed 2010).

### 3.1 Ultraviolettisäteilyn määrittelmä

Ultraviolettisäteily jaetaan määritelmässä yleensä kolmeen osaan sen spektrin eli säteilyn aallonpituuden perusteella. UV-säteilyn osa-alueet ovat UVA-, UVB- ja UVC-säteily, joiden vastaavat aallonpituusjakaumat ovat 315–400 nm, 300–315 nm ja 100–280 nm (Kuva 1.). Aallonpituuden kasvaessa kasvaa myös säteilyn läpäisevyys väliaineessa.



Kuva 2. Valon aallonpituusjakauma (Glasco UV 2021).

Vaikka koko UV-säteilyn spektri vaikuttaa eliöihin, vedenpuhdistuksessa tarkoitetaan käytännössä ainoastaan UVC-säteilyä ja pienissä määrin myös UVB:tä. Puhuttaessa UVC-säteilyn osasta 100–200 nm käytetään myös termiä tyhjiö UV (vacuum UV), tämä osa säteilystä kulkee pitkiä matkoja ainoastaan tyhjiössä ja kulkiessaan väliaineessa sen teho heikkenee erittäin nopeasti, tästä syystä sen rooli vedenpuhdistuksessa jää vähäiseksi (Cotton ym. 2006).

### 3.2 UV-säteilyn biologiset vaikutukset

Siirryttäessä röntgensäteilystä UV-säteilyyn vaikutukset aineeseen muuttuvat olennaisesti. Röntgensäteily on pääasiallisesti muodoltaan ionisoivaa, joka muuttaa atomien varauksia, kun taas UV-säteilyn vaikuttaa pääasiallisesti virittämällä atomien välisten sidosten elektroneja korkeammille energiatasolle. 200–280 nm aallonpituudella olevat fotonit aiheuttavat muutoksia monien orgaanisten yhdisteiden sidoksissa. Fotonin osuessa ns. konjugoituun sidokseen, jossa on kaksi elektroniparia, fotonin energia nostaa elektronin korkeammalle energiatasolle tehden sidoksesta epävakaa. (Reed 2010).

Erilaisilla eliöillä on erilainen sietokyky UV-valolle ja täten tarvittavan säteilyannoksen määrä myös vaihtelee (Reed 2010). Nyrkkisääntönä voi pitää, että eliön koon kasvaessa tarvitaan myös suhteessa suurempi annos, jotta organismi menettää elinkelpoisuutensa. Joillakin organismeilla on myös kyky korjata perimään ja muihin biologisesti tärkeisiin molekyyliin syntyneitä vaurioita, korjauskyky luokitellaan valo- ja pimeäkorjaukseen riippuen olosuhteista joissa korjaus tapahtuu (Quek & Hu 2008). Tämän vuoksi myös järjestelmiä hyväksyttäessä organismien palautumista seurataan tutkien käsiteltyjen eliöiden mahdollista korjausta ja lisääntymistä käsittelyn jälkeen.

Painolastiveden käsittelystä puhuttaessa oleellimmat organismit ovat erilaisten pienlevät sekä virukset ja bakteerit. Näistä eniten säteilyä vaativat suuret yli 50 µm levät jotka pyritään poistamaan esisuodatuksessa. Suodatuksen läpi pääsevästä eliöstä suurimman säteilyannoksen vaativat organismit ovat niin ikään leviä. Näistä hyvin UV-valoa kestävä *Tetraselmis suecica* on useasti tutkimuksissa käytetty hyvä indikaattoriorganismi kun halutaan selvittää painolastiveden käsittelyjärjestelmän tehokkuutta. Sitä on ehdotettu jopa standardieliöksi käytettäväksi painolastiveden puhdistuslaitteistojen tehokkuuden arvioinnissa. Vertailun vuoksi useimmat bakteerit tarvitsevat tuhoutuakseen säteilyannoksen joka on muutamista millijouleista muutamiin kymmeneen millijouleihin, *T. suecican* uudelleenkasvun estämiseksi annoksen tulisi olla 300–400 millijoulea (Olson ym. 2019.).

Ultraviolettipohjaisen painolastiveden käsittelyjärjestelmän suunnittelussa tulisi järjestelmän ultravioletiteho mitoittaa siten, että se kykenee tuottamaan käsiteltävään veteen keskimääräisen annoksen 300 ja 400 millijoulen väliltä.

Organismien kuolleisuutta kuvataan logaritmiseen asteikkoon perustuvilla arvolla joka kuvaa kuolleiden organismien suhdetta elinkelpoisiin organismeihin käsittelyn jälkeen. Pohjana käytetään kymmenkantaista logaritmia jossa 1-log vähennys vastaa 90 % (9/10)

kuolleisuutta, 2-log 99 % (99/100), 3-log 99,9 % (999/1000) ja niin edelleen. Yleisesti vedenkäsittelyssä raja-arvot riittäville puhdistusmäärille ilmoitetaan tällä asteikolla eliökohtaisesti. (World Health Organization 2004).

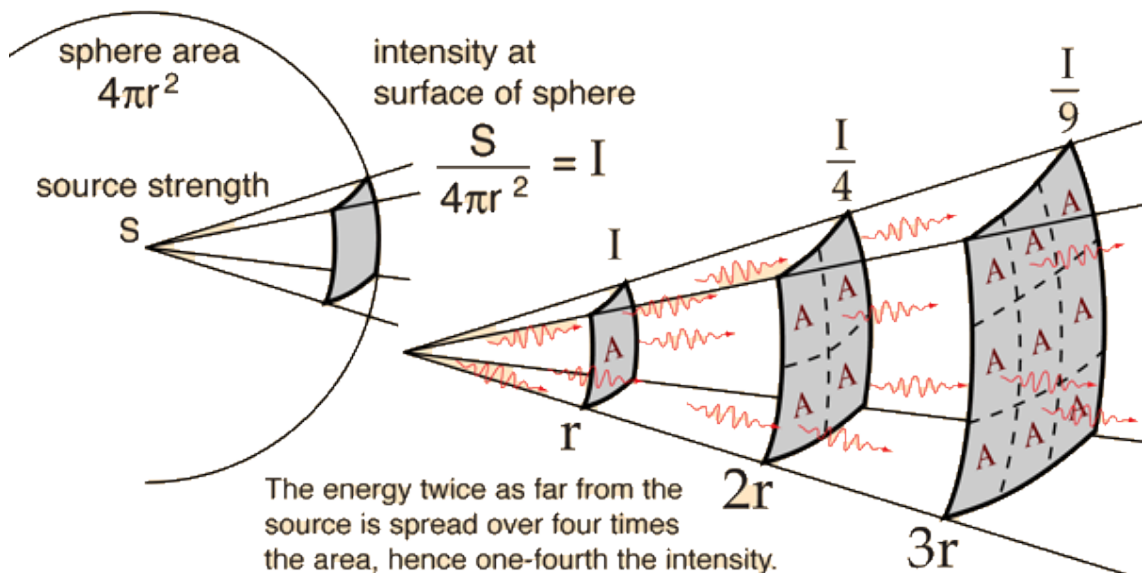
### 3.3 Ultraviolettisäteilyn eteneminen

Ultraviolettisäteilyn lähtiessä säteilylähteestä sen intensiteettiin, eli säteilyn voimakkuuteen, valitussa pisteessä vaikuttavat pääasiassa etäisyys säteilylähteestä sekä väliaineen ominaisuudet. Elektromagneettinen säteily noudattaa käänteisen neliön lakia, jossa säteilyn voimakkuus pienenee suhteessa etäisyyden neliöön. Tilanteessa jossa pistemäinen säteilylähde lähettää säteilyä tasapuolisesti joka suuntaan kuvitteelliselle pallopinnalle voidaan säteilyn intensiteetti  $I$ , etäisyydellä  $r$  laskea kaavasta

$$I = \frac{S}{4\pi r^2},$$

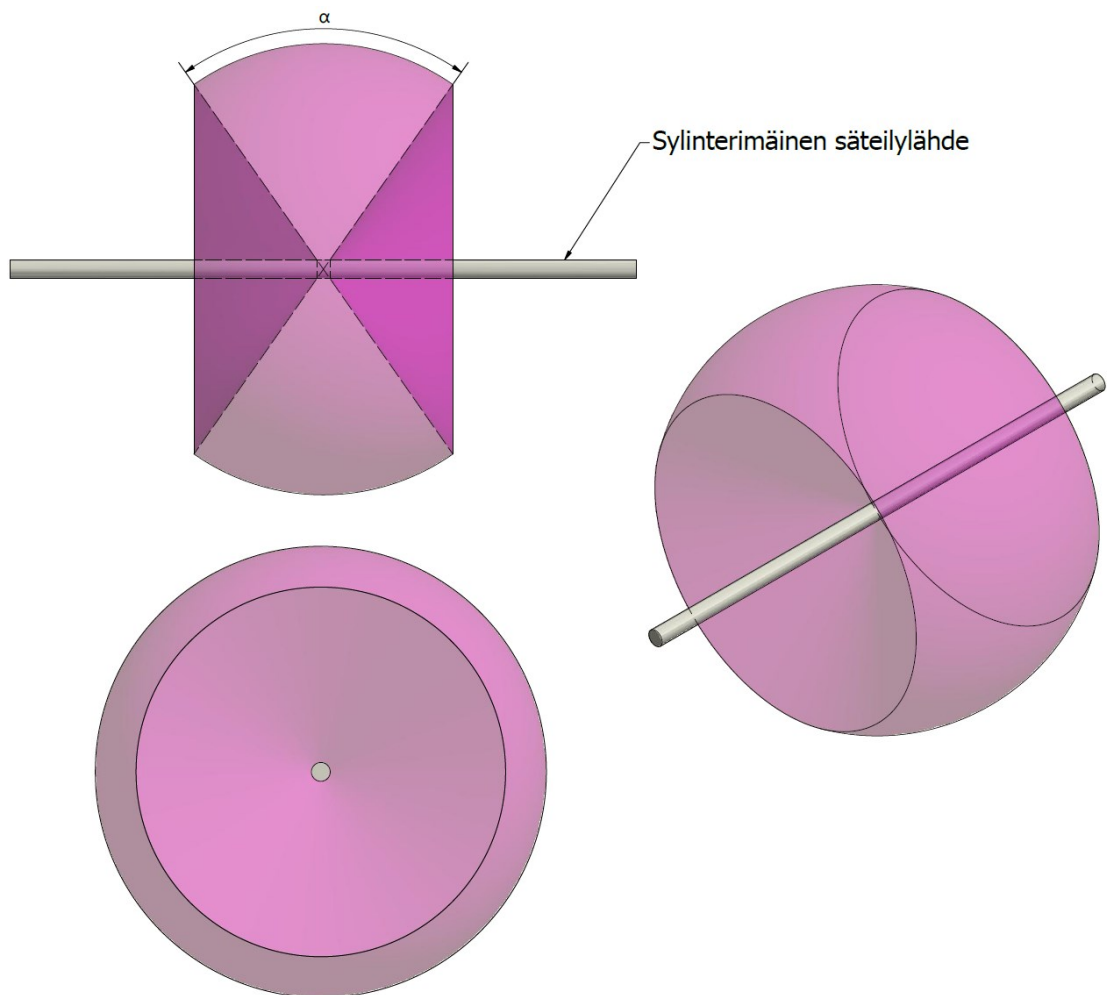
Kaava 1. Käänteisen neliön laki (Georgia State University 2021).

jossa  $S$  kuvaa säteilylähteen voimakkuutta lähtötilanteessa.



