

Työkalu taudinaiheuttajien poistotehon arviointiin vedentuotantoketjussa

Vesilaitosyhdistyksen
monistesarja nro 54

Helsinki 2019

Julkaisun myynti:

Vesilaitosyhdistys
Ratamestarinkatu 7 B
00520 Helsinki

puh. (09) 868 9010
sähköposti: vvy@vvy.fi
kotisivu www.vvy.fi

ISSN-L 2242-7279
ISSN 2242-7279

ISBN 978-952-6697-52-9

Copy-Set Oy, Helsinki 2019
2. painos

KUVAILULEHTI			
<i>Julkaisija</i>	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
<i>Tekijät</i>	Norsk Vann, Suomen Vesilaitosyhdistys ry ja Svenskt Vatten		
<i>Julkaisun nimi</i>	Työkalu taudinaiheuttajien poistotehon arviointiin vedentuotantoketjussa		
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 54		
<i>Julkaisun teema</i>	Vedenhankinta, vedenkäsittely, desinfiointi, talousveden laatu, taudinaiheuttajat		
<i>Saatavuus</i>			
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Tässä oppaassa on esitetty Norjassa kehitettyyn menetelmään perustuva työkalu taudinaiheuttajien poistotehon arviointiin vedentuotantoketjussa. Työkalu auttaa vesilaitoksia ja suunnittelijoita määrittelemään tarvittavat ja riittävät toimenpiteet taudinaiheuttajien poistumisen varmistamiseksi vedentuotantoketjussa. Työkalu myös lisää ymmärrystä taudinaiheuttajien poistumiseen vaikuttavien käsittelyvaiheiden ja toimenpiteiden merkityksestä.</p> <p>Talousveden tuotantoketjussa pitää olla useampia itsenäisiä vaiheita taudinaiheuttajien poistamiseksi, jotta veden välityksellä leviävien tautien riski on hallittu. Useimmat vesilaitokset turvaavat talousveden mikrobiologista laatua desinfiomalla, mutta mikrobiologista laatua turvataan myös suojelemalla raakavettä ja vedenottoa saastumiselta sekä käsittelemällä vettä muutoin kuin desinfiomalla.</p> <p>Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon riittävyttä arvioidaan laskennallisesti eri mikrobien logaritmisten poistumien avulla. Arviointi sisältää seuraavat vaiheet:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho. 2) Taudinaiheuttajien poistuminen raakaveden ja vedenoton suojelutoimenpiteillä. 3) Taudinaiheuttajien poistuminen vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia. 4) Taudinaiheuttajien poistuminen desinfioinnissa. 5) Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistoteho suhteessa tarvittavaan poistotehoon. 		
<i>Avainsanat</i>	Vedenhankinta, vedenkäsittely, desinfiointi, taudinaiheuttajien poistaminen, suunnittelu, operointi		
<i>Rahoittaja/toimeksiantaja</i>	Norsk Vann, Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Svenskt Vatten		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-52-9	<i>ISSN</i> 2242-7279	2. painos
	<i>Sivuja</i> 72	<i>Kieli</i> suomi	<i>luottamuksellisuus</i> julkinen
<i>Julkaisun jakelu</i>	Vesilaitosyhdistys, www.vvy.fi		
<i>Julkaisupaikka ja -aika</i>	Helsinki 2019		

BESKRIVNINGSBLAG			
<i>Publicerat av</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
<i>Författare</i>	Finlands Vattenverksförening r.f., Norsk Vann, Svenskt Vatten		
<i>Publikationens titel</i>	Mikrobiologisk Barriär Analys, Ett verktyg för att bedöma om vattenverkets rening mot patogener är tillräcklig		
<i>Publikationsseriens titel och nummer</i>	Vattenverksföreningens publikationsserie nr 54 (Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 54)		
<i>Publikationens tema</i>	Vattenförsörjning, vattenhantering, desinficering, kvalitet av hushållsvatten, patogener		
<i>Tillgänglighet</i>			
<i>Sammanfattning</i>	<p>I denna guide presenteras ett verktyg för utvärderingen av reduktionen av patogener i vattenproduktionskedjan. Verktöget grundar sig på en metod som har utvecklats i Norge. Verktöget hjälper vattenverk och planerare att fastställa nödvändiga och tillräckliga åtgärder för att säkerställa elimineringen av patogener i vattenproduktionskedjan. Verktöget ökar även förståelsen för betydelsen av behandlingsmetoder och åtgärder som inverkar på elimineringen av patogener.</p> <p>I produktionskedjan för hushållsvatten måste det finnas flera avskiljande barriärer, för att risken för sjukdomar som sprider sig via vattnet ska vara under kontroll. De flesta vattenverk trygger hushållsvattnets mikrobiologiska kvalitet genom desinficering, men den mikrobiologiska kvaliteten kan även tryggas genom att skydda råvattnet och vattentäkten från mikrobiologisk kontaminering samt genom att behandla vattnet på annat sätt än genom desinficering.</p> <p>Effekten av reduktionen av sjukdomsalstrare i vattenproduktionskedjan beräknas med hjälp av en logaritmisk reduktion av olika mikrober. Beräkningen omfattar följande faser:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Bedömning av nödvändig barriärhöjd 2) Skyddsåtgärder i vattentäkten 3) Vattenverkets avskiljande barriäreffekt utan desinficering 4) Inaktiverande barriäreffekt i desinficering 5) Slutsummering 		
<i>Nyckelord</i>	Vattenförsörjning, vattenhantering, desinficering, reduktion av patogener, planering, drift		
<i>Finansiär/uppdragsgivare</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-52-9	<i>ISSN</i> 2242-7279	2. upplagan
	<i>Sidantal</i> 72	<i>Språk</i> finska	<i>Konfidentialitet</i> offentlig
<i>Distribution av publikationen</i>	Vattenverksföreningen, www.vvy.fi		
<i>Ort och tidpunkt för publicationen</i>	Helsingfors 2019		

Esipuhe

Talousveden tuotantoketjussa pitää olla useampia itsenäisiä vaiheita taudinaiheuttajien poistamiseksi, jotta riski tautien leviämisestä talousveden välityksellä on hallittu. Englanniksi näitä vaiheita kutsutaan termillä microbial barrier tai hygienic barrier. Tyypillisesti vesilaitokset varmistavat talousveden mikrobiologisen laadun desinfioimalla, mutta talousveden laatua varmistavat myös raakavesilähteiden suojeleminen ja vedenkäsittely.

Tässä oppaassa esitetään menetelmä vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden arviointiin. Työkalulla voidaan arvioida olemassa olevan tai suunnitellun talousveden tuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys laskennallisesti raakaveden laadun ja taudinaiheuttajien logaritmisten poistumien kautta. Oppaassa on esitetty myös laskenta- ja testausmenetelmiä, joiden avulla voidaan määrittellä tai arvioida eri desinfiointimenetelmien taudinaiheuttajien poistotehoa ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Talousvettä toimittavien laitosten pitää turvata toimittamansa talousveden laatua koko vedentuotantoketjun riskinarvioinnilla ja riskienhallinnalla. Suomen vesihuoltolaitokset voivat käyttää tähän sosiaali- ja terveysministeriön tarjoamaa verkkopohjaista Water Safety Plan (WSP) -työkalua (wspssp.fi). WSP:ssä ei arvioida vedentuotantoketjua yksityiskohtaisesti taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden näkökulmasta, kuten tämän oppaan työkalulla tehdään. Tämä työkalu tukee ja antaa lisätietoja WSP-työssä tehtävään kokonaisvaltaiseen vedentuotantoketjun riskinarviointiin, mutta ei korvaa sitä.

Talousveden mikrobiologisten terveysriskien arviointiin on tarjolla verkkopohjainen työkalu Vesiopas - Arviointi vedenlaadun terveysvaikutuksista (<http://fi.opasnet.org/fi/Vesiopas>). Vesioppaassa voidaan laskea, minkä suuruinen terveysriski on tietyillä raakaveden taudinaiheuttajilla valitulla puhdistusprosessilla ja laskennallinen tulos kertoo suolistoinfektioihin sairastuneiden lukumäärän (Meriläinen ym. 2012). Vesioppaassa taudinaiheuttajien poistotehojen valikoima on suppeampi kuin tämän oppaan työkalussa.

Opas perustuu Norjassa Scandinavian Environmental Technology -yhtiön (dr.ing. Hallvard Ødegaard) Norsk Vannin toimeksiannosta kehittämään ja laajapohjaisella norjalais- ja ruotsalaisten asiantuntijoiden työryhmällä valmisteltuun toimintamalliin. Toimintamallin ensimmäinen versio julkaistiin Norjassa ja Ruotsissa vuonna 2009 ja vuonna 2014 Norsk Vannin, Svenskt Vattenin ja Vesilaitosyhdistyksen yhteistyönä englanninkielinen päivitetty versio, Microbial Barrier Analysis (MBA) –guideline (Ødegaard ym., 2014). Menetelmä perustuu tieteellisiin tutkimuksiin mikrobien poistumisesta vedentuotantoketjun eri vaiheissa, mutta on toteutukseltaan suhteellisen yksinkertainen.

Tämä englanninkielisestä oppaasta Vesilaitosyhdistyksen johdolla laadittu suomenkielinen versio noudattaa periaatteiltaan alkuperäistä työkalua. Suomenkielisessä versiossa on kuitenkin pyritty ottamaan huomioon olosuhteemme siten, että oppaan teksti ja käyttö olisi Suomen vesihuoltolaitoksille luontevaa. Suomenkielistä opasta valmistelleessa työryhmässä olivat Elina Antila (Porvoon Vesi), Riitta Kettunen (Tampereen vesi), Tuula Laakso (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä), Markku Lehtola (Kuopion vesi), Riina Liikanen (VVY), Päivi Meriläinen (THL) ja Ilkka Miettinen (THL). Oppaan 2. painokseen esimerkit taudinaiheuttajien poistotehon laskemisesta

klooriamiiniklooraukselle ja otsonoinnille laati Heli Härkki Pöyry Finland Oy:stä ja näitä muutoksia ohjanneessa työryhmässä olivat Elina Antila (Porvoon Vesi), Tuula Laakso (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä), Riina Liikanen (VVY) ja Jukka Tyrväinen (Jyväskylä Energia Oy). Anne Kuulas ja Alina Oksala Vesilaitosyhdistyksestä viimeitelivät oppaan kuvia ja muuta ulkoasua.

Vesilaitosyhdistys pitää Norsk Vannin ja Svenskt Vattenin työtä ja toimeksiantoa toimintamallin kehittämiseksi pohjoismaisten vesilaitosten kannalta ansiokkaana. Ilahduimme Norsk Vannin kutsusta osallistua työkalun viimeisimpään päivitystyöhön. Suuri kiitos oppaan suomenkielisen version laatimiseen osallistuneille tärkeästä työstä.

Helsinki, 21.10.2019

Vesilaitosyhdistys

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Itsenäiset mikrobien poistamisen vaiheet.....	10
1.2	Mikrobit.....	11
1.2.1	Virukset.....	11
1.2.2	Bakteerit.....	11
1.2.3	Alkueläimet.....	11
1.2.4	Indikaattorimikrobit.....	11
1.3	Toimenpiteet talousveden suojelemiseksi taudinaiheuttajilta.....	12
1.3.1	Toimenpiteet pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma- alueella ja vedenotossa.....	12
1.3.2	Toimenpiteet vedenkäsittelyssä.....	13
2	Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden arviointi vedentuotantoketjussa.....	15
2.1	Taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnin toteutus vedentuotantoketjussa ...	17
2.1.1	Tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon määrittäminen.....	17
2.1.2	Logaritmisen poistuman määrittäminen raakavesialueen ja vedenoton toimenpiteille sekä vedenkäsittelylle.....	18
2.1.3	Desinfioidussa tarvittavan logaritmisen poistuman määrittäminen ...	28
3	Desinfioidun laskenta- ja testimenetelmät (työkalut).....	29
3.1	Suunnittelun ja käytön perusteet.....	29
3.1.1	Mitoitusvirtaama.....	29
3.1.2	Desinfioidun veden laatu ja lämpötila.....	29
3.2	Ct-arvot eri taudinaiheuttajaryhmien inaktivoinnille tai tuhoamiselle.....	30
3.2.1	Ct-arvon käsite.....	30
3.2.2	Ohjeelliset Ct-arvot.....	30
3.3	Ct-arvon määrittäminen.....	32
3.3.1	t-arvon määrittäminen Ct-laskelmissa.....	32
3.3.2	C-arvon määrittäminen Ct-laskelmissa.....	34
3.4	Kloori (kloorikaasu ja hypokloriitti).....	34
3.4.1	Klooripitoisuuden muutos desinfioidussa.....	34
3.4.2	Kloorin alkukulutus (AK) ja hajoamisvakio (k).....	35
3.4.3	Ct-arvon laskeminen.....	37
3.5	Klooriamiini.....	37
3.5.1	Klooriamiinidesinfioidun pitoisuusmuutoksen kehittyminen.....	38
3.5.2	Klooriamiinin Ct-arvon laskeminen.....	39
3.6	Klooridioksidi.....	40
3.6.1	Klooridioksidin alkukulutus ja hajoamisvakio.....	40
3.6.2	Ct-arvon laskeminen klooridioksidille.....	41
3.7	Otsoni.....	41
3.7.1	Otsonipitoisuuden muutokset prosessissa.....	41
3.7.2	Otsonin alkukulutuksen ja otsonin hajoamisvakion määrittäminen.....	44
3.7.3	Otsonin alkupitoisuuden määrittäminen.....	45
3.7.4	Ct-arvon laskeminen otsonijärjestelmissä.....	46
3.8	Lopullisen logaritmisen poistuman määrittäminen kemiallisia desinfiointimenetelmiä käytettäessä.....	46
3.9	UV-desinfiointi.....	48

3.9.1	UV-annos ja mikrobin inaktivointi ja tuhoaminen.....	48
3.9.2	UV-desinfiointin logaritmisin poistuman määrittäminen.....	49
4	Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon määrittäminen.....	54
5	Esimerkkejä Taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnista	56
5.1	Vaihet 1: tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho.....	56
5.1.1	Esimerkki 1a, Viherlaakso: Suuri pintavesilaitos	56
5.1.2	Esimerkki 1b, Pikkukylä: Pieni pohjavesilaitos	56
5.2	Vaihe 2: Toimenpiteet raakaveden ja vedenoton suojelemiseksi	57
5.2.1	Esimerkki 2a, Viherlaakso: Pintaveden suojeleminen ja seuranta	57
5.2.2	Esimerkki 2b, Pikkukylä: Pohjaveden suojeleminen ja seuranta.....	57
5.3	Vaihe 3: Taudinaiheuttajien poistuminen vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia	58
5.3.1	Esimerkki 3a, Viherlaakso: Kemiaalinen saostus, selkeytys ja suodatus	
	sekä hidassuodatus, yksinkertainen seuranta	58
5.3.2	Esimerkki 3b, Pikkukylä: Ei vedenkäsittelyä.....	59
5.4	Vaihe 4: Taudinaiheuttajien poistuminen desinfiointissa.....	60
5.4.1	Esimerkki 4a, Viherlaakso: Kloori	60
5.4.2	Esimerkki 4b, Pikkukylä: UV-desinfiointi.....	62
5.4.3	Esimerkki 4 c, Lähdeniitty: Klooriamiini	63
5.4.4	Esimerkki 4d, Vesikylä: Otsoni	65
5.5	Vaihe 5: Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistoteho suhteessa	
	tarvittavaan poistotehoon	70
5.5.1	Esimerkki 5a, Viherlaakso: Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys	
	vedentuotantoketjussa	70
5.5.2	Esimerkki 6, Pikkukylä: Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys	
	vedentuotantoketjussa	70
	Lähteet.....	72

Lyhenteet

AK	desinfiointikemikaalin alkukulutus, eli nopea veden laadusta riippuva kemikaalin kuluminen hapetusprosesseissa
AK _{säädetty}	desinfiointikemikaalin alkukulutus, jossa on otettu huomioon toisen desinfiointikemikaalin/hapettimen vaikutus alkukulutukseen
C _x	desinfiointikemikaalin pitoisuus vaiheessa x
C _{aiika}	desinfiointikemikaalin pitoisuus tietyn kontaktiajan kuluttua
C _{alku}	desinfiointikemikaalin pitoisuus alkukulutuksen jälkeen
C _{annos}	desinfiointikemikaalin annostuspitoisuus
C _{sisään}	desinfiointikemikaalin pitoisuus kontaktialtaan sisääntulossa
C _{ulos}	desinfiointikemikaalin pitoisuus kontaktialtaan ulostulossa
C _{n-kk}	otsonipitoisuus kontaktikammion määrättyssä osassa
C _{n-rk}	otsonipitoisuus reaktiokammion määrättyssä osassa
C _{teho-kk}	tehollinen otsonipitoisuus kontaktikammiossa
D	UV-annos, J/m ²
F _h	hydraulinen kerroin
F _s	sarjakerroin
I	UV-valon intensiteetti, W/m ²
k	desinfiointikemikaalin hajoamisvakio
k _{vaihe I}	klooriamiinin hajoamisvakio nopean hajoamisen vaiheessa I
k _{vaihe II}	klooriamiinin hajoamisvakio hitaan hajoamisen vaiheessa II
k _{siirtymä}	otsonin veteen siirtymisvakio
t	desinfiointikemikaalin kontaktiaika, UV-valon altistusaika
t _{teho}	desinfiointikemikaalin tehollinen kontaktiaika, joka riippuu kontaktialtaan sekoitusolosuhteista
UVT	UV-läpäisevyys, %, $100 \cdot 10^{-UV_{abs}}$
UVT ₁₀	UV-absorbanssi (UV _{abs}) mitataan spektrofotometrillä aallonpituudella 254 nm 10 mm kvartsilasikyvetissä
UVT ₅₀	UV-absorbanssi (UV _{abs}) mitataan spektrofotometrillä aallonpituudella 254 nm 10 mm kvartsilasikyvetissä
X _{kk}	parametrin x arvo otsonoinnin kontaktikammiossa
X _{rk}	parametrin x arvo otsonoinnin reaktiokammiossa

1 JOHDANTO

Tässä oppaassa on esitetty Norjassa kehitettyyn menetelmään perustuva työkalu taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden arviointiin vedentuotantoketjussa. Työkalun avulla pyritään varmistamaan talousveden mikrobiologinen laatu.

Taudinaiheuttajien poistoteho voidaan saavuttaa luonnollisilla tai rakennetuilla fysikaalisilla tai kemiallisilla toimenpiteillä, joiden avulla mikrobeja (bakteerit, virukset ja alkueläimet) poistetaan, tuhotaan tai inaktivoidaan, siten, että ne eivät aiheuta terveysvaaraa. Tässä oppaassa käytetään mikrobien poistamisesta, tuhoamisesta ja inaktivoinnista pääsääntöisesti yleistermiä mikrobien tai taudinaiheuttajien poistaminen.

Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnin tarkoituksena on:

1. Auttaa vedentuotantoketjun ja sen osien suunnittelijoita määrittelemään tarpeelliset ja riittävät toimenpiteet olemassa olevissa tai suunnitelluissa vedentuotantoketjuissa tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon saavuttamiseksi.
2. Lisätä vesilaitoksen toiminnasta vastaavien henkilöiden tietoa desinfioinnista ja muiden taudinaiheuttajien poistumiseen vaikuttavien käsittelyvaiheiden ja toimenpiteiden merkityksestä, kehittää vesilaitosten toimintaa ja varmistaa, että taudinaiheuttajien poistuminen on riittävää.

Tämä tarkoittaa, että taudinaiheuttajien poistotehon arviointi koskee kaikkia vedentuotantoketjujen suunnittelun ja käytön parissa toimivia.

1.1 ITSENÄISET MIKROBIEN POISTAMISEN VAIHEET

Vedentuotantoketjussa tarvitaan useampia itsenäisesti toimivia vaiheita, jotka pystyvät poistamaan vedestä taudinaiheuttajia ja siten turvaamaan talousveden mikrobiologista laatua. Tämä tarkoittaa, että jos yksi taudinaiheuttajia poistava vaihe pettää tai lakkaa toimimasta, toinen käytössä oleva vaihe on riittävän tehokas mikrobiologisen riskin minimoimiseksi. Norjassa lainsäädäntö edellyttää, että vedentuotantoketjussa on vähintään kaksi tällaista vaihetta, joista toisen on oltava desinfiointikäsittely. Joissakin muissa maissa edellytetään, että vedentuotantoketjussa on useampi vaihe taudinaiheuttajien poistamiseen.

Muissa Pohjoismaissa ja englanninkielisissä maissa näistä vedentuotantoketjun taudinaiheuttajia poistavista vaiheista käytetään termiä "hygienic barrier" tai "microbial barrier". Suomenkielessä ei ole vakiintunutta termiä näille taudinaiheuttajia poistaville vedentuotantoketjun vaiheille. Joillakin laitoksilla niitä kutsutaan talousveden laadun turvapuskureiksi.

Taudinaiheuttajien poistumista edistävien toimenpiteiden vaikutus voidaan määrittää taudinaiheuttajien poistotehon avulla. Koko vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistoteho ilmoitetaan itsenäisten toimenpiteiden aikaansaamien mikrobiryhmien logaritmisien poistumien yhteen laskettuna suuruutena.

1.2 MIKROBIT

Valtaosa mikrobeista ovat vaarattomia ja itse asiassa tarpeellisia ihmisten hyvinvoinnin kannalta. Jotkin mikrobit voivat aiheuttaa tauteja (taudinaiheuttajat, patogeenit). Tässä oppaassa käsiteltäviä taudinaiheuttajamikrobeja ovat virukset, bakteerit ja alkueläimet. Alla on lyhyt kuvaus Pohjoismaiden yleisimmistä veden välityksellä leviävistä taudinaiheuttajista.

1.2.1 Virukset

Pienimmät taudinaiheuttajamikrobit kuuluvat virusryhmään. Virukset ovat tavallisesti kooltaan $<0,1 \mu\text{m}$. Ne muodostuvat proteiinikuoren verhoamasta geneettisestä materiaalista, ja tarvitsevat isäntäsolun lisääntyäkseen. Pohjoismaissa norovirukset ovat yleisimpiä veden välityksellä leviävien tautien (erityisesti ripulin) aiheuttajia, mutta myös monet muut virukset (adenovirus, rotavirus, poliovirus, hepatiitti A -virus) voivat aiheuttaa sairauksia. Virukset kestävät eri desinfiointimenetelmiä hyvin eri tavoin. Esimerkiksi adenovirus voidaan inaktivoida käyttämällä pieniä annoksia kemiallisia desinfiointiaineita, kuten klooria ja otsonia, mutta se kestää useimpia muita mikrobeja paremmin UV-säteilyä.

1.2.2 Bakteerit

Erilaisia bakteereja on valtava määrä, ja ne voivat lisääntyä hyvin erilaisissa olosuhteissa. Bakteerit ovat suurempia kuin virukset, tavallisesti n. $1 \mu\text{m}$ kokoisia. Pohjoismaissa yleisimpiä veden välityksellä tautia aiheuttavia bakteereja ovat ripulia aiheuttavat kampakobakteerit, joiden esiintyminen johtuu usein lintujen aiheuttamasta ulostekontaminaatiosta. Jotkin bakteerit (esimerkiksi *Clostridium*) muodostavat itiöitä selviytyäkseen epäedullisissa olosuhteissa. Nämä itiöt kestävät hyvin desinfiointia.

1.2.3 Alkueläimet

Alkueläimet ovat bakteereja suurempia, tavallisesti $3-10 \mu\text{m}$ kokoisia. Talousvesi välitteisiä epidemioita voivat aiheuttaa *Giardia* ja *Cryptosporidium*-alkueläimet. Alkueläimet tarvitsevat isännän lisääntyäkseen, mutta ollessaan isännän ulkopuolella, ne ovat erittäin kestäviä kemialliselle desinfioinnille (erityisesti kloorille). Viimeisen 10 vuoden aikana Skandinaviassa on ollut useita alkueläintartuntoja. Ne ovat yksi tärkeimmistä syistä oppaassa esitetyn arviointityökalun laatimiseen.

1.2.4 Indikaattorimikrobit

Taudinaiheuttajamikrobien tutkiminen juomavedestä on työlästä ja satunnaisotannassa todennäköisyydet tietyn mikrobin havaitsemiseen ovat pienet. Siksi mikrobiologisen saastumisen havaitsemiseen käytetään ns. indikaattorimikrobeja.

Indikaattorimikrobien on täytettävä useita ehtoja, esimerkiksi:

- Niiden on osoitettava taudin riski tarpeeksi luotettavasti.
- Niiden havaitsemisen pitää olla helppoa nykyisillä analyysimenetelmillä.
- Niiden määrän tulee olla riittävän suuri luotettavan havainnoinnin varmistamiseksi.

Kaikilla yleisesti käytetyillä indikaattorimikrobeilla on vaikeuksia näiden kriteerien täyttämässä, ja indikaattorimikrobeihin perustuva juomaveden mikrobiologinen laadunvalvonta on kaukana täydellisestä. Indikaattorimikrobien rooli mikrobiologisessa laadunvalvonnassa on kuitenkin suuri, koska tutkimuksen tuloksista voidaan nähdä, onko vedessä mikrobikontaminaatiota, erityisesti ulostesaastutusta. Tämän tiedon yhdistäminen muiden vesitutkimusten tuloksiin (esimerkiksi fysikaalisiin tai kemiallisiin) tekee mikrobiologisen vedenlaadun arvioinnista luotettavampaa.

Lainsäädäntö edellyttää, että talousvedestä tutkitaan säännöllisesti seuraavat mikrobiologiset muuttujat: *E. coli*, enterokokit, koliformiset bakteerit, pesäkkeiden lukumäärä (22 °C), sekä *Clostridium perfringens* (mukaan lukien itiöt, jos raakavesi on pintavettä tai pintavesi vaikuttaa raakaveteen).

E. coli toimii indikaattorina tuoreesta ulostekontaminaatiosta, ja sen avulla voidaan myös arvioida desinfiointiprosessin vaikutusta. *E. coli* ei ole kuitenkaan luotettava indikaattori virusten ja alkueläinten läsnäolosta (*Cryptosporidium*- ja *Giardia*-(oo)kystat) juomavedessä desinfiointin jälkeen. Se ei ole myöskään luotettava indikaattori kampylobakteerien läsnäolosta.

