

Eemeli Kärkäs

Kloorin ja hopean käyttö talousveden varastoinnissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

31.12.2016

Tekijä(t) Otsikko	Eemeli Kärkäs Kloorin ja hopean käyttö talousveden varastoinnissa
Sivumäärä Aika	32 sivua + 1 liitettä 31.12.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Bio- ja elintarviketekniikka
Ohjaaja(t)	Carola Fortelius, Tutkintovastaava Mika Aho, ELL, Ympäristöterveydenhuollon erikoiseläinlääkäri, Sotilaslääketieteen keskus
<p>Tutkimus tehtiin Puolustusvoimille osana poikkeusolojen vesihuoltosuunnittelua. Tutkimukseen hankitut talousvedet varastoitiin kahdella erityyppisellä desinfiointikemikaalilla, joiden pitoisuusmuutoksia selvitettiin varastoinnin aikana. Talousveden varastointiin käytetyt desinfiointikemikaalit olivat kloorivalmiste ja hopeayhdiste.</p> <p>Tutkimuksessa hyödynnettiin erilaisia talousveden hankintamenetelmiä. Ensimmäisessä menetelmässä talousvettä otettiin vesijohtoverkosta. Toisena oli matalakairamenetelmä, jossa talousvettä tuotetaan suoraan pohjavedestä. Kolmas menetelmä oli käänteisosmoosiin perustuva vedenpuhdistuslaite, jolla talousvettä tuotettiin merivedestä.</p> <p>Varastoitaviin talousvesiin lisättiin tutkittava desinfiointikemikaali, jonka pitoisuutta mitattiin varastoinnin aikana. Toiset vesisäiliöt varastoitiin rakennukseen, jossa olosuhteet ovat vakioituneet ja toiset vesisäiliöt varastoitiin ulos, jossa varastointiolosuhteet olivat vaihtelevia.</p> <p>Mittaustuloksien perusteella laadittiin matemaattinen mallinnus, johon hyödynnettiin pienimmän neliösumman menetelmää. Menetelmää voidaan hyödyntää kun laaditaan ennusteita kemikaalipitoisuuksiin tai jos arvioidaan kemikaalipitoisuuksia mittauspisteiden ulkopuolisista kohdista.</p> <p>Tutkimustuloksissa havaittiin eroja talousveden vapaan kloorin pitoisuuksissa, kun varastointiolosuhteet olivat erilaiset. Raakavesilähteellä oli myös vaikutusta mitattuihin vapaan kloorin pitoisuuksiin.</p> <p>Tutkimustuloksien perusteella olosuhteet eivät vaikuttaneet yhtä voimakkaasti hopeapitoisuuteen kuin klooripitoisuuksiin. Raakavesilähde vaikutti myös hopeapitoisuuteen varastoinnin aikana.</p>	
Avainsanat	Vesihuolto, kloori, hopea

Author(s) Title	Eemeli Kärkäs Chlorine and silver for the storage of household water
Number of Pages Date	32 pages + 1 appendices 31.12.2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical engineering
Specialisation option	Biotechnology and Food processing
Instructor(s)	Carola Fortelius, Head of Biotech and Food Eng. Dept. Mika Aho, DVM, Specialist in Environmental Health, Center for Military Medicine
<p>This thesis was made to the Finnish Defence Forces as a part of the emergency conditions water supply planning. The drinking water obtained for this thesis project were stored using two different types of chemical disinfection. The chemical disinfectants were chlorine and a silver compound.</p> <p>The thesis utilized various methods of obtaining supplies of household water. In the first method, drinking water was obtained from a water pipe. The second method was a low-drill method, where the drinking water was produced directly from the groundwater. The third method was based on reverse osmosis water purification equipment, which was used to produce drinking water from sea water.</p> <p>Before being stored, the drinking waters were treated with disinfection chemicals, whose concentration was measured during storage. Some water tanks were stored in a building, where the conditions are standardized, and some water tanks were stored outside where the storage conditions were varied.</p> <p>The measurement results were used to create a mathematical modeling which used in the ordinary least squares method. The method can be used when making forecasts on the chemical concentration or if the estimated concentrations of chemicals are outside the measuring points.</p> <p>In the results, differences were observed in the free chlorine concentration of the drinking water when concentrations of the storage conditions were different. The source of raw water also affected the measured free chlorine concentrations.</p> <p>These findings indicate that silver concentrations were not strongly affected by storage conditions as chlorine conditions. The raw water source was also affected by the silver concentration during storage.</p>	
Keywords	Water supply, chlorine, silver

Lyhenteet ja selitteet

Normaaliolot Tilanne, jossa esiintyvät uhat voidaan ehkäistä ennalta tai tarvittaessa torjua siten, että niiden vaikutuksista voidaan toipua normaaliolojen säädöspohjalla ja voimavaroilla. Normaaliolojen erityistilanteissa viranomaiset toimivat normaalivaltuuksin mutta voivat ottaa käyttöön erityistoimia ja tehostaa yhteistoimintaa.

Poikkeusolot Valmiuslaissa ja puolustustilalaissa säädetty tilanne, jonka hallitseminen ei ole mahdollista viranomaisten säännönmukaisin toimivaltuuksin ja resurssein. Poikkeusoloihin siirrytään valtioneuvoston valmiuslain nojalla antaman asetuksen myötä.

WHO World health organization (Maailman terveysjärjestö)

RO Reverse osmosis (Käänteisosmoosi)

MP-AES Mikroaaltoplasma-atomiemissiospektrofotometri

PE-HD Polyethylene high-density (korkea tiheysinen polyeteeni)

DPD N,N-dimetyyli-p-fenyylidiamiini

PNS-menetelmä Pienimmän neliösumman menetelmä (Ordinary least squares) on matemaattisen optimoinnin menetelmä, jolla pyritään löytämään aineistolle paras sovite. Regressiokertoimien estimaattorit määrätään minimoimalla jäännöstermien neliösumma.

Sisällys

Lyhenteet ja selitteet

1	Johdanto ja tutkimuksen tarkoitus	1
2	Talousvesi	2
2.1	Talousveden laatu	2
2.2	Talousvesi poikkeusoloissa	3
2.3	Veden hankinta poikkeusoloissa	5
2.4	Vesilähteet	9
2.4.1	Vedenpuhdistuslaitteet	9
2.4.2	Pohjaveden kairaus	11
2.5	Hankitun talousveden varastointikäsitteily	13
2.5.1	Talousveden säilöntä kloorilla	13
2.5.2	Talousveden säilöntä hopealla	16
3	Koejärjestelyt	18
3.1	Tutkimuksessa käytetyn vedenhankinta	18
3.2	Tutkimuksessa käytetyt vesisäiliöt	18
3.3	Mittalaitteet	20
4	Tutkimustulokset	22
4.1	Mittaukset ja matemaattinen mallintaminen	23
4.2	Mitatut vapaa klooripitoisuudet ja mallin selitysaste	24
4.3	Mitatut hopeapitoisuudet ja mallin selitysaste	27
5	Tulosten tarkastelu	30
5.1	Vapaa klooripitoisuus	30
5.2	Hopeapitoisuus	31
6	Johtopäätökset	32
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1. Mittaustulokset ja mallintaminen	

1 Johdanto ja tutkimuksen tarkoitus

Talousvettä pitää olla saatavissa kaikissa olosuhteissa ja tilanteissa, jotta ihmisen toimintakyky säilyy. Talousveden hankintaan ja käsittelyyn on hyvä olla useita erilaisia menetelmiä, vaikka Suomessa on paljon vesilaitoksia ja laajat vesijohtoverkostot. Normaalioloissa toimivat vesilaitokset tekevät suunnitelmia ja varautuvat erityistilanteisiin, joissa vesilaitoksella tulee ongelmia talousveden toimittamisessa käyttäjille. Varautuminen on erittäin tärkeää, jotta vesilaitokset pystyvät reagoimaan nopeasti ja suunnitelmusti mahdollisiin ongelmiin.

Tämä tutkimus keskittyy tilanteisiin, joissa käytetään erilaisia vedenhankintamenetelmiä, vesijohtoverkostosta hankitun talousveden lisäksi. Tutkimuksessa selvitetään syntykö talousvesiin lisättävien desinfiointikemikaalien pitoisuuksissa eroja varastoinnin aikana, kun talousvedet on hankittu kolmella erimenetelmällä. Lisäksi tutkimuksessa selvitetään, miten varastointiolosuhteet vaikuttavat desinfiointikemikaalipitoisuuksiin.

Tutkimus toteutettiin kvantitatiivisena ja rajattiin kahteen erityyppiseen vedendesinfiointikemikaaliin. Tutkimuksen desinfiointikemikaalit olivat hopeayhdiste (AgNO_3) (Ag_2SO_4) sekä natriumdikloori-isosyanuraattidihydraattijauhetta ($\text{NaC}_3\text{N}_3\text{O}_3\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$) (R-kloori). Tutkimukseen hankittiin talousvettä vesijohtoverkosta, matalakairamenetelmällä pohjavedestä ja lisäksi talousvettä tuotettiin puhdistamalla merivettä käänteisosmoosilaitteella. Tutkimuksessa selvitetään, miten talousveteen lisätyn desinfiointikemikaalin pitoisuus muuttuu varastoinnin aikana.

Tutkimuksessa mitattuja kemikaalipitoisuuksien muutoksia pyritään selittämään matemaattisesti mallintamalla. Matemaattiseen mallintamiseen käytettiin pienimmän neliösumman menetelmää, joka mahdollistaa ennusteen laskemisen, kun tarkastellaan tutkimuksen mittauspisteiden ulkopuolelle olevia kemikaalipitoisuuksia.

Tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa perusteita poikkeusolojen vesihuollon suunnitteluun ja täydentää Puolustusvoimien vesihuollon opetusmateriaalia. Tutkimuksessa keskityttiin ensisijaisesti poikkeusolojen sotilaallisten joukkojen vesihuollon toteutukseen. Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää myös normaaliolojen vesihuollon erityistilanteissa.

2 Talousvesi

2.1 Talousveden laatu

Vesi on ihmiselle elintärkeää. Puhdasta vettä tulee olla saatavilla kaikissa olosuhteissa, myös poikkeusoloissa. Suomessa on tunnetusti hyvälaatuiset pohjavedet ja toimivat vesijohtoverkostot. Varautuminen vedenjakelun häiriötilanteisiin on tärkeää, koska puhtaalla vedellä on suuri vaikutus yhteiskuntaan. Ennalta varautuminen mahdollistaa nopeamman reagoinnin kriisitilanteisiin, vesihuolto saadaan toteutettua suunnitelmallisesti ja riskit voidaan paremmin tunnistaa.

Maailman terveysjärjestö (WHO) on määrittänyt kansainvälisesti käytössä olevia raja-arvoja sekä normeja talousveden laadulle. Suomessa sosiaali- ja terveysministeriö vastaa lainsäädännöstä, jolla ohjataan talousveden laatua. Terveysturvallisuuden varmistamisella on vastuu talousveden laadun valvonnasta. [1.]

Talousvesi on määritetty vedeksi, jota juodaan sekä käytetään ruoan ja elintarvikkeiden valmistamiseen. Talousveden pitää täyttää sosiaali- ja terveysministeriön asettamat laatuvaatimukset, jotta vedestä ei aiheudu haittaa ihmisten terveydelle. Talousveden laatua tulee valvoa säännöllisesti, jotta veden tuottajat pystyvät reagoimaan nopeasti mahdollisiin muutoksiin veden laadussa. Talousveden laatuvaatimuksissa on määritetty enimmäispitoisuudet eliöille ja kemiallisille aineille. Enimmäispitoisuuksien ylittyessä veden tuottajan tulee ryhtyä korjaustoimenpiteisiin viipymättä ja tarvittaessa ohjeistaa veden käyttäjää terveyshaitan välttämiseksi. [2.]

Hyvä talousvesi täyttää laatuvaatimukset. Se on hajutonta, väritöntä, kirkasta ja mautonta. Lisäksi hyvä talousvesi ei sisällä sellaisia mikrobeja tai kemiallisia yhdisteitä, joista olisi haittaa ihmisen terveydelle. Talousvedessä olevat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa välittömiä terveyshaittoja tai terveyshaitat voivat tulla esiin viivästyneesti. Epäpuhtaasta talousvedestä johtuvat sairastumiset liittyvät usein talousvedessä oleviin haitallisiin mikrobeihin tai kemiallisiin yhdisteisiin. Sairastumistapauksissa oireet ovat usein samanlaisia kuin ruokamyrkytyksissä, joten elintarvikeperäisiä sairastumisia selvittäessä on aina huomioitava myös käytössä ollut talousvesi. Terveysturvallisuus on tulla esiin myös viivästyneesti, kuukausien tai vuosien kuluttua. Esimerkiksi erilaisten syöpäsairauksien lisääntyminen, johtuu useiden ympäristötekijöiden kombinaatioista, jolloin voi olla vaikea selvittää yksittäisten kemikaalien osuutta sairastumisiin. [5.]

2.2 Talousvesi poikkeusoloissa

2000-luvulla tapahtuneet sodat Irakissa, Afganistanissa ja Ukrainassa ovat muuttaneet yleisesti sodan kuvaa. Poliittiset erimielisyydet maiden välillä muuttuivat nopeasti valtioiden välillä sotatilaksi. Perinteinen normaaliolojen ja poikkeusolojen välinen ”harmaa vaihe” on jäänyt lyhyeksi tai kokonaan pois. Aiemmin sotatilaa edeltänyt ”harmaa vaihe” mahdollisti muun muassa siviilien evakuoinnin kriittisimmiltä alueilta. Nopeasti kehittyneet sotilaalliset konfliktit eivät ole mahdollistaneet kaikkien siviilihenkilöiden evakuointia alueilta, vaan sotatoimialueilla ovat samaan aikaan toimineet sekä siviilit että sotilaat. Vesihuollon osalta tämä vaatii entistäkin tarkempaa suunnittelua. Erityisen haastavaa on järjestää vesihuolto painopistealueilla ja niiden vesilaitoksilla, joissa jo normaalioloissa toimitaan oman vesituotantokapasiteetin ylärajoilla. Alueella asuvien siviilien ja teollisuuden lisäksi samalle alueelle sijoitetut sotilasjoukot lisäävät yksittäisten vesilaitosten kuormitusta merkittävästi. Kybersodankäynti ja mahdolliset sähkökatkot heikentävät huomattavasti vesilaitosten tuotantokapasiteettiä ja vaikutukset näkyvät nopeasti myös veden laadussa. [4.]

Puolustustilalaki

1 LUKU Yleiset säännökset

1 § [\(25.2.2000/199\)](#)

Valtiollisen itsenäisyyden turvaamiseksi ja oikeusjärjestyksen ylläpitämiseksi voidaan valtakunnan puolustusta tehostaa ja sen turvallisuutta lujittaa saattamalla voimaan puolustustila Suomeen kohdistuvan sodan aikana sekä siihen rinnastettavissa vakavasti yleisen järjestyksen ylläpitämiseen vaikuttavissa sisäisissä, väkivaltaisissa levottomuuksissa, joilla pyritään kumoamaan tai muuttamaan perustuslain mukainen valtiojärjestys.[3.]

Poikkeusoloissa vesihygienia ja talousveden saatavuus korostuvat entisestään. Sodanajan joukot toimivat usein kenttäolosuhteissa, jossa hygienia- ja vesihuoltotaso ei ole yleisesti yhtä korkea, kuin normaalioloissa. Vesihygieniaan ja veden suunnitelmalliseen käyttöön eli ”vesikuriin” pitää kiinnittää erityistä huomiota, jotta vältytään vesivälitteisten epidemioiden vaikutuksilta. Hyvin hoidetulla vesihygienialla pyritään estämään sairauk-

sien leviäminen veden välityksellä ja ylläpitää joukon toimintakykyä. Vesikurin tarkoituksena on säännöstellä rajallinen vesiresurssi välttämättömiin tarpeisiin sekä turvata puhtaan talousveden saanti kaikissa tilanteissa. Hyvin hoidettu vesihygienia ja vesikuri vähentävät vesivälitteisten epidemioiden riskiä merkittävästi. Sodan aikana olosuhteet ovat vaihtelevia ja vesihygienialla on suuri vaikutus kentällä toimivien joukkojen suorituskykyyn. Yhteen vedentäydennyspaikkaan saattaa tukeutua useita tuhansia käyttäjiä, jolloin on olemassa riski sairauksien leviämisestä suurille joukoille. [5.]

Poikkeusoloissakin talousveden hankinnassa tukeudutaan ensisijaisesti normaalioloissa toimivaan ja valvottuun vesijohtoverkoston. Vesijohtoverkoston ilmenevät häiriöt tai verkoston vettä tuottavan vesilaitoksen toiminnan rajoittuminen ohjaa tukeutumaan muihin vedenhankintamenetelmiin. Normaalioloissa toimivasta vesijohtoverkoston otettu vesi on valvottua ja veden tulee täyttää turvallisen talousveden laatuvaatimukset. [5.]

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta

7 §

Talousveden laadun säännöllinen valvonta

Kunnan terveydensuojeluviranomaisen on valvottava säännöllisin tutkimuksin 2 §:ssä tarkoitettua talousvettä. Vedenjakelualueelta otettavien valvontatutkimusnäytteiden vähimmäismääristä säädetään liitteessä II.

Säännölliseen valvontaan sisältyvät:

1) jatkuva valvonta, jonka tarkoituksena on hankkia säännöllisesti tietoa talousveden laadusta ja laatuvaatimusten täyttymisestä sekä talousveden käsittelyn, erityisesti desinfioinnin, tehokkuudesta, ja

2) jaksottainen seuranta, jonka avulla on tarkoitus selvittää, täyttääkö talousvesi liitteen I mukaiset vaatimukset.

Jos näytteenottaja on muu kuin kunnan terveydensuojeluviranomainen, kunnan terveydensuojeluviranomaisen tulee varmistua siitä, että näytteenottaja tuntee talousvesinäytteiden ottoon liittyvät yleiset periaatteet. [6.]

Lisäksi vesijohtoverkoston etuna on vesiputkien sijainti maassa, jolloin veden lämpötila pysyy alhaisena ja vesi on eristettynä muilta ympäristövaikutuksilta. Vesijohtoverkos-

tossa oleva vedenpaine on ympäröivää painetta korkeampi, jolloin pienet vuodot vesijohtoverkossa ovat mahdollisia ilman että vesi saastuu.