Kuva 3. Käänteisen neliön laki havainnollistettuna (Georgia state university 2021).

Laskettaessa elohopealamppujen lähettämää säteilyä, on kuitenkin otettava huomioon, että lamppu säteilee  $360^\circ$  akselinsa ympäri ja on lisäksi muodoltaan pitkänmallinen sylinteri. Laskennallisesti lamppua voidaan lähestyä ajattelemalla sen koostuvan pistejonosta joista jokainen säteilee  $360^\circ$  lampun akselin ympäri ja lähettää säteilyä kulmassa akselin kanssa kohtisuorassa olevaan tasoon nähden. Jos tarkastellaan pistettä, joka ei ole kohtisuorassa kuvitteelliseen vastaanottimeen nähden, on lisäksi otettava huomioon kulmapoikkeama. Kulma  $\alpha$ , jossa säteily pääsee lähtemään sylinteristä riippuu sen materiaalista ja väliaineesta, johon siirrytään (kuva 4). Tiheyden muutokset väliaineessa aiheuttavat säteilyn taittumista rajapinnoilla.



Kuva 4. Esimerkki sylinterimäisen säteilylähteen säteilyprofiilista.

Ultraviolettisäteilyn läpäisevyyttä vedessä kuvaa ns. %UVT-arvo joka määrittää, kuinka paljon lähteneestä säteilystä on prosentuaalisesti jäljellä sen kuljettua 1 cm matkan vedessä. %UVT arvon määrittämiseksi säteilylähde lähettää monokromaattista valoa 254nm taajuudella 1 cm etäisyydellä olevaan sensoriin. Veden absorbanssi  $A$  voidaan laskea säteilylähteen  $I$  ja sensorille saapuvan säteilyn  $I_0$  intensiteetin suhteesta kaavalla

$$A = \log \frac{I}{I_0} .$$

Kaava 2. Veden absorbanssin laskenta (Water Aps 2021)

Edelleen %UVT voidaan määrittää tästä arvosta kaavalla

$$\%UVT = 100 \times 10^{-A} .$$

Kaava 3. Veden läpäisevyyden laskenta (Waters Aps 2021).

Esimerkiksi %UVT-arvon ollessa 50 % on 1 cm päässä säteilylähteestä säteilyn intensiteetti puolittunut ja 2 cm päässä pudonnut neljäsosaan (Water Aps 2021). Veden läpäisevyyteen vaikuttavat suurimmilta osin orgaaniset sekä inorgaaniset kiintoaineet jotka joko kokonaan tai osittain absorboivat säteilyä, tai muuttavat sen kulkusuuntaa (Sensorix 2021).

Kuvassa 5 nähdään mitattuja UVT arvoja kahdestakymmenestä eri satamasta. Arvoja voi käyttää suuntaa-antavina kyseisen sataman veden UV-läpäisevyydestä.

Veden läpäisevyysarvo luonnonvesissä vaihtelee riippuen maantieteellisestä sijainnista, sääolosuhteista sekä vuodenaikojen vaihtelusta. Erityisesti jokisuistojen lähellä sijaitsevista satamissa veden läpäisevyysarvo saattaa hetkellisesti heikentyä huomattavasti esimerkiksi tulvivan joen mukana kuljettaman maa-aineksen takia. Kausittaista vaihtelua esiintyy myös organismien määrässä, esimerkiksi Itämerellä kesäaikaan tapahtuvat leväkukinnot voivat hetkellisesti sekä lisätä järjestelmälle tulevaa organismikuormaa, että vähentää veden läpäisevyyttä.

**Water quality by port**

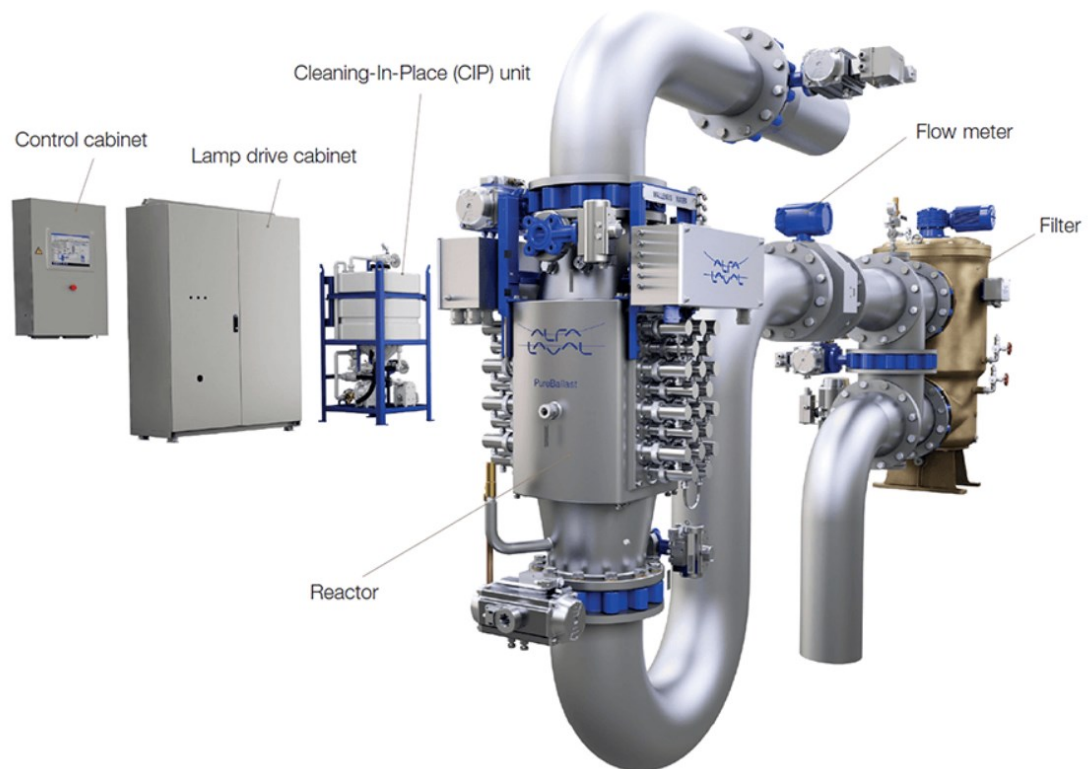
Port	UVT(%)	Temp(°C)	Salinity (PSU)
Istanbul, Turkey	95	6	24
San Pedro, CA, USA	95	2	32
Halifax, NS, Canada	94	-0.8	20
Veracruz, Mexico	94	26	36
Rotterdam, Netherlands	93	5	0.3
Port of Singapore, Singapore	93	27	31.5
Houghton, MI, USA	91	-0.1	0.1
Erie, PA, USA	87	-0.1	0.3
Zeebrugge, Belgium	76	5	26
Gothenburg, Sweden	85	0	20
Charleston, SC, USA	84	10	24
Baltimore, MD, USA	83	11	12
Hong Kong, China	80	17	33
Houston, TX, USA	74	11	20
Hamburg, Germany	69	2	0.1
Antwerp, Belgium	66	5	6.5
Bremerhaven, Germany	60	2	4
Lisbon, Portugal	53	14	35
Southampton, England	51	5	32
Shanghai, China	49	4	1.2

Kuva 5. Eri satamissa mitattuja %UVT-arvoja (Alfa-Laval 2021).

## 4 UV-JÄRJESTELMÄN PÄÄKOMPONENTIT

Ultravioletitekniikkaa hyödyntävät järjestelmät käyttävät pitkälti vakiintuneita komponentteja ja perusasetelma sekä prosessiperiaatteet ovat samoja. Komponenttien yksityiskohtaisemmat ominaisuudet kuitenkin vaihtelevat ja niiden mitoittaminen järkevästi kohdejärjestelmään voi parantaa järjestelmän energiatehokkuutta huomattavasti.

Kuvassa 6 nähdään esimerkkikokoonpano tyypillisestä UV-järjestelmästä painolastiveden käsittelyyn joka koostuu suodatinyksiköstä, reaktoriyksiköstä, ohjaukskaapista, virranjakokaapista, reaktorin puhdistusyksiköstä sekä prosessi-instrumenteista kuten virtaus-, paine-, säteily- ja lämpötila-antureista.



Kuva 6. UV-painolastivesijärjestelmän esimerkkikokoonpano (Alfa-Laval 2021).

Tässä luvussa järjestelmän osat käydään läpi yksityiskohtaisemmin ja arvioidaan niiden ominaisuuksien vaikutusta puhdistusprosessin kannalta.

#### 4.1 Järjestelmän toimintaperiaate

UV-pohjaisessa painolastiveden käsittelyjärjestelmässä painolastitankkeihin otettava vesi pumpataan käsittelyjärjestelmän lävitse, jolloin se kulkeutuu suodatuksen kautta UV-yksikölle. Käsittelyn jälkeen vesi voidaan ohjata painolastitankkeihin, joissa veden on oltava tyypihyväksyntätodistuksessa määritetty aika ennen kuin se voidaan pumpata takaisin mereen, tämä viipymäaika on valmistajasta riippuen tavanomaisesti jotakin 2 ja 72 tunnin väliltä (United States Coast Guard 2021). Viipymäajan jälkeen painolastivesi voidaan pumpata uudelle merialueelle jolloin se tavanomaisesti käsitellään vielä kertaalleen kokonaissäteilyannoksen kasvattamiseksi.