Clostridium perfringens -bakteeria käytetään usein vanhojen ulostekontaminaatioiden havainnoinnissa, koska *Clostridium perfringens* itiöt selviävät *E. coli*a kauemmin. Koska sekä virukset että alkueläimet säilyvät vedessä elävinä kauemmin kuin bakteerit, *Clostridium perfringens* itiöt ovat joidenkin tutkijoiden mielestä parempia indikaattoreita viruksille ja alkueläimille raakavedessä kuin *E. coli*.

Talousveden käsittelyyn käytettävän raakaveden tai käsitellyn talousveden virusanalyysistä ei ole vaatimuksia. Bakteriofagien (erityisesti kolifagien) käyttöä on ehdotettu virusindikaattoriksi. Niitä ei kuitenkaan ole otettu käyttöön, koska kolifagit eivät toimi selkeinä indikaattoreina ulostekontaminaatiosta.

1.3 TOIMENPITEET TALOUSVEDEN SUOJELEMISEKSI TAUDINAIHEUTTAJILTA

Talousvettä suojellaan taudinaiheuttajilta pääasiallisesti vedentuotantoketjun kolmessa vaiheessa:

1. Estämällä taudinaiheuttajien pääsy raakaveteen pohjaveden muodostumisalueella ja pintaveden valuma-alueella sekä vedenotossa.
2. Poistamalla taudinaiheuttajia vedenkäsittelyllä ja desinfiointilla.
3. Estämällä käsitellyn veden saastuminen veden jakelun aikana.

Tässä oppaassa esitetty arviointi käsittää näistä kaksi ensimmäistä vaihetta.

1.3.1 Toimenpiteet pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella ja vedenotossa

Saastumista ehkäiseviä toimenpiteitä voidaan ottaa käyttöön pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella ja vedenotossa. Näitä toimenpiteitä ovat

esimerkiksi rajoitukset pohjaveden muodostumisalueen maankäytössä ja toimenpiteet, jotka ehkäisevät taudinaiheuttajien pääsyn vedenottopaikkaan. Taudinaiheuttajien pääsy vedenottopaikkaan voidaan ehkäistä esimerkiksi pidentämällä viipymäaika maa-perässä tai valitsemalla vedenottopaikka syvemmältä, jossa vedenlaatu on parempi.

Pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella tai vedenotossa tehtävien toimenpiteiden vaikutusten määrittäminen on erittäin hankalaa. Tämän vuoksi esim. Ruotsin viranomaiset eivät pidä näitä toimenpiteitä riittävän luotettavina, jotta ne voitaisiin laskea vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehoon.

Pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella tai vedenotossa tehtävien toimenpiteiden vaikutukset näkyvät vasta ajan myötä raakaveden parempana laaduna. Tässä oppaassa esitetyssä arvioinnissa oletetaan, että tehdyt toimenpiteet ovat jo vaikuttaneet raakaveden nykyiseen laatuun ja siten vain raakaveden laadun määrittelyn jälkeen käyttöön otettavien toimenpiteiden voidaan olettaa tehostavan taudinaiheuttajien poistumista laskennassa.

1.3.2 Toimenpiteet vedenkäsittelyssä

Vedenkäsittely, kuten kemiallinen saostus (kemiallinen koagulaatio ja flokkaus), selkeytys, suodatus tai desinfiointi, tehostaa taudinaiheuttajien poistumista.

Taulukko 1 antaa karkean laadullisen yleiskuvan erotukseen perustuvien vedenkäsittelymenetelmien poistotehosta suhteessa eri mikrobiryhmiin. Luvussa 2 (taulukko 10) on esitetty tarkempi määrällinen arvio eri mikrobiryhmien poistumisen määrittämiseksi.

Taulukko 1. Yleisimpien vedenkäsittelymenetelmien laadullinen tehokkuus mikrobien poistamisessa, kun prosessit ovat asianmukaisesti suunniteltuja ja toimivia.

Vedenkäsittelymenetelmä	Bakteerit	Virukset	Alkueläimet
Hiekkasuodatus (ilman kemiallista saostusta)	Heikko	Erittäin heikko	Heikko
Kemiallinen saostus, selkeytys + hiekkasuodatus	Hyvä	Kohtalaisen hyvä	Hyvä
Kalvosuodatus ¹⁾			
RO ja NF	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä
UF	Hyvä	Kohtalaisen hyvä	Erittäin hyvä
MF	Kohtalaisen hyvä	Heikko	Hyvä
Kemiallinen saostus + UF(MF)	Erittäin hyvä	Hyvä	Erittäin hyvä

1) RO=käänteisosmoosi; NF=nanosuodatus (< 5 nm); UF=ultrasuodatus (< 40 nm); MF=mikrosuodatus (< 100 nm).

Desinfiointi on perinteisesti ollut tärkein talousveden mikrobiologista laatua turvaava käsittelymenetelmä Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa. Yleisimmin käytetty desinfiointikemikaali on kloori. Joillakin laitoksilla kloori sidotaan ennen veden johtamista verkostoon klooriamiiniksi. Klooridioksidin käyttö on suhteellisen vähäistä. Desinfiointiin ja hajun ja

maun parantamiseen käytetään pintavesilaitoksilla usein myös otsonia. Viime vuosina UV-desinfiointin käyttö on lisääntynyt. Taulukko 2 antaa karkean yleiskuvan yleisimpien desinfiointimenetelmien tehokkuudesta mikrobin kolmen pääryhmän poistamisen suhteen.

Taulukko 2 Yleisimpien desinfiointimenetelmien laadullinen tehokkuus mikrobin poistossa, kun prosessit ovat asianmukaisesti suunniteltuja ja toimivia ja desinfiointiannostus on riittävä.

Desinfiointimenetelmä	Bakteerit	Virukset	Alkueläimet
Klooraus	Erittäin hyvä	Hyvä	Riittämätön
Klooridioksidi	Erittäin hyvä	Kohtalainen	Kohtalainen/ Riittämätön ¹⁾
Klooriamiini	Riittämätön	Riittämätön	Riittämätön
Otsonointi	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä	Hyvä/ Riittämätön ²⁾
UV-desinfiointi	Erittäin hyvä	Hyvä/Riittämätön ³⁾	Erittäin hyvä

- 1) Kohtalainen *Giardia*-alkueläimiä vastaan. Riittämätön *Cryptosporidium*-alkueläimiä vastaan.
- 2) Melko hyvä *Giardia*-alkueläimiä vastaan. Riittämätön *Cryptosporidium*-alkueläimiä vastaan tavallisesti käytettävällä otsoniannostuksella.
- 3) Hyvä useimpia veden välityksellä leviäviä viruksia vastaan. Riittämätön adenovirusta vastaan tavallisesti käytettävällä UV-annoksella.

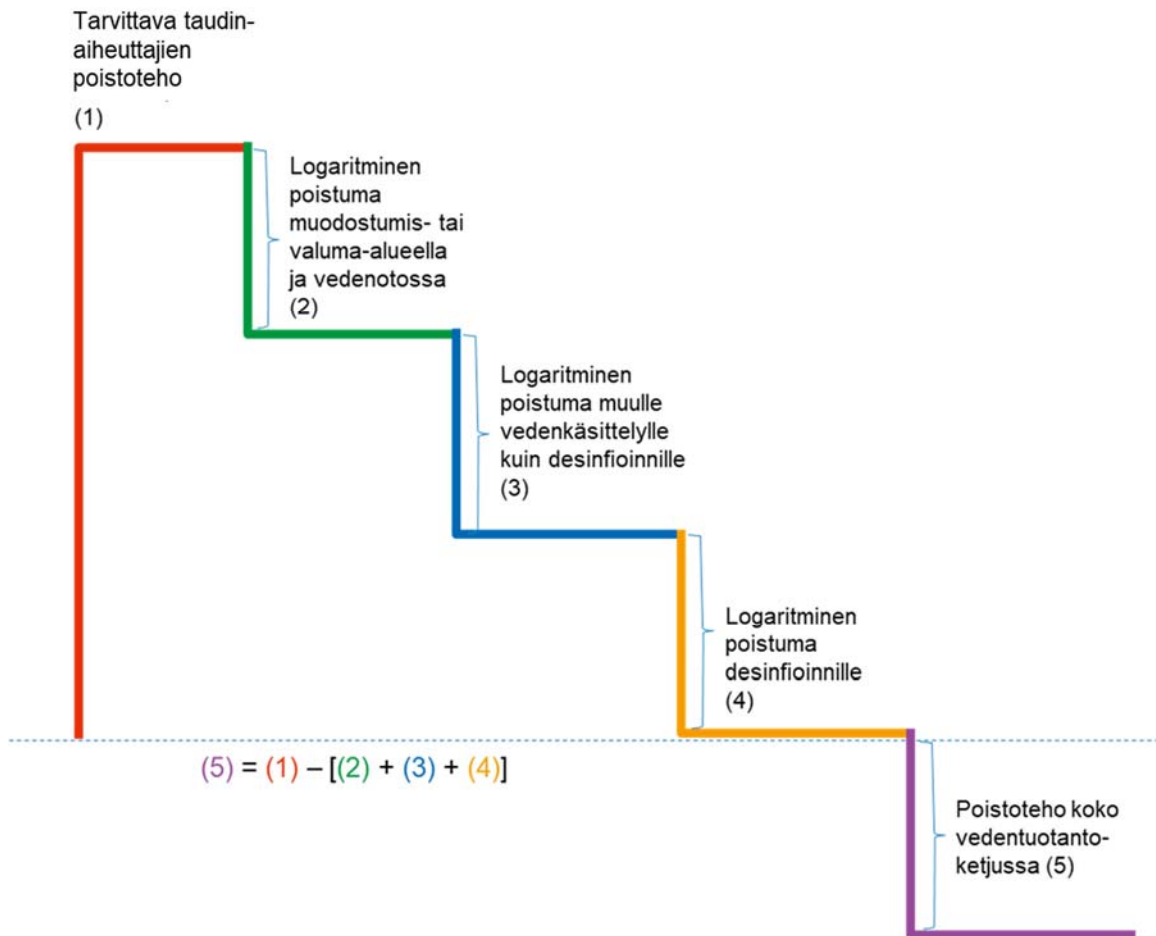
Oppaan luvussa 3 on esitetty, miten desinfiointimenetelmien tehokkuus voidaan laskea desinfiointiannostuksen ja veden laadun perusteella eri taudinaiheuttajien logaritmisena poistumana.

2 TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHON RIITTÄVYYDEN ARVIOINTI VEDENTUOTANTOKETJUSSA

Tässä luvussa esitellään oppaan työkalu taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden arviointiin vedentuotantoketjussa (kuva 1). Desinfiointimenetelmien tehokkuuden laske- mista käsitellään tarkemmin luvussa 3. Arviointi sisältää seuraavat vaiheet:

- 1) **Tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon määrittäminen.** Määrittely perustuu:
 - raakaveden laatuun ja
 - vesilaitoksen kokoon (veden käyttäjien määrä).

Tarvittava poistoteho ilmaistaan eri taudinaiheuttajaryhmien (bakteerien, virusten ja alkueläinten) logaritmisena poistumana, joka pitäisi saavuttaa vedentuotantoketjussa.
- 2) **Eri taudinaiheuttajaryhmien logaritmiset poistumat raakaveden ja vedenoton suojelutoimenpiteiden vaikutuksesta.** Määrittely perustuu:
 - raakavettä suojaaviin toimenpiteisiin pohjaveden muodostumisalueella ja pintaveden valuma-alueella sekä vedenottamalla ja
 - raakaveden laadunvalvontaan.
- 3) **Eri taudinaiheuttajaryhmien logaritmiset poistumat vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia.** Määrittely perustuu:
 - käytettyihin vedenkäsittelymenetelmiin ja
 - vedenkäsittelyn valvontaan.
- 4) **Eri taudinaiheuttajaryhmien logaritmiset poistumat desinfioinnissa.** Määrittely perustuu:
 - käytettyyn desinfiointimenetelmään/-menetelmiin ja
 - desinfioinnin mitoitukseen ja käyttöön.
- 5) **Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys suhteessa tarvittavaan poistotehoon**
 - Tarvittava taudinaiheuttajien logaritminen poistuma – olemassa oleva taudinaiheuttajien logaritminen poistuma
 - vaihe 1 – vaihe 2 – vaihe 3 -vaihe 4



Kuva 1. Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyyden arviointi vedentuotantoketjussa.

Jos lopputuloksen eli vaiheen 5 logaritmitiset poistumat ovat negatiiviset kaikilla taudinaiheuttajaryhmillä, taudinaiheuttajien poistoteho on riittävä. Jos lopputuloksen logaritminen poistuma on positiivinen jollakin taudinaiheuttajaryhmällä, on ryhdyttävä täydentäviin toimenpiteisiin taudinaiheuttajien poistotehon parantamiseksi.

Logaritminen poistuma

Logaritminen poistuma kuvaa mikrobin suhteellista poistumista vedentuotantoketjussa tehtävien toimenpiteiden vaikutuksesta. Esimerkiksi 2 log poistuma tarkoittaa mikrobin määrän vähenemistä sadasosaan alkuperäisestä (99 % poistuma) ja 3 log poistuma tuhannesosaan (99,9 % poistuma).

Työkalussa tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho ja vedentuotantoketjun toimenpiteillä saavutettava logaritminen poistuma ilmoitetaan kolmen mikrobiryhmän (bakteerien, virusten ja alkueläinten) logaritmisina poistumina. Esimerkiksi tarvittava logaritminen poistuma $5b + 5v + 3a$ tarkoittaa, että tarvittava logaritminen poistuma bakteereille on 5 (99,999 %), viruksille 5 (99,999 %) ja alkueläimille 3 (99,9 %).

2.1 TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHON ARVIOINNIN TOTEUTUS VEDENTUOTANTOKETJUSSA

2.1.1 Tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon määrittäminen

Raakaveden laatu ja vesilaitoksen koko ovat arvioinnissa perustana vedentuotantoketjussa tarvittavalle taudinaiheuttajien poistoteholle.

Alkuperäisessä Microbial Barrier Analysis (MBA) – a guideline (2014) -oppaassa raakaveden mikrobiologisen laatutason määrittelyssä käytetään moniportaista asteikkoa, joka perustuu raakaveden tyyppiin ja mikrobiologisen laadun tutkimuksiin. Suomen vesilaitoksilla on tyypillisesti niukasti tietoja raakaveden mikrobiologisesta laadusta erityisesti *Clostridium perfringensin* ja alkueläinten osalta. Toisaalta näiden havaitseminen raakavesistä voi osoittautua pienten pitoisuuksien vuoksi vaikeaksi. Tässä oppaassa päätettiin mukailla Svenskt Vattenin oppaassa Förenklad MBA, Mikrobiologisk Barriär Analys (2015) esitettyä raakaveden laatutason määrittämistä. Svenskt Vattenin oppaasta poiketen raakavedet jaetaan kahden sijasta kolmeen luokkaan taulukon 3 mukaan.

Taulukko 3. Raakaveden mikrobiologisen laatutason määrittäminen.

Raakavesi	Laatutaso
Pintavesi	Da
	Dc, jos raakavedessä on riski alkueläinten esiintymiselle jätevesipäästön kautta
Pohjavesi	A, jos raakavedestä ei ole löytynyt <i>E.Coleja</i> , enterokokkeja tai muita ulosteperäisen saastumisen indikaattoreita viimeisen kolmen vuoden aikana (vähintään 12 näytettä edustavasti eri olosuhteissa)
	Da, jos raakavedestä on löytynyt <i>E.Coleja</i> , enterokokkeja tai muita ulosteperäisen saastumisen indikaattoreita viimeisen kolmen vuoden aikana

Tekopohjavesi on pohjavettä, jonka antoisuutta on lisätty imeyttämällä pintavettä maaperän läpi. Sama prosessi voi tapahtua tarkoituksellisesti tai tahattomasti rantaimetytyksenä. Tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon määrittämisessä tekopohjavettä voidaan tarkastella kahdella eri tavalla:

1. käyttämällä pintaveden laatua perustana ja ottamalla huomioon logaritminen poistuma (taulukko 8) vedenkäsittelylle, jossa vesi imeytetään maaperän läpi, tai
2. käsittelemällä tekopohjavettä samalla tavalla kuin maaperästä saatavaa pohjavettä.

Jälkimmäisessä vaihtoehdossa veden viipymän maaperässä on oltava vähintään 2-3 kuukautta.

Kalliopohjavesi on kallioperään poratuista tai räjäytetyistä kaivoista saatavaa vettä. Tarvittavan taudinaiheuttajien poistotehon määrittämisessä kalliopohjavettä tarkastellaan seuraavasti:

1. Kallionpinnan päällä olevan maapeitteen ollessa matala (0–3 m), kalliopohjavesi voi olla laadullisesti pintaveden kaltaista.
2. Maapeitteen ollessa ≥ 3 m kalliopohjavesi voi olla laadullisesti samankaltaista kuin pohjavesi maaperässä. Käytettäessä tätä perustetta tarvitaan riittävät raakaveden laatutiedot asian tueksi.

Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho on riippuvainen myös vesilaitoksen koosta, sillä mikrobiologisen saastumisen aiheuttama sairastuvuus on vähäisempää pienissä vesilaitoksissa kuin isoissa. Vesilaitokset jaetaan kolmeen kokoluokkaan sen palvelemien henkilöiden (hlö) määrän perusteella.

Raakaveden mikrobiologinen laatutason ja kokoluokan määrittämisen jälkeen tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho eri mikrobiryhmille saadaan taulukosta 4.

Taulukko 4. Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho riippuen vesilaitoksen koosta ja raakaveden laatutasosta.

Vesilaitoksen koko, vedenkäyttäjät	Raakaveden laatutaso ja tarvittava poistoteho		
	A	Da	Dc
< 1 000 hlö	$3,0b + 3,0v + 2,0a$	$5,0b + 5,0v + 3,0a$	$5,0b + 5,0v + 4,0a$
1 000 – 10 000 hlö	$3,5b + 3,5v + 2,5a$	$5,5b + 5,5v + 3,5a$	$5,5b + 5,5v + 4,5a$
> 10 000 hlö	$4,0b + 4,0v + 3,0a$	$6,0b + 6,0v + 4,0a$	$6,0b + 6,0v + 5,0a$

2.1.2 Logaritmissen poistuman määrittäminen raakavesialueen ja vedenoton toimenpiteille sekä vedenkäsittelylle

Logaritmisia poistumia voidaan antaa seuraaville toimenpiteille:

1. Toimenpiteet pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella tai vedenotossa
 - Fyysinen suojaus
 - Veden laatua vaarantavien toimintojen rajoittaminen pohjaveden muodostumis- tai pintaveden valuma-alueella ja vedenottamon läheisyydessä
 - Raakaveden laadun seurannan tehostaminen
2. Toimenpiteet vedenkäsittelyssä
 - Vedenkäsittelyprosessit
 - Desinfiointi
 - Toiminnan seuranta ja valvonta

On kuitenkin syytä olla varovainen annettaessa logaritmisia poistumia pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella tai vedenotossa suoritetuille toimenpiteille, koska näiden toimien tehokkuudesta ei voida olla varmoja. Logaritmisia poistumia voidaan antaa ainoastaan sellaisille pohjaveden muodostumisalueella, pintaveden valuma-alueella tai vedenotossa tehtäville suojaaville ja toimintoja rajoittaville toimenpiteille, jotka on otettu käyttöön sen jälkeen, kun raakaveden mikrobiologinen laatu on määriteltiin.

Itsenäisten mikrobeja poistavien toimenpiteiden logaritmisia poistumia voidaan laskea yhteen, mutta vedentuotantoketjun vaiheen yhteen laskettu logaritminen poistuma ei voi ylittää taulukossa 5 esitettyjä vaiheen toimenpiteille annettuja logaritminen poistuman enimmäismääriä.

Taulukko 5. Eri toimenpiteiden logaritminen poistuman enimmäismäärä¹⁾

Toimenpide	Logaritminen poistuman enimmäismäärä
Lisätoimenpiteet valuma-alueella tai vedenotossa – järvet Logaritminen poistuman enimmäismäärä fyysisille ja rajoittaville toimenpiteille (taulukko 6), josta logaritminen poistuman enimmäismäärä raakaveden valvontatoimenpiteille (taulukko 9)	2,0b + 2,0v + 1,25a 0,75b + 0,75v + 0,5a
Lisätoimenpiteet valuma-alueella ja vedenotossa – joet ja purot Logaritminen poistuman enimmäismäärä ainoastaan raakaveden valvontatoimenpiteille, edellyttäen, että raakaveden otto katkaistaan automaattisesti valvontaparametrien ylittyessä (taulukko 9)	 0,75b + 0,75v + 0,5a
Lisätoimenpiteet muodostumisalueella ja vedenotossa – pohjavesi Logaritminen poistuman enimmäismäärä fyysisille ja rajoittaville toimenpiteille (taulukot 7 ja, 9), josta logaritminen poistuman enimmäismäärä raakaveden valvontatoimenpiteille (taulukko 9)	2,0b + 2,0v + 1,25a 0,75b + 0,75v + 0,5a
Muut vedenkäsittelytoimenpiteet kuin desinfiointi²⁾ Logaritminen poistuman enimmäismäärä yksittäisille, itsenäisille vedenkäsittelyvaiheille (taulukko 10) ennen desinfiointia (ennen omavalvonnan puutteiden aiheuttamia vähennyksiä, taulukko 11)	3,0b³⁾ + 3,0v³⁾ + 3,0a

Logaritmisen poistuman enimmäismäärä desinfioinnissa (ennen turvallisuuspuutteiden aiheuttamia mahdollisia vähennyksiä, taulukot 16 ja 19) Kemialliset desinfiointimenetelmät, luku 3.8 ³⁾ UV-desinfiointi, luku 3.9 (taulukot 18 ja 19) Annostus 400 J/m ² (biodosimetrisesti määriteltä) Annostus 300 J/m ² (biodosimetrisesti määriteltä) Annostus 250 J/m ² (biodosimetrisesti määriteltä)	4,0b + 4,0v + 3,0a 4,0b + 3,5v + 4,0a 3,5b + 3,0v + 3,5a 3,0b + 2,5v + 3,0a
---	--

- 1) Olemassa olevaa vesilaitosta arvioitaessa olemassa olevien ja uusien toimenpiteiden (mukaan lukien raakaveden seuranta) logaritmisten poistumien summa ei saa ylittää tässä taulukossa ilmoitettua enimmäismäärää.
- 2) Saman toimenpiteen yksittäisten, itsenäisten käsittelyvaiheiden logaritmiset poistumat ovat kumulatiivisia. Tämän vuoksi vedenkäsittelyn (muu kuin desinfiointi) logaritminen poistuma saattaa ylittää yksittäisten vaiheiden logaritmisen poistuman enimmäismäärän. Tällöin myöhemmissä vaiheissa käytetään annettua enimmäismäärää.
- 3) Jos hapetusta käytetään vedenkäsittelyssä muussa kuin desinfiointitarkoituksessa (esim. otsonointi), sille voidaan antaa sama logaritminen poistuman enimmäismäärä, jos kemikaaliannos on tarpeeksi suuri (luku 3.7).

2.1.2.1 Logaritminen poistuma järvissä ja niiden valuma-alueilla tehtäville toimenpiteille

Logaritmisia poistumia voidaan antaa pääasiassa uusille toimenpiteille. Olemassa olevat toimenpiteet ovat jo vaikuttaneet raakaveden laatutason määrittelyyn, joten niille ei anneta logaritmisia poistumia. Taulukossa 6 on esitetty logaritmiset poistumat järvissä ja niiden valuma-alueilla tehtäville fyysisille ja rajoittaville toimenpiteille. Jokien valuma-alueilla tehtävillä toimenpiteillä ei pystytä hallitsemaan raakaveden kohdistuvia riskejä niin tehokkaasti, että toimenpiteille voitaisiin antaa logaritmisia poistumia.

Taulukko 6. Logaritmiset poistumat uusille fyysisille ja rajoittaville lisätoimenpiteille järvissä ja niiden valuma-alueilla¹⁾.

Toimenpide-ryhmä	Toimenpiteet	Logaritmisen poistuman enimmäismäärä
Raakaveden saastekuormituksen vähentäminen	Kaikkien suoraan raakavedeen johtavien jätevesipäästöjen sulkeminen.	0,75b + 0,75v + 0,5a
	Kiinteistöjen liittäminen viemäriverkostoon valuma-alueella tai vesitiiviin kiinteistökohtaisen jätevesijärjestelmän käyttöönotto, jonka avulla jätevesi kuljetetaan pois valuma-alueelta.	0,5b + 0,5v + 0,25a
	Aitojen pystyttäminen, joilla estetään tuotantoeläinten, koirien yms. pääsy raakavesilähteelle sekä jäteastioiden hankkiminen valuma-alueelle (mukaan lukien astiat koiran ulosteille).	0,25b + 0,25v + 0,15a

Toiminnan rajoittaminen valuma-alueella ja vedenottamolla	Laiduntavien tuotantoeläinten pitämisen kieltäminen tai rajoittaminen valuma-alueella.	0,75b + 0,75v + 0,5a
	Mahdollisesti saastuttavien toimien kieltäminen valuma-alueella, esim. kodit, mökit, moottoriliikenne yms.	0,25b + 0,25v + 0,15a
	Vesiturheilun, uimisen tai muun virkistätymiskäytön kieltäminen tai rajoittaminen vedenottamolla, esim. moottoriliikenne.	0,25b + 0,25v + 0,15a
Järven vedenotto- paikkaan liittyvät toimenpiteet	Vedenottoaikan siirtäminen harppauskerroksen alle, paitsi täyskierron aikana.	0,5b + 0,5v + 0,25a
	Vedenottoaikan siirtäminen siten, ettei jätevedet tai eläinten uloste vaikuta vedenottoaikan vedenlaatuun (osoitettu hydraulisilla tutkimuksilla).	0,25b + 0,25v + 0,15a
Yhteenlaskettujen logaritmistien poistumien ehdoton enimmäismäärä toimenpiteille valuma-alueella ja vedenottamolla		2,0b + 2,0v + 1,25a

1) Toimenpideryhmälle annettava logaritminen poistuma ei voi olla suurempi kuin ryhmän kattavimman toimenpiteen logaritminen poistuma.

2.1.2.2 Logaritminen poistuma pohjaveden muodostumisalueella ja vedenotto- moilla tehtäville toimenpiteille

Logaritmisia poistumia voidaan antaa pääasiassa pohjavesikaivon vaikutusalueella tehtäville uusille toimenpiteille. Olemassa olevat toimenpiteet ovat jo vaikuttaneet raakaveden laatutason määrittelyyn, joten niille ei anneta logaritmisia poistumia. Kallioperäkaivoissa on havaittu niin paljon puutteita, että myös kaivon suunnittelun ja rakentamisen parantamisesta voidaan antaa logaritmisia poistumia.