Mikrobiologisen laadunvalvonnan keskeisimmät indikaattorit ovat tauteja aiheuttavat bakteerit. Kenttäolosuhteissa talousveden mikrobiologisen laadun arviointiin on syytä käyttää luotettavia, yksinkertaisia ja mahdollisimman nopeita laadunvarmistusmenetelmiä. Talousvesi ei saa sisältää yhtään *E. coli* tai koliformisia bakteereita. Jos edellä mainittuja bakteereita havaitaan, vesi voi olla saastunutta ja terveydelle haitallista. Koli-formisten bakteereiden ja *E. colin* määrittämiseen voidaan hyödyntää esimerkiksi Evi-ran viranomaiskäyttöön hyväksymää Colilert-testiä. Colilert 18 -testi näyttää 18 tunnissa, onko vedessä yleisimpiä taudinaiheuttajabakteereita, lisäksi voidaan jo muutamassa tunnissa todeta, jos niitä on paljon. Perinteisesti viranomaiskäytössä olevat standardimenetelmät ovat vaatineet useita päiviä tuloksen määrittämiseen. Testi soveltuu hyvin päätöksenteon tueksi tilanteissa, joissa päätetään, voidaanko tutkittavaa vettä käyttää talousvetenä. Colilert-testillä saadaan tietää, onko tutkittavassa vedessä mahdollisia patogeenejä. [7.]

Colilert-menetelmä mahdollistaa koliformisten bakteereiden ja *E. colin* kasvun tutkittavassa näytteessä. Menetelmässä on niukasti ravinteita heterotrofisten bakteereiden kasvuun, jolloin ne eivät yleensä häiritse tulosten tulkintaa. Colilert-testin ravinteet on optimoitu koliformisten bakteereiden kasvulle, ja niiden aineenvaihduntatuotteena muodostuu ihmissilmällä havaittavaa keltaista väriä. Menetelmä tukee myös *E. colin* kasvua, jonka aineenvaihduntatuotteena näytteeseen muodostuu yhdiste, joka fluoresoi UV-valon vaikutuksessa. Näytteiden värimuutoksien tulkintaa helpottaa, jos käytössä on positiivinen ja negatiivinen kontrollinäyte. Silmämääräisesti värimuutoksen huomaa parhaiten vertaamalla näytteitä rinnakkain. [8.]

2.3 Veden hankinta poikkeusoloissa

Poikkeusoloissa, esimerkiksi sodan aikana, riski tahalliseen vesijärjestelmän sabotointiin kasvaa, koska vastapuolen vesijärjestelmään vaikuttaminen on tehokas keino heikentää vastapuolen suorituskykyä. Poikkeusoloissa on siis tehostettava veden täydennyspaikkojen valvontaa, jotta tahallisen sabotoinnin riskiä voidaan pienentää. [5.]

Poikkeusoloissa toimivien sotilaallisten joukkojen osalta talousveden laatusuosituksista joudutaan mahdollisesti poikkeamaan. Sotilaallisten joukkojen suorituskyvyn säilymisen kannalta vettä on oltava saatavissa kaikissa olosuhteissa, jolloin joukon johtaja tekee päätöksen laatukriteereistä poikkeavan talousveden käytöstä. Tällaisissa tilapäisratkaisissa joukossa toimiva hygieniaan perehtynyt henkilö suunnittelee, miten vesihuolto voidaan toteuttaa mahdollisimman pienillä riskeillä. Talousveden laatuvaatimuksista tilapäisesti poikkeamisessa suurin riski on veden mikrobiologinen laatu. Terveydelle haitalliset mikrobit sairastuttavat ihmisen nopeasti, kun taas lievät poikkeamat talousveden kemiallisessa laadussa eivät tilapäiskäytössä todennäköisesti aiheuta välittömiä terveyshaittoja. [5.]

Kuljetuskalustoa ja veden säilytyskalustoa on rajallisesti, joten veden kuljettaminen ei ole ensisijainen vaihtoehto. Ensisijaisesti pyritään tukeutumaan jo normaalioloissa toimivaan vesijärjestelmään. Veden hankkijan kannalta on tärkeää, että veden käsittelyyn kuluu mahdollisimman vähän omia resursseja. Säiliöissä varastoitava talousvesi on aina riski talousveden laadun kannalta. Säiliöiden kunto, puhtaus ja varastointiolosuhteet vaikuttavat merkittävästi juomaveden laatuun ja säilyvyyteen. Sotilasjoukon on kuitenkin aina kyettävä hankkimaan talousvettä omavaraisesti, jotta suorituskyky saadaan ylläpidettyä. Suurten joukkojen veden hankintaan voidaan hyödyntää esimerkiksi matalakairamenetelmää tai erilaisia vedenpuhdistuslaitteita. [9.]

Sotilasjoukon tehtävän lisäksi veden kulutukseen vaikuttavat merkittävästi ympäröivät olosuhteet. Kuumissa olosuhteissa ja korkeassa ruumiillisessa rasituksessa veden tarve kasvaa huomattavasti. Keskimääräisesti yksittäisen taistelijan veden tarve on 10 litraa vuorokaudessa. Keskimääräinen veden tarve pitää sisällään juomaveden lisäksi ruokailuun, sekä henkilökohtaisen hygienian ylläpitämiseen tarvittavat vedet. [5.]

Talousveden hankinnassa on hyvä käyttää vesilähdettä, jossa veden laatu on parasta mahdollista. Laadukas vesilähde kuormittaa vähemmän joukon resursseja veden käsittelyyn, jolloin resursseja säästyy muihin tehtäviin. Vedenhankintaan vaikuttaa veden tarpeen lisäksi kuljetusetäisyys ja muut vallitsevat olosuhteet. Vedenkuljetus- ja säilytyskapasiteetin rajallisuus ohjaa veden käyttäjää, veden hankinnassa lähimpään käytössä olevaan vedentäydennyspaikkaan, joka ei aina ole turvallisin vaihtoehto. Vesihuolto-suunnittelun mukaisesti vedentäydennyspaikat ovat ennalta määritettyjä ja valvottuja. Mikäli veden täydennyspaikka ei ole ennalta määritetty ja valvottu, pitää vedestä ottaa näyte ja varmistua, että vesi täyttää asetetut vaatimukset. Mikäli vesi ei täytä laatuvaatim

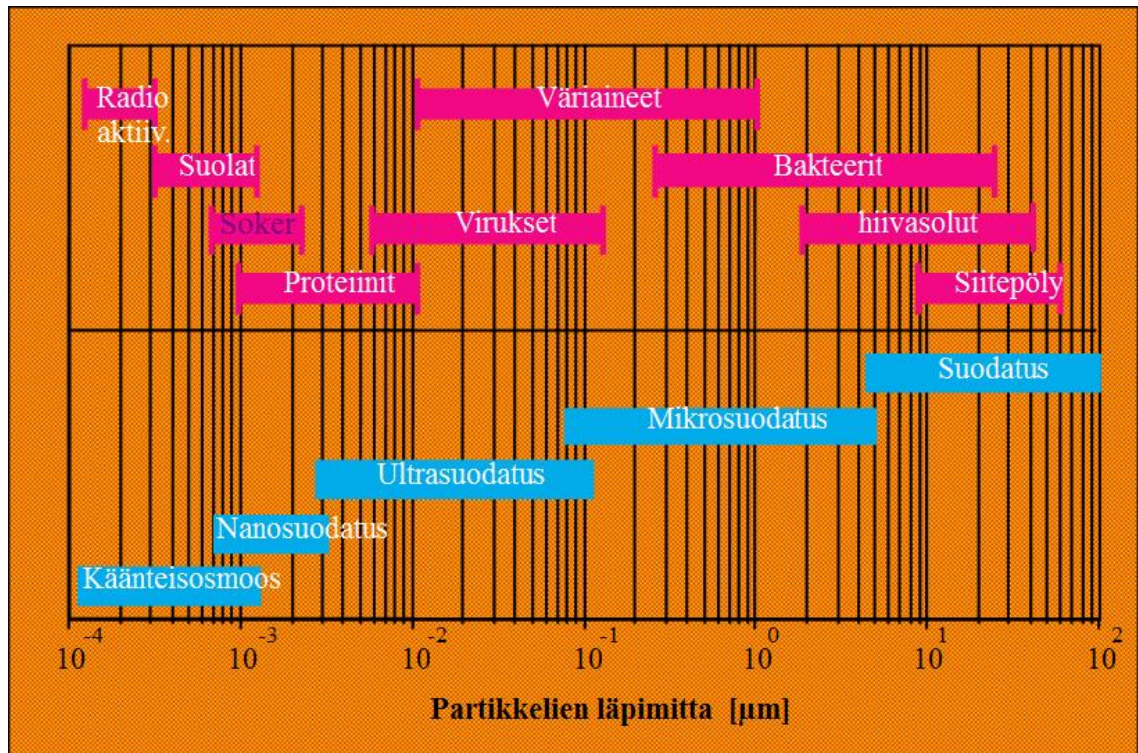
timuksia, se voidaan puhdistaa käyttökelpoiseksi, jos vedenpuhdistusresursseja on käytössä. Sodan ajan joukoilla keskeisimmät vedenpuhdistusmenetelmät ovat keittäminen, kemiallinen puhdistaminen, suodattaminen tai erilaiset vedenpuhdistuslaitteet. Veden hankinnassa voidaan hyödyntää myös valmiiksi pulloitettua juomavettä, jos joukon tilanne ja tehtävä sen mahdollistavat. [5;9.]

Veden keittäminen on yksinkertainen, helposti ja nopeasti toteutettava vedenpuhdistusmenetelmä. Lähes kaikilla joukoilla on välineet ja mahdollisuus veden keittämiseen kenttäolosuhteissa. Muutaman minuutin kestävä veden keittäminen tuhoaa lähes kaikki vedessä olevat terveydelle haitalliset mikrobit ja muut tautia aiheuttavat pieneliöt. Veden keittämällä ei ole merkittävää vaikutusta veden kemialliseen tai radioaktiiviseen laatuun, jolloin vedessä mahdollisesti olevat terveydelle haitalliset aineet jäävät veteen myös keittämisen jälkeen. Keittämällä ei ole myöskään vaikutusta veden mikrobiologiseen laatuun veden uudelleen jäähtymisen jälkeen, koska keittämisen jälkeen veteen ei jää desinfioidua ominaisuutta. [5;9.]