#### 4.2 Suodatinyksikkö

Ennen kuin vesi käsitellään UV-valolla, siitä esisuodatetaan pois suurimmat partikkelit. Painolastivesikäyttöön suunniteltavissa laitteistoissa suodatuskoko on tavanomaisesti 20–40 mikrometriä. Suodatus poistaa suurimpia organismeja, jotka vaatisivat suhteessa huomattavasti korkeamman säteilyannoksen tuhoutuakseen. Lisäksi suodatuksessa halutaan poistaa vedessä olevia inorgaanisia partikkeleita jotka säteilytysvaiheessa absorpoivat säteilyä ja muodostavat fyysisen esteen säteilyn ja kohdeorganismien välille näin vähentäen organismien saamaa keskimääräistä säteilyannosta.

Suodattimet ovat käytännössä aina tyypiltään automaattipuhdistuvia, mikä tarkoittaa, että suodatinyksikön sisällä mitataan paine-eroa suodattimen yli, joka on verrannollinen suodatuselementissä kiinni olevien suodatettujen partikkelien määrään. Kun paine-ero ylittää määritetyn raja-arvon, eli suodatin on tukossa, suodatinelementin sisällä käynnistyy alipaineeseen perustuva imurointimekanismi joka imee suodatinelementin kiintopartikkelit poistovesilinjaan. Tällaisten suodattimien etuna on helppokäyttöisyys, ja ne mahdollistavat järjestelmän pitkän toiminta-ajan ilman, että suodatinta tarvitsee avata ja manuaalisesti puhdistaa (Boll & Kirch 2021).

Suodatuskokoja ei kuitenkaan voida pienentää loputtomiin käytännön asennuksissa, joissa tarvittavat painolastivirtaamat ovat pienimmilläänkin satoja kuutioita tunnissa (American Bureau of Shipping 2019). Suodatinverkon tihentyessä tarvitaan saman virtaaman käsittelyyn suurempi suodatuspinta-ala ja suodatinlaitteen fyysinen koko- sekä valmistuskustannukset kasvavat.

Mitoittamalla suodatinverkon koko oikein voidaan elohopealamppujen tarvitsemassa tehossa säästää huomattavasti siten, että suodatuksen jälkeisessä UV-käsittelyyn menevässä vedessä olisi jäljellä enää vain vähän UV-valoa sietäviä organismeja, ja suodatin olisi kuitenkin kooltaan tarpeeksi pieni asennettavaksi kohdekapasiteetin alukseen helposti.

#### 4.3 Reaktoriyksikkö

Reaktoriyksikkö on järjestelmän osa jossa varsinainen UV-käsittely tapahtuu. Siinä suodattimelta tuleva esikäsitelty vesi virtaa reaktorikammiossa korkeatehoisten elohopealamppujen lomitse, jolloin veden mukana kulkevat partikkelit altistuvat säteilylle.

Teoreettisesti optimaalisessa reaktorissa jokainen sen läpi virtaava partikkeli saisi täsmälleen saman verran säteilyä ja tällöin myös reaktorin energiatehokkuus olisi paras, sillä energiaa voitaisiin käyttää pienin tarvittava määrä. Tämän vuoksi reaktoriyksikön suunnittelu on yksi oleellisimmista järjestelmän toimivuuteen ja energiatehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Keskeistä on arvioida erilaisten lamppukonfiguraatioiden säteilyjakaumaa reaktorin sisällä, veden virtausnopeuksia reaktorin osissa sekä veden virtausprofiilia ja sekoittumista. Käytännössä reaktori joudutaan mitoittamaan ns. heikoimman reitin periaatteella, jossa selvitetään reaktorin lävitse virtaavien teoreettisesten partikkelien reiteistä se johon kohdistuu pienin säteilyannos. Kun heikoimman reitin säteilyannos mitoitetään riittäväksi, saavat kaikkia muita reittejä kulkevat partikkelit aina vähintään riittävän säteilyannoksen. Säteilyannos ilmoitetaan yleensä yksikössä  $\text{mJ/cm}^2$ .

Säteilyannos  $D$  voidaan laskea kaavasta

$$D = I \times t ,$$

jossa  $I$  on säteilyn intensiteetti ja  $t$  käsittelyaika.

Kaava 4. Säteilyannoksen laskenta (Templeton 2021).

Reaktorin laskennallista arviointia on tarkemmin käsitelty luvussa 5.

#### 4.4 UV-lamput

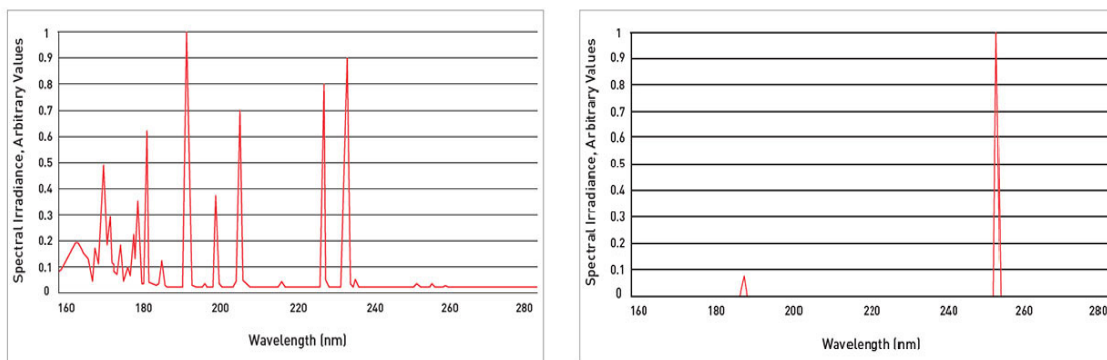
UV valoa lähettäviä lamppuja löytyy markkinoilta laaja valikoima, usein tiettyyn käyttökohteeseen suunniteltuja. Ne vaihtelevat huomattavasti ominaisuuksien, kuten aallonpituusjakauman, maksitehon ja UV hyötysuhteen osalta. Vedenpuhdistuksessa käytetään lähinnä kaasumuotoiseen elohopeaan perustuvia lamppuja jotka ovat luokiteltu lampun sisäisen paineen mukaan matala- ja keskipainelamppuihin, joista käytetään lyhenteitä LP (low pressure) ja MP (medium pressure). Lisäksi matalapainelampuista on olemassa ns. LPHO (low pressure high output) joka on normaalia matalapainelamppua korkeatehoisempi (Cotton ym. 2006).

Taulukosta 2 voidaan nähdä UV-aallonpituusjakauman olevan kummallakin matalapainelampulla monokromaattinen eli vain yhtä tiettyä aallonpituutta, kun taas keskipainelampulla säteilevä UV valo jakautuu koko spektrille.

Erityyppisten elohopealamppujen ominaisuuksia			
Ominaisuus	LP	LPHO	MP
UV Aallonpituusjakauma	254nm monokromaattinen	254nm monokromaattinen	Polykromaattinen 200-300nm
Sisäinen paine (Pa)	0,93	0,18-1,6	40 000 - 4 000 000
Normaali käyttölämpötila (°C)	40	60-100	600-900
Teholuokitus (W/cm)	0,5	1,5-10	50-250
UV korjattu teholuokitus (W/cm)	0,2	0,5-3,5	5-30
UV Tehon hyötysuhde (%)	35-38	30-35	10-20
Valokaaren pituus (cm)	10-150	10-150	5-120
Suhteellinen tarvittavien lamppujen määrä järjestelmissä	Korkea	Keskinkertainen	Vähäinen
Tyypillinen käyttöaika (h)	8 000 - 10 000	8 000 - 12 000	4 000 - 8 000

Taulukko 2. Erityyppisten elohopealamppujen ominaisuuksia (muokattu lähteestä Cotton ym. 2006).

Kuvassa 7 nähdään esimerkkinä kuvaaja eräästä keski- ja matalapainelampusta. Kuvaajissa vaaka-akseli määrittää aallonpituuden ja pystysuuntainen vaihtelu tietyn aallonpituuden suhteellista voimakkuutta lampun kokonaissäteilymäärästä.



Kuva 7. Havainnollistus keskipainelampun (vas.) ja matalapainelampun (oik.) säteilykaumasta (Trojan Technologies 2021).

Vaikka 254 nm aallonpituudella olevan valon on havaittu olevan erityisen vahingollinen DNA:n ja RNA:n nukleotideille, on tutkimusnäyttöä olemassa joka viittaisi kokonaisvaikutukseltaan keskipainelamppujen laajemman säteilyspektrin pääsevän parempiin tuloksiin tutkittaessa eliöiden kykyä palautua UV-valon aiheuttamista vaurioista. Onkin todennäköistä, että eliöiden kokonaiskuolleisuuteen vaikuttavat myös olennaisesti muiden biomolekyylien toiminta, jotka absorpoivat valoa eri aallonpituuksilla (Quek & Hu. 2008).

Elohopealamppujen lisäksi erilaisissa sovelluksissa käytettä UV valoa tuottavia lamppuja ovat mm. metallihalogeenilamput, pulssitoimiset xenonlamput, eximerlamput, UV-laserit sekä UV-LED valot (Cotton ym. 2006).

Elohopealamput menettävät tehoa ikääntyessään ja energiatehokkuuden optimoimiseksi ne tulisi vaihtaa tasaisin väliajoin. Vanhalla lampulla operoitaessa puhdistus voidaan yhä suorittaa, mutta saman UV-säteily määrän saamiseksi tarvitsee lampulle syöttää huomattavasti enemmän energiaa (Cotton ym. 2006). Esimerkkivalmistajan lamppujen ottoteho saattaa mallista riippuen olla mitä tahansa 0,4 – 60 kilowatin väliltä ja arvioitu käyttöikä 1 500 – 10 000 tuntia (Heraeus Noblelight 2021).

#### 4.5 Järjestelmän mittalaitteet

Virallista hyväksyntää hakevassa laitteistossa on oleellista, että järjestelmän säädösten mukainen toiminta voidaan todentaa mittaustuloksia käyttäen. Yleisimmin UV-järjestelmän määritetään toimivan säädösten mukaisesti kun reaktoriyksikössä olevia lamppuja mitattaavan säteilyanturin arvo ylittää tietyn rajan. Raja-arvon tulee olla kolmannen osapuolen

todentamasti riittävä käsittelemään siitä läpi virtaavan veden (United States Coast Guard 2021).