Pohjavesikaivoa ympäröivät suojavyöhykkeet jaetaan tavallisesti seuraavasti:

- Vedenottamoalue: 20–50 metrin säteellä kaivosta oleva alue.
- Lähempi pohjaveden muodostumisalue (lähisuojavyöhyke): Tämä alue määritetään yleensä etäisyytenä kaivosta, josta viipymä maaperässä on 60 päivää. Muodostumisalueella maakerrokset ovat hyvin vettä johtavia ja alueen maaperä mahdollistaa veden merkittävän imeytymisen pohjavedeksi.
- Kauempi pohjaveden muodostumisalue (kaukosuojavyöhyke): 60 päivän viipymän alueen ulkopuolella sijaitseva pohjaveden muodostumisalue.
- Pohjavesialue: Alue, jolla on vaikutusta pohjavesimuodostuman veden laatuun tai muodostumiseen. Pohjavesialueen raja määritetään hydrogeologisten olosuhteiden perusteella kohtaan, jossa pohjavettä johtavien maaperäkerrosten päällä on riittävän tiiviit pohjavettä suojaavat maakerrokset tai jossa pohjavettä johtavat maakerrokset päättyvät kallioon tai vettä huonosti johtavaan maaperään.

Logaritmiset poistumat pohjaveden muodostumisalueella ja vedenottamolla tehtäville toimenpiteille on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Logaritmiset poistumat uusille toimenpiteille pohjaveden muodostumisalueella ja vedenottamalla¹⁾.

Vyöhykkeet	Toimenpiteet, jotka eivät olleet käytössä vesilaitoksen raakaveden laatutasoa määritettäessä	Logaritmisien poistuman enimmäismäärä
Vedenottamoalue	Kaivoalueen aitaaminen ja portin lukitseminen.	$0,25b + 0,25v + 0,25a$
Lähempi pohjaveden muodostumisalue	Kaikenlaisten jätevesilaitteiden kieltäminen alueella, esim. viemäriputket, sako-kaivot, paikan päällä sijaitsevat imeytysjärjestelmät yms., sekä jätevesilietteen leviämisen estäminen.	$0,75b + 0,75v + 0,5a$
	Kaikenlaisen maataloustoiminnan harjoittamisen kieltäminen, esim. nurmituotanto, lannoitus, torjunta-aineiden käyttö ja alueen (tai sen osan) käyttäminen laidunmaana tuotantoeläimille.	$0,5b + 0,5v + 0,25a$
	Mahdollisesti saastuttavien toimien kieltäminen alueella, esim. kodit, mökit, moottoriliikenne yms., sekä kaikenlaiset kaatopaikat.	$0,25b + 0,25v + 0,15a$
Kauempi pohjaveden muodostumisalue	Kaikenlaisen jäteveden maaperään päästämisen kieltäminen, esim. maaperään imeytyvä jätevesi, jätevesilietteen leviäminen yms.	$0,5b + 0,5v + 0,25a$
	Kaikenlaisen maataloustoiminnan harjoittamisen kieltäminen, esim. nurmituotanto, lannoitus, torjunta-aineiden käyttö ja alueen (tai sen osan) käyttäminen laidunmaana tuotantoeläimille.	$0,25b + 0,25v + 0,15a$
	Mahdollisesti saastuttavien toimien kieltäminen alueella, esim. kodit, mökit, moottoriliikenne yms., sekä kaikenlaiset kaatopaikat.	$0,25b + 0,25v + 0,15a$
Kaivon rakenteiden parantaminen	Kaivon suojaaminen kaivorakennuksella, jossa on vesitiivis lattia, tiivistetty kaivo-putki ja maanpinnan luiskaus kaivolta pois.	$0,5b + 0,5v + 0,25a$

	Kallioperän pohjavedelle: holkkiputken ja kallion välin täydellinen tiivistäminen.	$0,5b + 0,5v + 0,25a$
	Kaivoputken nostaminen vähintään 40 cm korkeudelle maanpinnasta ja vesitiivis kansi.	$0,25b + 0,25v + 0,15a$
Yhteenlaskettujen logaritmistien poistumien ehdoton enimmäismäärä pohjaveteen liittyville toimenpiteille		$2,0b + 2,0v + 1,25a$

1) Toimenpideryhmälle annettava logaritminen poistuma ei voi olla suurempi kuin ryhmän kattavimman toimenpiteen logaritminen poistuma.

Määritettäessä tekopohjaveden muodostuksessa tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho imeytettävän pintaveden perusteella (luku 2.1.1), voidaan tekopohjaveden muodostamiselle antaa logaritmisia poistumia taulukossa 8 esitetyllä tavalla, jos viipymä maaperässä voidaan ennustaa hydrogeologisten tutkimusten avulla.

Taulukko 8. Logaritminen poistuma tekopohjaveden muodostamisen aikaansaamalle veden laadun parantumiselle (tekopohjaveden muodostaminen tai rantaimetyys).

Veden viipymä maaperässä	Logaritmistien poistuman enimmäismäärä
> 60 päivää	$2,0b + 2,0v + 1,0a$
30–60 päivää	$2,0b + 1,5v + 1,0a$
15–30 päivää	$1,5b + 1,0v + 1,0a$

Tekopohjaveden käsittelyssä on otettava huomioon, että Valviran julkaisemassa Talousvesiasetuksen soveltamisohjeessa todetaan, että terveyden suojelemiseksi ja talousveden mikrobiologisen saastumisen estämiseksi tekopohjavedestä valmistettu talousvesi on syytä desinfioida.

2.1.2.3 Logaritminen poistuma raakaveden laadun seurannalle

Monilla vesilaitoksilla raakaveden laadun seuranta on vähäistä. Seurannassa keskitytään usein vain talousveden laadun seurantaan. Raakaveden laadun seuranta parantamalla saadaan kuitenkin enemmän tietoa koko vedentuotantoketjusta, mikä puolestaan turvaa paremmin talousveden laatua. Raakaveden laadun seurannan kehittämiseksi voidaan antaa logaritmisia poistumia, jos sen ansiosta mahdollisiin veden laadun häiriötilanteisiin voidaan varautua paremmin.

Tehostettu raakaveden laadun seuranta voi itsessään parantaa toimintavalmiutta, koska tällöin poikkeamat havaitaan ja korjataan nopeammin. Sen avulla voidaan myös paremmin ennustaa, miten raakavesi reagoi häiriötilanteissa (esimerkiksi rankkasateiden aikana). Kun tällaisia tapauksia havaitaan tehostetun raakaveden laadun seurannan ansiosta ja ne yhdistetään talousveden laatua suojaaviin toimenpiteisiin (esimerkiksi vedenjakelun katkaisemiseen), tehostetulle raakaveden seurannalle voidaan antaa logaritmisia poistumia taulukon 9 mukaan. On kuitenkin syytä muistaa, että raakaveden laadun seurannalla ei havaita kaikkia poikkeamia.

Taulukko 9. Logaritminen poistuma tehostetulle raakaveden laadun seurannalle¹⁾.

Toimenpide-ryhmä	Raakaveden näytteenotto ja seuranta-toimenpiteet	Logaritmisen poistuman enimmäismäärä
Tihennetty näytteenotto	Laajennettu raakaveden mikrobiologinen näytteenotto- ja analyysiohjelma <ul style="list-style-type: none"> vähintään yhtä kattava kuin riskiperusteinen ohjelma²⁾ vähintään yhtä kattava kuin veden laadun seuranta verkostossa 	0,50b + 0,50v + 0,15a 0,25b + 0,25v + 0,15a
Raakaveden laadun online-seuranta	Raakaveden laadun online-seuranta (samuus, mikrobiologinen laatu tai muut mikrobiologisen laadunvalvonnan kannalta hyödylliset parametrit), jonka perusteella voidaan: <ul style="list-style-type: none"> katkaista raakavedenotto automaattisesti katkaista raakavedenotto manuaalisesti tunnin sisällä siirtyä toiseen raakavesilähteeseen hälytysrajan ylittyessä 	0,50b + 0,50v + 0,15a 0,25b + 0,25v + 0,15a 0,25b + 0,25v + 0,15a
Yhteenlaskettujen logaritmistien poistumien ehdoton enimmäismäärä raakaveden tehostetulle näytteenotolle ja laadun seurannalle		0,75b + 0,75v + 0,5a

1) Toimenpideryhmälle annettava logaritminen poistuma ei voi olla suurempi kuin ryhmän kattavimman toimenpiteen logaritminen poistuma.

2) Alkuperäisessä Microbial Barrier Analysis (MBA) – a guideline (Norwegian Water, 2014) -oppaassa esitetty ohjelma raakaveden laadun määrittämiseksi. Laadun seuranta tehostetaan mahdollisten raakaveden laatuhäiriöiden (esim. järven kevät- ja syyskierto, rankkasateet, tulvat, lumien sulaminen) aikaan ja vesilaitoksen koon mukaan näytteitä otetaan vuodessa seuraavasti:

< 1 000 hlö	≥ 6
1 000 - 10 000 hlö	≥ 12
> 10 000 hlö	≥ 24

Raakavedestä tutkitaan ainakin *E.coli* ja *Clostridium perfringens* ja mahdollisesti myös *Giardia* ja *Cryptosporidium*.

2.1.2.4 Logaritminen poistuma vedenkäsittelyssä

Taulukossa 10 on esitetty erilaisille vedenkäsittelymenetelmille annettavia logaritmisia poistumia. Menetelmät poistavat vedestä partikkeleita ja kolloideja, eli ne poistavat myös taudinaiheuttajia. Taulukko perustuu Norjassa ja Ruotsissa tehtyihin havaintoihin ja kirjallisiin lähteisiin (esim. Hijnen ja Medema, 2010, Hokajärvi ym., 2018).

Taulukko 10. Logaritminen poistuma vedenkäsittelymenetelmille.

Vedenkäsittelymenetelmä	Logaritmisen poistuman enimmäismäärä
Pikahiekkasuodatus ilman saostusta (suodatusnopeus < 7,5 m/h) ¹⁾	0,5b + 0,25v + 0,5a
Mikrosuodatus, kalvosuodatus (MF), kalvon huokosten nimellishalkaisija on < 100 nm	2,0b + 1,0v + 2,0a
Ultrasuodatus, kalvosuodatus (UF), kalvon huokosten nimellishalkaisija on < 40 nm	2,5b + 2,0v + 2,5a
Nanosuodatus/käänteisosmoosi, kalvosuodatus (NF/RO), kalvon huokosten nimellishalkaisija on < 5 nm	3,0b + 3,0v + 3,0a
Hidas hiekkasuodatus (suodatusnopeus < 0,5 m/h)	2,0b + 2,0v + 2,0a
Saostus/suorasuodatus ²⁾	2,25b + 1,5v + 2,25a
Saostus/suorasuodatus ³⁾	2,5b + 2,0v + 2,5a
Saostus + selkeytys (laskeutus tai floaatio) + suodatus ²⁾	2,5b + 1,75v + 2,5a
Saostus + selkeytys (laskeutus tai floaatio) + suodatus ³⁾	2,75b + 2,25v + 2,75a
Saostus/MF-kalvosuodatus ³⁾	3,0b + 2,5v + 3,0a
Saostus/UF-kalvosuodatus ³⁾	3,0b + 3,0v + 3,0a

- 1) Voidaan soveltaa myös biosuodattimiin, ioninvaihtosuodattimiin, aktiivihiekkasuodattimiin ja kalkkikivisuodattimiin
- 2) Kun tuotetun veden sameus on < 0,2 NTU (online-seuranta)
- 3) Kun koagulantin annostus on suuri ja toiminnan valvonnalla varmistetaan veden sameuden olevan < 0,1 NTU (online-seuranta)

Taulukossa 10 on esitetty erilaisia suodatusmenetelmiä (hiekkasuodatus ja kalvosuodatus esisaostuksella ja ilman sitä). Pääasiallisesti muuhun kuin partikkelien erotukseen käytettävien suodatusmenetelmien (ioninvaihtosuodattimet, aktiivihiekkasuodattimet, kalkkikivisuodattimet yms.) mikrobien erottelukyky on kohtuullinen, ja niiden logaritminen poistuma on yhtä suuri kuin pikahiekkasuodattimien poistuma (ilman esisaostusta) suodatusnopeuden ollessa < 7,5 m/h. Jos suodatusnopeus on suurempi kuin 7,5 m/h, logaritmista poistumaa ei anneta.

Logaritminen poistuma saostus/suodatusmenetelmissä riippuu partikkeleiden ja kolloidien poiston tehokkuudesta. Tämän vuoksi on tarkasteltava erikseen tilanteita, joissa käsitellyn veden sameus on alle 0,2 NTU tai alle 0,1 NTU. Jälkimmäisessä tapauksessa on yleensä käytetty tehostettua saostusta, eli suurempia saostuskemikaaliannoksia ja tehostettua pH-kontrollia. Jos vesi sisältää luonnon orgaanista ainesta (natural organic matter, NOM), veden värin pitäisi poistua tehostetussa saostuksessa >70 %.

Kalvosuodatuksessa kalvot saattavat vahingoittua, jolloin taudinaiheuttajien poistoteho ei välttämättä ole yhtä hyvä kuin on ilmoitettu. Kalvosuodatuslaitoksilla on valvottava kalvojen eheyttä testeillä ja tuoteveden laadun seurannalla (esim. sähköjohtavuus, UV-absorbanssi).

2.1.2.5 Logaritmiseen poistumaan tehtävät vähennykset vedenkäsittelyn toiminnan valvonnan puutteiden vuoksi

Taulukossa 10 esitetyt logaritmiset poistumat edellyttävät prosessien moitteetonta toimintaa. Moitteeton toiminta sisältää myös toiminnan ja vedenlaadun seurannan riskien vähentämiseksi odottamattomissa häiriötilanteissa, esimerkiksi suodatinvian, annosteluvirheen tai sähkökatkon tapahtuessa. Jos vedenkäsittelyn valvonta on puutteellista, taulukossa 10 esitettyjen logaritmisten poistumien arvoa on vähennettävä. Taulukossa 11-2 on esitetty logaritmisten poistumien vähennykset, jotka on tehtävä toiminnan riskejä vähentävän valvonnan puuttuessa.

Taulukko 11. Taulukossa 10 esitettyyn logaritmiseen poistumaan tehtävät vähennykset toiminnan valvonnan puutteiden vuoksi.

Toimenpideryhmä	Toiminnan valvontatoimenpiteet	Logaritmiseen poistumaan tehtävät vähennykset valvontatoimenpiteen puuttuessa
Käsitellyn veden online-laadunvalvonta ja toimenpiteet asetettujen raja-arvojen noudattamiseksi	<p>Käsitellyn veden sameuden, värin tai muun sopivan prosessinohjauksen parametrin online-seuranta:</p> <ul style="list-style-type: none"> • puuttuu • on käytössä ja aktivoi hälytyksen raja-arvon ylittyessä¹⁾, jonka jälkeen prosessiolosuhteet <u>korjataan manuaalisesti</u> tunnin kuluessa (pH-säädöt, saostuskemikaalin annostus yms.) niin, että normaali toiminta voi jatkua. • on käytössä ja aktivoi hälytyksen raja-arvon ylittyessä¹⁾, jonka jälkeen veden toimitus <u>katkaistaan manuaalisesti ja korjaaviin toimenpiteisiin ryhdytään</u> tunnin kuluessa ja normaali toiminta käynnistetään tilanteen korjaamisen jälkeen. • on käytössä ja katkaisee veden toimituksen <u>automaattisesti</u> raja-arvon ylittyessä¹⁾, kunnes tilanne on korjattu ja kuitattu ja normaali toiminta voi jatkua. 	<p>- 40%</p> <p>- 20%</p> <p>- 10%</p> <p>0 %</p>

Sähkön- saannin jat- kuva val- vonta ja toi- menpiteet sähkönsaan- nin katke- tessa	Vedenkäsittelylaitoksen sähkösaannin jatkuva seu- ranta ja tietojen toimitus keskusvalvomoon	
	• puuttuu	- 40 %
	• on käytössä ja aktivoi hälytyksen sähkösaannin katketessa, jonka jälkeen raakavedenotto <u>katkaistaan manuaalisesti tunnin kuluessa</u> , mikäli raakaveden tulo jatkuu sähkösaannin katkosta huolimatta ja raakaveden otto palautetaan sähkösaannin palaututtua	- 20 %
	• on käytössä ja katkaisee sähkösaannin katketessa raakavedenoton <u>automaattisesti</u> , mikäli raakaveden tulo jatkuu sähkösaannin katkosta huolimatta ja raakaveden otto palautetaan sähkösaannin palaututtua	0%
	• on käytössä ja aktivoi hälytyksen sähkösaannin katketessa, jonka jälkeen vesilaitoksen toiminnot ylläpitävä varavoimageneraattori <u>käynnistetään manuaalisesti tunnin kuluessa</u> .	- 20%
• on käytössä ja käynnistää vesilaitoksen toiminnot ylläpitävän varavoimageneraattorin <u>automaattisesti</u> sähkönsyötön katketessa.	0%	

1) Hälytyksen raja-arvo on asetettava tapauskohtaisesti asiaankuuluvalla parametrilla.

Esimerkki

Saostusta/suora suodatusta käytävässä vesilaitoksessa käsitellyn veden sameus on < 0,1 NTU. Vedenkäsittelyn logaritmisien poistuman enimmäismäärä (taulukko 10) on näin ollen $2,5b+2,0v+2,5a$. Laitoksessa on seuraavat valvontalaitteet:

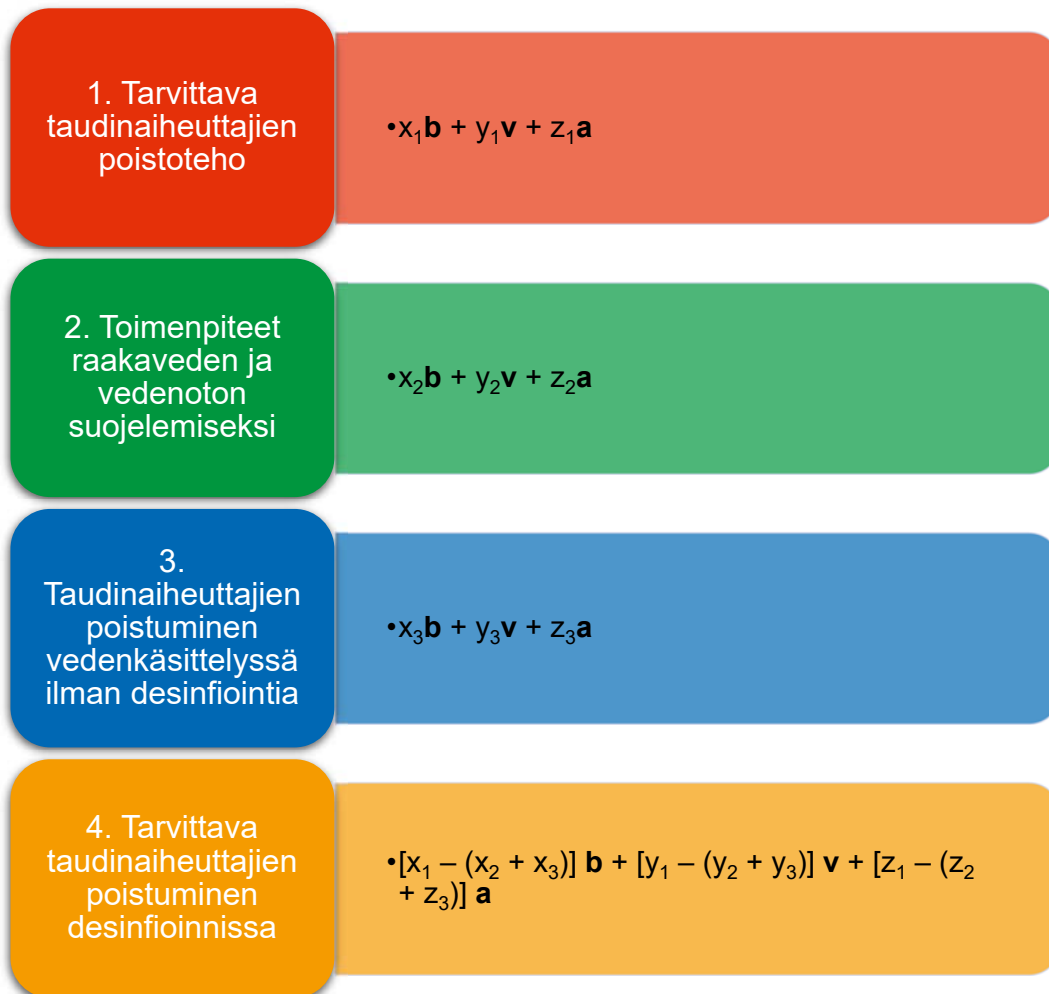
- Jokaiseen suodattimeen on asennettu sameusanturi. Jos sameus ylittää arvon 0,2 NTU, valvojat saavat hälytyksen ja korjaavat välittömästi tilanteen manuaalisesti niin, että käsitellyn veden sameus laskee taas tasolle < 0,1 NTU. Raakavedenotto ei katkea automaattisesti.
- Laitoksessa on varavoimageneraattori, joka käynnistyy automaattisesti, kun normaali sähkösaanti katkeaa.

Vedenkäsittelyn logaritmisien poistuman laskenta

Logaritmisien poistuman enimmäismäärä	$2,5b + 2,0v + 2,5a$
– Valvonnan puutteista johtuvat vähennykset	
• käsitellyn veden laadunvalvonnan puutteet (- 20 %)	$0,5b + 0,4v + 0,5a$
• sähkösaannin valvonnan puutteet (- 0 %)	<u>$0,0b + 0,0v + 0,0a$</u>
Vedenkäsittelyn logaritminen poistuma	$2,0b + 1,6v + 2,0a$

2.1.3 Desinfiinnissa tarvittavan logaritmissen poistuman määrittäminen

Kun tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho ja logaritminen poistuma toimenpiteille pohjaveden muodostumisalueella tai pintaveden valuma-alueella ja vedenotossa sekä vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia on määritetty, desinfiointivaiheessa tarvittava logaritminen poistuma saadaan vähentämällä logaritminen poistuma tarvittavasta taudinaiheuttajien poistotehosta (kuva 2).



Kuva 2. Desinfiinnissa tarvittavan logaritmissen poistuman määrittäminen.

Luvussa 3 selitetään, miten desinfiinnin logaritminen poistuma lasketaan. Olemassa olevissa vedentuotantoketjuissa tulosta voi verrata kuvan 2 mukaisesti määritettyyn desinfiinniltä tarvittavaa taudinaiheuttajien poistotehoon ja taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys koko vedentuotantoketjussa voidaan arvioida (luku 4). Suunnitteilla olevissa vesilaitoksissa kuvan 2 mukaisesti määritetty tarvittava desinfiinnin logaritminen poistuma muodostaa perustan desinfiinnin suunnittelulle.

3 DESINFIOINNIN LASKENTA- JA TESTIMENETELMÄT (TYÖKALUT)

Tässä luvussa esitellään laskenta- ja testimenetelmiä (työkaluja), joita voidaan hyödyntää desinfioidin suunnittelussa ja käytössä.

1. Työkaluja voidaan käyttää suunnitteluvaiheessa tarvittavan desinfiointiannoksen ja kontaktiajan määrittämiseksi, jotta saavutetaan tarvittava taudinaiheuttajien logaritminen poistuma.
2. Käytössä olevalla laitoksella työkaluja voidaan hyödyntää käytön valvonnassa (omavalvonta), esimerkiksi määrittämään, onko annostus riittävä.

Esimerkkejä laskenta- ja testausmenetelmien käytöstä erilaisissa tilanteissa on esitetty alkuperäisen oppaan Microbial Barrier Analysis (MBA) –guideline (Ødegaard ym., 2014) liitteissä I ja II klooridesinfioidin ja otsonoidin osalta.

3.1 SUUNNITTELUN JA KÄYTÖN PERUSTEET

Talousveden desinfioidin suunnittelu ja käyttö perustuvat kolmeen tekijään:

- Virtaama (mitoitusvirtaama).
- Desinfioidin veden laatu ja lämpötila.
- Ct-arvot vaadittavan logaritmissen poistuman saavuttamiseksi eri mikrobien osalta.

3.1.1 Mitoitusvirtaama

Mitoitusvirtaama on desinfioidin tuntikohtainen maksimivirtaama, eli $Q_{\max. \text{tunti}}$. Maksimivirtaaman määrittelyssä on otettava tarvittaessa huomioon pumppauksen maksimikapasiteetti.

3.1.2 Desinfioidin veden laatu ja lämpötila

Veden laatu on monen muuttujan summa, mutta desinfioidin kannalta kolme tärkeintä muuttujaa ovat:

- Orgaanisen aineksen pitoisuus (esitetty TOC-pitoisuutena (tarvitaan desinfiointikemikaaliannoksen laskennassa), COD_{Mn} -arvona tai värinä humuspitoisessa vedessä)
- Sameus
- pH-arvo

Näiden lisäksi esimerkiksi vedessä oleva rauta ja mangaani vaikuttavat desinfiointiin, sillä desinfiointikemikaalia kuluu niiden hapettamiseen.

TOC-pitoisuuden (tai värin) ja sameuden osalta suunnittelu perustuu desinfiointiin johdettavan veden huonoimpaan oletettuun laatuun. Olemassa olevissa vesilaitoksissa käytetään suurinta viimeisen 3 vuoden käytön aikana havaittua TOC-pitoisuutta.

Kemiallisen desinfioidin annostelulaitteistoa suunniteltaessa pitää ottaa huomioon annostuksen mahdollinen nostaminen tarvittavalle tasolle myös orgaanisen aineksen

poistamisen epäonnistuessa tai raakaveden laadun heikentyessä ja vaikka desinfiointimenetelmä olisi suunniteltu alhaisemmille orgaanisen aineksen pitoisuuksille.

UV-desinfiointia käytettäessä desinfioinnin tehokkuuden nostaminen ei ole mahdollista kuten kemiallisten desinfiointimenetelmien kohdalla. Mitoitusta korkeampi desinfioitavan veden TOC-, rauta-, mangaanipitoisuus tai sameus voi kuitenkin johtaa UV-desinfioinninkin pettämiseen. Tämä pitää ottaa huomioon pienentämällä UV-desinfioinnin laskennallista logaritmista poistumaa siinä tapauksessa, että desinfioitavan veden UV-valon läpäisevyys on alhaisempi kuin mihin UV-laitos on suunniteltu (luku 3.9.2).