Veden kemiallinen puhdistaminen on tehokas menetelmä yleisimpien taudinaiheuttaja bakteereiden ja virusten tuhoamiseen. Käytettävä vedenpuhdistuskemikaali ei pääsääntöisesti vaikuta vedessä mahdollisesti oleviin terveydelle haitallisiin kemikaaleihin tai haitalliseen säteilyyn. Haitallisten mikrobien aineenvaihduntatuotteena syntyvät toksiinit jäävät veteen myös kemiallisen käsittelyn jälkeen. Yleisimmät vedenpuhdistuskemikaalit, kuten kloorivalmisteet ovat edullisia ja helposti saatavissa. Kemiallista vedenpuhdistusta toteuttavan henkilön tulee olla tietoinen käytössä olevan kemikaalin vaikutuksesta. Kemikaalia on osattava annostella oikein, jotta sen määrä vedessä on riittävä vaikutuksen varmistamiseksi, ja ettei kemikaalin yliannostuksesta aiheudu haitallisia terveysvaikutteita vedenkäyttäjiiin. Vedenpuhdistuskemikaalien vaikutusnopeus ja vaikutuksen kokonaiskesto vaihtelee kemikaalityypistä riippuen. [5.]

Veden suodattaminen poistaa vedestä suodattimen läpäisyominaisuuden mukaiset epäpuhtaudet (kuva 1). Suodattimia on olemassa laajasti eri suodatuskapasiteetilla. Suodatuslaitteet pitää myös huoltaa, jotta niiden suodatusteho säilyy. Yleisimmät vedensuodattimet poistavat vedestä bakteereiden lisäksi alkueläimiä, mutta eivät kuitenkaan viruksia, kemiallisia aineita tai radioaktiivistasäteilyä. Tehokkain puhdistustulos saadaan käänteisosmoosiin perustuvilla laitteilla, joiden hinta on moninkertainen verrattuna karkeampiin suodatusmenetelmiin. Veden suodatus on hyvä esikäsittelymenetel-

mä myös ennen kemikaalikäsittelyä, jolloin kemikaalin teho saadaan paremmin hyödynnettyä. [5.]



Kuva 1. Kuvassa esitetty erilaisten puhdistusmenetelmien teho ja tutkimuksessa käytetyn vedenpuhdistuslaitteen suodatus perustuu käänteisosmoosiin. Käänteisosmoosisuodatuksessa vedestä saadaan poistettua ionimuodossa olevat suolat ja radioaktiivinen säteily, sekä kaikki muut suuremmat epäpuhtaudet. Järjestelmän toimivuus voidaan varmistaa ”suolatestillä”. Testillä mitataan raakaveden ja tuotetun talousveden sähkönjohtavuus eroja. Mikäli sähkönjohtavuus pienenee yli 95 %, voidaan olettaa järjestelmän toimivan oikein. Puhdistusjärjestelmä poistaa sähkönjohtavuutta lisäävät ionit, jolloin voidaan olettaa myös suurempien partikkelien poistuvan puhdistusprosessissa. [11.]

Sotatoimialueilla vesihuoltojärjestelmään saattaa tulla lisääntyviä teknisiä häiriöitä, jolloin tukeutuminen valmiiseen vesijohtoverkoston voi estyä. Normaalioloissa toimiva vesiverkosto on tärkeä myös poikkeusolojen vesihuollossa. Vesiverkostoa on kuitenkin lähes mahdotonta valvoa kokonaisvaltaisesti, jolloin mahdollisella sabotoinnilla saadaan aiheutettua merkittäviä vaikutuksia suurelle määrälle ihmisiä. Kaikkia vesilaitoksia ei mahdollisesti pystytä pitämään toiminnassa, kun sotatoimialueilta joudutaan evakuoimaan siviilihenkilöitä turvallisempiin paikkoihin. [4;9;20.]

2.4 Vesilähteet

Suomessa on paljon vesistöjä ja pohjavesi on hyvin suojassa maakerrosten alla. Pintavedet vaativat lähtökohtaisesti enemmän käsittelyä. Vesilaitosten, jotka tuottavat talousvettä pintavedestä, on varautumissuunnitelmissaan huomioitava mahdolliset nopeat muutokset raakavesilähteessä. Pohjavesissä tapahtuvat nopeat laatumuutokset eivät ole yhtä todennäköisiä kuin pintavesissä. [5;10.]

Normaalioloissa pohjavesissä on merkittävästi enemmän radioaktiivisia aineita kuin pintavesissä. Sodan aikana tilanne voi nopeasti muuttua, koska vastustajan alueen pintavesiin on helpompi vaikuttaa kuin pohjavesiin, jotka ovat hyvin suojassa maaperässä. Radioaktiivinen laskeuma etenee maaperässä keskimäärin noin metrin syvyyteen ja sitoutuu maaperään, jolloin se ei vaikuta nopeasti pohjaveteen. Talvella jääpeite suojaa myös pintavesiä radioaktiivisten aineiden laskeumilta, mutta keväällä jäiden sulaessa pitoisuudet saattavat nousta nopeasti. Osa radioaktiivisesta säteilystä häviää ensimmäisten viikkojen aikana, toiset säilyvät pintavesissä kuukausia ja vaativat puhdistusmenetelmiä, jotta ne saadaan kokonaan eristettyä vedestä. Epäiltäessä raakavesilähteen sisältävän välittömästi terveydelle haitallista radioaktiivista säteilyä pitää vesi puhdistaa vedenpuhdistuslaitteella tai jos mahdollista vaihtaa vesilähdettä. [10.]

Vesihuoltojärjestelmän saastuttaminen biologisesti tai kemiallisesti on todennäköisempi ja yleisesti helpommin toteutettavissa kuin radioaktiivisilla aineilla. Vedenpuhdistuslaitteiden tuotto laskee merkittävästi puhdistettaessa vettä, jossa on tai epäillänsä olevan terveydelle haitallista radioaktiivista säteilyä. [11.]

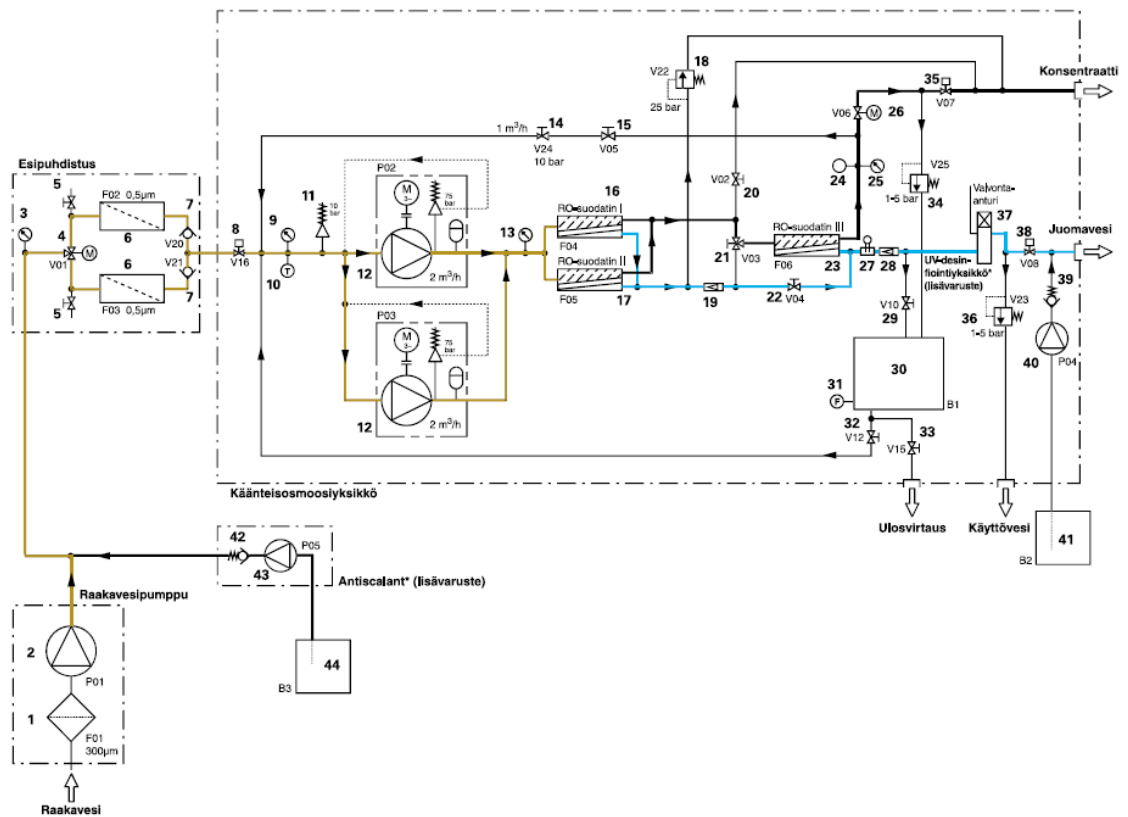
2.4.1 Vedenpuhdistuslaitteet

Erilaisia siirrettäviä vedenpuhdistuslaitteita voidaan hyödyntää tilanteissa, joissa sotilasjoukko on tehtävässä tai tilanteessa, joka ei mahdollista tukeutumista vesijohtoverkoston tai verkostossa oleva vesi ei ole sellaisenaan turvallista käyttää. Sähkönsaanti on vesilaitosten toiminnan kannalta keskeistä, ja sotatoimialueella mahdolliset katkot sähkönjakelussa ovat todennäköisiä, jolloin veden jakeluun tulee häiriöitä. Häiriötilanteisiin tulee varautua suunnittelemalla vaihtoehtoisia menetelmiä. Suomessa on paljon pintavesilähteitä, joihin on helppo tukeutua. Pintavedet altistuvat kuitenkin aina ympäristölle eivätkä siksi ole suoraan käytettävissä talousvetenä. Pintavedet sisältävät lähes aina patogeenejä, joten pintavesi on käsiteltävä ennen kuin sitä voidaan turvallisesti

käyttää talousvetenä. Vedenpuhdistuslaitetta voidaan käyttää myös vesijohtoveden puhdistamiseen, jos veden epäillään olevan terveydelle haitallista. Vedenpuhdistuslaitteita on erikokoisia. Pienemmät ovat taistelijakohtaisia laitteita ja suuremmilla kyetään tukemaan isompia joukkoja. [5;10.]