Yksikertaisimmillaan raja-arvo voidaan määrittää päteväksi järjestelmän hyväksytylle maksimivirtaamalle, jolloin säteilyanturi säätää elohopealamppujen tehoa aina niin, että säteilyanturin lukema vastaa vähintään määritettyä raja-arvoa. Tällöin myös raja-arvo pätee kaikille maksimivirtaamaa pienemmille virtaamille, sillä virtausnopeuden hidastuminen reaktoriyksikössä kasvattaa läpivirtaavien partikkeleiden saaman säteilyannoksen suuruutta.

Kuitenkin energiatehokkuuden kannalta parasta olisi, että virtaaman pienentyessä voitaisiin suhteessa vähentää myös lamppujen tehoa portaattomasti niin, että reaktorin läpi virtaavan veden partikkelit saisivat saman säteilyannoksen virtaamasta riippumatta. Tällaisessa asetelmassa järjestelmä ei hukkaa energiaa antamalla hitaammin virtaamille partikkeleille suurempaa säteilyannosta kuin olisi tarpeen. Asetelma on kuitenkin haastavampaa toteuttaa käytännössä, sillä tämä vaatii korrelaatioyhtälön määrittämistä tilavuusvirta- ja säteilyanturin mittausarvojen välille.

Kolmas tapa on määrittää säätöaskeleet eri virtaamille. Tässä menetelmässä valitulle määrälle tilavuusvirran arvoja haetaan riittävää säteilyannosta vastaavat säteilyanturin arvot. Esimerkiksi kaksiporaisessa säädössä voidaan määrittää anturiarvo A, jolla voidaan käsitellä 100 % virtaama ja kaikki sitä pienemmät virtaamat, sekä anturiarvo B, jolla voidaan käsitellä 50 % ja kaikki sitä pienemmät virtaamat. Tällöin virtaaman alentuessa 50 % järjestelmän maksimiarvosta voidaan todeta anturiarvon B olevan riittävä säteilyannoksen tuottamiseen ja laskea elohopealamppujen teho kunnes säätöarvo B saavutetaan. Säätöasketen määrää kasvaessa lähestytään koko ajan enemmän portaattonta säätöä.

#### 4.6 Sähköjärjestelmä

Energiatehokkuuden kannalta sähköjärjestelmän oleellisin komponentti on UV-lampuille tehoa siirtävä virtalähde. Virtalähteitä on olemassa kahta päätyyppiä: elektromagneettisia (kutsutaan myös magneettiseksi) ja elektronisia.

Elektromagneettiset virtalähteet ovat olleet käytössä huomattavasti pidempään ja edustavat tekniikan vanhempaa tyyppiä. Ne ovat halpoja, pitkäikäisiä, eivät vikaannu helposti

ja kestävät hyvin muutoksia ympäristön olosuhteissa. Huonona puolena elektromagneettisissa virtalähteissä on niiden huono säädettävyys sekä huonompi hyötysuhde. Elektroniset virtalähteet saavuttavat paremman hyötysuhteen ja pidentävät elohopealamppujen käyttöikää käynnistysominaisuuksiensa vuoksi. Ne ovat kuitenkin kalliimpia, lyhytikäisempiä ja vikaantuvat helpommin. (Chung ym. 2007).

Jos järjestelmä halutaan suunnitella mahdollisimman energiatehokkaaksi, elektronisilla virtalähteillä saavutetaan huomattavia etuja etenkin niiden hyvän säädettävyiden takia. Ne mahdollistavat lamppuille syötettävän tehon muuttamisen joustavasti ja järjestelmän energiankulutusta voidaan pienentää huomattavasti käytettäessä järjestelmää paikoissa, joissa veden läpäisevyys on hyvä ja lamppuista tarvittava teho on alhainen.

#### 4.7 Käsittely-yksikön puhtauden vaikutus järjestelmän energiatehokkuuteen

Käsittely-yksikön puhtaus vaikuttaa oleellisesti reaktorin energiatehokkuuteen. Lamppujen suojana olevat lasiputket ja säteilyanturin mittausikkuna ovat kvartsilasia joka likaisessa vedessä toimiessaan saattaa ajan myötä kerätä pinnalleen orgaanista- ja inorgaanista likaa. Likaantuessaan UV valosta vähemmän pääsee kulkemaan käsiteltävään veteen ja vielä vähemmän käsittelyn tehoa mittaavaan säteilyanturiin, jolloin järjestelmän tehonkulutus nousee tarpeettoman suureksi automaatio-ohjelman kasvattaessa lamppujen tehoa määritetyn anturiarvon saavuttamiseksi.

Tästä syystä säteilyanturin mittausikkuna ja lamppujen suojaputket tulisi puhdistaa tassisin väliajoin, joillakin valmistajilla on myös osana järjestelmää automaattinen puhdistusyksikkö CIP (cleaning in place) ks. kuva 5. Käytettyjä automaattipuhdistusmenetelmiä ovat mekaaninen puhdistus, kemiallinen puhdistus ja ultraäänipuhdistus.

#### 4.8 UV-järjestelmän energiankulutus

Keskimäärin UV-järjestelmä kuluttaa veden käsittelyyn energiaa  $0,11 \text{ kWh/m}^3$ , joka tarkoittaa, että keskikokoinen UV-järjestelmä jonka tilavuusvirta on  $800 \text{ m}^3/\text{h}$  on operoidessa teholtaan n. 88 kW (Vorkapić ym. 2018). Käytettyyn tehoon vaikuttaa eniten käsiteltävän veden laatu. Teho kuluu käytännössä kokonaan UV-lamppujen käyttöön. Toinen tehonkuluttaja järjestelmässä on suodatinyksikön vastavirtahuuhdeltu, mutta se ei

ole jatkuvatoimista ja suodattimen moottori on teholtaan enimillään muutamia kilowatteja.

Lisäksi eriävät standardit IMO:n ja USCG:n välillä vaikuttavat olennaisesti siihen, minkä verran energiaa järjestelmän tarvitsee käyttää vedenkäsittelyyn. IMO ja USCG käyttävät eliöiden kuolleisuuden määrittämiseen eri menetelmiä. IMO:n käyttämä MPN-menetelmä määrittää otetusta näytteestä ensisijaisesti sitä, ovatko näytteessä olevat organismit elinkelpoisia (Cullen 2019). Riittää siis, että eliö ei kykene lisääntymään kohdeympäristössä. USCG:n käyttämä CFMDA-metodi taas ottaa välitöntä kantaa siihen onko eliö elossa vai kuollut. USCG:n vaatimaa analyysitapaa on jossain määrin kritisoitu, sillä CFMDA-metodin mukainen käsittely vaatii huomattavasti enemmän energiaa ja MPN-metodilla elinkelvottomiksi todettujen eliöiden on argumentoitu olevan vaarattomia ympäristölle vieraslajien leviämisen kannalta (Alfa-Laval 2021).

## 5 REAKTORIYKSIKÖN LASKENNALLINEN ARVIOINTI

Kuten aikaisemmissa kappaleissa on todettu, reaktoriyksikön suunnittelu on yksi keskeisimmistä järjestelmän energiatehokkuuteen ja suorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä. Opinnäytetyössä tuotettiin laskentataulukko, jota käytettiin yhdessä virtausmallituksen kanssa avuksi energiatehokkaan reaktoriyksikön suunnittelussa. Hyödyntäen dataa erilaisten reaktorigeometrioiden virtausmalleista lähtöarvoina laskentataulukossa pystyttiin vertailemaan niiden vaatimia energiankulutuksia asetetun säteilyannoksen saavuttamiseksi. Taulukon avulla pystyttiin myös laskennallisesti arvioimaan järjestelmän muita suorituskykyparametrejä, kuten suurinta toimintasameutta ja tehontarvetta käsiteltäessä erilaisia tilavuusvirtoja. Esimerkki taulukon laskemista arvoista on nähtävillä liitteessä 1.

Laskennan lähtökohtanan hyödynnettiin H. Keitzin vuonna 1971 tekemien tutkimusten tuloksia elohopealamppujen tehon määrittämiseksi, joita käytetään edelleen elohopealamppujen valmistuksessa. Keitz määrittä tutkimuksensa tuloksena kaavan, jolla voidaan laskea elohopealampun teho, kun sitä mitataan säteilymittarilla jonka avauskulma tunnetaan. Avauskulma on termi, jota käytetään säteilymittareissa kuvaamaan kulmaa, jonka ulkopuolelta saapuvaa säteilyä vastaanotin ei huomioi mittauksessa, vastaanotin asetetaan aina kohtisuoraan säteilylähteestä.

Tällaisessa asetelmassa lampun teho  $P$  on mahdollista laskea kaavasta

$$P = \frac{I \times 2\pi^2 \times D \times L}{2\alpha \times \sin 2\alpha} .$$

Kaava 5. Keitzin yhtälö (Sasges ym. 2012).

Kaavassa 5  $I$  on vastaanottimen mittaama säteilyarvo,  $D$  vastaanottimen etäisyys säteilylähteen keskipisteestä ja  $L$  on mitattavan lampun pituus. Kulma  $\alpha$  on puolikulma vastaanottimen näkemästä alueesta. Jos vastaanotin on liian lähellä säteilylähdettä eikä pysty mittaamaan sitä kokonaan, voidaan kaavaa muokata käsittelemään vain vastaanottimen näkemää osaa.

Kun järjestelmien mitoituksia arvioidaan laskennallisesti tuntemattomana tekijänä on yleensä  $I$  eli vastaanottimen mittaama säteilyarvo, jonka kautta voidaan lähteä määrittämään kuvitteellisten vastaanotinpisteiden saamaa säteilyannosta käsittelyjakson aikana.

Näin tarkastelussa voidaan helposti vaihtaa lampun tehoa ja tarkasteltavan pisteen etäisyyttä ja yhdessä tarkasteltavan käsittely-yksikön virtausdynaamisten ominaisuuksien kanssa määrittää läpivirtaavien partikkeleiden saamia säteilyannoksia.

Reaktoriyksikön mitoituksista tehtiin malleja ja laskennan kanssa rinnakkain hyödynnettiin laskennallista virtausdynamiikkaa, eli CFD-laskentaa (computational fluid dynamics), jolla erilaisten reaktorimallien virtausprofiileita voitiin tarkastella yhdessä laskentataulukon kanssa energiatehokkaan sisägeometrian ja lamppusijoittelun löytämiseksi. CFD-laskennassa käytettiin SimScale ohjelmaa, joka on avoimeen lähdekoodiin perustuva pilvipalvelutekniikkaa käyttävä ohjelma. Laskenta suoritetaan ulkoisilla palvelimilla mahdollistaen usean simulaation tekemisen samanaikaisesti ja tulosten tarkastelun selainpohjaisessa käyttöliittymässä. Simulaatiodatan voi myös ladata palvelimelta tietokoneelle ja suorittaa jälkikäsittelyä (post processing) siihen suunnitellulla ohjelmalla. SimScale on saatavilla opinto- ja tutkimuskäyttöön maksutta rajoitetulla määrällä laskentatunteja ja ohjelmaan voi myös ostaa kattavamman lisenssin ammattikäyttöön.