Suunnitellussa käytetään pH-arvoa, jossa desinfiointivaiheen pitäisi toimia. pH-arvo vaikuttaa merkittävästi desinfioinnin tehokkuuteen kloorauksessa.

Desinfioitavan veden lämpötila on riippuvainen raakavesilähteestä. Taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnissa voidaan käyttää suunnittelun yhteydessä Pohjoismaissa seuraavia mitoituksilämpötiloja, ellei raakaveden todellisten lämpötilatietojen tai muun aineiston perusteella ole perusteltua käyttää muuta lämpötilaa:

- 0,5 °C joille ja puroille
- 4 °C järville ja pohjavedelle.

Desinfioinnin todellista toimintaa arvioitaessa pitää käyttää todellista toimintalämpötilaa. Tällöin käytetään lämpötilaa, joka ylittyy 90 % ajasta (90. persentiili) tai olemassa olevista mittauksista, koska ääriämpötiloja voi esiintyä lyhyillä aikaväleillä.

3.2 CT-ARVOT ERI TAUDINAIHEUTTAJARYHMIEN INAKTIVOINNILLE TAI TUHOAMISELLE

3.2.1 Ct-arvon käsite

Desinfiointikemikaalin Ct-arvo kuvaa taudinaiheuttajien tiettyyn logaritmiseen poistumaan tarvittavaa desinfiointikemikaalin pitoisuutta (C) ja kontaktiaikaa (t). Kokemusten ja kirjallisten lähteiden perusteella voidaan määrittää tarvittava Ct-arvo tietyn logaritmi- poistuman saavuttamiseksi eri taudinaiheuttajaryhmille. Tätä käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.2. Haasteena on määrittää laskennassa käytettäville pitoisuudelle (C) ja kontaktiajalle (t) oikeat arvot. Tätä käsitellään tarkemmin luvussa 3.3.

Reaktoria, jossa desinfiointikemikaali saatetaan kosketukseen veden kanssa kontaktiajan ajaksi, kutsutaan kontaktialtaaksi. Kontaktiallas voi koostua yhdestä tai useammasta osasta. Vesijohto ensimmäiselle kuluttajalle asti voidaan myös laskea osaksi kontaktiallasta.

3.2.2 Ohjeelliset Ct-arvot

Aiempien tutkimusten (Ødegaard ym., 2006, 2009a) ja kirjallisten lähteiden (Guillot, E. ja Loret, J-F., 2010) perusteella määritetyt ohjeelliset Ct-arvot eri desinfiointikemikaaleille ja taudinaiheuttajille on esitetty taulukossa 12. Nämä arvot muodostavat perustan tässä

työkalussa esitettävälle taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnille. Mitoituslämpötila on otettava huomioon kaikissa tapauksissa ja klooridesinfiointissa myös pH-arvo. Jos Ct-arvo on >100, kemikaalin annostuksen ja/tai kontaktiajan on oltava niin suuri, että menetelmä on epäkäytännöllinen.

Taulukko 12. Vaaditut Ct-arvot (mg · min/l) bakteerien, virusten ja alkueläinten poistamiseksi.

	Bakteerit 3 log poistuma		Virukset 3 log poistuma		Giardia-alkueläimet 2 log poistuma		Cryptosporidium-alkueläimet 2 log poistuma	
	4 °C	0,5 °C	4 °C	0,5 °C	4 °C	0,5 °C	4 °C	0,5 °C
Kloori								
pH < 7	1,0	1,5	4,0	6,0	75	100	*)	*)
pH 7–8	1,5	2,0	6,0	9,0	100	150	*)	*)
pH > 8	2,0	3,0	8,0	12,0	175	250	*)	*)
Klooriamiini	100	200	1500	2000	1750	2500	*)	
Klooridioksidi	1,0	1,5	10	15	20	30	>100	>150
Otsoni	0,5	0,75	1,0	1,4	1,5	2,0	30	45

*) Ct-arvo on niin korkea, että sillä ei voi käytännössä saavuttaa.

Koska Ct-arvon ja logaritmisesta poistumasta välillä on suora yhteys, logaritminen poistuma voidaan laskea mille tahansa Ct-arvolle. Kun tarvittava Ct-arvo on taulukon 12 mukainen, minkä tahansa muun Ct-arvon logaritminen poistuma ($\log_{\text{laskettava}}$) voidaan laskea seuraavasti:

$$\log_{\text{laskettava}} / \text{Ct}_{\text{laskettava}} = \log_{\text{tarvittava}} / \text{Ct}_{\text{tarvittava}} \quad \text{Yhtälö (1)}$$

Esimerkki

Virusten logaritminen poistuma otsonidesinfiointissa, kun Ct-arvo on 0,8 (mg · min/l) 4 °C lämpötilassa:

$$\begin{aligned} \log_{\text{laskettava}} &= (\log_{\text{tarvittava}} / \text{Ct}_{\text{tarvittava}}) \cdot \text{Ct}_{\text{laskettava}} \\ &= (3 \log / 1,0 \text{ mg} \cdot \text{min/l}) \cdot 0,8 \text{ mg} \cdot \text{min/l} = 2,4 \log \end{aligned}$$

Seuraavaa kaavaa käyttäen voidaan myös määrittää $\text{Ct}_{\text{laskettava}}$ tietylle logaritmiselle poistumalle ($\log_{\text{laskettava}}$), kun $\text{Ct}_{\text{tarvittava}}$ tiedetään toisella logaritmisella poistumalla:

$$\text{Ct}_{\text{laskettava}} = \text{Ct}_{\text{tarvittava}} \cdot (\log_{\text{laskettava}} / \log_{\text{tarvittava}}) \quad \text{Yhtälö (2)}$$

Näin ollen ainoastaan yhden $\text{Ct}_{\text{tarvittava}}$ -arvon ilmoittaminen (taulukko 12) jokaiselle desinfiointitilanteelle riittää, kun kyseessä on bakteerien ja virusten 3 log poistuma ja alkueläinten 2 log poistuma. Näiden kaavojen avulla voidaan laskea helposti tarvittava Ct-arvo mille tahansa logaritmiselle poistumalle.

3.3 CT-ARVON MÄÄRITTÄMINEN

Desinfiointikemikaalin pitoisuuden (C)- ja kontaktiajan (t) määrittäminen on tärkeää, koska:

- C vaihtelee ajan myötä desinfiointiaineen kuluessa
- t on riippuvainen desinfioinnin kontaktialtaan (esim. alavesisäiliö, verkostotilavuus ennen ensimmäistä kuluttajaa, otsonoinnin kontakti- ja reaktiokammio) tilavuudesta ja sekoitusasteesta (johon puolestaan vaikuttaa altaan muoto, väliseinät, muut rakenteet, yms.)

3.3.1 t-arvon määrittäminen Ct-laskelmissa

Sekoittuminen ja altaaseen tulevan veden viipymien jakauma ovat erilaisia erimuotoisissa kontaktialtaissa. Kun halutaan määrittää t-arvo (osana Ct-arvoa), on käytettävä tehollista kontaktiaikaa t_{teho} alla esitetyn yhtälön mukaisesti.

$$t_{\text{teho}} = (V/Q) \cdot F_h \cdot F_s = T \cdot F_h \cdot F_s$$

Yhtälö (3)

t_{teho} = tehollinen kontaktiaika (min)

V = kontaktialtaan tilavuus (m³)

Q = mitoitusvirtaama (m³/min)

T = V/Q = teoreettinen kontaktiaika (min)

F_h = hydraulinen kerroin

F_s = sarjakerroin

Hydraulisen kertoimen (F_h) ja sarjakerroimen (F_s) arvot erilaisissa sekoitusolosuhteissa on esitetty taulukossa 13. t_{10} kuvastaa ajanjaksoa, jonka aikana 10 % altaaseen tulleesta vedestä on kulkenut altaan läpi ja 90 % on edelleen altaassa. t_m kuvastaa ajanjaksoa, jonka aikana 50 % altaaseen tulleesta vedestä on kulkenut altaan läpi. Nämä ajat voidaan määrittää merkkiainekokeilla, jotka voivat olla hyödyllisiä olemassa olevien järjestelmien käytössä. Suunnitteluvaiheessa on kuitenkin tehtävä tiettyjä oletuksia sekoitusolosuhteiden määrittämiseksi (taulukko 13).

Hydraulinen kerroin on sitä suurempi, mitä lähempänä tulppavirtausta virtaus on. Ihan-teellisessa tilanteessa tulppavirtaus on täydellinen. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista kontaktialtaassa. Kun kontaktiallas jaetaan useaan sarjassa olevaan osaan, koko kontaktialtaan virtausjärjestelmä lähestyy tulppavirtauksen virtausjärjestelmää. Tämän vuoksi sarjakerroin on sisällytetty t_{teho} -kaavaan.

Taulukko 13. Hydraulisen kertoimen ja sarjakertoimen suositusarvot erilaisissa sekoitusolosuhteissa.

Sekoitusolosuhteet	Hydraulinen kerroin F_h *, **		Kuvaus kontaktialtaan kammioista	Sarjakerroin F_s sarjaan kytketyt altaan osat		
	t_{10}/T^*	t_m/T^{**}		1,0	2,0	3,0
Ei tulppavirtausta (täydellinen sekoitus)	0,1	0,3	Ei ohjauslevyjä, sekoitusallas, korkea sisään- ja ulostulonopeus, alhainen altaan pituus–leveys-suhde (≤ 1).	1,0	2,0	2,5
Heikko tulppavirtaus	0,3	0,4	Ei ohjauslevyjä altaassa, yksittäiset sisään- ja ulostuloaukot, altaan pituus–leveys-suhde > 1 .	1,0	1,8	2,0
Keskinkertainen tulppavirtaus	0,5	0,5	Ohjauslevy sisään- tai ulostuloaukossa, joitakin ohjauslevyjä altaassa ja mahdollisesti useampi sisään- ja ulostuloaukko, altaan pituus–leveys-suhde > 4 .	1,0	1,5	1,8
Melko hyvä tulppavirtaus	0,7	0,7	Ohjauslevy sisääntuloaukossa, kierukkamainen ohjauslevy altaassa, jonka ansiosta altaan pituus–leveys-suhde > 6 .	1,0	1,3	1,4
Erittäin hyvä tulppavirtaus	0,9	0,9	Ohjauslevy sisääntuloaukossa, kierukkamainen tai rei'itetty ohjauslevy altaassa. Korkea pituus–leveys-suhde (> 10).	1,0	1,1	1,1
Täydellinen tulppavirtaus	1,0	1,0	Erittäin korkea pituus–leveys-suhde (> 20). Putkistovirtaus.	1,0	1,0	1,0

* Käytetään Ct-laskelmissa (luku 3.4.3, 3.7.4)

** Käytetään laskettaessa k -, C_{alku} - ja C_{ulos} -arvoja (luku 3.4.2 ja luvut 3.7.2)

Esimerkki

Kontaktiallas muodostuu 3 samankokoisesta sarjassa olevasta osasta. Jokaisen osan teoreettinen kontaktiaika on $T = (V/Q) = 10$ min (eli teoreettinen kokonaiskontaktiaika = 30 min), ja jokaisessa kammiossa on heikko tulppavirtaus (yksittäiset sisään- ja ulostuloaukot, ei ohjauslevyjä altaassa), eli hydraulinen kerroin ($F_h = t_{10}/T$) on 0,3. Tällöin koko altaan tehollinen kontaktiaika (t_{teho}) on:

$$t_{teho} = T \cdot F_h \cdot F_s = 30 \text{ min} \cdot 0,3 \cdot 2,0 = 18 \text{ min}$$

Myöhemmin (luvut 3.4.3, 3.7.4, 3.4.2 ja 3.7.2–3.7.3) kerrotaan, kuinka desinfiointikemikaalin alkukulutus (AK), hajoamisvakiot (k) ja pitoisuudet (C_{alku} ja C_{ulos}) voidaan laskea. Näissä laskelmissa t_m on tärkeämpi kuin t_{10} , ja hydraulista kerrointa t_m/T olisi käytettävä kertoimen t_{10}/T sijaan (taulukko 13). Hydraulista kerrointa t_{10}/T käytetään Ct -arvon laskennassa. Taulukosta ilmenee, että hydrauliset kertoimet eroavat ainoastaan täydellisessä sekoituksessa ja heikoissa tulppavirtauksessa.

3.3.2 C-arvon määrittäminen Ct-laskelmissa

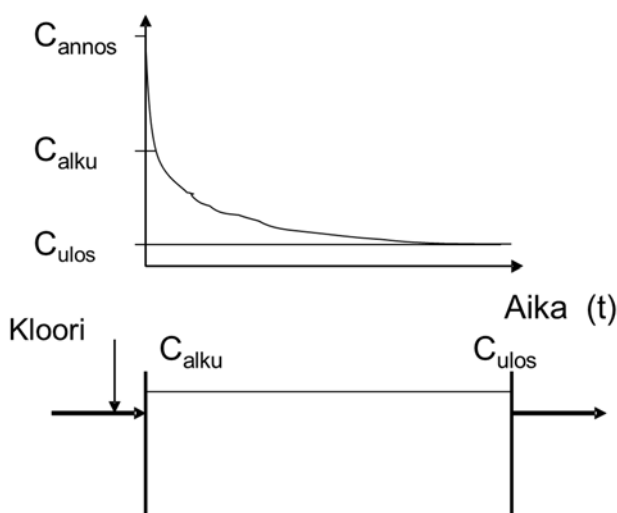
Desinfiointiaineen pitoisuusmuutos kontaktialtaassa riippuu desinfiointiaineen tyypistä. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan kutakin desinfiointikemikaalia, tarvittavan annostuksen laskemista sekä Ct -arvoa.

3.4 KLOORI (KLOORIKAASU JA HYPOKLOORIITTI)

Yleistä tietoa kloorikaasun ja hypokloriitin käytöstä desinfiointiaineena löytyy oppikirjoista, VVY:n julkaisusarjan oppaasta Talousveden klooraus (2014) sekä Ødegaardin ym. teoksista (2006, 2009b, 2014). Klooripitoisuudesta puhuttaessa viitataan aina vapaaseen klooriin ($\text{mg Cl}_2/\text{l}$), riippumatta kloorituotteen tyypistä tai sen muodosta vedessä.

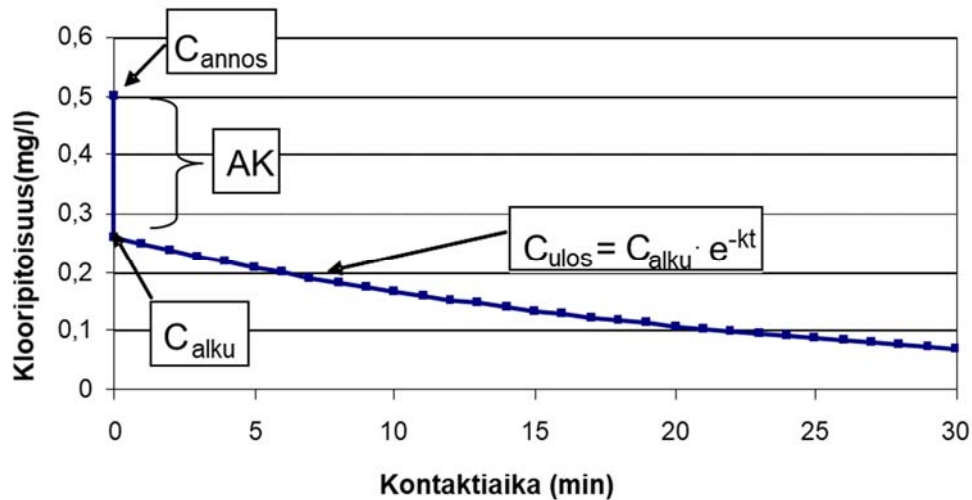
3.4.1 Klooripitoisuuden muutos desinfioinnissa

Kun klooria lisätään veteen, klooria kuluu nopeasti erilaisten orgaanisten ja epäorgaanisten hapettuvien yhdisteiden hapettuessa vedessä. Tämän alkukulutuksen myötä klooripitoisuus laskee tasolle, jota voidaan kutsua desinfioinnin alkupitoisuudeksi (C_{alku}). Tämän jälkeen kloori hajoaa asteittain ja hitaammin, saavuttaen kloorin jäännöspitoisuuden tietyn ajanjakson jälkeen. Jäännöspitoisuutta kontaktialtaasta poistumisen jälkeen kutsutaan ulostulopitoisuudeksi (C_{ulos}) (kuva 3).



Kuva 3. Kaaviokuva kloorin pitoisuusmuutoksesta kontaktialtaassa.

Hapettumisen aiheuttama kloorin alkukulutus tapahtuu niin nopeasti, että sen kestoa on hankala määritellä. Tässä oppaassa oletetaan, että alkukulutus tapahtuu välittömästi ja että pitoisuuden kehittymistä voidaan kuvata kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Kaaviokuva kloorin alkukulutuksesta ja hajoamisesta.

Tämä tarkoittaa, että annoksen (C_{annos}) ja alkupitoisuuden (C_{alku}) välinen suhde voidaan kuvata kaavalla:

$$C_{\text{alku}} = C_{\text{annos}} - \text{AK}$$

Yhtälö (4)

jossa AK on kloorin alkukulutus, joka tapahtuu välittömästi annostuksen jälkeen. Se toimii vedenlaadun ja kloorin annostuksen funktiona.

Klooripitoisuuden asteittainen väheneminen ajan myötä alkupitoisuudesta (C_{alku}) kohti jäännöspitoisuutta ulostuloaukolla (C_{ulos}) voidaan kirjata ensimmäisen kertaluvun hajoamisreaktiona, eli:

$$C_{\text{ulos}} = C_{\text{alku}} \cdot e^{-kt}$$

Yhtälö (5)

jossa t on kontaktiaika ja k on kloorin hajoamisvakio, joka on riippuvainen vedenlaadusta ja kloorin annostuksesta.

Klooripitoisuutta eri kontaktiajoilla kuvaavan käyrän alle jäävä pinta-ala kuvaa Ct -arvoa (kuva 4). Ct -arvo voidaan laskea myös seuraavalla kaavalla:

$$Ct = 0,3 \cdot t \cdot C_{\text{ulos}}$$

Yhtälö (6)

jossa C_{ulos} on alhaisin mitattu kontaktialtaasta ulos tulevan veden vapaan kloorin pitoisuus. Varmuuskerrointa 0,3 käytetään, koska virtaus ja kontaktiaika kontaktialtaassa ei yleensä ole tasainen.

3.4.2 Kloorin alkukulutus (AK) ja hajoamisvakio (k)

Alkukulutuksen (AK) ja hajoamisvakion (k) arvot voidaan määrittellä usealla eri tavalla. Käytössä olevassa laitoksessa paras tapa on mittaaminen. Koska tämä ei ole mahdollista suunnitteluvaiheessa, AK- ja k -arvot on arvioitava joko laboratoriokokeiden avulla tai veden laatuun perustuvilla laskelmilla.

Luvussa 3.4.2.2 esitetyt mallit, joita voidaan käyttää AK- ja k-arvojen laskemiseen, perustuvat useilla erilaisilla vesillä suoritettuihin laboratorionkokeisiin (Ødegaard ym., 2009). Alla on esitetty määrittäminen myös kokeellisin menetelmin.

3.4.2.1 Vaihtoehto 1: AK- ja k-arvojen määrittäminen toiminnassa olevan laitoksen mittausten perusteella

Toiminnassa olevissa laitoksissa klooriannos (C_{annos}) ja klooripitoisuus kontaktiajan jälkeen (C_{ulos}) ovat tiedossa. Jos mahdollista, klooripitoisuus on hyvä mitata myös jostakin toisesta kontaktialtaan selkeästi määritellystä kohdasta (esimerkiksi kontaktialtaan sisään-tuloaukosta, $C_{\text{sisään}}$). Näin hajoamisvakio (k) voidaan laskea näiden kahden kohdan mitattujen klooripitoisuuksien perusteella seuraavan yhtälön avulla:

$$k = -[\ln(C_{\text{ulos}}/C_{\text{sisään}})]/t \quad (t = t_{\text{teho}}, \text{ luku 3.3.1}) \quad \text{Yhtälö (7)}$$

Sen jälkeen alkukulutus voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$AK = C_{\text{annos}} - C_{\text{alku}} = C_{\text{annos}} - [C_{\text{ulos}}/e^{-kt}] \quad (t = t_{\text{teho}}, \text{ luku 3.3.1}) \quad \text{Yhtälö (8)}$$

3.4.2.2 Vaihtoehto 2: AK- ja k-arvojen määrittäminen mallilaskelmien avulla

Ødegaardin ym. (2009) tutkimusten perusteella on esitetty seuraava malli AK- ja k-arvojen määrittämiseksi:

$$AK_{\text{kloori}} = 0,06 \cdot \text{TOC} + 0,36 \cdot C_{\text{annos}} + 0,08 \cdot (C_{\text{annos}} / \text{TOC}) - 0,12 \quad \text{Yhtälö (9)}$$

$$k_{\text{kloori}} = 0,013 \cdot \text{TOC} - 0,040 \cdot C_{\text{alku}} - 0,010 \cdot C_{\text{alku}} / \text{TOC} + 0,022 \quad \text{Yhtälö (10)}$$

AK:n kloorimallia voidaan soveltaa, kun:

- $C_{\text{annos}} = 0,25 - 3,0 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$
- $\text{TOC} = 0,5 - 6,0 \text{ mg/l}$
- Laskettu $AK \leq C_{\text{annos}}$ (kun $AK > C_{\text{annos}}$, on oltava $AK = C_{\text{annos}}$)

k:n kloorimallia voidaan soveltaa, kun:

- $C_{\text{alku}} = 0,25 - 3,0 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$
- $\text{TOC} = 0,5 - 6,0 \text{ mg/l}$
- Laskettu $AK < C_{\text{annos}}$
- Laskettu $k > 0,005$

3.4.2.3 Vaihtoehto 3: AK- ja k-arvojen määrittäminen mittausten ja laskelmien yhdistelmän avulla

Jos tiedetään ainoastaan kontaktialtaan klooriannos (C_{annos}) ja klooripitoisuus kontaktiajan jälkeen (C_{ulos}), on suositeltavaa ensin määrittää AK-arvo yllä esitettyä yhtälöä 9

käyttämällä ja määrittää tämän jälkeen alkupitoisuus (C_{alku}) yhtälön 4 avulla. Tämän jälkeen voidaan laskea hajoamisvakio (k) seuraavan yhtälön avulla:

$$k = - [\ln(C_{ulos}/C_{alku})]/t \quad (t = t_{teho}, \text{ ks. luku 3.3.1}) \quad \text{Yhtälö (11)}$$

Mallin avulla tulisi määrittää AK-arvo k -arvon sijaan siksi, että AK-arvon määrittäminen mallin avulla on varmempaa kuin k -arvon määrittäminen.

Kun klooriannos (C_{annos}) ja kloorin ulostulopitoisuus kontaktiajan jälkeen (C_{ulos}) ovat molemmat tuntemattomia (tavallisesti suunnitteluvaiheessa), sekä AK- että k -arvot voidaan molemmat määrittää mallien avulla. Koska AK- ja k -arvot ovat molemmat riippuvaisia klooriannoksesta, on oletettava jokin klooriannos AK:n ja k :n määrittämiseksi. Jos oletettu annos ei ole yhtäpitävä lasketun annoksen kanssa, on oletettava uusi annos, joka tuottaa uudet AK- ja k -arvot. Tämän jälkeen laskenta on suoritettava uudelleen, kunnes oletettu annos on kohtalaisen yhtäpitävä lasketun annoksen kanssa.

3.4.3 Ct-arvon laskeminen

Koska Ct-arvo annetaan käyrän alle jäävänä pinta-alana pitoisuuden kehittymisen suhteen (kuva 4), Ct-arvo saadaan hajoamisyhtälön integraation kautta, jolloin Ct-yhtälö on:

- Kun lähtökohtana on C_{alku} :

$$Ct = (C_{alku} / k) (1 - e^{-kt}) \quad \text{Yhtälö (12)}$$

- Kun lähtökohtana on C_{ulos} :

$$Ct = (C_{ulos} / k) (e^{kt} - 1) \quad \text{Yhtälö (13)}$$

Molemmissa yhtälöissä aika (t) on tehollinen kontaktiaika (t_{teho}):

$$t_{teho} = (V/Q) \cdot F_h \cdot F_s \quad (F_h = t_{10}/T, \text{ ks. luku 3.3.1}) \quad \text{Yhtälö (14)}$$

Kuten jo aiemmin todettiin, Ct-arvo voidaan laskea myös yhtälöllä 6.

3.5 KLOORIAMIINI

Yleistä tietoa klooriamiinin käytöstä desinfiointiaineena löytyy oppikirjoista, VVY:n julkaisusarjan oppaasta Talousveden klooraus (2014) sekä Ødegaardin ym. teoksista (2006, 2009b, 2014). Klooriamiinilaskelmissa käytetään kokonaisklooripitoisuutta, joka esitetään muodossa mg Cl_2/l .

Usein ammoniumlisäys tehdään klooriamiinikloorauksessa vasta tietyn natriumhypoklooriitin kontaktiajan jälkeen. Tällöin siis käytännössä klooriamiinikloorausta edeltää

desinfiointi kloorilla ja molempien desinfiointimenetelmien logaritmiset poistumat laske-
taan erikseen.

3.5.1 Klooriamiinidesinfiointin pitoisuusmuutoksen kehittyminen

Klooriamiinia käytettäessä ei tapahdu samanlaista nopeaa alkukulutusta kuin silloin, kun klooria lisätään kloorikaasuna tai hypokloriittina (vertaa kuvaa 4 kuvaan 5). Näin ollen klooriamiinin Ct-laskelmissa alkupitoisuus C_{alku} asetetaan yhtä suureksi annoksen kanssa:

$$C_{\text{alku}} = C_{\text{annos}}$$

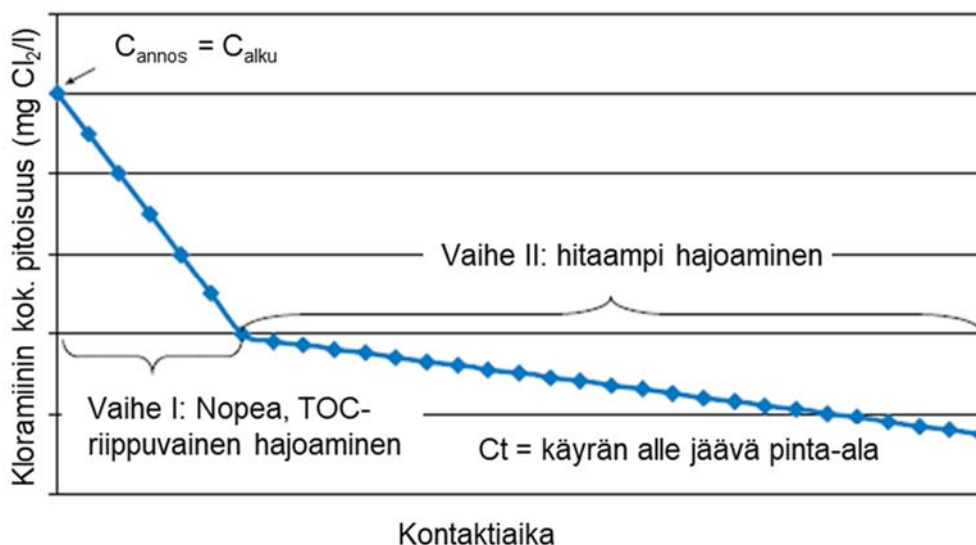
jossa C_{annos} on klooriamiiniannos esitettynä muodossa $\text{mg Cl}_2/\text{l}$.