Tässä tutkimuksessa käytettiin käänteisosmoosilaitteistoja veden puhdistamiseen. Kärcher 1600 GT -vedenpuhdistuslaitteella saadaan juomavettä tuotettua 1 600 litraa tunnissa, johon raakavettä tarvitaan 3000–4000 litraa tunnissa, riipuen raakavesilähteestä. Laitteelle pumpattava vesi käsitellään ensin esisuodatusmoduulissa. Esisuodatusmoduulin (kuva 2, F02 ja F03) polyesterisuodattimiin jäävät partikkelit > 0,5 mikrometriä. Esisuodatus parantaa käänteisosmoosimoduulin tehokkuutta poistamalla järjestelmälle haitalliset partikkelit ja lisää järjestelmän käyttöikä. Varsinainen suodatus perustuu kolmeen puoliläpäisevään polyamidikalvoon (kuva 2, F04–F06), johon raakavettä pumpataan korkealla (30–70 bar) paineella (kuva 2, P02 ja P03). Kalvon läpi kulkeutuvat ainoastaan vesimolekyylit, ja puhtaan veden mikrobiologinen laatu voidaan varmistaa järjestelmään kuuluvalla UV-lampulla. Laitteella voidaan puhdistaa talousvettä lähes kaikista raakavesilähteistä, ja laadun valvonta on yksinkertaista, raakaveden ja talousveden sähkönjohtavuuserojen perusteella. Mikrobiologinen laatu todetaan erikseen otettavalla Colilert-testillä, joka indikoi mahdollisia taudinaiheuttajabakteereita vedessä. Laitetta voidaan hinata kuorma-auton perässä, jolloin laite voidaan sijoittaa tukeutujan kannalta keskeiselle paikalle ja on helposti siirrettävissä eri raakavesilähteille. Laitteen käyttö vaatii perehtymistä, jotta laitetta osaa käyttää oikein, väärin käytettynä laite vaurioituu helposti. Vedenpuhdistusresurssien rajallisuus vaatii tarkkaa suunnittelua. Laitteiden käytön suunnittelussa on tärkeää sijoittaminen tukeutujien kannalta keskeisille paikoilla ja tukeutumisen priorisoiminen joukoille, jotka eivät pysty tukeutumaan muihin vedentäydennyspaikkoihin. [11]

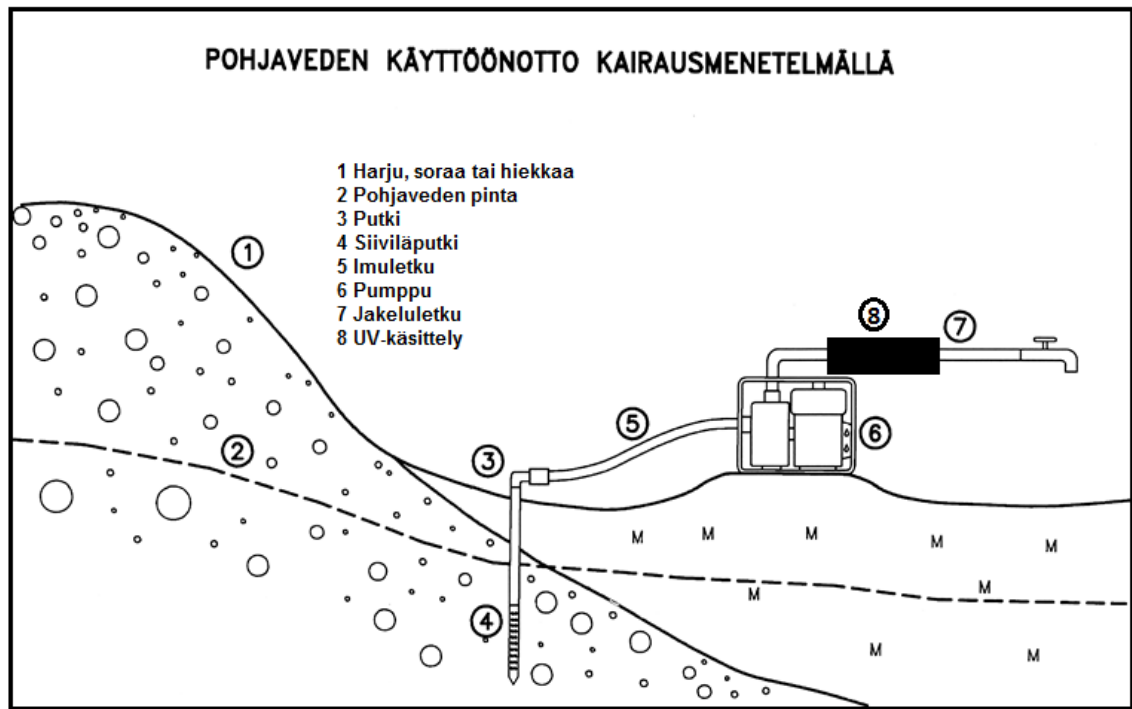
Käänteisosmoosilaitteella puhdistettu vesi on erittäin puhdasta, mutta puhdistusprosessissa vedestä poistuu myös ihmiselle tärkeitä mineraaleja. Pitkäaikaisessa käytössä käänteisosmoosilaitteella puhdistetun veden nauttiminen saattaa johtaa erilaisiin puutoksiin, jos ihmiselle tärkeitä mineraaleja ei saada muista lähteistä. Laitteen lisäominaisuutena puhdistettuun juomaveteen voidaan lisätä mineraalit, jos käänteisosmoosilaitteella tuotettu vesi on tukeutujan ainoa vesilähde ja sen käytön oletetaan jatkuvan pitkään. Järjestelmään sisältyy säilöntäkloorausmahdollisuus, joka parantaa veden säilyvyyttä. [11]



Kuva 2. Kärcher 1600 GT prosessikaavio. Kuvassa on esitetty vedenpuhdistusprosessi normaalkäytössä (Single pass). Mikäli raakavesi on erittäin likaista tai raakavesi sisältää ihmisen terveydelle vaarallisia pitoisuuksia radioaktiivista säteilyä, voidaan puhdistusprosessia muuttamalla saavuttaa parempi puhdistustulos (Double pass). Double pass -toiminnossa kertaalleen puhdistettu vesi (RO-suodatin 1 ja 2) johdetaan uudelleen suodatettavaksi (RO-suodatin 3). [11.]

2.4.2 Pohjaveden kairaus

Mahdollisuus tukeutua suoraan pohjaveteen tuo monilla paikoilla vaihtoehtoisen vedentäydennysmahdollisuuden, jos muut menetelmät ovat vaikeasti toteutettavissa. Pohjaveden hankintaan voidaan käyttää matalakairamenetelmää. Matalakairamenetelmälle soveltuvassa paikassa saadaan vettä hankittua nopeasti ja suhteellisen yksinkertaisilla järjestelyillä. Menetelmässä maaperään asennetaan putkisto, jonka päässä olevan siiviläputken läpi vesi pumpataan maanpinnalle. Ennen varsinaisen siiviläputken asennusta maahan porataan esikairaustanko, jolla saadaan tietoa maaperän laadusta ja pohjaveden pinnan korkeudesta. Porattuun reikään asennetaan myös varsinainen siiviläputki, jolloin putken asentaminen helpottuu ja nopeutuu. [5]



Kuva 3. Matalakairamenetelmällä saadaan hankittua pohjavettä maaperästä. Pohjavesi käsitellään järjestelmään kuuluvalla UV-valolla. [5;9.]

Suomessa on hyvänlaatuiset pohjavedet, mutta kairauskohteen valinta vaatii tarkkaa suunnittelua ja tiedustelua, jotta toimiva vedentäydennyspaikka saadaan perustettua. Hydrogeologiset kartat ja normaalit maastokartat auttavat sopivan kairauspaikan valinnassa, mutta pohjaveden saannista voidaan olla varmoja vasta, kun pohjavettä saadaan onnistuneesti pumpattua maaperästä. Käytössä olevat kevyet ja raskaat pohjaveden kairauskalustot soveltuvat vain hiekkaiselle ja soraiselle maaperälle ja laitteiston ominaisuudesta johtuen pohjaveden pinta voi olla korkeintaan kahdeksan metrin syvyydessä. [5.]