Virtausmalleja iteroitiin erilaisilla virtausta muuttavilla lisäyksillä ja virtausdynaamiset muutokset, joissa havaittiin selkeitä etuja reaktorin käsittelykykyyn ja energiankulutukseen siirtyivät seuraaviin malleihin jatkotutkittaviksi.

Taulukko muotoiltiin laskemaan ja kategorisoi automaattisesti tilavuusvirran arvot eri veden läpäisevyyksissä, joissa määritetty kohdeannos toteutuu ja missä annos ei ole riittävä. Reaktorin matemaattisen tarkastelun lisäksi taulukolla voitiin helposti tutkia tarkasteltavan järjestelmän suorituskykyä eri virtaus- ja läpäisevyysolosuhteissa.

### 5.1 Laskennassa käytetyt lähtöarvot

Laskentaa varten oli tarpeen määrittää mitä kaikkia lähtöarvoja tarvitaan. Seuraavaksi esitellään taulukossa käytetyt lähtöarvot ja mitä ne tarkoittavat. Taulukossa 3 nähdään kuvankaappaus käytetyn laskentataulukon lähtöarvokentistä.

**Mitattava lampun teho:** Kertoo tarkasteltavan lampun ottotehon.

**Järjestelmän kokonaisteho:** Kertoo lamppujen yhteenlasketun tehon usean lampun järjestelmässä.

**UV-hyötysuhde:** Kertoo missä suhteessa lampun ottoteho muuttuu UV-säteilyksi.

**Heijastuskerroin:** Kuvaa arviota reaktoriyksikön sisällä tapahtuvaa UV-valon takaisinheijastumisen määrästä (riippuvainen veden läpäisevyydestä).

**Valokaaren pituus ja suhteellinen teho:** Kuvaavat lampun teho-ominaisuuksia.

**Differentiaaliosan pituus ja teho:** Kuvaavat laskennassa käytettävän lampun osan ominaisuuksia.

**Säteilymittarin avauskulma:** Kuvaa kulmaa, jossa saapuvaa säteilyä anturi vastaanottaa valoa.

**Säteilymittarin näkemä osa ja sen teho:** Kuvaavat osaa lampusta jonka etäisyydelle  $x$  asetetun mittarin näkökentässä.

**Tehokerroin:** Lampun suhteellisen tehon mukaan skaalaava kerroin. Tehon ollessa 100 % maksimiottotehosta tehokerroin on 1. Tehon pienentyessä tehokerroin laskee UV-hyötysuhdetta.

**Muut mitat:** Määrittävät säteilyannoksen laskemiseen tarvittavat tiedot kuten pisteen jossa virtaavan veden partikkelit kauimmillaan keskimäärin kulkevat, veden virtausnopeuden tällä reitillä, säteilyn vedessä kulkemaan etäisyyden eri pisteissä (säteilyä vähentävä vaikutus läpäisevyyden ollessa  $< 100$  %) sekä muut valon eri kerroksissa kulkevat matkat.

**Läpäisyhäviöt:** Arvioidut säteilyhäviöt joita tapahtuu valon siirtyessä kvartsilasin läpi eri vaiheissa. Kvartsilasi ei ole täysin läpäisevää UV-valolle ja riippuen sen laadusta siinä tapahtuu aina jonkin verran takaisinheijastumista.

Taulukko 3. Laskentataulukossa käytetyt lähtöarvot (esimerkki, muutettu todellisista).

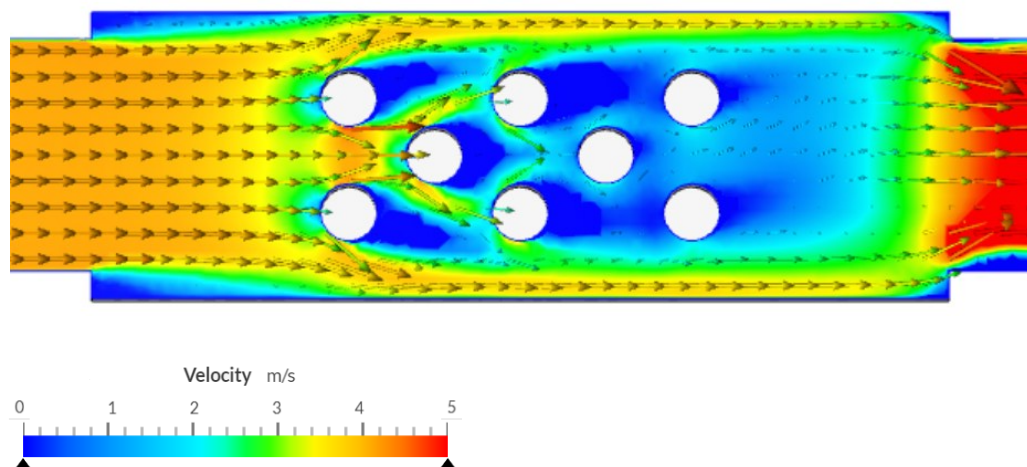
<b>Lähtöarvot</b>	
<b>Lampun tiedot</b>	
Mitattavan lampun teho	3500 W
Järjestelmän kokonaisteho	17,5 kW
UV-hyötysuhde	0,15
Heijastuserroin	1,90
Valokaaren pituus	0,50 m
Suhteellinen teho	1083,67 W/m
Differentiaaliosan pituus	0,01 m
Differentiaaliosan teho	20,59 W
Säteilymittarin avauskulma	30,00 °
Puolikulma	0,52 rad
sin 2a	0,87 rad
2a	1,05 rad
Säteilymittarin näkemä osa	0,05 m
Mitatun osan teho	50,05 W
Tehokerroin	1,00
<b>Muut mitat</b>	
Säteilymittarin etäisyys	0,04 m
Kauimmainen annospiste	0,032 m
Annospisteen etäisyys vedessä	0,01 m
Vedessä kuljettu etäisyys	0,018 m
Lampun ulkosäde	0,0105 m
Lampun lasisuojan ulkosäde	0,022 m
Pii	3,142
Säteilytysmatka	0,9 m
Keskimääräinen virtausnopeus	1,2 m/s
Partikkelin annosaika	0,75 s
<b>Läpäisyhäviöt</b>	
T% Anturilasi	95 %
T% Lasisuoja	95 %
T% Lampun ulkopinta	95 %

## 5.2 Iteratiivisen prosessin aloitus

Simulaatiot aloitettiin käyttäen hyvin yksinkertaista geometrioita, joissa vesi virtasi putkesta suorakulmion muotoiseen laatikkoon. Kuvissa 8 nähdään jälkikäsitellyllä visualisoi- soitu esitys mallinnetun esimerkireaktorin sisällä tapahtuvasta virtauksesta. Havain- nolistettujen vektoreiden suunta ja koko kertovat virtauksen suunnan ja suhteellisen no- peuden. Taustatasolla nähdään myös paikallinen nopeustieto väreillä havainnollistet- tuna.

Tarkastelemalla virtausnopeuden arvoja ja virtausvektroita huomattiin nopeasti, että täy- sin laatikkomaisessa geometriassa oli huomattavia ongelmia säteilyen jakautumisen kanssa. Geometriassa reaktorin sivuille jää vapaata tilaa, jossa virtausvastus on pie- nempi kuin UV-lamppujen läpi mentäessä. Tämän vuoksi virtaus pyrkii väistämään kor- keimman säteilyn alueen reaktorin keskellä. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa reaktorin keskellä virtaavat partikkelit saisivat tarpeettoman korkean säteilyannoksen tapauk- sessa, jossa sivuilla virtaaville partikkeleille haluttaisiin taata riittävä säteilyannos.

Lisäksi geometriassa lamppujen taakse jäi suuria katvealueita, jossa virtausta ei juuri- kaan tapahtunut (kuvassa tummansinisellä). Katvealueilla hukataan lamppujen tehoka- pasiteettia hitaasti virtaavan veden ylikäsittelyyn. Hyvin pian oli siis selvää, että geomet- riaa oli muutettava enemmän virtausta ohjaavaksi.

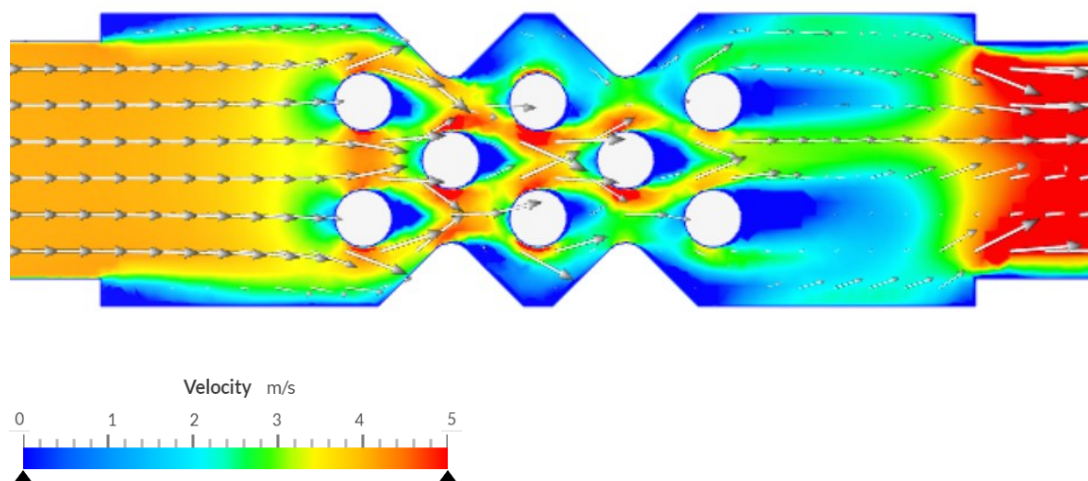


Kuva 8: Ensimmäisiä iteraatiomallin- nuksia.