Matalissa lämpötiloissa heti annostuksen jälkeen esiintyvät pienet määrät vapaata klooria voidaan jättää huomioimatta. Vaikka klooriamiini onkin huomattavasti klooria stabiilimpaa, sekin hajoaa, mutta paljon hitaammin. Koska hajoaminen on hidasta ja desinfiointiteho suhteellisen alhainen, voimme yksinkertaisuuden vuoksi olettaa, että klooriamiinin hajoaminen tapahtuu kahdessa vaiheessa (kuva 5):

1. Ensimmäinen vaihe, jossa hajoaminen on nopeampaa ja riippuvaista veden laadusta sekä itsestään hajoamisesta.
2. Hitaampi vaihe, joka on riippumaton veden laadusta (edellyttäen, että $\text{pH} > 8$ ja $\text{Cl}_2 : \text{NH}_3\text{-N} < 5:1$) ja jossa itsestään hajoaminen pääasiassa tapahtuu.

Molempien vaiheiden hajoamista voidaan arvioida pitoisuuden ja ajan välisenä lineaarisena suhteena, kuva 5.

Vaihe I:n laajuus ja kesto voivat vaihdella. Käsiteltävän veden laadun ja käytetyn kemikaaliannoksen suhteen tyyppillisissä pohjoismaisissa olosuhteissa vaihe I kestää tavallisesti noin 5 tuntia.



Kuva 5. Kaaviokuva klooriamiinin hajoamisesta.

Klooriamiinin pitoisuus tietyn ajan kuluttua (C_{aika}) voidaan määrittellä seuraavasti:

$$C_{\text{aika}} = C_{\text{annos}} - [k_{\text{vaihe I}} \cdot t] \quad \text{kun } t \leq 300 \text{ min} \quad \text{Yhtälö (15)}$$

$$C_{\text{aika}} = C_{\text{annos}} - [k_{\text{vaihe I}} \cdot 300] - [k_{\text{vaihe II}} \cdot (t - 300)] \quad \text{kun } t > 300 \text{ min} \quad \text{Yhtälö (16)}$$

$k_{\text{vaihe I}}$ ja $k_{\text{vaihe II}}$ ovat nopean ja hitaan hajoamisen vaiheiden hajoamisvakiot (kuva 5 ja taulukko 14).

Koska kirjallisista lähteistä löytyy hyvin vähän tietoa hajoamisvakioista, paras tapa arvioida $k_{\text{vaihe I}}$ ja $k_{\text{vaihe II}}$ on suorittaa kokeita käsiteltävälle vedelle. Yksinkertaisin tapa on mitata klooriamiinipitoisuus tietyin aikavälein, esimerkiksi 2, 10 ja 20 tunnin kontaktiajalla. Vakiot, esitettynä $\text{mg} / (\text{l} \cdot \text{min})$, voidaan laskea seuraavasti:

$$k_{\text{vaihe I}} = (C_{\text{annos}} - C_{2\text{h}}) / \Delta t = (C_{\text{annos}} - C_{2\text{h}}) / (2 \cdot 60) \quad \text{Yhtälö (17)}$$

$$k_{\text{vaihe II}} = (C_{10\text{h}} - C_{20\text{h}}) / \Delta t = (C_{10\text{h}} - C_{20\text{h}}) / (10 \cdot 60) \quad \text{Yhtälö (18)}$$

$C_{2\text{h}}$, $C_{10\text{h}}$ ja $C_{20\text{h}}$ esittävät klooriamiinipitoisuutta ($\text{mg Cl}_2/\text{l}$) 2, 10 ja 20 tunnin jälkeen, ja Δt on kontaktiaikaero (minuuteissa) kahden pitoisuusmittauksen välillä.

Jos kyseisestä vedestä ei ole saatavilla mittaustuloksia, voidaan käyttää taulukon 14 arvoja.

Taulukko 14. Hajoamisvakiot klooriamiinille.

Hajoamisvaiheet	Hajoamisvakio	Arvo [$\text{mg}/(\text{l} \cdot \text{min})$]
Vaihe I, nopea	$k_{\text{vaihe I}}$	$3,3 \times 10^{-5} \cdot (1 + \text{TOC})^1$
Vaihe II, hidas	$k_{\text{vaihe II}}$	$3,3 \times 10^{-5}$

1) TOC esitettynä mg/l

3.5.2 Klooriamiinin Ct-arvon laskeminen

Ct-laskelmissa käytettävä tehollinen kontaktiaika tulisi määrittellä samalla tavoin kuin kloorin kontaktiaika (luku 3.3.1, yhtälö 3).

Kummankin vaiheen Ct-arvo lasketaan ja Ct:n kokonaisarvo on näiden kahden arvon summa.

$$Ct_{\text{vaihe I}} = [(C_{\text{annos}} + C_{\text{aika}})/2] \cdot t = [1/2(2C_{\text{annos}} - t \cdot k_{\text{vaihe I}})] \cdot t \quad \text{kun } t \leq 300 \text{ min} \quad \text{Yhtälö (19)}$$

$$C_{t_{\text{vaihe II}}} = [\frac{1}{2} (C_{300 \text{ min}} + C_{\text{aika}})] \cdot (t-300) \quad \text{kun } t > 300 \text{ min} \quad \text{Yhtälö (20)}$$

$$C_{t_{\text{kok}}} = C_{t_{\text{vaihe I}}} + C_{t_{\text{vaihe II}}} = [\frac{1}{2}(2C_{\text{annos}} - 300k_{\text{vaihe I}})] \cdot 300 + [\frac{1}{2}(2C_{\text{annos}} - 600k_{\text{vaihe I}} - t \cdot k_{\text{vaihe II}} + 300k_{\text{vaihe II}})] \cdot (t-300) \quad \text{Yhtälö (21)}$$

Klooriamiini hajoaa hitaasti, joten kontaktiajassa voidaan perustellusti ottaa huomioon myös viipymä verkostossa ennen ensimmäistä asiakasta. Koska verkoston tulppavirtaus on lähes täydellinen, olisi syytä käyttää hydraulista kerrointa $T_{10}/T=1,0$. Tehollinen kontaktiaika on näin ollen yhtä suuri kuin teoreettinen kontaktiaika määriteltäessä C_t -arvoa tilanteessa, jossa verkostoa käytetään kontaktialtaana.

Jos juomaveden kulutuksen oletetaan tapahtuvan veden lähtiessä laitokselta, verkostoa ei voida käyttää kontaktialtaana ja C_t -laskelman on perustuttava teholliseen kontaktiaikaan vain kontaktialtaassa, kuten tehdään klooridesinfiointissa.

3.6 KLOORIDIOKSIDI

Yleistä tietoa klooridioksidin käytöstä desinfiointiaineena löytyy oppikirjoista, VVY:n julkaisusarjan oppaasta Talousveden klooraus (2014) sekä Ødegaardin ym. teoksista (2006, 2009b, 2014).

Klooridioksidin C_t -arvon, tehollisen kontaktiajan (t_{teho}), pitoisuusmuutoksen kehittymisen (C_{ulos}) ja mahdollisen segmentoitumisen laskemiseen käytetään samoja menetelmiä kuin kloorilla. Alkukulutusta (AK) ja hajoamisvakioita (k) laskettaessa käytetään kuitenkin klooridioksidille ominaisia menetelmiä.

3.6.1 Klooridioksidin alkukulutus ja hajoamisvakio

Alla on esitetty mallit klooridioksidin alkukulutuksen (AK) ja hajoamisvakion (k) laskemiseksi. Ne perustuvat kirjallisista lähteistä löytyvään rajalliseen tietoon. Onkin suositeltavaa suorittaa kokeita kyseiselle vedelle luotettavamman tiedon saamiseksi. Menettelytapa tällaisissa kokeissa olisi samanlainen kuin kloorin kanssa. Jos kokeellisia tietoja ei ole saatavilla, voidaan käyttää seuraavia malleja:

$$AK_{\text{klooridioksidi}} = 0,10 \cdot \text{TOC} + 0,61 \cdot [C_{\text{annos}}]^{0,2} + 0,14 \cdot (C_{\text{annos}} / \text{TOC}) - 0,20 / C_{\text{annos}} \quad \text{Yhtälö (22)}$$

soveltuu, jos $C_{\text{annos}} > 0,25 \text{ mg/l}$ ja $\text{TOC} \cdot C_{\text{annos}} > 1$ samanaikaisesti

$$k_{\text{klooridioksidi}} = 0,01 \cdot [\text{TOC}]^{0,5} - 0,02 \cdot C_{\text{alku}} + 0,015 \quad \text{Yhtälö (23)}$$

Jos samanaikaisesti esiintyy sekä klooria että klooridioksidia, AK_{kloori} ja $AK_{\text{klooridioksidi}}$ -arvoja on molempia säädettävä. Tämä johtuu siitä, että toisen hapettimen alkukulutus vähenee, koska toinen hapetin hapettaa myös helposti hapettuvia yhdisteitä ja päinvastoin.

Tällaisissa tapauksissa AK_{kloori} ja $AK_{\text{klooridioksidi}}$ -arvoja on säädettävä seuraavasti:

$$AK_{\text{klooridioksidi säädetty}} = \frac{C_{\text{annos klooridioksidi}}}{(C_{\text{annos klooridioksidi}} + C_{\text{annos kloori}})} \cdot AK_{\text{klooridioksidi}} \quad \text{Yhtälö (24)}$$

jossa $AK_{\text{klooridioksidi}}$ määräytyy kokeiden tai yhtälön 22 mukaan.

$$AK_{\text{kloori säädetty}} = \frac{C_{\text{annos kloori}}}{(C_{\text{annos klooridioksidi}} + C_{\text{annos kloori}})} \cdot AK_{\text{kloori}} \quad \text{Yhtälö (25)}$$

jossa AK_{kloori} määräytyy kappaleesta 3.4.2 löytyvän mallin mukaan.

Kloorin ja klooridioksidin esiintymisen yhteisvaikutus hajoamisvakioihin k_{kloori} ja $k_{\text{klooridioksidi}}$ on epäsuora, koska alkupitoisuuksiin $C_{\text{alku kloori}}$ ja $C_{\text{alku klooridioksidi}}$ vaikuttavat AK:n säädetyt arvot:

$$C_{\text{alku klooridioksidi}} = C_{\text{annos klooridioksidi}} - AK_{\text{klooridioksidi säädetty}} \quad \text{Yhtälö (26)}$$

$$C_{\text{alku kloori}} = C_{\text{annos kloori}} - AK_{\text{kloori säädetty}} \quad \text{Yhtälö (27)}$$

Klooridioksidin ja kloorin hajoamisvakiot lasketaan tässä tapauksessa sijoittamalla yhtälöihin 10 ja 23 yhtälöillä 26 ja 27 lasketut klooridioksidin ja kloorin alkupitoisuudet.

3.6.2 Ct-arvon laskeminen klooridioksidille

Tehollisen kontaktiajan, pitoisuusmuutoksen kehittymisen, mahdollisen altaan osastoinnin ja Ct-arvon laskemiseen käytettävät menetelmät ovat samat sekä klooridioksidille että kloorille, kun otetaan huomioon klooridioksidille lasketut AK- ja k-arvot.

Jos käytetään kloorin ja klooridioksidin yhdistelmää, Ct-arvo lasketaan erikseen kloorille ja klooridioksidille molempien desinfiointiaineiden säädetyillä AK- ja k-arvoilla. Lisäksi logaritmisien poistuman laskelmat on suoritettava erikseen ja laskettava yhteen logaritmisien poistuman kokonaismäärän selvittämiseksi (kokonaismäärää on mahdollisesti säädettävä logaritmisien poistuman enimmäismäärän rajoitusten tai riskienhallintatointenpiteiden puutteiden vuoksi).

3.7 OTSONI

Yleistä tietoa otsonin käytöstä desinfiointiaineena löytyy oppikirjoista sekä Ødegaardin ym. teoksista (2006,2009b, 2014).

3.7.1 Otsonipitoisuuden muutokset prosessissa

Otsonidesinfioinnissa tapahtuu kolme prosessia: Otsonin siirtyminen kaasufaasista vesifaasiin, vedessä olevien aineiden hapettuminen ja otsonin hajoaminen hapeksi.

Nämä kolme prosessia tapahtuvat rinnakkain, minkä vuoksi otsonin pitoisuusmuutoksen kuvaaminen vedessä on vaikeaa. Otsoni on paljon klooria reaktiivisempaa ja

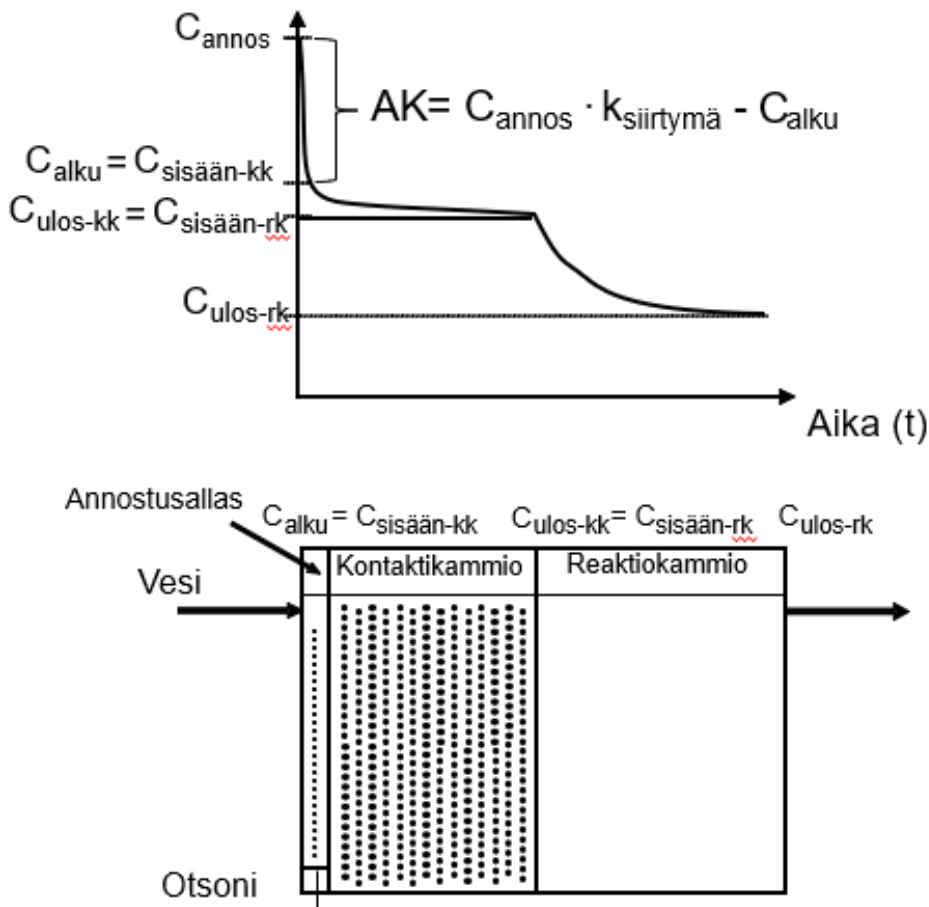
otsonipitoisuuden lasku annostuksen jälkeisestä pitoisuudesta alkupitoisuuteen tapahtuu paljon nopeammin kuin kloorilla, luultavasti muutamassa sekunnissa. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu versio otsonipitoisuuden kehitymisestä. Kuvassa eri prosessivaiheet liittyvät otsonoinnin kontakti- ja reaktiokammioihin.

Otsonipitoisuuden muuttumisen kolme vaihetta ovat:

1. Sekoitusvaihe, joka tapahtuu kammion annosteluosassa, jonne otsoni lisätään (diffuusorin, injektorin, turbiinin tms. avulla).
2. Otsonin siirtymävaihe, jossa otsoni siirtyy kaasusta veteen kontaktikammiossa. Samaan aikaan otsonia kuluu sen reagoiessa vedessä olevien aineiden kanssa.
3. Otsonin kulutusvaihe, joka tapahtuu reaktiokammiossa, jossa otsonipitoisuus laskee hajoamisen myötä.

Käytännössä on hankala erottaa sekoitusvaihetta siirtymävaiheesta, koska otsonin annostus tapahtuu yleensä heti ennen kontaktikammiota tai kontaktikammiossa. Käytännön suunnittelussa kontaktikammion tilavuus lasketaan injektio kohdasta lähtien (kuva 6).

Alla olevissa laskelmissa oletetaan kuitenkin, että sekoitus- ja kontaktikammio ovat erillään toisistaan prosessin sekoitus- ja siirtymävaiheiden erottamiseksi.



Kuva 6. Pitoisuusmuutoksen kehittyminen otsonijärjestelmässä.

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu malli otsonipitoisuuden kehittämisestä Ct-arvon laskemiseksi. Oletus on, että vedessä oleva otsonipitoisuus laskee hetkessä annoksen pitoisuudesta (C_{annos}) alkupitoisuuteen (C_{alku}), jolloin pitoisuus on yhtä suuri kuin pitoisuus otsonin siirtymisen ja veden hapettuvien yhdisteiden hapettumisen jälkeen.

Alkupitoisuuden ja alkukulutuksen (AK) välinen suhde on näin ollen:

$$C_{alku} = (C_{annos} \cdot k_{siirtymä}) - AK \quad \text{Yhtälö (28)}$$

jossa $k_{siirtymä}$ on otsonin veteen siirtymisvakio.

$k_{siirtymä}$ -arvolla ilmaistaan otsonin vesifaasiin siirtymisen tehokkuutta. Otsonin käyttöasteen ollessa 100 % (ei häviötä) $k_{siirtymä}$ on 1,0. Jos häviö on 10 %, $k_{siirtymä}$ on 0,9. Siirtymisen tehokkuus on riippuvainen kontaktikammion muodosta. Suomessa tyypillisesti käytetylle kontaktikammioityypille suositellaan käytettäväksi $k_{siirtymä}$:n arvoa 0,75. Esimerkiksi täyteainetta sisältävässä kontaktikammiossa otsonin siirtyminen on tehokkaampaa.

C_{alku} on yhtä suuri kuin kontaktikammioon siirtyvä pitoisuus $C_{sisään-kk}$.

Alkukulutus (AK) on riippuvainen vedenlaadusta ja otsoniannoksesta ja se voidaan arvioida käyttämällä luvussa 3.7.2.2 esitettyjä malleja.

Suomen olosuhteissa teoreettinen alkukulutuslaskelma johtaa korkeampaan otsonin kulutukseen kontaktikammiossa kuin mitä suomalaisilla otsonointia käyttävillä laitoksilla on mittaustulosten perusteella havaittu. Niinpä alkukulutukseen tulee suhtautua suuntaa antavana numeerisena kulutuksena ja tarkistaa todellinen kulutus otsonin jäännöspitoisuuden analyysillä tai mittauksilla eri osista otsonialtaita.

Jatkuvasta hapettumisesta ja kaasunsiirron kinetiikasta johtuen otsonipitoisuus voi sekä kasvaa että laskea kontaktikammion vedessä. Otsonin hajoamisen voidaan kuitenkin olettaa tapahtuvan kontaktikammiossa ensimmäisen asteen yhtälön mukaisesti:

$$C_{ulos-kk} = C_{sisään-kk} \cdot e^{-kt} = C_{sisään-rk} = C_{alku} \cdot e^{-kt} \quad \text{Yhtälö (29)}$$

jossa t on kontaktikammion tehollinen kontaktiaika ($t = t_{teho-kk}$) ja k on otsonin hajoamisvakio. Luvuissa 3.7.2.1 ja 3.7.2.2 on esitetty malleja k :n laskemiseksi.

Jos kontaktikammio on osastoitu, tehollista pitoisuutta $C_{teho-kk}$ -arvoa tulisi käyttää jokaisen osan Ct-arvoa laskettaessa. $C_{teho-kk}$ -arvon oletetaan olevan vakio kussakin altaan osassa. Jokaisen osan Ct-arvot lasketaan lopuksi yhteen koko kontaktikammion Ct-arvon määrittämiseksi. Käytännössä olemassa olevalla laitoksella eri kontaktikammioiden otsonipitoisuuksia voi olla vaikeaa mitata. Tällöin laskennassa käytetään viimeisen kamion tehollista pitoisuutta $C_{teho-kk}$.

Taulukko 15. $C_{teho-kk}$ -arvon määrittäminen kontaktikammion osissa reaktorityypistä riippuen.

Täydellisen sekoituksen reaktori	Myötävirtareaktori	Vastavirtareaktori
$C_{teho-kk} = C_{ulos-kk}$	$C_{teho-kk} = C_{ulos-kk}$ tai $\frac{1}{2} (C_{sisään-kk} + C_{ulos-kk})^1$	$C_{teho-kk} = \frac{1}{2} \cdot C_{ulos-kk}$

1) Jos $C_{sisään-kk}$ halutaan sisällyttää $C_{teho-kk}$ -arvon määrittelyyn, $C_{sisään-kk}$ on määritettävä analysoimalla, ei laskemalla.

Reaktiokammiossa (joka voi koostua useista osista) tapahtuu vain kulutusta ja ulkoista otsonilähdettä ei ole. Näin ollen kontaktikammion tulevan veden otsonipitoisuuden voidaan olettaa hajoavan ensimmäisen kertaluvun hajoamisen mukaisesti, eli:

$$C_{ulos-rk} = C_{sisään-rk} \cdot e^{-kt} = C_{ulos-kk} \cdot e^{-kt} \quad \text{Yhtälö (30)}$$

jossa $C_{sisään-rk}$ on reaktiokammion sisäntulopitoisuus ja $C_{ulos-rk}$ on ulostulopitoisuus ja $t = t_{teho-rk}$.

Tämä tarkoittaa sitä, että reaktiokammion tehollinen pitoisuus ei ole vakio vaan muuttuja, joka määräytyy otsonin hajoamisreaktion mukaan. Näin ollen C_t -arvo voidaan määrittää pitoisuus vs. aika -käyrän alle jäävänä pinta-alana (kuva 6).

3.7.2 Otsonin alkukulutuksen ja otsonin hajoamisvakion määrittäminen

Alla on esitetty kolme eri keinoa otsonin siirtymisvakion ($k_{siirtymä}$), otsonin alkukulutuksen (AK) ja otsonin hajoamisvakion (k) arvioimiseksi. Kontakti- ja reaktiokammioiden tehollista kontaktiaikaa (t_{rk} ja t_{kk}) ja arvoja k , C_{alku} ja C_{ulos} arvioitaessa käytetään hydraulista kerrointa $F_h = t_m/T$ (taulukko 13).

3.7.2.1 Vaihtoehto 1: Olemassa olevan laitoksen k-arvon määrittäminen mittamalla

Olemassa olevassa laitoksessa annos (C_{annos}) ja ulostulopitoisuus otsonin kontaktikammiossa ($C_{ulos-kk}$) tai otsonin reaktiokammiossa ($C_{ulos-rk}$) ovat yleensä tiedossa. On suositeltavaa, että otsonipitoisuus mitataan vähintään kahdesta kohdasta reaktiokammiossa ja että näitä tietoja käytetään hajoamisvakion (k) määrittämiseksi. Tyypillisiä näytteenottopaikkoja ovat reaktiokammion sisäntuloaukko ($C_{sisään-rk}$) ja ulostuloaukko ($C_{ulos-rk}$) sekä reaktiokammion kahden osan välinen alue (jos kammiot on osastoitu).

Hajoamisvakio (k) voidaan näin ollen määrittää käyttämällä seuraavaa yhtälöä:

$$-k = [\ln(C_{ulos-rk}/C_{sisään-rk})]/t_{rk} \quad \text{Yhtälö (31)}$$

$C_{sisään-rk}$ on yhtä suuri kuin $C_{ulos-kk}$ ja t_{rk} on reaktiokammion tehollinen kontaktiaika.

3.7.2.2 Vaihtoehto 2: k-arvon arvioiminen mallien avulla

Jos otsoniannos tiedetään, mutta otsonipitoisuus on tuntematon, AK- ja k-arvot voidaan arvioida mallien avulla. Alla olevat mallit esitettiin Norsk Vannin raportissa 169/2009

(Ødegaard ym., 2009a). Ne perustuvat laadultaan erilaisilla vesillä suoritettuihin kokeisiin:

$$AK_{\text{otsoni}} = 0,14 \cdot \text{TOC} + 0,58 \cdot C_{\text{annos}} + 0,09 \cdot (C_{\text{annos}}/\text{TOC}) + 0,07 \cdot \text{pH} - 0,92 \quad \text{Yhtälö (32)}$$

$$k_{\text{otsoni}} = 0,050 \cdot \text{TOC} - 0,032 \cdot C_{\text{alku}} - 0,017 \cdot C_{\text{alku}}/\text{TOC} + 0,084 \cdot \text{pH} - 0,48 \quad \text{Yhtälö (33)}$$

AK:n otsonimallia voidaan soveltaa, jos:

- $C_{\text{annos}} = 0,25 - 6,0 \text{ mg O}_3/\text{l}$
- $\text{TOC} = 0,5 - 6,0 \text{ mg/l}$
- $C_{\text{annos}} / \text{TOC} < 2,5 \text{ mg O}_3 / \text{mg TOC}$
- Laskettu $AK \leq C_{\text{annos}}$ (kun $AK > C_{\text{annos}}$, on oltava $AK = C_{\text{annos}}$)
- Laskettu $AK > 0,05 \text{ mg O}_3/\text{l}$

k:n otsonimallia voidaan soveltaa, jos:

- Alkupitoisuus $C_{\text{alku}} = 0,25 - 6,0 \text{ mg O}_3/\text{l}$
- $\text{TOC} = 0,5 - 6,0 \text{ mg/l}$
- $\text{pH} = 6,0 - 8,0$
- Laskettu $AK < C_{\text{annos}}$
- Laskettu $k > 0,005$

Malleja voidaan käyttää laboratoriokokeista saatavien vedenlaatutietojen puuttuessa. Kun sekä otsoniannos (C_{annos}) että ulostulopitoisuus (C_{ulos}) ovat tuntemattomia, kuten suunnitteluvaiheessa usein on, on käytettävä yllä esitettyjen mallien pohjalta laskettuja arvoja otsonin alkukulutukselle (AK) ja otsonin hajoamisvakiolle (k) sekä $k_{\text{siirtymä}}$:n arvoa 0,75.