Onnistunut kairauspaikan valinta mahdollistaa hyvän vedentuoton, useita kuutioita tunnissa. Pohjavesi täyttää usein talousveden laatuvaatimukset sellaisenaan, mutta vesi kannattaa johtaa järjestelmään kuuluvan UV-valon läpi, mikrobiologisen laadun varmistamiseksi. Varastoitava pohjavesi kannattaa käsitellä myös kemiallisesti, jotta säilyvyyttä saadaan parannettua.

Kairausjärjestelmään kuuluva UV-valo on salkkumallinen, joten se on helppo kuljettaa mukana. UV-valo vaatii toimiakseen siirrettävän virtalähteen tai se voidaan kytkeä suoraan verkkovirtaan, jos kairauspaikka sen mahdollistaa. Jos kairauspaikan lähellä ei ole sähköä saatavilla, käytetään järjestelmään kuuluvaa kannettavaa polttoainekäyttöistä

generaattoria. UV-valon desinfioiva vaikutus perustuu valon aallonpituuteen, joka UV-valoissa on yleensä noin 250 nm. UV-valo tunkeutuu bakteerin soluseinämän läpi ja häiritsee DNA-replikoitumista, jolloin solu ei voi enää kasvaa tai jakaantua. UV-valon vaikutus vedessä oleviin bakteereihin kestää vain sen ajan jonka vesi on UV-valon vaikutuksessa. Vedessä olevat partikkelit heikentävät UV-valon tehoa, joten paras desinfiointi teho saadaan kun vesi on kirkasta. Matalakairamenetelmällä pohjavettä pumpattaessa vedessä on alussa paljon hiekkaa, jolloin vettä tulee pumpata kunnes vesi on kirkasta. UV-valo kannattaakin kytkeä järjestelmää vasta kun vesi on kirkastunut, jolloin UV-valoon ei tule ylimääräistä hiekkaa. [5;9.]

2.5 Hankitun talousveden varastointikäsittely

Talousveden laatu pitää varmistaa varastoinnin ajaksi, vaikka vesi olisi kuinka hyvin puhdistettu. Vesisäiliöiden ja vesiastioiden pitää olla puhtaita ja muuten hyväkuntoisia, jotta säiliöihin varastoitava puhdistettu vesi ei saastu säiliöiden epäpuhtauksista. Lämpimissä olosuhteissa varastoitavalle talousvedelle merkittävä riski on mikrobiologisen laadun heikkeneminen vesisäiliöissä. Talousveden saannin varmistaminen kaikissa olosuhteissa voi vaatia pitkiä aikoja talousveden varastoinnissa, jolloin pitää hyödyntää kemikaaleja veden säilyvyyden varmistamiseksi.

2.5.1 Talousveden säilöntä kloorilla

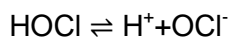
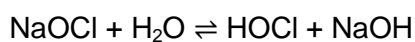
Erilaisia kloorivalmisteita käytetään yleisesti valkaisu- ja desinfiointiaineina sekä elintarviketeollisuudessa bakteereiden ja tuoksujen kontrollointiin. Klooria on käytetty jo 1900-luvun alusta talousveden desinfiointiin ja säilyvyyden parantamiseen. Kloori on tehokas ja edullinen keino juomaveden desinfiointiin. Kloorin käytön juomaveden desinfiointiin on todettu lisäävän erilaisten syöpien riskiä ihmisellä. IARC:n (International Agency for Research on Cancer) mukaan kloori ei ole luokiteltu ihmiselle syöpää aiheuttavaksi. Kloorivalmisteilla desinfioitaessa, kloorin ja orgaanisten aineiden reaktiossa syntyvät sivutuotteet ovat pitkäaikaisessa käytössä terveydelle haitallisia.

Veden säilyvyyden kannalta on tärkeää, että käytössä olevat vesisäiliöt on pesty ensin mekaanisesti. Säiliöiden seinämissä kasvavat bakteerit muodostavat ympärilleen biofilmin, joka suojaa bakteereita. Biofilmi pitää poistaa mahdollisimman hyvin, koska kloori ei vaikuta tehokkaasti biofilmissä kasvaviin bakteereihin. Kloorin desinfioiva vaikutus

rajoittuu vedessä vapaasti liikkuviin bakteereihin, jolloin vedessä olevat ravinteet jäävät biofilmissä kasvavien bakteereiden käyttöön, joka pahimmillaan kiihdyttää biofilmin muodostumista.

Kloorin ja veden reaktiossa syntyy alikloorihapoketta ja hypokloriitti-ioneja. Kloorin desinfiioiva vaikutus perustuu kloorin ja hapen muodostamien ionien hapetuskykyyn. Vesilaitoksessa puhdistettu vesi ei säilyisi putkistossa laadukkaana käyttäjälle asti, jos vettä ei käsiteltäisi mitenkään. [12;18]

Esimerkiksi natriumhypokloriitti reagoi veden kanssa seuraavasti:

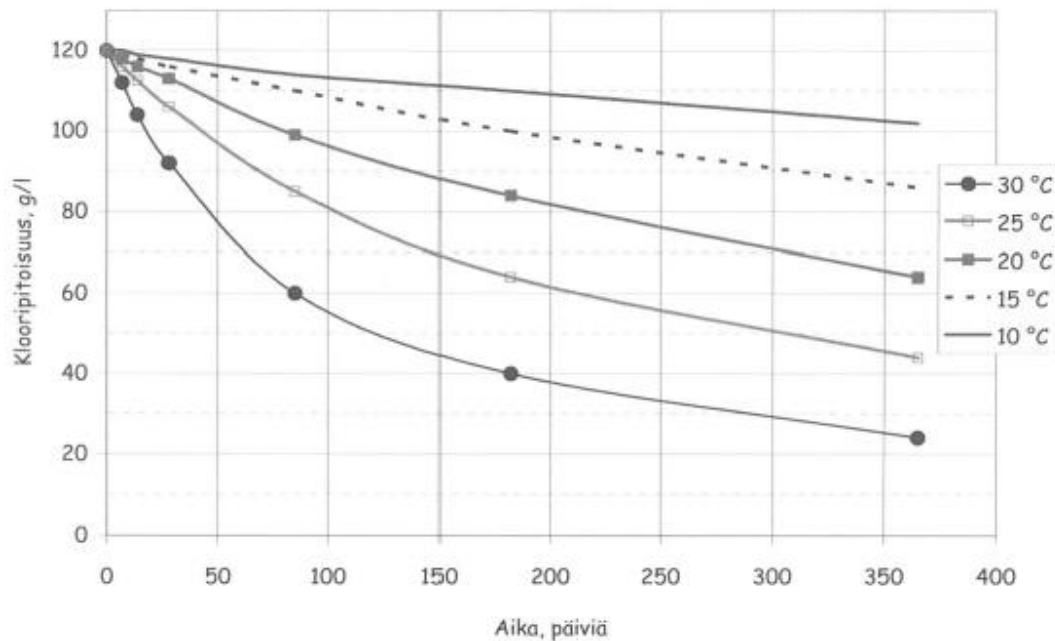


Veden desinfiointin kannalta merkittävä komponentti natriumhypokloriitin (NaOCl) ja veden (H₂O) reaktiossa on muodostuva alikloorihapoke (HOCl) ja hypokloriitti-ioni (OCl⁻). HOCl : OCl⁻ reaktiotasapaino on suoraan verrannollinen veden pH:n kanssa. Veden pH:n ollessa seitsemän tai alle reaktiotasapainossa muodostuu enemmän alikloorihapoketta, joka neutraalin varauksen johdosta läpäisee paremmin bakteerin negatiivisesti varautuneen solukalvon ja tuhoaa bakteerin. pH:n ollessa yli seitsemän muodostuu enemmän negatiivisesti varautuneita hypokloriitti-ioneja (OCl⁻), joten bakteereiden solukalvojen tuhoutuminen ei ole yhtä tehokasta. Suomessa pohjaveden pH:n vaihtelee 6,6 - 8,0 välillä, vesijohtoveden pH nostetaan vesilaitoksella hieman emäksiseksi, jotta korrosio ei vaikuttaisi vesijohtoverkoston. [12;18]

Talousveden säilönnässä osa kloorista sitoutuu vedessä oleviin orgaanisiin, epäorgaanisiin aineisiin ja mikrobeihin. Mikrobiologisen laadun kannalta merkityksellistä on jäljelle jäävä sitoutumaton kloori, jolla säilyy desinfiioiva ominaisuus. Kenttäolosuhteissa on erittäin tärkeää että talousveden vapaa klooripitoisuus on riittävä, jolloin kloorilla on desinfiioiva vaikutus koko täydennysketjun ajan, loppukäyttäjälle saakka.

Kloorille on ominaista muuttua kaasumaiseen (Cl₂) muotoon, jolloin nesteessä oleva klooripitoisuus laskee. Kloorin kaasuuntumisen kannalta veden lämpötilalla on merkittävä vaikutus, lämpötilan noustessa yli 30 °C:seen veden klooripitoisuus lähtee laske-

maan voimakkaasti. Kuvassa 4. on esitetty lämpötilan vaikutus kaupalliseen 10 prosenttiseen natriumhypokloriittiliuokseen. [21.]



Kuva 4. Natriumhypokloriittiliuoksen pitoisuuden muutos eri lämpötiloissa. [13.]