### 5.3 Iteratiivisen prosessin eteneminen

Seuraavissa iteraatioissa geometriaa muutettiin enemmän virtausta ohjaavaaksi asettamalla sivuille kulmalevyjä, jotka pakottivat virtauksen kääntymään UV-lamppujen suuntaan reunoilta. Kuvassa 9 nähdään samoin tavoin visualisoituna muutosten vaikutus virtausvektoreihin. Jo ensimmäisessä ohjuri-iteraatioissa huomattiin katvealueiden pientyminen ja virtauksen ohjautuminen lähemmäs lamppuja, jolssa säteilyn intensiteetti on korkea. Vaikka myös virtausnopeus kasvaa on oleellista ottaa huomioon, että säteilyn intensiteetti etäisyyteen nähden kasvaa ja vähenee toiseen potenssiin, kun taas nopeuden ja säteilyintensiteetin välinen suhde on vain kerrannollinen. On siis kannattavaa tuoda virtaus lähemmäksi lamppuja vaikka sen nopeus samalla kasvaisi.

Seuraavaksi geometriaa lähdettiin hienosäätämään mm. optimoimalla virtausohjureiden paikkaa ja kulmaa suhteessa lamppeihin. Virtausohjureiden optimointiin vaikuttaviksi tekijöiksi käytännön kannalta muodostuivat virtausnopeuden kasvun (liiallisessa nopeudessa vaarana reaktorin mekaaninen kuluminen) ja painehäviöiden pitäminen maltillisella tasolla. Prosessin aikana käytiin jatkuvaa keskustelua myös mekaniikkasuunnittelun kanssa ja etsittiin geometrioita, jotka olisivat vielä suhteellisen helppoja valmistaa ja toteuttaa käytännössä. Lisäksi muutoksia tehtiin ja analysoitiin lamppejen asetteluun ja reaktorin ulkomittoihin liittyen.



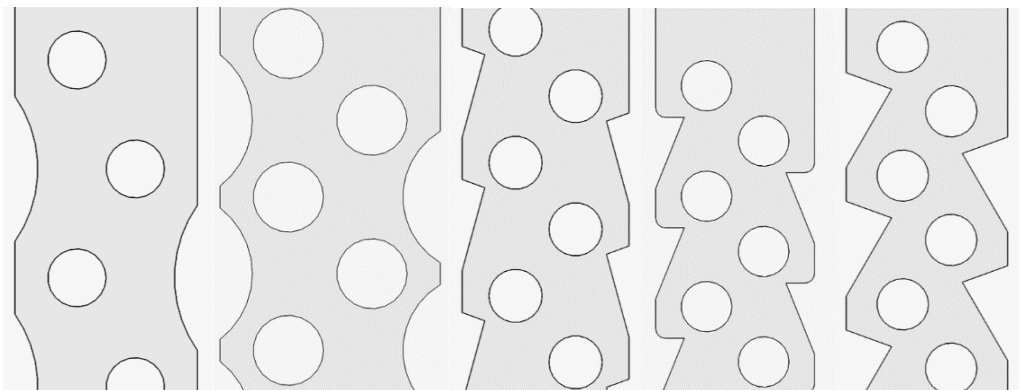
Kuva 9: Analyysin pohjalta tehtyjen muutosten tarkastelua.

#### 5.4 Prosessin lopputulokset

Salassapitosyistä lopullista reaktorigeometriaa ja sen mitoituksia ei käsitellä tässä työssä yksityiskohtaisemmin.

Lopulliseen malliin pääsemiseksi mallinnettiin yhteensä 59 iteraatiota ja ensimmäisistä iteraatioista lopulliseen malliin tultaessa merkittävästi muuttuivat:

- UV-lamppujen määrä
- UV-lamppujen keskinäinen etäisyys sekä etäisyys keskijanasta ja seinistä
- UV-lamppujen lasisuojusten halkaisija
- Reaktorin ulkomitat (reaktoria kavennettiin jotta kokonaisleveys jäisi tulo- ja lähtöyhteen putkileveyden tasolle).
- Seinämissä olevien virtausohjureiden paikka, muoto, koko ja kulma suhteessa virtaussuuntaan.



Kuva 10: Kuvankaappauksia joistakin iteraatioprosessin aikana käytettyjen geometrioiden poikkileikkauksista.

Prosessin tuloksena syntynyt viimeisin malli siirrettiin tuotantoon, ja siitä tehtiin täysikokoinen prototyyppi. Prototyyppi lähetettiin osana muuta järjestelmää ensin testeihin, jossa kartoitettiin sen soveltuvuutta tyyppihyväksyntätestaukseen. Järjestelmä pärjasi esitesteissä erittäin hyvin ja onnistui käsittelemään testiveden asetettujen raja-arvojen mukaisesti sille asetetulla maksimivirtaamalla.

## 6 UV-JÄRJESTELMIEN KEHITYS TULEVAISUUDESSA

UV-järjestelmien siirtyminen valokaarilampuista LED-tekniikkaan odottaa läpimurtoa puolijohdekomponenttien valmistuksessa. Tällä hetkellä markkinoilta löytyvät korkeatehoisimmat LED-valot ovat teholtaan noin 4 W ja niiden UVC-hyötysuhde 1–2 %, jolloin UVC tehoa saadaan noin 70 mW (Klaran 2021). Pienitehoisuutensa takia LED-valoja tarvitaan huomattava määrä. Jos ajatellaan keskikokoista elohopealamppuja käyttävää UV-puhdistusjärjestelmää, jonka keskimääräinen käyttöteho on 88 kW, voidaan sen arvioida tuottavan noin 13 kW UVC-säteilyä hyötysuhteen ollessa 15 %. Vastaavan UVC-säteily määrän tuottaminen LED-valoilla vaatisi nykyisellä teknologialla tässä tilanteessa arviolta 185 714 LED-valoa. Vaikka LED-valot ovat pieniä ja niitä voidaan asentaa lähikäin toisiaan, järjestelmän koko kasvaisi siitä huolimatta niin suureksi, että sen asentaminen laivaympäristöön ei olisi millään tavalla järkevää. Lisäksi edellä mainittu määrä LED-valoja tuottaisi lähes megawatin hukkalämpöä, jota laivoissa muodostuu paljon jo valmiiksi suurilla moottoreilla jäähdytettäessä.

Tästä huolimatta UVC-LED-valot ovat lupaava tulevaisuuden vaihtoehto elohopealamppujen korvaajiksi. Etuina LED-valoilla on huomattavasti suurempi käyttöikä, pieni koko ja pieni vikaantuvuus. Lisäksi niiden aallonpituusjakauma voidaan valita muuttamalla käytettyjä puolijohdeita. (Umar ym. 2014). Tällä hetkellä valaistukseen käytettävien LED-valojen hyötysuhteet ovat parhaimmillaan noin 50 % (Dial 2021).

UVC-LED-valojen käyttö painolastijärjestelmissä vaatii myös UV-reaktorin uudenlaista suunnittelua, sillä toisin kuin elohopealamput, LED-valot ovat pistemäisiä säteilylähteitä ja lähettävät säteilyä vain yhteen suuntaan tietyssä kulmassa.

## 7 POHDINTA

UV-pohjaisen painolastiveden käsittelyjärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavat olennaisesti komponenttivalinnat ja UV-reaktorin tarkoituksenmukainen suunnittelu, sen mukaan minkälaisia ominaisuuksia järjestelmässä halutaan korostaa.

Erilaisten UV-reaktorien mitoituksia voidaan arvioida matemaattisesti ja optimoida järjestelmää tietynlaisiin olosuhteisiin käytettäväksi. On kuitenkin huomioitava, että työssä tehdyn matemaattisen tarkastelun kaltainen arvio on aina suuntaa antava ja todellisuudessa kaikkia UV-reaktorin suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä on vaikea ottaa huomioon. Tästä syystä järjestelmän toiminta tulisi aina testata todellisuudessa oikeinlaisella koejärjestelyllä, jotta laskennan tarkkuutta ja vastaavuutta todellisuuteen voidaan arvioida. Kokeellisten tulosten perusteella laskentaa on kuitenkin mahdollista tarkentaa korjauskertoimilla, jotka kompensoivat laskennassa käytettyjen liki- ja keskiarvojen epätarkkuuksia.

Lisätutkimuksen kohteena puhdistusyksiköiden energiatehokkuuden parantamiseksi voisi lähteä selvittämään heijastavien materiaalien käyttöä puhdistusyksikön sisällä. Asiaa ei työssä lähdetty enemmälti tutkimaan, sillä sen lähestyminen matemaattisesti on erittäin haastavaa ja vaatisi ennemminkin paljon käytännön testausta ja mittausdatan analysointia. Heijastamateriaaleilla todennäköisesti voitaisiin saavuttaa vähennystä puhdistusyksikön tehonkulutukseen käyttötilanteissa, joissa käsiteltävän veden UV-valon läpäisevyys on hyvä.

## LÄHTEET

- Alfa-Laval. Holding times and UV measurements in ballast water treatment. 2017.  
<https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/process-solutions/ballast-water-solutions/MDD00657EN.pdf>
- Alfa-Laval Pureballast. UV Ballast Water Treatment. Viitattu 6.5.2021  
<https://www.alfalaval.com/microsites/pureballast/uvballastwatertreatment/>
- American Bureau of Shipping. Best Practices for Operations of Ballast Water Management Systems Report. 2019.
- Bellefontaine, N.; Haag, F.; Lindén, O.; Matheickal J. 2010. Proceedings of the IMO-WMU Research and Development forum. 2010. WMU Publications.
- Boll & Kirch. Automatic backwash filters. Viitattu 12.5.2021)  
<https://www.bollfilter.com/filters/filter-types/automatic-backwash-filter>
- Chung, H.; Ho, C.; Hui S. 2007. Comparison of Dimmable Electromagnetic and Electronic Ballast Systems – An assessment on Energy Efficiency and Lifetime. IEEE Transactions on Industrial Electronics, volume 54.
- ClassNK. ClassNK Advises Existing Ships to Instal Ballast Water Management Systems Early On. 2018. [https://www.classnk.or.jp/hp/en/hp\\_news.aspx?id=3165&type=press\\_release&layout=5](https://www.classnk.or.jp/hp/en/hp_news.aspx?id=3165&type=press_release&layout=5)
- Cotton, C.; Owen, D.; Schmelling, D.; Mackey, E.; Wright, H.; Linden, K.; Malley, J. 2006. Ultra-violet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. United States Environmental Protection Agency, Office of Water.
- Cullen, J. 2019. The best available science describing type-approval testing methods and protocols for ballast water management systems that render nonviable organisms in ballast water. Dalhousie University Department of Oceanography.
- Desmi Oceanguard. Ballast water management technologies: A comparison between UV based systems & electrochlorination systems.  
[https://desmioceanguard.com/media/pe4dyokr/desmi\\_bwms\\_technologies.pdf](https://desmioceanguard.com/media/pe4dyokr/desmi_bwms_technologies.pdf)
- Dial. Efficiency of LEDs: The highest luminous efficacy of a white LED. 2016.  
<https://www.dial.de/en/blog/article/efficiency-of-leds-the-highest-luminous-efficacy-of-a-white-led/>
- Georgia State University, Hyperphysics. Viitattu 12.5.2021.  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/refr.html>
- Glasco UV, about UV light. Viitattu 5.5.2021  
<http://www.glascouv.com/uv-info.html>
- Gollasch, S. & Matej, D. 2018. Ballast Water: Problems and Management. 2019 World Seas: An Environmental Evaluation (Second Edition), volume 3, sivut 237-250.
- Heraeus Noblelight. UV medium-pressure lamps. Viitattu 24.5.2021  
[https://www.heraeus.com/en/hng/products\\_and\\_solutions/uv\\_lamps\\_and\\_systems/uv\\_lamps/uv\\_medium\\_pressure\\_lamps/uv\\_medium\\_pressure\\_lamps.html#tabs-43875-3](https://www.heraeus.com/en/hng/products_and_solutions/uv_lamps_and_systems/uv_lamps/uv_medium_pressure_lamps/uv_medium_pressure_lamps.html#tabs-43875-3)