Koska AK- ja k-arvot ovat molemmat riippuvaisia otsoniannoksesta, on oletettava jokin otsoniannos AK:n ja k:n määrittämiseksi. Jos oletettu annos eroaa merkittävästi myöhemmin lasketusta annoksesta, on oletettava uusi annos, joka on lähempänä laskettua annosta. Tämä menettely on toistettava, kunnes oletettu annos on yhtäpitävä lasketun annoksen kanssa.

AK- ja k-arvot voidaan mallilaskelmien sijaan määrittää laboratoriokokeiden avulla. Norsk Vannin raportissa 169/2009 (Ødegaard ym., 2009a) on esitetty testausmenettely tällaisille kokeille.

3.7.3 Otsonin alkupitoisuuden määrittäminen

Ct-arvon laskemiseksi (3.7.4) tai lasketun k- tai AK-arvon oikeellisuuden arvioimiseksi on tiedettävä alkupitoisuus (C_{alku}), joka on kontaktikammion sisääntulopitoisuutta vastaava arvo ($C_{\text{sisään-kk}}$), jonka avulla voidaan määrittää kontaktikammion ulostulopitoisuus ($C_{\text{ulos-kk}}$) ja näin myös reaktiokammion sisääntulopitoisuus ($C_{\text{sisään-r}}$) (3.7.1).

C_{alku} -arvo voidaan laskea sekä käytetyn annoksen (C_{annos}) että mitatun reaktiokammon sisääntulopitoisuuden perusteella. Mahdollisuuksien mukaan molempia menetelmiä voidaan käyttää $k_{\text{siirtymä}}$ - ja AK-arvojen oikeellisuuden arvioimiseksi.

C_{alku} -arvo voidaan laskea annoksen (C_{annos}) perusteella käyttämällä $k_{siirtymä}$ -arvoa 0,75 ja arvioimalla AK-arvo yllä esitetystä mallista (luku 3.7.2.2, yhtälö 32):

$$C_{alku} = (C_{annos} \cdot k_{siirtymä}) - AK = (C_{annos} \cdot 0,75) - AK \quad \text{Yhtälö (34)}$$

tai vaihtoehtoisesti kontaktikammion ulostulopitoisuuden ($C_{ulos-kk}$) perusteella:

$$C_{alku} = C_{ulos-kk} / e^{-k \cdot t_{kk}} \quad \text{Yhtälö (35)}$$

Jälkimmäisellä tavalla saadut tulokset ovat todennäköisesti korkeammat, sillä yhtälö 35 yliarvioi C_{alku} -arvon (luku 3.7.1). Jos näin ei ole, pitää laskelmat tarkistaa.

3.7.4 Ct-arvon laskeminen otsonijärjestelmissä

Otsonoinnin kontakti- ja reaktiokammion Ct-laskelmat tehdään erikseen ja lasketaan sen jälkeen yhteen. Ct-arvon laskennassa kammioiden tehollista kontaktiaikaa ($t_{teho-kk}$ ja $t_{teho-rk}$) määrittäessä käytetään hydraulista kerrointa $F_h = t_{10}/T$ (taulukko 13).

Kontaktikammio:

$$(Ct)_{kk} = C_{teho-kk} \cdot t_{teho-kk} \quad \text{Yhtälö (36)}$$

Reaktiokammio:

$$(Ct)_{rk} = (C_{sisään-rk} / k)(1 - e^{-k \cdot t_{teho-rk}}) \quad \text{(jos perustuu } C_{sisään-rk} \text{ -arvoon)} \quad \text{Yhtälö (37)}$$

tai

$$(Ct)_{rk} = (C_{ulos-rk} / k)(e^{k \cdot t_{teho-rk}} - 1) \quad \text{(jos perustuu } C_{ulos-rk} \text{ -arvoon)} \quad \text{Yhtälö (38)}$$

Otsonijärjestelmän Ct-kokonaisarvo on näin ollen:

$$(Ct)_{kok} = (Ct)_{kk} + (Ct)_{rk} \quad \text{Yhtälö (39)}$$

3.8 LOPULLISEN LOGARITMISEN POISTUMAN MÄÄRITTÄMINEN KEMIALLISTA DESINFIOINTIMENETELMIÄ KÄYTETTÄESSÄ

Saadun Ct-arvon avulla arvioidaan luvussa 3.2. esitettyllä tavalla kemiallisen desinfioinnin logaritmiset poistumat. Kemiallisen desinfioinnin logaritmisia poistumia laskettaessa voidaan saada hyvinkin korkeita arvoja annostuksen ollessa korkea. Tässä oppaassa on esitetty logaritmisien poistuman enimmäismäärät erilaisille toimenpiteille (taulukko 5), myös desinfioinnille:

Kemiallisen desinfioinnin logaritmisien poistuman enimmäismäärä on $4b + 4v + 3a$

Jos Ct-laskelmien avulla saatu kemiallisen desinfioinnin logaritminen poistuma on pienempi kuin yllä esitetty kemiallisen desinfioinnin logaritmisesta poistuman enimmäismäärä, käytetään laskennassa lähtökohtana Ct-laskelmien avulla saatuja arvoja.

Kemiallisen desinfioinnin logaritmisesta poistuman enimmäismäärän toteutuminen edellyttää, että desinfioinnissa ei ole häiriöitä, jotka vaikuttavat taudinaiheuttajien poistototehoon. Kemiallisen desinfioinnin jatkuvan häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi tarvitaan riskienhallintatoimenpiteitä, joita on esitetty taulukossa 16. Mikäli riittäviä riskienhallintatoimenpiteitä ei ole käytössä, täytyy saatuun logaritmisesta poistuman enimmäismäärään tehdä vähennyksiä taulukon 16 mukaan. Käytössä olevat riskienhallintatoimenpiteet puolestaan vähentävät logaritmisesta poistumaan tehtäviä vähennyksiä.

Taulukossa 16 esitetyt riskienhallintatoimenpiteet ja niihin liittyvät vaikutukset logaritmisesta poistumaan ovat suosituksia, jotka perustuvat käytännön kokemukseen. Esitettyjen arvojen sijaan voidaan käyttää paikallisiin olosuhteisiin ja tietoon perustuvia arvoja. Jos riskienhallintatoimenpiteiden toimivuutta ei tunneta, on käytettävä enimmäisvähennyksiä. Luvussa 5 annetaan esimerkkejä taulukon 16 käytöstä.

Taulukko 16. Kemiallisen desinfioinnin laskettuun tai annettuun enimmäismäärään perustuvaan logaritmisesta poistumaan tehtävät vähennykset (prosentteina) kemiallisen desinfioinnin riskienhallinnan puutteiden vuoksi. Käytössä oleva riskienhallintatoimenpide pienentää tehtävää vähennystä.

	Riskienhallintatoimenpiteet	Vaikutus logaritmisesta poistumaan
Toimenpiteet tilapäisen annosteluvirheen tapahtuessa	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-10 %
	1. Vedentuotannon automaattinen sulkeminen ³⁾	+ 10 % ²⁾
	2. Hälytys ja vara-annostelulaitteiston automaattinen käynnistys	+ 5 % ²⁾
Toimenpiteet annosteluvirheen riskin vähentämiseksi	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-15 %
	1. Varavoimageneraattori ja/tai UPS asennettu	+ 10 % ²⁾
	2. Vara-annostelulaitteisto asennettu	+ 5 % ²⁾
	3. Tasaustilavuus, joka voi täyttää vedentarpeen tuotannon keskeytyessä annosteluvirheen vuoksi ⁴⁾	+ 10 % ²⁾
Muut toimenpiteet	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-10 %
	1. Riittävä valvontajärjestelmä asennettu (jäänöskloori/-otsoni, pH)	+ 5 % ²⁾
	2. Tärkeiden varaosien varastoiminen ⁵⁾	+ 5 % ²⁾
	3. Riittävät antureiden puhdistamiseen, valvontaan ja kalibrointiin liittyvät käytännöt jäänöskloorin/-otsonin seuraamiseksi ⁶⁾	+ 5 % ²⁾

- 1) Enimmäisvähennys annetaan, ellei mitään ryhmän riskienhallintatoimenpiteitä ole käytössä.
- 2) Riskienhallintatoimenpiteen olemassaolosta saatava vähennys ryhmän enimmäisvähennykseen. Riskienhallintatoimenpiteillä ei kuitenkaan voida lisätä logaritmisesta poistumaa, eli ryhmän vähennys on minimissään 0 %.
- 3) Järjestelmässä oltava riittävä tasauksetilavuus/puskuritulavuus.

- 4) Puhdasvesiallas, tasausallas tai vastaava, jonka tilavuus riittää vähintään 12 tunnin jakelun tarpeisiin.
- 5) Annostelu- ja kiertopumput, otsonigeneraattorin osat, seurantalaitteiston elektrodit yms.
- 6) Kuukausittaiset vähimmäisvalvonta-/kalibrointitoimenpiteet.

3.9 UV-DESINFIOINTI

Yleistä tietoa UV-desinfiointista löytyy oppikirjoista, VVY oppaasta Talousveden desinfiointi ultravioletivalolla (2014) sekä Ødegaardin ym. (2006, 2009b) tai Eikebrokkin ym. (2008) teoksista. Koska UV-desinfiointin suunnittelu ja käyttö eroavat melko paljon kemiallisesta desinfiointista, taudinaiheuttajien poistumista UV-desinfiointissa on arvioitava eri tavalla kuin kemiallisia desinfiointimenetelmiä.

3.9.1 UV-annos ja mikrobien inaktivointi ja tuhoaminen

UV-desinfiointissa UV-valo tuhoaa mikrobien solujen DNA:ta, jolloin mikrobit inaktivoituvat tai tuhoutuvat. Periaatteessa UV-desinfiointissa voidaan käyttää samoja pitoisuuden, kontaktiajan ja Ct-arvon käsitteitä kuin kemiallisessa desinfiointissa. Pitoisuus kuitenkin ilmoitetaan UV-intensiteettinä (I), kontaktiaika altistusaikana (t) ja Ct-arvo UV-annoksena, joka muodostuu intensiteetistä ja altistusajasta. UV-annoksen lisäksi veden UV-valon läpäisevyys eli transmittanssi vaikuttaa UV-desinfiointin tehokkuuteen.

UV-desinfiointissa käytetään seuraavia käsitteitä:

- Intensiteetti, I (ilmoitetaan tavallisesti muodossa W/m^2)
 - Vastaa pitoisuutta kemiallisessa desinfiointissa.
 - Intensiteetti vaihtelee reaktorin eri kohdissa lampun etäisyydestä riippuen.
- Altistusaika (säteilytusaika), t (ilmoitetaan tavallisesti sekunteina)
 - Vastaa tehollista kontaktiaikaa kemiallisessa desinfiointissa.
 - Riippuu hydraulisista olosuhteista, mm. altistusajan jakaumasta.
 - Ihanteellisessa (turbulentissa) tulppavirtauksessa on yhtä kuin UV-reaktorin tilavuus jaettuna virtauksella (V/Q).
- UV-annos, D (ilmoitetaan tavallisesti muodossa J/m^2)
 - Vastaa Ct-arvoa kemiallisessa desinfiointissa.
 - $D = I \cdot t$
 - $10 J/m^2 = 1 mWs/cm^2 = 1 mJ/cm^2$
- UV-läpäisevyys, UVT (%)
 - Käsiteltävän veden UV-absorbanssi (UVabs) mitataan spektrofotometrillä aallonpituudella 254 nm joko 10 mm (UVT_{10}) tai 50 mm (UVT_{50}) kvartsilasikyvetyssä.
 - $UVT = 100 \cdot 10^{-UVabs}$
 - $UVT_{50} = (UVT_{10})^5 / 10^8$

Mikrobien kestävyys UV-säteilylle vaihtelee. UV-desinfiointi on yleensä tehokas keino kaikkien taudinaiheuttajaryhmien (bakteerit, virukset ja alkueläimet) inaktivoimiseksi tai tuhoamiseksi. UV-desinfiointi toimii erityisen hyvin alkueläimiä vastaan kemiallisiin

desinfiointimenetelmiin verrattuna. Pohjoismaissa käytetään tavallisesti 400 J/m² UV-annosta.

UV-laitteen UV-annoksen todentaminen on varmintä puolueettoman testilaitoksen mitaamana, ns. biosimetrisenä annoksena. UV-desinfiointin biosimetrisesti testatun annoksen pitää olla vähintään 400 J/m², jotta mikrobien inaktiointi ja tuhoutuminen on riittävän tehokasta. Suomessa ei ole viranomaisvaatimuksia UV-desinfiointin biosimetriselle annokselle, mutta UV-desinfiointin vaatimusten määrittelyssä voidaan soveltaa itävaltalaisia (ÖNORM), saksalaisia (DVGW) tai sveitsiläisiä (SVGW) standardeja. Käytännössä monien suomalaisten laitosten UV-annos jää alle biosimetrisesti määritellyn annoksen 400 J/m². Biosimetrisen annoksen lisäksi käytetään keskimääräistä annosta, joka saadaan mallintamalla intensiteetti UV-reaktorin eri kohdissa ja ottamalla huomioon teoreettinen kontaktiaika. Tällä tavalla ei voida varmistua UV-desinfiointin riittävästä tehosta.

UV-desinfiointi tehoaa muita mikrobiryhmiä heikommin viruksiin, erityisesti adenovirusseen. Taulukossa 17 (USEPA, 2006) on esitetty vähimmäisannos, joka on USEPA:n mukaan riittävä *Cryptosporidium*- ja *Giardia*-alkueläinten sekä virusten inaktivoimiseksi ja tuhoamiseksi. Taulukosta selviää, että virusten annosvaatimukset ovat Yhdysvalloissa hyvin korkeat (143 mJ/cm² 3 log poistumalle). Tämä johtuu adenoviruksen korkeasta kestävydestä UV-säteilylle.

Taulukko 17. Pienin UV-annos (mJ/cm²), joka tarvitaan *Cryptosporidiumin*, *Giardian* ja virusten inaktivoimiseksi ja tuhoamiseksi Yhdysvaltojen säännösten mukaisesti (USEPA 2006). J/m² = 10 * mJ/cm².

Logaritminen poistuma	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
<i>Cryptosporidium</i>	1,6	2,5	3,9	5,8	8,5	12	15	22
<i>Giardia</i>	1,5	2,1	3,0	5,2	7,7	11	15	22
Virukset	39	58	79	100	121	143	163	186

3.9.2 UV-desinfiointin logaritmisen poistuman määrittäminen

Tässä suosituksessa käytettävät UV-desinfiointin logaritmisten poistumien enimmäismäärät erilaisilla UV-annoksilla on esitetty taulukossa 18. Logaritmisen poistuman arvoja voidaan soveltaa, kun UV-laitetta käytetään mitoituksen mukaisesti ja huolletaan laite-toimittajan ohjeiden mukaan. Adenoviruksen tarttuminen veden välityksellä on epäto-dennäköistä, joten Norjan mallin mukaan myös Suomessa virusten logaritminen poistuma UV-desinfiointissa voidaan laskea adenovirusta huomioon ottamatta.

Taulukko 18. Logaritmisen poistuman enimmäismäärä UV-desinfiointissa erilaisilla UV-annoksilla^{1), 2)}.

Biodosimetrinen annos	Logaritminen poistuma, virukset pl. adenovirus	Logaritminen poistuma, virukset adenoviruksen perusteella
400 J/m ²	4,0b + 3,5v + 4,0a	4,0b + 1,25v + 4,0a
300 J/m ²	3,5b + 3,0v + 3,5a	3,5b + 1,0v + 3,5a
250 J/m ²	3,0b + 2,5v + 3,0a	3,0b + 0,75v + 3,0a

1) Edellyttäen, että UV-annokset on määritetty biosimetrisesti.

2) Jos UV-annosta ei ole määritetty biosimetrisesti, logaritmisen poistuman enimmäismäärä on 3,0b + 2,5v + 3,0a (3b + 0,75v + 3a virusvaatimuksen perustuessa adenovirukseen)

UV-desinfiointin logaritmista poistumaa määritettäessä käytetään lähtökohtana taulukossa 18 esitettyä logaritmisen poistuman enimmäismäärää. Tämän jälkeen logaritmiin poistumaan tehdään vähennyksiä, mikäli riittävät UV-desinfiointin riskienhallintatoimenpiteet eivät ole käytössä. Taulukossa 19 on esitetty riskienhallintatoimenpiteiden logaritmiin poistumaan tehtävät enimmäisvähennykset, ellei mikään ryhmän riskienhallintatoimenpiteistä ole käytössä. Käytössä oleva riskienhallintatoimenpide puolestaan pienentää ryhmän toimenpiteiden aiheuttavaa enimmäisvähennystä.

Taulukko 19. UV-desinfiointin logaritmisen poistuman enimmäisarvoon riskienhallinnan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset (prosentteina). Käytössä oleva riskienhallintatoimenpide pienentää tehtävää vähennystä.

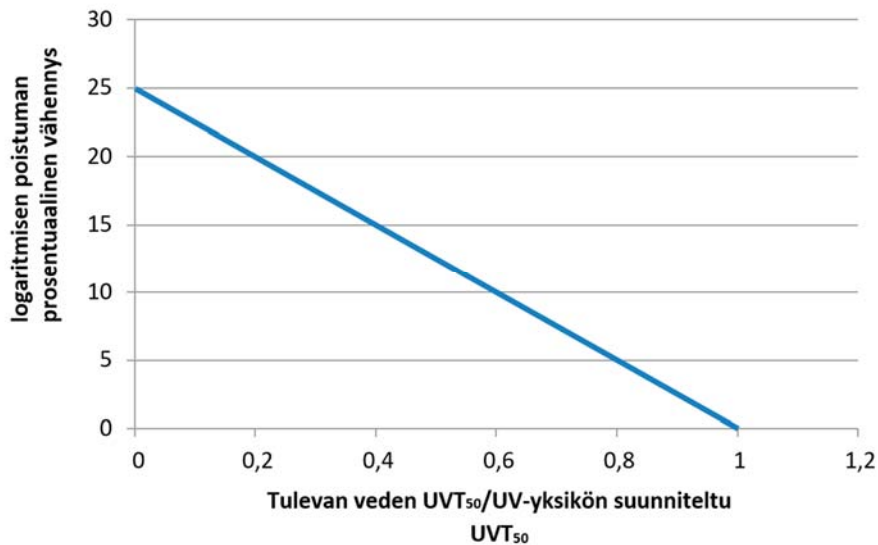
	Riskienhallintatoimenpiteet	Vaikutus logaritmiin poistumaan
Toimenpiteet toimintahäiriön tai UV-säteilytyksen vähentyneen vaikutuksen tapahtuessa	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-10 %
	1. Laitoksen veden tuotannon automaattinen keskeytys (järjestelmässä oltava riittävä taustatilavuus)	+10 % ²⁾
	2. Hälytys ja varadesinfiointijärjestelmän (esim. kloorauksen) automaattinen käynnistys	+5 % ²⁾
Toimenpiteet toimintahäiriön tai UV-säteilytyksen vähentyneen vaikutuksen riskin vähentämiseksi	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-20 %
	1. UPS asennettu	+10 % ²⁾
	2. Varavoimageneraattori asennettu	+10 % ²⁾
Muut suunniteltuun liittyvät toimenpiteet	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-30 %
	1. Useita UV-reaktoreita, jotka on suunniteltu ja asennettu niin, että keskeytymätön veden toimitus voi jatkua yhden reaktorin pettäessä ³⁾	+5 % ²⁾
	2. Erilliset virtaamamittaukset jokaiselle UV-reaktorille hyvien hydraulisten olosuhteiden varmistamiseksi	+10 % ²⁾

	3. Oikein sijoitetut laitteiston toiminnan valvonnan anturit (UV-intensiteetti, UV-läpäisevyys, jne.)	+5 % ²⁾
	4. UV-laitoksen jälkeinen vesisäiliö, jonka tilavuus riittää vähintään 12 tunnin jakelun tarpeisiin.	+10 % ²⁾
	5. Varadesinfiointi käyttöön otettavissa, esim. klooraus	+5 % ²⁾
Muut käyttöön liittyvät toimenpiteet	Ryhmän enimmäisvähennys¹⁾	-30 %
	1. Tärkeitä varaosia laitoksen varastossa ⁴⁾	+5 % ²⁾
	2. Veden tuotannon automaattinen keskeyttäminen UV-laitteen käynnistyksen yhteydessä siihen asti, että UV-laite toimii täydellä teholla	+10 % ²⁾
	3. UV-annoksen hyvä hallinta ⁵⁾	+10 % ²⁾
	4. Veden tuotannon automaattinen keskeyttäminen, jos laitoksen toiminta on mitoitusalueen ulkopuolella	+10 % ²⁾
	5. Automaattinen hälytys, jos laitoksen toiminta on mitoitusalueen ulkopuolella	+5 % ²⁾
	6. Riittävät antureiden puhdistamiseen, valvontaan ja kalibrointiin liittyvät käytännöt ⁶⁾	+5 % ²⁾
	7. UV-annoksen seuranta ajan funktiona ⁷⁾	+5 % ²⁾

- 1) Enimmäisvähennys annetaan, ellei mitään ryhmän riskienhallintatoimenpiteitä ole käytössä.
- 2) Riskienhallintatoimenpiteen olemassaolosta saatava pienennys ryhmän enimmäisvähennykseen. Riskienhallintatoimenpiteillä ei kuitenkaan voida lisätä logaritmistä poistumaa, eli ryhmän vähennys on minimissään 0 %.
- 3) Esimerkiksi kaksi reaktoria 100 % enimmäisvirtauksella, kolme reaktoria 50 % enimmäisvirtauksella jne.
- 4) Kvartsiputket, lamput, o-renkaat, pyyhkimet, pyyhkimen käyttökoneisto, kuristimet, tuulettimet, UV-anturit, referenssianturit ja mahdolliset UV-siirtoanturit.
- 5) UV-annokseen vaikuttavat ainakin UV-intensiteetti, virtaus, UV-läpäisevyys ja käytössä olevien lamppujen määrä ja ikä.
- 6) Kuukausittainen valvonta ja vähintään vuosittainen referenssianturien kalibrointi.
- 7) Voidaan esittää käyränä, joka ilmaisee lasketun annoksen ajan funktiona. Käyrät ovat erittäin hyödyllisiä UV-desinfiointin toiminnan luotettavuutta arvioitaessa.

Luvussa 5 on esimerkkejä todellisten laitosten logaritmisten poistumien arvioinnista tämän menetelmän avulla.

UV-desinfiointin toimintaa arvioitaessa on otettava huomioon mahdolliset häiriöt vedentuotantoketjun edeltävissä vaiheissa, koska ne saattavat vaikuttaa veden UV-läpäisevyyteen. Tällaisissa tapauksissa UV-desinfiointin logaritmistä poistumaa vähennetään laitteelle tulevan veden UV-läpäisevyyden ja laitteen mitoituksessa käytetyn UV-läpäisevyyden suhteessa kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. UV-desinfiointin lasketun logaritmisien poistuman vähentäminen (prosentteina) UV-desinfiointiin tulevan veden mitoitussarvoon verrattuna alhaisen UV-läpäisevyyden vuoksi. Tämä vähennys tehdään taulukossa 19 esitettyjen mahdollisten riskienhallinnan puutteista johtuvien vähennysten jälkeen.

Ohjeita kuvan 7 käyttämiseen:

- Tuleva vesi on vettä, joka tulee UV-desinfiointiin tilanteessa, jossa edeltävä käsittely, joka parantaa veden UV-läpäisevyyttä, on pettänyt. Tulevan veden UV₅₀-arvona käytetään raakaveden UV-läpäisevyyttä, jos UV-läpäisevyyttä parantavia käsittelyvaiheita on vain yksi ennen UV-käsittelyä. Jos UV-käsittelyä edeltäviä UV-läpäisevyyttä parantavia käsittelyvaiheita on useampi, tulevan veden UV₅₀-arvo on sama kuin tilanteessa, jossa UV-läpäisevyyttä eniten parantava vaihe pettää.
- Käytettävä raakaveden UV₅₀ ei saa olla parempi kuin enintään 10 % vuoden aikana mitatuista raakaveden UV₅₀-arvoista.
- Mitoituksessa käytettävä suunniteltu UV₅₀ määritellään veden maksimituotannolla.

Logaritmissen poistuman vähennystä ei tarvitse tehdä UV-desinfiointia edeltävän vedenkäsittelyn häiriön vuoksi, jos käsiteltävän veden virtausta UV-laitteeseen vähennetään kyseisessä tilanteessa niin paljon, että saavutettavalla suuremmalla UV-annoksella päästään arvioituun logaritmissen poistumaan, vaikka veden UV-läpäisevyyttä parantavat käsittelyvaiheet eivät ole toiminnassa. Jos veden tuotanto keskeytetään automaattisesti, kun että UV-desinfioinnin toiminta ei täytä asetettuja vaatimuksia, logaritmiselle poistumalle ei tarvitse tehdä vähennystä.