WHO:n mukaan jatkuvasti käytössä olevan talousveden enimmäispitoisuussuositus kloorille on 5 mg/l. Kloorin tehokkaan vaikutuksen kannalta on tärkeää, että kloorilla käsiteltävä vesi on mahdollisimman puhdasta. Vedessä oleva humus tai sameus heikentävät aina kloorin desinfiointikykyä, koska osa kloorista sitoutuu vedessä olevaan orgaaniseen ja epäorgaaniseen aineeseen. Käsittelyvaiheessa osa kloorista sitoutuu suoraan veden epäpuhtauksiin, jolloin ainoastaan aktiiviseksi jäävällä kloorin osuudella on desinfioiva vaikutus varastoinnin aikana. Kloorin lisäyksen jälkeen on hyvä varmistua mittaamalla säiliössä olevan talousveden sitoutumattoman kloorin pitoisuus. Mittaus voidaan tehdä helposti ja nopeasti, jos käytössä on klooripitoisuusmittari tai mittaliuskoja. Kloorikäsittelyn jälkeen tehtävä mittaus tehdään aikaisintaan 10 - 15 minuuttia käsittelystä, jolloin kontaktaika on riittävä. Yleisesti käytössä olevien kannettavien fotometrinen klooripitoisuusmittareiden ja mittaliuskojen mittaustarkkuus riittää hyvin kenttäolosuhteissa tehtäviin mittauksiin. Molemmilla mittausmenetelmillä pystytään määrittämään veden kokonaisklooripitoisuus sekä vapaan eli sitoutumattoman kloorin pitoisuus. [14.]

Kaikissa tilanteissa ei ole mahdollista mitata talousveden klooripitoisuutta mittavälineillä, näissä tilanteissa pitää sopiva annostus ensin määrittää laskemalla ja varmistaa aistinvaraisesti. Kloorilla säilötyn talousveden pitää tuoksua ja maistua lievästi kloorille. Jos kloorista ei jää veteen hajua ja makua, on klooria lisättävä. Suurin osa ihmisistä kykenee haistamaan ja maistamaan vedestä kloorin pitoisuudella 5 mg/l. [14]

Kloorin voimakkaaseen hapetuskykyyn perustuvia valmisteita on paljon erilaisia. Niitä on helposti saatavissa ja hankintakustannukset ovat edullisia. Tässä tutkimuksessa käytettiin raemaista "pikaklooria", natriumdikloori-isosyanuraattidihydraattijauhetta ($\text{NaC}_3\text{N}_3\text{O}_3\text{Cl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (R-kloori). Jauhe valittiin tähän tutkimukseen nopean vaikutuskyvyn ja helpon saatavuuden takia. Jauhemuodossa oleva kloori on kevyt kuljettaa mukana verrattuna käyttövalmiina oleviin nestemäisiin kloorivalmisteisiin. Jauhemuotoisen kloorin liukoisuus veteen on parhaimmillaan noin 20 °C:ssa, joten kloori kannattaa liuottaa ensin pienempään astiaan ja vasta liuenneena lisätä varsinaiseen vesisäiliöön, jossa vesi on noin 8 °C astetta. Paras liukoisuus kenttäolosuhteissa saavutetaan täyttämällä vesisäiliö puolilleen vettä, lisätään esivalmisteltu klooriliuos ja lopuksi täytetään säiliö loppuun vedellä. Jauhe voidaan lisätä myös täynnä olevaan säiliöön, jolloin sekoittuminen ei ole yhtä nopeaa.

2.5.2 Talousveden säilöntä hopealla

Hopea esiintyy luonnossa heikosti liukenevassa muodossa. Hopeaa on havaittu löytävän pohjavesistä, pinta- ja juomavesistä. Vain pieni osa suun kautta nautitusta hopeasta imeytyy ihmiseen. Hopean antibakteeriset ominaisuudet on tiedostettu jo tuhansia vuosia. Viimeisten kymmenien vuosien aikana kehittynyt nanoteknologia on lisännyt hopean käyttöä erilaisissa desinfiointimenetelmissä. Hopean käyttöä on pyritty lisäämään vedenpuhdistuksessa, jotta voitaisiin korvata kloorivalmisteet, joiden on todettu olevan haitallisempaa ihmisen terveydelle. WHO:n enimmäispitoisuussuositus juomaveden hopeapitoisuudelle on 0,1 mg/l, joka perustuu jatkuvaan nauttimiseen ihmisiän aikana. Suosituksen mukaisella pitoisuudella ei ole löydetty haittaa ihmisen terveydelle. Suosituksen pitkään jatkuva ylittäminen voi aiheuttaa sairastumisen argyriaan.[15.]

Kaikkia hopean aiheuttamia desinfiointia ominaisuuksia ei täysin tunneta. Tutkimuksien perusteella kuitenkin oletetaan, että Ag^+ -ionit tuhoavat bakteerin solukalvon ja heikentävät sen entsyymijärjestelmän toimintaa, jolloin solu ei voi kasvaa eikä myöskään kykene jakautumaan. Kaikki bakteerit eivät tuhoudu kokonaan hopeakäsittelyssä, vaan

menevät ennemminkin toimintakyvyttömiksi. Riippuen konsentraatiosta ja ajasta osa bakteereista kykenee palautumaan hopean vaikutuksista. Säilöttävän veden laadulla on merkittävä vaikutus hopean antibakteerisen ominaisuuden säilymiseen. Hopealla käsitellyn talousveden osittain tuhoutuneiden bakteereiden toimintakyky palautuu viimeistään kuuden kuukauden kuluttua säilönnän aloittamisesta. Bakteerit sietävät hopeaa eri tavoin, esimerkiksi tutkimus hopeakäsittelyn vaikutuksista gramnegatiiviseen *E. coli*-bakteeriin ja grampositiiviseen *S. aureukseen*, osoittaa, että *S. aureus* sietäisi paremmin hopeaa kuin *E. coli*. Mahdollinen selitys saattaa olla grampositiivisen bakteerin paksumpi solukalvo, joka suojaa paremmin hopeaionien siirtymistä bakteerin sytoplasmaan ja vaikuttaa sieltä bakteerin kasvuun ja jakautumiseen. [16.]

Veden käyttäjän kannalta on miellyttävää, että veden makuun ei tule muutoksia hopeakäsittelyssä, kuten esimerkiksi kloorikäsittelyssä. Hopeapitoisuutta on mahdoton määrittää vedestä aistinvaraisesti, siitä syystä hopean lisääminen talousveteen tulee olla tarkkaa. Kloori sen sijaan tuo veteen hajua ja makua, jotka käyttäjä aistii. Hopea on hidasvaikutteinen ja sen desinfioiva vaikutus vaatii riittävän pitkän kontaktiajan, jotta desinfiointi on tehokasta. Oikein käytettynä hopea tuo talousvedelle jopa kuuden kuukauden säilyvyyden. Hopeayhdisteiden hinta on korkeampi eikä saatavuus ole yhtä hyvä, kuin esimerkiksi kloorivalmisteilla. [22;15.]

Hopeayhdistettä on saatavilla erilaisia, tähän tutkimukseen valittiin hopeajauhe. Jauhe on tarkoitettu veden säilöntään vesisäiliöissä. Valmistetta on saatavilla myös tabletteina ja liuoksina, jos käyttökohteena ovat esimerkiksi vesipullot. Hopeayhdiste koostuu hopeanitraatista (AgNO_3) ja hopeasulfaatista (Ag_2SO_4). [22.]

3 Koejärjestelyt

3.1 Tutkimuksessa käytetyn vedenhankinta

Tutkimuksessa varastoidut vedet hankittiin kolmella eri menetelmällä. Vesi 1) otettiin vesijohtoverkosta, 2) talousvettä tuotettiin merivedestä käänteisosmoosilaitteella ja 3) hankittiin pohjavettä matalakairamenetelmällä, joka käsiteltiin UV-valolla. Hankitut vedet säilöttiin rinnakkain samoissa olosuhteissa. Veden säilöntä tehtiin kahdella eri kemikaalilla ja vedestä mitattiin varastoissa käytetyn säilöntäkemikaalin pitoisuuden muutosta.

3.2 Tutkimuksessa käytetyt vesisäiliöt

Tutkimuksessa käytetyt 1000 litran vesisäiliöt olivat Finncont-yrityksen valmistamia komposiittisäiliöitä. Vesisäiliön nimellistilavuus on 1000 litraa ja piriipintaan täytettynä + 5 %. Varsinainen säiliö on valmistettu korkeatiheyksisestä polyeteenistä (PE-HD). PE-HD on muovityypiltään samaa, kova ja kestävä, ja ominaisuudet säilyvät hyvin myös pakkasolosuhteissa. Lisäksi PE-HD -muovista ei tule veteen hajuja eikä makuja, ja se sietää hyvin kemiallisia aineita. Säiliön ympärillä on teräksinen kehys, joka tukee varsinaista säiliöosaa. Säiliön alla on muovinen (PE-HD) jalusta, joka mahdollistaa säiliöiden siirtelyn koneellisesti. Komposiittisäiliö painaa tyhjänä 59 kiloa ja vedellä täytettynä 1 060 kiloa. Muovinen säiliö suojaa säilöttävää vettä melko hyvin ympäristön vaikutuksilta. Säiliön korkissa on paineentasauslaite (kuva 5, N2), joka päästää säiliöön korvausilmaa heikosti, kun vettä otetaan säiliöstä tyhjennysventtiilin (kuva 5, N4) kautta. Mikäli säiliöstä lasketaan kymmeniä litroja vettä kerralla, paineentasausventtiilin kautta säiliöön tuleva korvausilma ei riitä, jolloin säiliöön muodostuva alipaine vaurioittaa säiliön. Korkin avaaminen parantaa korvausilman saantia ja poistaa riskin alipaineesta muodostuvasta vauriosta. Korkin avaaminen kuitenkin altistaa säiliössä olevan veden ulkoisille epäpuhtauksille, joten korkki on suljettava käytön jälkeen. Säiliön sisäpuolen mekaaninen puhdistaminen on haastavaa pienen täyttöyhteen kautta, verrattuna 750 litran vesisäiliöön. Vesisäiliössä oleva vesi alkaa myös talviaikaan jäätyä nopeasti, koska säiliössä ei ole eristystä. Kovilla pakkasilla veden sulana pito kuluttaa käyttäjän resursseja, jotta vettä on jatkuvasti käytettävissä. Yleismalliset vesisäiliöt ovat kuitenkin edullisia verrattuna lämpöeristettyihin malleihin ja säiliöt ovat helposti hankittavissa. [17.]