Indian Register of Shipping Technical Circular No. 40. 2016. <https://www.irclass.org/technical-circulars/iopp-certificate-renewal-in-respect-of-ballast-water-management/>

International Maritime Organization. Ballast Water Management. Viitattu 26.9.2021 <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/BallastWaterManagement.aspx>

International Maritime Organization. BWMS Technologies. Viitattu 24.4.2021. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/BWMTechnologies.aspx>

Klaran UV-led datasheet. Viitattu 27.5.2021 [https://www.klaran.com/images/Products/cis\\_klaran\\_wd\\_ds\\_031021.pdf](https://www.klaran.com/images/Products/cis_klaran_wd_ds_031021.pdf)

Offshore Energy. BIMCO asks IMO MEPC to extend BWM experience building phase. Viitattu 20.10.2021. <https://www.offshore-energy.biz/bimco-asks-imo-to-extend-ebp-building-phase/>

Quek, P. & Hu, J. 2008. Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. Journal of industrial microbiology and biotechnology, vol 35.

Sensorex. What is UV Transmittance (UVT)?. Viitattu 19.5.2021. <https://sensorex.com/uv-transmittance/>

Sun, Z. & Blatchley, E.R. 2017. Tetraselmis as a challenge organism for validation of ballast water UV systems. Water Research, volume 121, Issue 14.

Templeton, M. Basic Principles of UV Disinfection. Imperial College of London. Viitattu 30.5.2021. [https://www.un-ihe.org/sites/default/files/3\\_templeton.pdf](https://www.un-ihe.org/sites/default/files/3_templeton.pdf)

Umar, M.; Roddick, F.; Fan, L.; Autin, O.; Jefferson, B. 2014. Treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate using UVC-LED/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with and without coagulation pre-treatment. Journal of Chemical Engineering, volume 260, January 2015.

Trojan Technologies, UV lamps. Viitattu 8.4.2021. <https://www.trojantechnologies.com/en/technologies/uv-lamps>

United States Coast Guard, Marine Safety Center. Viitattu 16.5.2021. <https://www.dco.uscg.mil/Our-Organization/Assistant-Commandant-for-Prevention-Policy-CG-5P/Commercial-Regulations-standards-CG-5PS/Marine-Safety-Center-MSC/Ballast-Water/>

Vorkapić, A.; Radonja, R.; Zec, D. Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. 2018. Promet – Traffic and Transport, volume 30 issue 3, sivut 343-348.

World Health Organization. Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water. 2004. IWA Publishing, London, UK.

Wärtsilä. BWMS booklet. 2012. Viitattu 29.3.2021 <https://www.wartsila.com/static/studio/assets/content/ss4/ballast-ga-booklet.pdf>