Esimerkki kuvan 7 käyttämisestä

Pintavesilaitoksen prosessi koostuu kemiallisesta saostuksesta, flotaatioselkeytyksestä, hiekkasuodatuksesta, aktiivihiihluodatuksesta ja UV-desinfioinnista. Normaalisti aktiivihiihluodatetun veden UV-läpäisevyys on alimmillaan 92 % (=UVT_{10,mitoitus}) ja hiekkasuodatetun veden 80 %. Raakaveden UV-läpäisevyys on alimmillaan 60 %. Eniten UV-läpäisevyyttä parantaa näin ollen saostus-selkeytys-suodatusprosessi, jolloin tulevana vetenä tulisi käyttää raakaveden UVT-arvoa. Tällaisessa tilanteessa kuitenkin vedentuotanto keskeytettäisiin, kunnes saostusprosessi saataisiin toimimaan. Aktiivihiihluaitoksen ohitus on kuitenkin mahdollinen, joten tulevana vetenä päätetään käyttää hiekkasuodatettua vettä (HS).

$$UVT_{50} = (UVT_{10})^5 / 10^8$$

$$UVT_{50, HS} = (80)^5 / 10^8 = 32,8$$

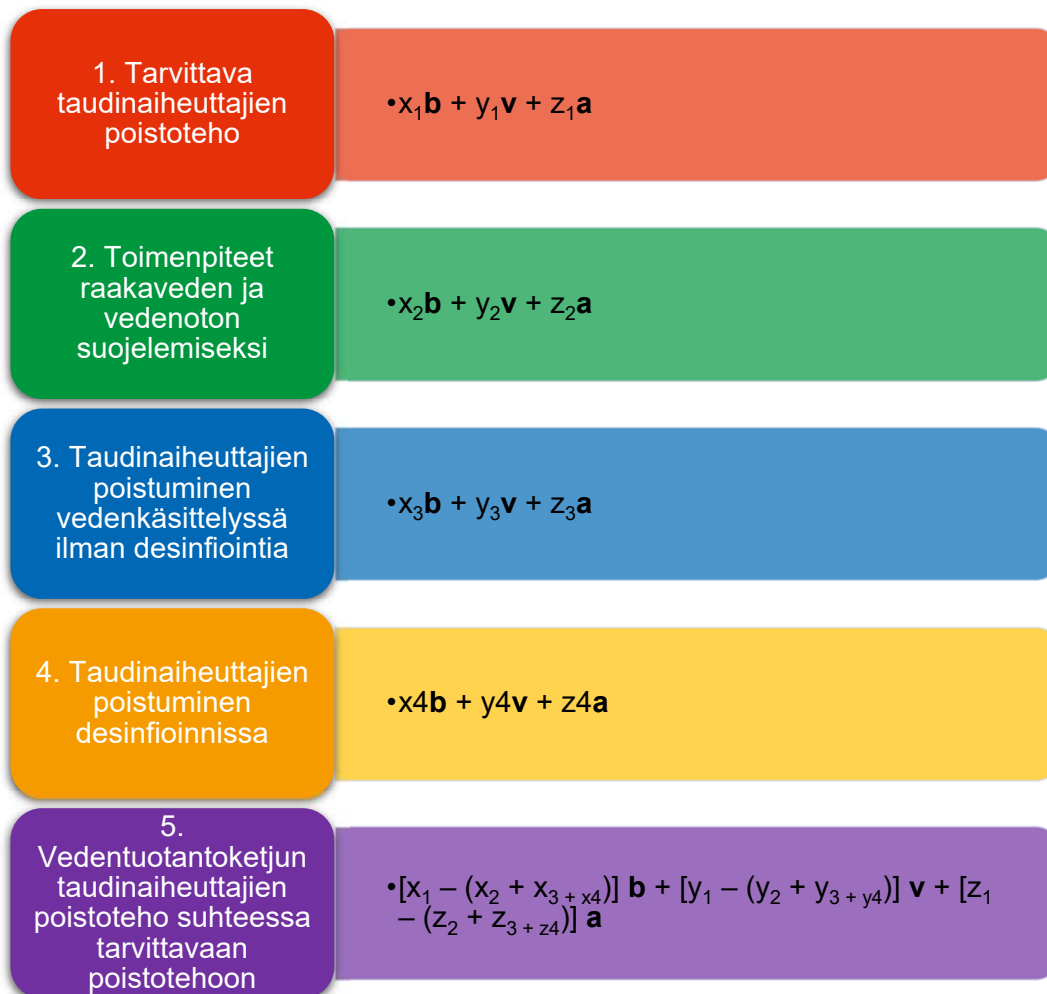
$$UVT_{50, mitoitus} = (92)^5 / 10^8 = 65,9$$

$$UVT_{50, HS} / UVT_{50, DIM} = 32,8 / 65,9 = 0,50$$

Kuvasta 7 saadaan UV-laitetta edeltävän vedenkäsittelyn häiriön vähennykseksi 12,5%.

4 VEDENTUOTANTOKETJUN TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHON MÄÄRITTÄMINEN

Kun taudinaiheuttajien logaritminen poistuma olemassa olevassa vedentuotantoketjussa on määritetty, voidaan arvioida taudinaiheuttajien poistoteho suhteessa tarvittavaan poistotehoon, kuten on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistoteho suhteessa tarvittavaan poistotehoon.

Taudinaiheuttajien poistoteho vedentuotantoketjussa on riittävä, jos lopputuloksen logaritmitiset poistumat ovat vedentuotantoketjussa negatiiviset kaikilla taudinaiheuttajaryhmillä.

Jos yksi tai useampi logaritminen poistuma on positiivinen, tarvitaan lisätoimenpiteitä (raakaveden ja vedenoton suojelua ja/tai vedenkäsittelyn ja/tai desinfioinnin tehostamista) tyydyttävän taudinaiheuttajien poistotehon saavuttamiseksi. Lopputuloksen logaritmitisten poistumien on siis oltava negatiivisia kaikille taudinaiheuttajaryhmille.

Otettaessa käyttöön uusia toimenpiteitä vedentuotantoketjussa, laskenta on suoritettava uudelleen uusien toimenpiteiden vaikutuksen varmistamiseksi.

Tavoitteena on, että vedentuotantoketjun talousveden mikrobiologista laatua turvaavat toimenpiteet olisivat itsenäisiä, eli että yhden toimenpiteen toiminta ei ole riippuvainen toisesta. Talousveden mikrobiologista laatua vedentuotantoketjun eri vaiheissa turvaavat toimenpiteet vahvistavat koko vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehoa. Jos yhdessä vedentuotantoketjun vaiheessa on käytössä enemmän kuin yksi toimenpide, toimenpiteiden pitäisi olla erilaisia (ei esimerkiksi kahta kloorausvaihetta). Kahdesta saman vaiheen toimenpiteestä (esimerkiksi klooraus ja UV-desinfiointi) voi kuitenkin olla hyötyä, koska yksi toimenpide voi olla tehokkaampi tietyn mikrobiryhmän poistossa kuin toinen.

Talousveden mikrobiologisen turvallisuuden varmistamiseksi vedentuotantoketjussa olisi hyvä olla vähintään kaksi itsenäistä taudinaiheuttajien poistoa tehostavaa toimenpidettä, yksi molemmissa seuraavista vedentuotantoketjun vaiheista:

- toimenpiteet raakaveden muodostumis- tai valuma-alueella/raakaveden otossa ja vedenkäsittelyssä (ilman desinfiointia)
- kemiallinen desinfiointi tai UV-desinfiointi

Kahden itsenäisten suojan saavuttamiseksi on suositeltavaa, että kummankin vaiheen toimenpiteiden yhteenlaskettu logaritminen poistuma on vähintään **3b + 3v + 2a**, jotta taudinaiheuttajien poistuma voidaan katsoa riittäväksi.

5 ESIMERKKEJÄ TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHON ARVIOINNISTA

Kuvatun laskentaprosessin toiminta voi olla helpompi ymmärtää konkreettisen esimerkin avulla. Esimerkki voi myös auttaa etenemään tilanteissa, joissa oma data ei täysin sovi malliin. Seuraavassa on esitetty esimerkein taudinaiheuttajien poistotehon arviointi vaiheittain suurella pintavesilaitoksella ja pienellä pohjavesilaitoksella. Vaiheittaisessa esitystavassa on helppo löytää kussakin vaiheessa tarvittavat tiedot. Joissakin tilanteissa eri vaiheiden tiedot ovat vahvasti yhteydessä toisiinsa, mikä on tuotu tekstissä esiin.

Lisää esimerkkejä kuvitteellisten vesilaitosten taudinaiheuttajien poistotehon arvioinnista on alkuperäisessä Microbial barrier analysis (MBA) -guideline raportissa (Ødegaard 2014).

5.1 VAIHET 1: TARVITTAVA TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHO

5.1.1 Esimerkki 1a, Viherlaakso: Suuri pintavesilaitos

Viherlaakson vesilaitoksen mitoitustuotto on 30 000 m³/vrk, mikä vastaa noin 100 000 henkilön kulutusta. Raakavesi otetaan joesta. Jokeen ei lasketa puhdistettuja jätevesiä, mutta yläjuoksulla on eläintiloja ja karjan laitumia. Tällä hetkellä vesilaitokselta toimitetaan talousvettä 48 000 asukkaalle, noin 14 000 m³/vrk.

Raakaveden laadun arviointi, Viherlaakso

Taulukon 3 perusteella pintavesi, jossa on riski alkueläinten esiintymiselle, luokitellaan luokkaan Dc.

Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho, Viherlaakso

Vesilaitos palvelee yli 10 000 vedenkäyttäjää, ja taulukon 4 mukaan **taudinaiheuttajien poistotehon pitää olla silloin 6,0b + 6,0v + 5,0a**, eli kyseinen mikrobien logaritminen poistuma tarvitaan Viherlaakson vesilaitoksen raakaveden muuttamiseksi turvalliseksi juomavedeksi. Raakaveden bakteereista ja viruksista on siis poistettava 99,9999 % ja alkueläimistä 99,999 %.

5.1.2 Esimerkki 1b, Pikkukylä: Pieni pohjavesilaitos

Pikkukylän vesilaitos palvelee vajaata 5 000 vedenkäyttäjää. Raakavesi otetaan kahdesta pohjavesikaivosta, joista näytteitä otetaan mikrobiologiseen tutkimukseen kerran kuukaudessa. Viimeisen kolmen vuoden aikana pohjavesinäytteistä ei ole löytynyt *E.colia* (EC), suolistoperäisiä enterokokkeja tai *Clostridium perfringensia* (CP).

Raakaveden laadun arviointi, Pikkukylä

Raakavesi luokitellaan taulukon 3 mukaan luokkaan A.

Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho, Pikkukylä

Koska Pikkukylän vesilaitos palvelee vajaata 5 000 asukasta, on **tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho 3,5b + 3,5v + 2,5a** taulukon 4 mukaisesti.

5.2 VAIHE 2: TOIMENPITEET RAAKAVEDEN JA VEDENOTON SUOJELEMISEKSI

5.2.1 Esimerkki 2a, Viherlaakso: Pintaveden suojeleminen ja seuranta

Viherlaakson vesilaitoksen raakavesi otetaan joesta, kaupungista ylävirtaan ja raakaveden karkeimmat partikkelit erotetaan välppäämällä ja siivilöimällä. Raakavesiasemalta vesi pumpataan vesilaitokselle. Raakaveden sameus mitataan vesilaitoksella online-mittarilla. Raakavesinäytteet otetaan vesilaitoksella ennen veden käsittelyä. Raakaveden sameus ohjaa myöhempää saostuskemikaalien annostusta.

Vesiensuojeluyhdistys mittaa jokiveden sameutta, johtokykyä ja pH-arvoa jatkuvatoimisella online-mittarilla paikassa, joka ei ole kaukana Viherlaakson vesilaitoksen raakavedenotosta. Jos jokivedessä havaitaan poikkeuksellisia arvoja, Vesiensuojeluyhdistys ilmoittaa asiasta Viherlaakson vesilaitoksen henkilöstölle. Tämä yhteistyö parantaa raakaveden laadun seuranta ja vedenkäsittelyn turvallisuutta.

Raakaveden ja vedenoton suojeletoimenpiteiden vaikutus taudinaiheuttajien poistumiseen, Viherlaakso

Koska raakavesi on peräisin joesta, ei raakaveden suojeletoimenpiteillä voida olettaa olevan vaikutusta mikrobiologiseen laatuun (luku 2.1.2.1) ja vain raakaveden laadun seuranta voi tukea vedentuotantoketjun taudinaiheuttajien logaritmisia poistumia (taulukko 9). Jokiveden sameusmittauksen tulokset eivät tule suoraan Viherlaakson vesilaitoksen tietoon, joten reagointi raakaveden laadun muutoksiin voi tapahtua viiveellä, eikä raakaveden laadun seurannasta voida siten antaa logaritmisia poistumia. Tästä huolimatta raakaveden jatkuvatoiminen sameusmittaus on tärkeää ja vaikuttaa vedentuotantoketjun turvallisuuteen.

5.2.2 Esimerkki 2b, Pikkukylä: Pohjaveden suojeleminen ja seuranta

Pikkukylän vesilähde on maaperän luontainen pohjavesi. Pikkukylän pohjavesikaivojen ympärillä oleva vedenottamoalue on aidattu. Kaivot sijaitsevat eri puolilla pohjaveden muodostumisaluetta. Lietelannan ja orgaanisten maanparannusaineiden varastointi ja levittäminen sekä käsiteltyjen jätevesien imeyttäminen pohjavesialueella on kielletty kunnan ympäristönsuojelumääräyksissä. Vedenottamolla on suoja-aluepäätös, jossa määrätään, että lähemmällä pohjaveden muodostumisalueella pohjaveden pinnan yläpuolella pitää säilyttää vähintään 3 metriä paksu maaperän suojakerros. Lisäksi pohjaveden muodostumisalueella on kielletty pohjavedelle vaaraa aiheuttava toiminta, kuten kaatopaikat, öljytuotteiden- ja kemikaalien varastointi sekä golfkentät.

Raakaveden ja vedenoton suojeletoimenpiteiden vaikutus taudinaiheuttajien poistumiseen, Pikkukylä

Taulukon 7 avulla voidaan arvioida, että pohjavesialueella, pohjaveden muodostumisalueella ja vedenotossa olevat pohjavettä suojaavat toimenpiteet ovat tärkeitä raakaveden laadun varmistamiseksi. Raakaveden laatua arvioitaessa olemassa olleille toimenpiteille ei kuitenkaan voida antaa taudinaiheuttajien poistotehoa arvioitaessa logaritmisia poistumia.

Pikkukylän pohjavesikaivojen rakenteita päätetään parantaa kaivorakennuksilla, joissa on vesitiivis lattia sekä varmistamalla kaivoputkien tiiviys ja maanpinnan luiskaus kaivorakennuksista poispäin.

Raakaveden mikrobiologista laatua seurataan pohjavesikaivoista otettavin näyttein 12 kertaa vuodessa, eli vähintään riskiperusteisen ohjelman mukaan.

Pohjavedenottoaivoja parantaville uusille suojelutoimenpiteille ja raakaveden laadun seurannalle voidaan antaa taulukoiden 7 ja 9 perusteella seuraavat logaritmiset poistumat:

Toimenpide	Logaritminen poistuma
Pohjavesikaivojen rakenteiden parantaminen	$0,5b + 0,5v + 0,25a$
Raakaveden riskiperusteinen tutkimusohjelma	$0,5b + 0,5v + 0,15a$
Logaritmiset poistumat suojeleville toimenpiteille vedenotossa ja raakaveden seurannassa	<u>$1,0b + 1,0v + 0,4a$</u>

Toimenpiteiden summa ei ylitä taulukossa 5 esitettyjä pohjaveden suojelun ja raakaveden seurannan logaritmisille poistumille asetettuja enimmäisarvoja, joten laskettua logaritmistien poistumien summaa voidaan käyttää arvioinnin viimeisessä vaiheessa.

5.3 VAIHE 3: TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTUMINEN VEDENKÄSITTELYSSÄ ILMAN DESINFIOINTIA

5.3.1 Esimerkki 3a, Viherlaakso: Kemiallinen saostus, selkeytys ja suodatus sekä hidassuodatus, yksinkertainen seuranta

Viherlaakson vesilaitoksen vedenkäsittelyprosessi alkaa karkeiden partikkeleiden poistolla välipässä. Vesilaitoksella raakaveteen lisätään kalkkia ja hiilidioksidia veden pH:n nostamiseksi ja kovuuden lisäämiseksi. Seuraavaksi veteen annostellaan saostuskemikaali ennen kuin se jakautuu kuuteen hämmennysaltaaseen. Muodostuva flokki erotetaan laskeutuksessa. Vesi kulkee kuuden pikahiekkasuodattimen läpi (kuormitus 3,3 m/h päivän keskivirtauksella). Sen jälkeen veden pH säädetään natriumhydroksidilla arvoon pH 8,2 ennen kuin se johdetaan neljään hidashiekkasuodattimeen.

Jotta varmistettaisiin hyvä kemiallisen käsittelyn laatu, veden pH mitataan online-mittarilla saostuskemikaalin lisäyksen jälkeen ja pidetään vakiona säätämällä kalkkiveden annosta. Saostuskemikaalin annostelua ohjataan virtaaman ja säädetään raakaveden laadun perusteella. Raakaveden lisäksi sameus mitataan pikahiekkasuodatetusta vedestä sekä laitokselta lähtevästä talousvedestä. Sameuden lisäksi laskeutuksen tehokkuutta seurataan kolme kertaa viikossa mittaamalla väri- ja UV-absorbanssi samoissa pisteissä kuin sameus. Säätöjä tehdään tarvittaessa.

Sameus on pikahiekkasuodatuksen jälkeen keskimäärin $< 0,1$ FNU, ja yli 10 %:ssa näytteistä $0,1-0,2$ FNU. Raakavesipumput pysähtyvät automaattisesti sähkökatkon sattuessa, koska varavoimaa ei ole. Vesilaitos on kuitenkin rakennettu siten, että sähkökatkoksen sattuessa vesi virtaa laitoksen läpi, kunnes käsikäyttöiset venttiilit suljetaan, jotta esim. vältetään pikahiekkasuodattimien ja hidassuodattimien kuivuminen.

Taudinaiheuttajien poistuminen vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia, Viherlaakso

Taulukon 10 ja 5 mukaan taudinaiheuttajien logaritmiset poistumat vedenkäsittelyssä Viherlaakson vesilaitoksella lasketaan seuraavasti:

Vedenkäsittelyn vaihe	Logaritminen poistuma
Saostus + selkeytys, muutamissa pikahiekkasuodatuksen jälkeen otetuissa vesinäytteissä sameus $> 0,1$ FNU.	$2,5b + 1,75v + 2,5a$
Hidassuodatus	$2,0b + 2,0v + 2,0a$
Poistotehon summa vedenkäsittelyssä	$4,5b + 3,75v + 4,5a$
Logaritmiset poistumat vedenkäsittelyn enimmäisrajoitukset huomioon ottaen	<u>$3,0b + 3,0v + 3,0a$</u>

Viherlaakson vedenkäsittelyn logaritmiseen poistumaan käsittelyn seurannan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset

Taulukon 11 mukaisesti vedenkäsittelyn taudinaiheuttajien logaritmiseen poistumaan on tehtävä vähennyksiä käsittelyn seurannan puutteiden vuoksi:

Toimenpide	Vähennysvaikutus
Sameudelle asetettujen raja-arvojen ylitykset johtavat manuaalisiin toimenpiteisiin toiminnan palauttamiseksi	-20%
Raakavesipumput pysähtyvät automaattisesti sähkökatkoksen sattuessa	0% ei vähennyksiä
Vähennykset yhteensä	-20%
Logaritmiset poistumat vedenkäsittelyssä vähennykset huomioon ottaen	$(3,0b + 3,0v + 3,0a) - 20\%$ <u>$2,4b + 2,4v + 2,4a$</u>

5.3.2 Esimerkki 3b, Pikkukylä: Ei vedenkäsittelyä

Pikkukylän pohjavesilaitoksen raakaveden pH arvoa nostetaan vesilaitoksella veden syövyttävyyden vähentämiseksi, mutta vesi ei tarvitse sellaista käsittelyä, joka vaikuttaisi taudinaiheuttajien logaritmiseen poistumaan. Logaritmiset poistumat vedenkäsittelyssä Pikkukylässä ovat siis 0 kaikille mikrobiryhmille.

5.4 VAIHE 4: TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTUMINEN DESINFIOINNISSA

5.4.1 Esimerkki 4a, Viherlaakso: Kloori

Vesi desinfioidaan natriumhypokloriitilla, jonka jälkeen se johdetaan alavesisäiliöön. Klooriannos on 0,5 mg Cl₂/l. Kokonaisklooripitoisuus mitataan online-mittarilla vesijohtoverkostoon lähtevästä talousvedestä alavesisäiliön jälkeen. Poikkeama klooripitoisuudelle asetetuista raja-arvoista aiheuttaa hälytyksen, jonka jälkeen tilanne korjataan manuaalisesti. Alavesisäiliön pinnankorkeus vaihteli vuoden 2018 viikolla 8 välillä 3,7 – 4,1 m. Pinnankorkeuden ollessa 4,1 m säiliö on täynnä ja vesitilavuus on silloin 2 000 m³. Lyhyin kontaktiaika oli pinnankorkeuden alimmalla tasolla, mikä vastaa 1 800 m³ vesitilavuutta. Säiliö on suorakaiteen muotoinen, ts. sen pituus-levyysuhde on suuri ja se on varustettu useilla väliseinillä. Altaan hydraulisen keroimen t₁₀/T on arvioitu olevan 0,6.

Viherlaakson vesilaitoksen talousveden TOC-pitoisuuden keskiarvo oli aikavälillä loka-kuu 2015 – helmikuu 2018 1,5 mg/l.

Tuotetun talousveden pH on 8,2, ja lämpötila voi olla ajoittain 0,5 °C. Vesilaitos on suunniteltu virtaamalle 30 000 m³/vrk, mutta yleensä talousvettä tuotetaan 14 000 m³/vrk.

Kemikaalipumpun vikaantumisen varalle on varaosia ja hypokloriitin annostelulle on olemassa vaihtoehtoinen syöttölinja. Virtaamamittari antaa hälytyksen, jos kemikaalin annostelulaitteessa on ongelmia. Annostelulaitteessa ei ole UPS-laitetta. Annostelu- ja mitauslaitteet huolletaan, tarkistetaan ja kalibroidaan säännöllisin väliajoin.

Klooridesinfiointin kontaktiajan t laskenta, Viherlaakso

Kloorin kontaktiajan laskennan lähtötiedot ja laskenta yhtälön 3 mukaan:

Säiliön tilavuus, V	1 800 m ³
Mitoitusvirtaama, Q	30 000 m ³ /vrk = 20,83 m ³ /min
Hydraulinen kerroin, F _h = t ₁₀ / T	0,6
Sarjakerroin, F _s (1 säiliö)	1,0
Kontaktiaika t = V/Q · F _h · F _s	51,8 min

Klooridesinfiointin alkukulutuksen AK, alkupitoisuuden C_{alku} ja hajoamisvakion k laskenta, Viherlaakso

TOC:n arvioidaan olevan 1,5 mg/l ja klooriannos C_{annos} on 0,5 mg/l. Koska C_{alku}- tai C_{ulos}-pitoisuuksia ei tiedetä, on alkukulutus AK ja hajoamisvakio k laskettava teoreettisesti.

Kloorin alkukulutus AK (yhtälön 9 mukaan):

$$AK_{\text{kloori}} = 0,06 \cdot \text{TOC} + 0,36 \cdot C_{\text{annos}} + 0,08 \cdot (C_{\text{annos}} / \text{TOC}) - 0,12 = 0,18 \text{ mg/l}$$

Kloorin alkupitoisuus C_{alku} (yhtälön 4 mukaan):

$$C_{\text{alku}} = C_{\text{annos}} - AK = 0,32 \text{ mg/l}$$

Hajoamisvakio k (yhtälön 10 mukaan):

$$k_{\text{kloori}} = 0,013 \cdot \text{TOC} - 0,040 \cdot C_{\text{alku}} - 0,010 \cdot C_{\text{alku}}/\text{TOC} + 0,022 = 0,027$$

Klooridesinfioinnin Ct-arvon laskenta, Viherlaakso

Laskettu Ct-arvo (yhtälön 12 mukaan):

$$Ct_{\text{laskettu}} = (C_{\text{alku}} / k) \cdot (1 - e^{-kt}) = 8,9 \text{ mg} \cdot \text{min/l}$$

Ct-arvon muuttaminen klooridesinfioinnin logaritmiseksi poistumaksi, Viherlaakso

Taulukon 12 perusteella muutetaan klooridesinfioinnin Ct-arvo jokaisen mikrobiryhmän osalta logaritmiseksi poistumaksi. Lämpötila on 0,5 °C ja pH 8,2.

Logaritminen poistuma lasketaan yhtälön 2 mukaan:

$$\log_{\text{laskettava}} = \log_{\text{tarvittava}} \cdot Ct_{\text{laskettava}} / Ct_{\text{tarvittava}}$$

Lasketun Ct-arvo muuttaminen klooridesinfioinnin logaritmiseksi poistumaksi:

Parametri	Bakteerit	Virukset	Alkueläimet
$\log_{\text{tarvittava}}$ taulukosta 12	3	3	2
$Ct_{\text{laskettava}}$ Laskelmista	8,9	8,9	8,9
$Ct_{\text{tarvittava}}$ taulukosta 12	3	12	250 (<i>Giardia</i>) Ei mahdollinen (<i>Cryptosporidium</i>)
$\log_{\text{laskettava}}$	8,9	2,2	0,071 (<i>Giardia</i>) 0 (<i>Cryptosporidium</i>)

Viherlaakson klooridesinfioinnin logaritmiset poistumat kemiallisen desinfioinnin enimmäisrajoitukset (4,0b + 4,0v + 3,0a) huomioon ottaen	<u>4,0b + 2,2v + 0,071a</u> (<i>Giardia</i>) <u>4,0b + 2,2v + 0,0a</u> (<i>Cryptosporidium</i>)
--	--

Viherlaakson klooridesinfioinnin logaritminen poistuma huomioon ottaen riskienhallinnan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset

Taulukon 16 mukaisesti kemiallisen desinfioinnin taudinaiheuttajien logaritmiseen poistumaan on tehtävä vähennyksiä desinfioinnin riskienhallinnan puutteiden vuoksi:

Riskienhallintatoimenpiteet		Vähennysvaikutus
Toimenpiteet tilapäisen annosteluvirheen tapahtuessa	-10 % Hälytys, mutta ei automaattista varakemikaalipumpun käynnistystä	-10 %
Toimenpiteet annosteluvirheen riskin vähentämiseksi	-15 % + 5 % Vara-annostelulaitteisto on olemassa	-10 %
Muut toimenpiteet	-10 % + 2,5% + 5 % + 5 % Kokonaiskloorin mittaus lähtevästä vedestä (ei vapaa kloori) ¹⁾ , tärkeitä varaosia varastossa ja hyvät huolto- ja valvontakäytännöt	0 %
Vähennykset riskienhallinnan puutteista yhteensä		-20 %
Logaritmiset poistumat klooridesinfioinnissa vähennykset huomioon ottaen	$(4,0b + 2,2v + 0,071a) - 20\%$ 3,2b + 1,76v + 0,057a (<i>Giardia</i>) 3,2b + 1,76v + 0,0a (<i>Cryptosporidium</i>)	

- 1) Koska online-mittauksessa mitataan kokonaiskloori, eikä vapaata klooria, mittaus pienentää muiden riskienhallintatoimenpiteiden puutteesta johtuvaa vähennystä puolella verrattuna vapaan kloorin mittaukseen. Lisäksi kloorimittaus alavesisäiliön jälkeen aiheuttaa viivettä klooriannostelun virheen huomaamiseen.