## UV-reaktorin laskentaan käytetty taulukko

Säteilyannoksen laskenta															
UVT%	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
Reitin säteilyannos	44 mJ/cm <sup>2</sup>	68 mJ/cm <sup>2</sup>	98 mJ/cm <sup>2</sup>	136 mJ/cm <sup>2</sup>	181 mJ/cm <sup>2</sup>	236 mJ/cm <sup>2</sup>	299 mJ/cm <sup>2</sup>	373 mJ/cm <sup>2</sup>	457 mJ/cm <sup>2</sup>	553 mJ/cm <sup>2</sup>	660 mJ/cm <sup>2</sup>	780 mJ/cm <sup>2</sup>	913 mJ/cm <sup>2</sup>	1 059 mJ/cm <sup>2</sup>	1 220 mJ/cm <sup>2</sup>
Teho tarkastelupisteessä	111 mW/cm <sup>2</sup>	170 mW/cm <sup>2</sup>	245 mW/cm <sup>2</sup>	339 mW/cm <sup>2</sup>	453 mW/cm <sup>2</sup>	589 mW/cm <sup>2</sup>	748 mW/cm <sup>2</sup>	933 mW/cm <sup>2</sup>	1 143 mW/cm <sup>2</sup>	1 382 mW/cm <sup>2</sup>	1 651 mW/cm <sup>2</sup>	1 950 mW/cm <sup>2</sup>	2 282 mW/cm <sup>2</sup>	2 648 mW/cm <sup>2</sup>	3 049 mW/cm <sup>2</sup>
UVI%															
Tilavuusvirta	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
50 m <sup>3</sup> /h	222 mJ/cm <sup>2</sup>	340 mJ/cm <sup>2</sup>	491 mJ/cm <sup>2</sup>	679 mJ/cm <sup>2</sup>	907 mJ/cm <sup>2</sup>	1 178 mJ/cm <sup>2</sup>	1 497 mJ/cm <sup>2</sup>	1 865 mJ/cm <sup>2</sup>	2 287 mJ/cm <sup>2</sup>	2 765 mJ/cm <sup>2</sup>	3 302 mJ/cm <sup>2</sup>	3 901 mJ/cm <sup>2</sup>	4 565 mJ/cm <sup>2</sup>	5 296 mJ/cm <sup>2</sup>	6 099 mJ/cm <sup>2</sup>
60 m <sup>3</sup> /h	185 mJ/cm <sup>2</sup>	283 mJ/cm <sup>2</sup>	409 mJ/cm <sup>2</sup>	565 mJ/cm <sup>2</sup>	755 mJ/cm <sup>2</sup>	982 mJ/cm <sup>2</sup>	1 247 mJ/cm <sup>2</sup>	1 554 mJ/cm <sup>2</sup>	1 906 mJ/cm <sup>2</sup>	2 304 mJ/cm <sup>2</sup>	2 751 mJ/cm <sup>2</sup>	3 251 mJ/cm <sup>2</sup>	3 804 mJ/cm <sup>2</sup>	4 414 mJ/cm <sup>2</sup>	5 082 mJ/cm <sup>2</sup>
70 m <sup>3</sup> /h	159 mJ/cm <sup>2</sup>	243 mJ/cm <sup>2</sup>	351 mJ/cm <sup>2</sup>	485 mJ/cm <sup>2</sup>	648 mJ/cm <sup>2</sup>	842 mJ/cm <sup>2</sup>	1 069 mJ/cm <sup>2</sup>	1 332 mJ/cm <sup>2</sup>	1 634 mJ/cm <sup>2</sup>	1 975 mJ/cm <sup>2</sup>	2 358 mJ/cm <sup>2</sup>	2 786 mJ/cm <sup>2</sup>	3 260 mJ/cm <sup>2</sup>	3 783 mJ/cm <sup>2</sup>	4 356 mJ/cm <sup>2</sup>
80 m <sup>3</sup> /h	139 mJ/cm <sup>2</sup>	212 mJ/cm <sup>2</sup>	307 mJ/cm <sup>2</sup>	424 mJ/cm <sup>2</sup>	567 mJ/cm <sup>2</sup>	736 mJ/cm <sup>2</sup>	935 mJ/cm <sup>2</sup>	1 166 mJ/cm <sup>2</sup>	1 429 mJ/cm <sup>2</sup>	1 728 mJ/cm <sup>2</sup>	2 064 mJ/cm <sup>2</sup>	2 438 mJ/cm <sup>2</sup>	2 853 mJ/cm <sup>2</sup>	3 310 mJ/cm <sup>2</sup>	3 812 mJ/cm <sup>2</sup>
90 m <sup>3</sup> /h	124 mJ/cm <sup>2</sup>	189 mJ/cm <sup>2</sup>	273 mJ/cm <sup>2</sup>	377 mJ/cm <sup>2</sup>	504 mJ/cm <sup>2</sup>	655 mJ/cm <sup>2</sup>	832 mJ/cm <sup>2</sup>	1 036 mJ/cm <sup>2</sup>	1 271 mJ/cm <sup>2</sup>	1 536 mJ/cm <sup>2</sup>	1 834 mJ/cm <sup>2</sup>	2 167 mJ/cm <sup>2</sup>	2 536 mJ/cm <sup>2</sup>	2 942 mJ/cm <sup>2</sup>	3 388 mJ/cm <sup>2</sup>
100 m <sup>3</sup> /h	111 mJ/cm <sup>2</sup>	170 mJ/cm <sup>2</sup>	245 mJ/cm <sup>2</sup>	339 mJ/cm <sup>2</sup>	453 mJ/cm <sup>2</sup>	589 mJ/cm <sup>2</sup>	748 mJ/cm <sup>2</sup>	933 mJ/cm <sup>2</sup>	1 143 mJ/cm <sup>2</sup>	1 382 mJ/cm <sup>2</sup>	1 651 mJ/cm <sup>2</sup>	1 950 mJ/cm <sup>2</sup>	2 282 mJ/cm <sup>2</sup>	2 648 mJ/cm <sup>2</sup>	3 049 mJ/cm <sup>2</sup>
110 m <sup>3</sup> /h	101 mJ/cm <sup>2</sup>	155 mJ/cm <sup>2</sup>	223 mJ/cm <sup>2</sup>	308 mJ/cm <sup>2</sup>	412 mJ/cm <sup>2</sup>	536 mJ/cm <sup>2</sup>	680 mJ/cm <sup>2</sup>	848 mJ/cm <sup>2</sup>	1 040 mJ/cm <sup>2</sup>	1 257 mJ/cm <sup>2</sup>	1 501 mJ/cm <sup>2</sup>	1 773 mJ/cm <sup>2</sup>	2 075 mJ/cm <sup>2</sup>	2 407 mJ/cm <sup>2</sup>	2 772 mJ/cm <sup>2</sup>
120 m <sup>3</sup> /h	93 mJ/cm <sup>2</sup>	142 mJ/cm <sup>2</sup>	204 mJ/cm <sup>2</sup>	283 mJ/cm <sup>2</sup>	378 mJ/cm <sup>2</sup>	491 mJ/cm <sup>2</sup>	624 mJ/cm <sup>2</sup>	777 mJ/cm <sup>2</sup>	953 mJ/cm <sup>2</sup>	1 152 mJ/cm <sup>2</sup>	1 376 mJ/cm <sup>2</sup>	1 625 mJ/cm <sup>2</sup>	1 902 mJ/cm <sup>2</sup>	2 207 mJ/cm <sup>2</sup>	2 541 mJ/cm <sup>2</sup>
130 m <sup>3</sup> /h	86 mJ/cm <sup>2</sup>	131 mJ/cm <sup>2</sup>	189 mJ/cm <sup>2</sup>	261 mJ/cm <sup>2</sup>	349 mJ/cm <sup>2</sup>	453 mJ/cm <sup>2</sup>	576 mJ/cm <sup>2</sup>	717 mJ/cm <sup>2</sup>	880 mJ/cm <sup>2</sup>	1 063 mJ/cm <sup>2</sup>	1 270 mJ/cm <sup>2</sup>	1 500 mJ/cm <sup>2</sup>	1 756 mJ/cm <sup>2</sup>	2 037 mJ/cm <sup>2</sup>	2 346 mJ/cm <sup>2</sup>
140 m <sup>3</sup> /h	79 mJ/cm <sup>2</sup>	121 mJ/cm <sup>2</sup>	175 mJ/cm <sup>2</sup>	242 mJ/cm <sup>2</sup>	324 mJ/cm <sup>2</sup>	421 mJ/cm <sup>2</sup>	535 mJ/cm <sup>2</sup>	666 mJ/cm <sup>2</sup>	817 mJ/cm <sup>2</sup>	987 mJ/cm <sup>2</sup>	1 179 mJ/cm <sup>2</sup>	1 393 mJ/cm <sup>2</sup>	1 630 mJ/cm <sup>2</sup>	1 892 mJ/cm <sup>2</sup>	2 178 mJ/cm <sup>2</sup>
150 m <sup>3</sup> /h	74 mJ/cm <sup>2</sup>	113 mJ/cm <sup>2</sup>	164 mJ/cm <sup>2</sup>	226 mJ/cm <sup>2</sup>	302 mJ/cm <sup>2</sup>	393 mJ/cm <sup>2</sup>	499 mJ/cm <sup>2</sup>	622 mJ/cm <sup>2</sup>	762 mJ/cm <sup>2</sup>	922 mJ/cm <sup>2</sup>	1 101 mJ/cm <sup>2</sup>	1 300 mJ/cm <sup>2</sup>	1 522 mJ/cm <sup>2</sup>	1 765 mJ/cm <sup>2</sup>	2 033 mJ/cm <sup>2</sup>
160 m <sup>3</sup> /h	70 mJ/cm <sup>2</sup>	106 mJ/cm <sup>2</sup>	153 mJ/cm <sup>2</sup>	212 mJ/cm <sup>2</sup>	283 mJ/cm <sup>2</sup>	368 mJ/cm <sup>2</sup>	468 mJ/cm <sup>2</sup>	583 mJ/cm <sup>2</sup>	715 mJ/cm <sup>2</sup>	864 mJ/cm <sup>2</sup>	1 032 mJ/cm <sup>2</sup>	1 219 mJ/cm <sup>2</sup>	1 426 mJ/cm <sup>2</sup>	1 655 mJ/cm <sup>2</sup>	1 906 mJ/cm <sup>2</sup>
170 m <sup>3</sup> /h	65 mJ/cm <sup>2</sup>	100 mJ/cm <sup>2</sup>	144 mJ/cm <sup>2</sup>	200 mJ/cm <sup>2</sup>	267 mJ/cm <sup>2</sup>	347 mJ/cm <sup>2</sup>	440 mJ/cm <sup>2</sup>	549 mJ/cm <sup>2</sup>	673 mJ/cm <sup>2</sup>	813 mJ/cm <sup>2</sup>	971 mJ/cm <sup>2</sup>	1 147 mJ/cm <sup>2</sup>	1 343 mJ/cm <sup>2</sup>	1 558 mJ/cm <sup>2</sup>	1 794 mJ/cm <sup>2</sup>
180 m <sup>3</sup> /h	62 mJ/cm <sup>2</sup>	94 mJ/cm <sup>2</sup>	136 mJ/cm <sup>2</sup>	188 mJ/cm <sup>2</sup>	252 mJ/cm <sup>2</sup>	327 mJ/cm <sup>2</sup>	416 mJ/cm <sup>2</sup>	518 mJ/cm <sup>2</sup>	635 mJ/cm <sup>2</sup>	768 mJ/cm <sup>2</sup>	917 mJ/cm <sup>2</sup>	1 084 mJ/cm <sup>2</sup>	1 268 mJ/cm <sup>2</sup>	1 471 mJ/cm <sup>2</sup>	1 694 mJ/cm <sup>2</sup>
190 m <sup>3</sup> /h	59 mJ/cm <sup>2</sup>	89 mJ/cm <sup>2</sup>	129 mJ/cm <sup>2</sup>	179 mJ/cm <sup>2</sup>	239 mJ/cm <sup>2</sup>	310 mJ/cm <sup>2</sup>	394 mJ/cm <sup>2</sup>	491 mJ/cm <sup>2</sup>	602 mJ/cm <sup>2</sup>	728 mJ/cm <sup>2</sup>	869 mJ/cm <sup>2</sup>	1 026 mJ/cm <sup>2</sup>	1 201 mJ/cm <sup>2</sup>	1 394 mJ/cm <sup>2</sup>	1 605 mJ/cm <sup>2</sup>
200 m <sup>3</sup> /h	56 mJ/cm <sup>2</sup>	85 mJ/cm <sup>2</sup>	123 mJ/cm <sup>2</sup>	170 mJ/cm <sup>2</sup>	227 mJ/cm <sup>2</sup>	295 mJ/cm <sup>2</sup>	374 mJ/cm <sup>2</sup>	466 mJ/cm <sup>2</sup>	572 mJ/cm <sup>2</sup>	691 mJ/cm <sup>2</sup>	825 mJ/cm <sup>2</sup>	975 mJ/cm <sup>2</sup>	1 141 mJ/cm <sup>2</sup>	1 324 mJ/cm <sup>2</sup>	1 525 mJ/cm <sup>2</sup>
210 m <sup>3</sup> /h	53 mJ/cm <sup>2</sup>	81 mJ/cm <sup>2</sup>	117 mJ/cm <sup>2</sup>	162 mJ/cm <sup>2</sup>	216 mJ/cm <sup>2</sup>	281 mJ/cm <sup>2</sup>	356 mJ/cm <sup>2</sup>	444 mJ/cm <sup>2</sup>	545 mJ/cm <sup>2</sup>	658 mJ/cm <sup>2</sup>	786 mJ/cm <sup>2</sup>	929 mJ/cm <sup>2</sup>	1 087 mJ/cm <sup>2</sup>	1 261 mJ/cm <sup>2</sup>	1 452 mJ/cm <sup>2</sup>
220 m <sup>3</sup> /h	51 mJ/cm <sup>2</sup>	77 mJ/cm <sup>2</sup>	112 mJ/cm <sup>2</sup>	154 mJ/cm <sup>2</sup>	206 mJ/cm <sup>2</sup>	268 mJ/cm <sup>2</sup>	340 mJ/cm <sup>2</sup>	424 mJ/cm <sup>2</sup>	520 mJ/cm <sup>2</sup>	628 mJ/cm <sup>2</sup>	750 mJ/cm <sup>2</sup>	887 mJ/cm <sup>2</sup>	1 037 mJ/cm <sup>2</sup>	1 204 mJ/cm <sup>2</sup>	1 386 mJ/cm <sup>2</sup>
230 m <sup>3</sup> /h	48 mJ/cm <sup>2</sup>	74 mJ/cm <sup>2</sup>	107 mJ/cm <sup>2</sup>	148 mJ/cm <sup>2</sup>	197 mJ/cm <sup>2</sup>	256 mJ/cm <sup>2</sup>	325 mJ/cm <sup>2</sup>	405 mJ/cm <sup>2</sup>	497 mJ/cm <sup>2</sup>	601 mJ/cm <sup>2</sup>	718 mJ/cm <sup>2</sup>	848 mJ/cm <sup>2</sup>	992 mJ/cm <sup>2</sup>	1 151 mJ/cm <sup>2</sup>	1 326 mJ/cm <sup>2</sup>
240 m <sup>3</sup> /h	46 mJ/cm <sup>2</sup>	71 mJ/cm <sup>2</sup>	102 mJ/cm <sup>2</sup>	141 mJ/cm <sup>2</sup>	189 mJ/cm <sup>2</sup>	245 mJ/cm <sup>2</sup>	312 mJ/cm <sup>2</sup>	389 mJ/cm <sup>2</sup>	476 mJ/cm <sup>2</sup>	576 mJ/cm <sup>2</sup>	688 mJ/cm <sup>2</sup>	813 mJ/cm <sup>2</sup>	951 mJ/cm <sup>2</sup>	1 103 mJ/cm <sup>2</sup>	1 271 mJ/cm <sup>2</sup>
250 m <sup>3</sup> /h	44 mJ/cm <sup>2</sup>	68 mJ/cm <sup>2</sup>	98 mJ/cm <sup>2</sup>	136 mJ/cm <sup>2</sup>	181 mJ/cm <sup>2</sup>	236 mJ/cm <sup>2</sup>	299 mJ/cm <sup>2</sup>	373 mJ/cm <sup>2</sup>	457 mJ/cm <sup>2</sup>	553 mJ/cm <sup>2</sup>	660 mJ/cm <sup>2</sup>	780 mJ/cm <sup>2</sup>	913 mJ/cm <sup>2</sup>	1 059 mJ/cm <sup>2</sup>	1 220 mJ/cm <sup>2</sup>

Liite 1. Kuvankaappaus tehdyn laskentataulukon analysikentästä, jossa määritetyillä arvoilla on laskettu esimerkireaktorin säteilyannoksia tarkastelupisteessä (arvot muutettu).