5.4.2 Esimerkki 4b, Pikkukylä: UV-desinfiointi

Pikkukylän vesilaitoksen vesi käsitellään pH-säädön jälkeen UV-desinfioinnilla. Laitos on mitoitettu annokselle 400 J/m² (biodosimetrisen). Laitoksessa on kaksi UV-laitetta, jotka molemmat pystyvät käsittelemään laitoksen maksimivirtauksen ja molemmilla laitteilla on omat virtausmittarit. UV-laitteiden intensiteettiä mitataan jatkuvasti. Vedentuotanto keskeytyy automaattisesti, jos UV-laitteen virtaama tai intensiteetti on mitoitusalueen ulkopuolella. Häiriöstä lähtee automaattinen hälytys valvomoon ja henkilöstö tulee paikalle korjaamaan tilanteen. Sähkökatkon varalle on asennettu manuaalisesti kytkettävä varavoimageneraattori. Tarvittavia varaosia on varastossa ja laitosta huolletaan, ylläpidetään ja kalibroidaan suunnitellulla tavalla (esim. säännölliset tarkastukset, lampun lasien puhdistukset paikan päällä, lampun käyttötuntien seuranta). Pikkukylän vesilaitoksella on varalla tilapäiseen klooridesinfiointiin soveltuva siirrettävä laitteisto, johon on soveltavat syöttöyhteet ja sähkönsaanti vesilaitoksen tiloissa.

Pikkukylän UV-desinfiointin logaritminen poistuma huomioon ottaen riskienhallinnan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset

Taulukoiden 18 ja 19 mukaisesti Pikkukylän UV-desinfiointin taudinaiheuttajien logaritminen poistuma lasketaan seuraavasti.

Logaritmiset poistuman enimmäismäärä 400 J/m ² biosimetrisellä annoksella		<u>4,0b + 3,5v + 4,0a</u> <u>4,0b + 1,25v + 4,0a (adenovirus)</u>
Riskienhallintatoimenpiteet		Vähennysvaikutus (enintään 0%)
Toimenpiteet toimintahäiriön tai UV-säteilytyksen vähentyneen vaikutuksen tapahtuessa	-10 % + 5 % +2,5 % Vedentuotannon automaattinen keskeytys ja hälytys. Ei tasaustilavuutta, eikä varajärjestelmien automaattista käynnistystä	-2,5 %
Toimenpiteet toimintahäiriön tai UV-säteilytyksen vähentyneen vaikutuksen riskin vähentämiseksi	-20 % + 10 % Varavoimageneraattori, ei muita toimenpiteitä	-10 %
Muut suunnitteluun liittyvät toimenpiteet	-30 % + 5 % + 10 % +2,5 % + 5 % Kaksi UV-laitetta ja molemmilla 100 % kapasiteetti ja erilliset virtaamamittarit ja intensiteettimittarit. Ei läpäisevyyden mittausta. Ei vesisäiliökapasiteettia. Kloorinsyöttölaitteisto varalla.	-7,5 %
Muut käyttöön liittyvät toimenpiteet	-30 % + 5 % + 5 % + 10 % + 5 % + 5 % Varaosavarasto, UV-annoksen melko hyvä hallinta, vedentuotanto ei keskeyty, jos UV-laite mitoitusalueen ulkopuolella, automaattinen hälytys toimintahäiriössä, suunniteltu huolto ja ylläpito.	0 %
Vähennykset riskienhallinnan puutteista yhteensä		-20 %
Logaritmiset poistumat UV-desinfioinnissa vähennykset huomioon ottaen	<u>(4,0b + 3,5v + 4,0a) - 20%</u> <u>3,2b + 2,8v + 3,2a</u> <u>3,2b + 1,0v + 3,2a (adenovirus)</u>	

5.4.3 Esimerkki 4 c, Lähdeniitty: Klooriamiini

Lähdeniityn pohjavesilaitoksen mitoitusvirtaama on 100 m³/h. Talousveteen annostellaan klooriamiinia veden mikrobiologisen laadun turvaamiseksi vedenjakeluverkostossa. Klooriamiini valmistetaan 10% natriumhypokloriitista ja ammoniumsulfaatista. Molemmat kemikaalit annostellaan ennen puhdasvesiallasta, jonka tilavuus on 150 m³. Puhdasvesialtaasta vesi pumpataan vedenjakeluverkostoon. Ensimmäiset kuluttajat ovat lähellä laitosta, joten verkostossa olevaa viipymää ei huomioida. Klooriamiinia annostellaan

veteen, niin, että saavutetaan kokonaisklooripitoisuus 0,4 mgCl₂/l. Pohjaveden TOC-pitoisuus on 1 mg/l.

Koska viipymä on alle 300 minuuttia, huomioidaan laskussa ainoastaan I vaiheen hajoaminen (ks. Kuva 5). Vakio k_{vaihel} otetaan taulukosta 14.

$$k_{\text{vaihel}} = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + \text{TOC}) = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 1) = 0,000066$$

$$C_{\text{annos}} = 0,4 \text{ mgCl}_2/\text{l}$$

$$t = 90 \text{ min}$$

Klooripitoisuus 90 minuutin viipymän jälkeen lasketaan yhtälöllä 15:

$$C_{\text{aika}(t \leq 300 \text{ min})} = C_{\text{annos}} - [k_{\text{vaihel}} \cdot t] = 0,4 - [0,000066 \cdot 90] = 0,394$$

Ct-arvo lasketaan yhtälöllä 19:

$$Ct_{\text{vaihel}} = Ct = [(C_{\text{annos}} + C_{\text{aika}}) / 2] \cdot t = [(0,4 + 0,394) / 2] \cdot 90 = 35,7$$

Ct-arvon muuttaminen klooriamiinin logaritmiseksi poistumaksi, Lähdeniitty

Taulukon 12 perusteella muutetaan klooriamiinin Ct-arvo jokaisen mikrobiryhmän osalta logaritmiseksi poistumaksi. Poistuma lasketaan kylmimmälle vedelle, 0,5 °C. *Cryptosporidium* osalta klooriamiini on käytetyissä pitoisuuksissa tehoton.

Logaritminen poistuma lasketaan yhtälön 2 mukaan:

$$\log_{\text{laskettava}} = \log_{\text{tarvittava}} \cdot Ct_{\text{laskettava}} / Ct_{\text{tarvittava}}$$

Lasketun Ct-arvo muuttaminen klooriamiinin logaritmiseksi poistumaksi:

Parametri	Bakteerit	Virukset	Alkueläimet
$\log_{\text{tarvittava}}$ taulukosta 12	3	3	2
$Ct_{\text{laskettava}}$ laskelmista	35,7	35,7	35,7
$Ct_{\text{tarvittava}}$ taulukosta 12	200	2000	2500 (<i>Giardia</i>) - (<i>Cryptosporidium</i>)
$\log_{\text{laskettava}}$	0,536	0,054	0,0286 (<i>Giardia</i>) - (<i>Cryptosporidium</i>)

Lähdeniityn klooriamiinin logaritminen poistuma huomioon ottaen riskienhallinnan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset

Taulukon 16 mukaisesti kemiallisen desinfioinnin taudinaiheuttajien logaritmiseen poistumaan on tehtävä vähennyksiä desinfioinnin riskienhallinnan puutteiden vuoksi:

Riskienhallintatoimenpiteet		Vähennysvaikutus
Toimenpiteet tilapäisen annosteluvirheen tapahtuessa	-10 % Ei tiedossa olevia riskienhallintatoimenpiteitä	-10 %
Toimenpiteet annosteluvirheen riskin vähentämiseksi	-15 % + 10 % + 5 % Laitoksella varavoimageneraattori, natriumhypokloriitille ja ammoniumsulfaatille varapumput	-0 %
Muut toimenpiteet	-10 % + 5 % + 5 % + 5 % Riittävä valvonta (jäännöskloorin mittaus, pH-mittaus), tärkeät varosat varastossa, säännöllinen mitareiden huolto	- 0 %
Vähennykset riskienhallinnan puutteista yhteensä		-10 %
Logaritmiset poistumat klooriamiinikloorauksessa vähennykset huomioon ottaen	(0,536b + 0,054v + 0,0286a – 10 % 0,48b + 0,05v + 0,03a (<i>Giardia</i>) 0,48b + 0,05v + 0,0a (<i>Cryptosporidium</i>))	

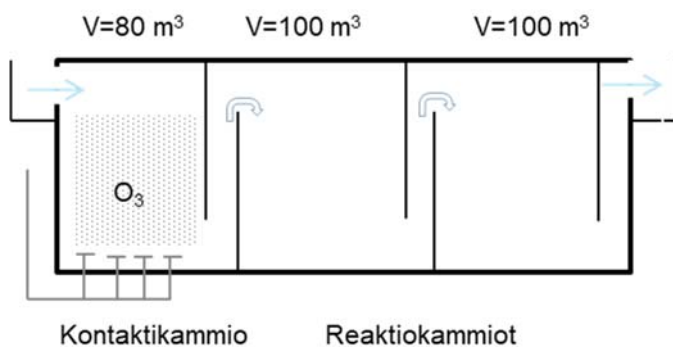
Tuloksen perusteella klooriamiini on melko tehoton desinfiointimenetelmä, eikä sitä voi käyttää ns. primääridesinfiointikemikaalina. Klooriamiinia annostellaankin veteen vesijohtoverkoston mikrobiologisen tasapainon ylläpitämiseksi, mutta mahdollisessa verkostoveden saastumistilanteessa klooriamiinin annostelu ei riitä turvaamaan veden mikrobiologista laatua.

5.4.4 Esimerkki 4d, Vesikylä: Otsoni

Vesikylässä on pintavesilaitos, jonka mitoitusvirtaama on 1000 m³/h. Otsonointia edeltää perinteinen saostus-selkeytys-hiekkasuodatusprosessi. Otsonointia käytetään veden desinfiointiin ja hajun ja maun parantamiseen vedessä.

Otsonin kontakti- ja reaktiokammio on kolmiosainen siten, että kaasu liuotetaan veteen ensimmäisessä osassa (kontaktikammio) ja annetaan sen jälkeen reagoida kahdessa seuraavassa kammiossa. Kaasu liuotetaan veteen ensimmäisessä kammiossa sijaitsevilla diffuusoreilla. Kammioiden vesitilavuudet ovat väliseinien väliset tilavuudet mukaan lukien:

- Kontaktikammio 80 m³
- Reaktiokammio 1 100 m³
- Reaktiokammio 2 100 m³



Kuva 9. Vesikylän otsonointikammiot.

Otsonointikammiot ovat perinteisiä betonialtaita, kammioiden välissä on väliseinät, jotka ohjaavat virtauksen seuraavaan osaan. Kammioissa ei ole sekoittimia. Sekoitusolosuhteet arvioidaan keskinkertaisiksi taulukon 13 mukaan.

Veden orgaanisen aineen pitoisuus hiekkasuodatuksen jälkeen on enimmillään TOC = 3 mg/l ja pH-arvo on 7,0. Otsoniannos on 2,5 mg/l. Vesi on kylmimmillään < 1 °C. Jäännösotsonipitoisuutta mitataan kontaktikammion jälkeen sekä reaktiokammioiden jälkeen. Jäännösmittauksen tulosten avulla voidaan tarkistaa teoreettisen laskennan todenmukaisuus. Tämä esimerkki on laskettu teoreettisille arvoille, koska jäännösotsonimittausdataa ei esimerkkilaitokselta ole saatavilla.

Otsonoinnin kontaktiaikojen t laskenta, Vesikylä

Ensimmäisen kammion (kontaktikammio) tehollisen kontaktiajan laskenta yhtälön 3 mukaan:

Kontaktikammion tilavuus, V	80 m ³
Mitoitusvirtaama, Q	1000 m ³ /h
Hydraulinen kerroin, $F_h = t_{10} / T$	0,5
<u>Sarjakerroin, F_s (1 säiliö)</u>	<u>1,0</u>
Kontaktiaika $t_{teho-kk} = V/Q \cdot F_h \cdot F_s$	2,4 min

Reaktiokammioiden kontaktiajan laskenta yhtälön 3 mukaan:

Reaktiokammion tilavuus, V	2 · 100 m ³
Mitoitusvirtaama, Q	1000 m ³ /h
Hydraulinen kerroin, $F_h = t_{10} / T$	0,5
<u>Sarjakerroin, F_s (2 säiliö)</u>	<u>1,8</u>
Kontaktiaika $t_{teho-rk} = V/Q \cdot F_h \cdot F_s$	10,8 min

Otsonoinnin hajoamisvakion k, alkukulutuksen AK ja alkupitoisuuden C_{alku} laskenta, Vesikylä

Alkupitoisuus tarkoittaa otsonipitoisuutta, joka on jäljellä, kun otsoni on reagoinut veden sisältämän orgaanisen aineen ja muiden mahdollisten yhdisteiden kanssa tietyssä pH-arvossa ja otsonikaasusta on siirtynyt veteen teoreettisesti arvioitu määrä.

Otsonikaasun siirtymän vakioarvona käytetään k_{siirtymä} = 0,75 (häviö 25 %)

Alkukulutus lasketaan teoreettisesti yhtälön 32 mukaan:

$$AK_{\text{otsoni}} =$$

$$0,14 \cdot \text{TOC} + 0,58 \cdot C_{\text{annos}} + 0,09 \cdot (C_{\text{annos}} / \text{TOC}) + 0,07 \cdot \text{pH} - 0,92 = 1,51 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Otsonin alkupitoisuus kontaktikammiossa yhtälön 28 mukaan:

$$C_{\text{alku}} = (C_{\text{annos}} \cdot k_{\text{siirtymä}}) - AK = (2,5 \text{ mg/l} \cdot 0,75) - 1,515 \text{ mg/l} = 0,360 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Otsonin hajoamisvakio k, jota käytetään laskemaan otsonin hajoamista edelleen, voidaan laskea yhtälön 33 avulla:

$$k_{\text{otsoni}} = 0,050 \cdot \text{TOC} - 0,032 \cdot C_{\text{alku}} - 0,017 \cdot (C_{\text{alku}} / \text{TOC}) + 0,084 \cdot \text{pH} - 0,48 = 0,24$$

Kontaktikammioista reaktiokammioihin lähtevän veden otsonipitoisuus lasketaan yhtälön 29 mukaan, missä k on otsonin hajoamisvakio ja t on kontaktialtaan tehollinen viipymä t_{teho-kk} (min)

$$C_{\text{sisään-rk}} = C_{\text{alku}} \cdot e^{-kt} = 0,36 \cdot e^{-0,24 \cdot 2,4} = 0,20 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Reaktiokammiosta seuraavaan prosessivaiheeseen lähtevän veden otsonipitoisuus koko kontaktiajan jälkeen vastaavasti:

$$C_{\text{ulos-rk}} = C_{\text{sisään-rk}} \cdot e^{-kt} = 0,20 \cdot e^{-0,24 \cdot 10,8} = 0,01 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Otsonoinnin Ct-arvon laskenta, Vesikylä

Ct-arvot lasketaan erikseen kontaktikammioille ja sen jälkeisille reaktiokammioille yhtälöiden 36 ja 37 mukaisesti.

Kontaktikammio:

$$Ct_{\text{kk}} = C_{\text{teho-kk}} \cdot t_{\text{teho-kk}}, \text{ missä}$$

$$C_{\text{teho-kk}} = C_{\text{ulos-kk}} = C_{\text{sisään-rk}} \text{ (taulukko 15)}$$

$$t_{\text{teho-kk}} = \text{kontaktikammion tehollinen viipymä}$$

$$Ct_{\text{kk}} = 0,20 \text{ mgO}_3/\text{l} \cdot 2,4 \text{ min} = 0,48 \text{ (mg} \cdot \text{min)} / \text{l}$$

Reaktiokammiot:

$$Ct_{\text{rk}} = (C_{\text{sisään-rk}} / k) \cdot (1 - e^{-kt_{\text{teho-rk}}})$$

$$Ct_{\text{rk}} = (0,20 / 0,24) \cdot (1 - e^{-(0,24 \cdot 10,8)}) = 0,76 \text{ (mg} \cdot \text{min)} / \text{l}$$

Ct-kokonaisarvo:

$$Ct = Ct_{kk} + Ct_{rk} = 0,48 + 0,76 = 1,24 \text{ (mg / min) / l}$$

Ct-arvon muuttaminen otsonoinnin logaritmiseksi poistumaksi, Vesikylä

Taulukon 12 perusteella muutetaan otsonoinnin Ct-arvo jokaisen mikrobiryhmän osalta logaritmiseksi poistumaksi. Poistuma lasketaan kylmimmälle vedelle, 0,5 °C.

Logaritminen poistuma lasketaan yhtälön 2 mukaan:

$$\log_{laskettava} = \log_{tarvittava} \cdot Ct_{laskettava} / Ct_{tarvittava}$$

Lasketun Ct-arvo muuttaminen otsonoinnin logaritmiseksi poistumaksi:

Parametri	Bakteerit	Virukset	Alkueläimet
$\log_{tarvittava}$ taulukosta 12	3	3	2
$Ct_{laskettava}$ laskelmista	1,24	1,24	1,24
$Ct_{tarvittava}$ taulukosta 12	0,75	1,4	2,0 (<i>Giardia</i>) 45 (<i>Cryptosporidium</i>)
$\log_{laskettava}$	4,96	2,66	1,24 (<i>Giardia</i>) 0,055 (<i>Cryptosporidium</i>)

Vesikylän otsonoinnin logaritmiset poistumat kemiallisen desinfioidin enimmäisrajoitukset ($4,0b + 4,0v + 3,0a$) huomioon ottaen	<u>$4,0b + 2,66v + 1,24a$</u> (<i>Giardia</i>) <u>$4,0b + 2,66v + 0,06a$</u> (<i>Cryptosporidium</i>)
--	--

Vesikylän otsonoinnin logaritminen poistuma huomioon ottaen riskienhallinnan puutteiden vuoksi tehtävät vähennykset

Taulukon 16 mukaisesti kemiallisen desinfioidin taudinaiheuttajien logaritmiseen poistumaan on tehtävä vähennyksiä desinfioidin riskienhallinnan puutteiden vuoksi:

Riskienhallintatoimenpiteet		Vähennysvaikutus
Toimenpiteet tilapäisen annosteluvirheen tapahtuessa	-10 % Ei tiedossa olevia riskienhallintatoimenpiteitä	-10 %
Toimenpiteet annosteluvirheen riskin vähentämiseksi	-15 % + 10% Laitoksella varavoimageraattori, joka kattaa myös otsonoinnin	-5 %
Muut toimenpiteet	-10 % +5 % + 5 % + 5 % Riittävä valvonta (jäännötsotsonin mittaus, pH-mittaus), tärkeät varaosat varastossa, säännöllinen mittareiden huolto	- 0 %
Vähennykset riskienhallinnan puutteista yhteensä		-15 %
Logaritmiset poistumat otsonoinnissa vähennykset huomioon ottaen	$(4,0b + 2,66v + 1,24a)$ (<i>Giardia</i>) – 15 % $3,4b + 2,26v + 1,05 a$ (<i>Giardia</i>) $(4,0b + 2,66v + 0,06a)$ (<i>Cryptosporidium</i>) - 15 % $3,4b + 2,26v + 0,05 a$ (<i>Cryptosporidium</i>)	

Tuloksen perusteella käytetyllä annoksella ja viipymällä saadaan erinomainen poistoteho bakteereille ja viruksille, mutta alkueläinten osalta riittävän poistotehon saavuttaminen vaatii myös muita yksikköprosesseja kuin otsonoinnin. *Cryptosporidium*-ryhmän alkueläimille otsonointi on erityisen tehoton.

5.5 VAIHE 5: VEDENTUOTANTOKETJUN TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHO SUHTEESSA TARVITTAVAAN POISTOTEHOON

5.5.1 Esimerkki 5a, Viherlaakso: Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys vedentuotantoketjussa

Viherlaakson pintavesilaitoksella vesi käsitellään kemiallisella saostuksella, selkeytyksellä, pikahiekkasuodatuksella, hidassuodatuksella ja klooridesinfioinnilla. Viherlaakson esimerkkilaitoksen taudinaiheuttajien poistotehon arviointi tämän luvun 5 aikaisemmissa esimerkeissä saatujen tulosten perusteella:

Vaihe	Logaritminen poistuma
1 Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho: Esimerkki 1a, Viherlaakso	+ [6,00b + 6,00v + 5,00a]
2 Toimenpiteen raakaveden ja vedenoton suojelemiseksi: Esimerkki 2a, Viherlaakso	– [0,00b + 0,00v + 0,00a]
3 Taudinaiheuttajien poistuminen vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia: Esimerkki 3a, Viherlaakso	– [2,40b + 2,40v + 2,40a]
4 Taudinaiheuttajien poistuminen desinfiointissa: Esimerkki 4a, Viherlaakso	– [3,20b + 1,76v + 0,057a (<i>Giardia</i>)] – [3,20b + 1,76v + 0,0a (<i>Cryptosporidium</i>)]
5 Taudinaiheuttajien poistoteho vedentuotantoketjussa	+ 0,4b + 1,8v + 2,5a (<i>Giardia</i>) + 0,4b + 1,8v + 2,6a (<i>Cryptosporidium</i>)

Viherlaakson vesilaitoksen vedenkäsittelyn taudinaiheuttajien poistoteho ei ole riittävä. Jos vesilaitoksen riskienhallintatoimet olisivat olleet kattavampia, logaritmiin poistumiin ei olisi tarvinnut tehdä vähennyksiä. Siinä tapauksessa taudinaiheuttajien poistoteho koko vedentuotantoketjussa olisi ollut hyvä bakteerien suhteen, mutta virusten ja alkueläinten suhteen poistoteho ei olisi silti riittävä. Riittävän virusten ja alkueläinten poistotehon saavuttaminen edellyttää esimerkiksi vedenkäsittelyn riskienhallintatoimenpiteiden tehostamista ja hyvällä riskienhallinnalla varustetun ja tehokkaan UV-desinfiointin (400 J/m²) käyttöönottoa.

5.5.2 Esimerkki 6, Pikkukylä: Taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys vedentuotantoketjussa

Pikkukylän pohjavesilaitoksella vedenkäsittelynä on vain pH:n säätö ja UV-desinfiointi (400 J/m² biosimetrisen). Pikkukylän esimerkkilaitoksen taudinaiheuttajien poistotehon arviointi tämän luvun 5 aikaisemmissa esimerkeissä saatujen tulosten perusteella:

Vaihe	Logaritminen poistuma
1 Tarvittava taudinaiheuttajien poistoteho: Esimerkki 1b, Pikkukylä	+ [3,5b + 3,5v + 2,5a]
2 Toimenpiteen raakaveden ja vedenoton suojelemiseksi: Esimerkki 2b, Pikkukylä	- [1,0b + 1,0v + 0,4a]
3 Taudinaiheuttajien poistuminen vedenkäsittelyssä ilman desinfiointia: Esimerkki 3b, Pikkukylä	- [0,0b + 0,0v + 0,0a]
4 Taudinaiheuttajien poistuminen desinfiointissa: Esimerkki 4b, Pikkukylä	- [3,2b + 2,8v + 3,2a] - [3,2b + 1,0v + 3,2a (adenovirus)]
5 Taudinaiheuttajien poistoteho vedentuotantoketjussa	- 0,7b - 0,3v - 1,1a - 0,7b + 1,5v - 1,1a (adenovirus)

Laskelman mukaan Pikkukylän vesilaitoksella on riittävä taudinaiheuttajien poisto kaikkien taudinaiheuttajaryhmien osalta, mikäli adenovirusta ei pidetä kriteerinä virusten poistumiselle. Koska adenoviruksen tarttuminen veden välityksellä on epätodennäköistä, virusten logaritminen poistuma UV-desinfiointissa voidaan laskea adenovirusta huomiioon ottamatta.

LÄHTEET

- Guillot, E. and Loret, J-F. (2010) Waterborne pathogens: Review for the Drinking Water Industry. GWRC Report Series, IWA Publishing, London
- Hijnen, W. and Medema, G. (2010) Elimination of micro-organisms by water treatment processes. KWR Water Cycle Research Institute Series. IWA Publishing, London, UK
- Hokajärvi, Anna-Maria; Pitkänen, Tarja; Meriläinen, Päivi; Kauppinen, Ari; Matikka, Ville; Kovanen, Sara; Vepsäläinen, Asko; Miettinen, Ilkka T. (2018) Determination of Removal Efficiencies for Escherichia coli, Clostridial Spores, and F-Specific Coliphages in Unit Processes of Surface Waterworks for QMRA Applications. Water 10(11), 1525.
- Meriläinen P, Pitkänen T, Miettinen I. (2012) Juomaveden terveysriskit - kvantitatiivinen mikrobiologinen riskinarviointi (QMRA) Suomessa. Vesitalous 2/2012.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015)
- Suomen Vesilaitosyhdistys ry. (2014) Talousveden klooraus. Vesilaitosyhdistyksen julkaisusarja nro 59
- Suomen Vesilaitosyhdistys ry. (2014) Talousveden desinfiointi ultraviolettivalolla. Vesilaitosyhdistyksen julkaisusarja nro 58
- Svenskt Vatten (2015) Introduktion till Mikrobiologisk BarriärAnalysis, MBA. Svenskt Vatten Publikation P112.
- Svenskt Vatten (2015) Förenklad MBA, Mikrobiologisk BarriärAnalysis. Svenskt Vatten Publikation P112 Forenklad.
- Valvira (2018) Talusvesiasetuksen soveltamisohje. Osa II Säännökohtaiset soveltamisohjeet. Ohje 16/2018
- USEPA (2006) Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. EPA 815-R-06-007
- Ødegaard, H., Fiksdal, L., Østerhus, S. (2006) Optimal disinfection practice for drinking water. Norwegian Water Report 147/2006 (in Norwegian)
- Ødegaard, H., Østerhus, S., Melin, E. (2009a) Optimal disinfection practice, phase 2. Norwegian Water Report 169/2009 (in Norwegian)
- Ødegaard, H., Østerhus, S., Melin, E. (2009b) Guideline to the determination of good disinfection practice. Norwegian Water Report 170/2009 (in Norwegian)
- Ødegaard H., Østerhus S. W., Pott B.-M. (2014) Microbial barrier analysis (MBA) – a guideline. Norwegian Water Report 202