Kuva 5. Vesisäiliö 1000 l, rakennekuva. [17.]

3.3 Mittalaitteet

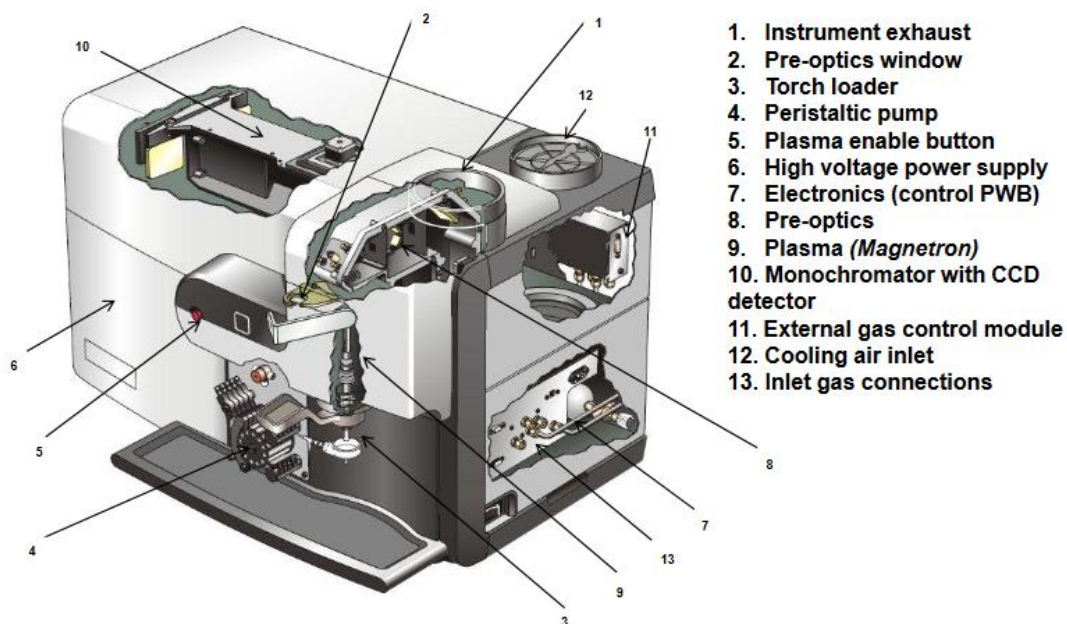
Tutkimuksessa klooripitoisuutta mitattiin Hach pocket colorimeter 2 –mittarilla (kuva 6.), jolla tehtiin kaikki kloorimittaukset. Laite sopii hyvin kentällä tehtäviin mittauksiin, ja pienen kokonsa ja painonsa ansiosta, mittari kulkee helposti mukana. Laite on IP-67 suojattu sekä ruggeroitu. [12;18.]



Kuva 6. Hach poket colorimeter 2. Mittaus tapahtuu fotometrisesti, perustuen (N,N-dimetyyli-p-fenyylidiamiini) DPD-kolorimetriseseen metodiin. DPD reagoi kloorin kanssa muodostaen punaista väriä, laite mittaa näytteen absorptiota aallopituudella 530 nm. Laitteella voidaan mitata vapaan kloorin pitoisuutta sekä kokonaiskloorin pitoisuutta. [12;18.]

Varastoitujen talousvesien hopeapitoisuus määritettiin Metropolian kemianteeniikan laboratoriossa, mikroaaltoplasma-atomiemissiospektrofotometrillä (MP-AES) (Kuva 7.).

Schematic Diagram



Kuva 7. Standardimenetelmään perustuvaan MP-AES -laitteeseen johdetaan mitattavan alkuaineen standardiliuokset ja tutkittava näyte. Laitteeseen johdettu liuos sekoittuu typpikaasuun, josta muodostuva aerosoli johdetaan plasmasoihduun. Plasmasoihduun johdetun tutkittavan alkuaineen atomien elektronit virittyvät korkeammalle energiatasolle, joka purkauessaan emittoituu mitattavan alkuaineen ominaisella aallonpituudella, hopealla aallonpituus 328 nm. Mitatun emission intensiteetti määrittää alkuaineen pitoisuuden näytteessä. [19.]

4 Tutkimustulokset

Seuraavassa osiossa on esitetty tutkimustulokset sekä tutkimustuloksiin perustuva matemaattinen mallintaminen. Tutkimuksen mittaukset toteutettiin taulukon 1. mukaisesti. Mallia voidaan hyödyntää tutkimuksen varsinaisten mittauspisteiden väliin jäävien kemikaalipitoisuuksien laskemiseen ja malli soveltuu myös kemikaalipitoisuuden määrittämiseen varsinaisten mittausten jälkeiselle ajalle.

Taulukko 1. Mittaussarjat

Tutkimuksen mittaukset	Vesilähde	Desinfiointikemikaali	Varastointiolosuhteet
Sarja 1.	Vesijohtoverkko	Kloori	Varastossa
Sarja 2.	Vesijohtoverkko	Kloori	Ulkona
Sarja 3	Pohjavesi	Kloori	Ulkona
Sarja 4.	Käänteisosmoosi	Kloori	Ulkona
Sarja 5.	Vesijohtoverkko	Hopea	Varastossa
Sarja 6.	Vesijohtoverkko	Hopea	Ulkona
Sarja 7.	Käänteisosmoosi	Hopea	Ulkona
Sarja 8.	Pohjavesi	Hopea	Ulkona

4.1 Mittaukset ja matemaattinen mallintaminen

Mittaustuloksiin perustuvan havaintomatriisin (Liite 1.) keskiarvojen perusteella selvitetiin sopivaa matemaattista mallia. Mallinnus toteutettiin pienimmän neliösumman menetelmällä (Liite1). Kokeilemalla erilaisia reaktioyhtälöihin perustuvia malleja ja niiden graafisten tarkastelujen perusteella (Liite 1), sopivin malli löytyi yhtälöstä:

$$y = a * e^{(-k*t^p)}$$

y= Laskettu kemikaalipitoisuus

t= Talousveden varastointiaika (vuorokausina)

a, -k, p= Regressiomallin parametrit

Kuvissa 8–15 on esitetty graafisesti mittaustulosten keskiarvojen vertailua laskettuun matemaattiseen malliin. Mallin selitysaste on laskettu yhtälöllä:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$$

R^2 = Selitysaste

$$SS_R = \text{Jäännösneliösumma} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SS_T = \text{Selitettävän kokonaisneliösumma} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

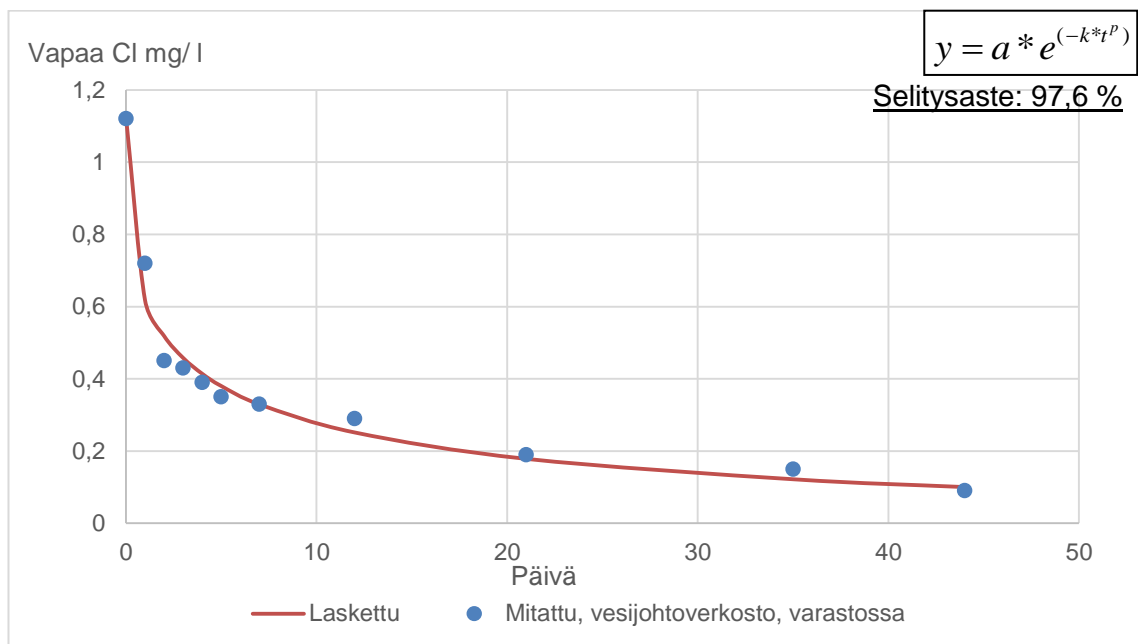
y_i = Mitattu pitoisuus

\hat{y}_i = Laskettu pitoisuus

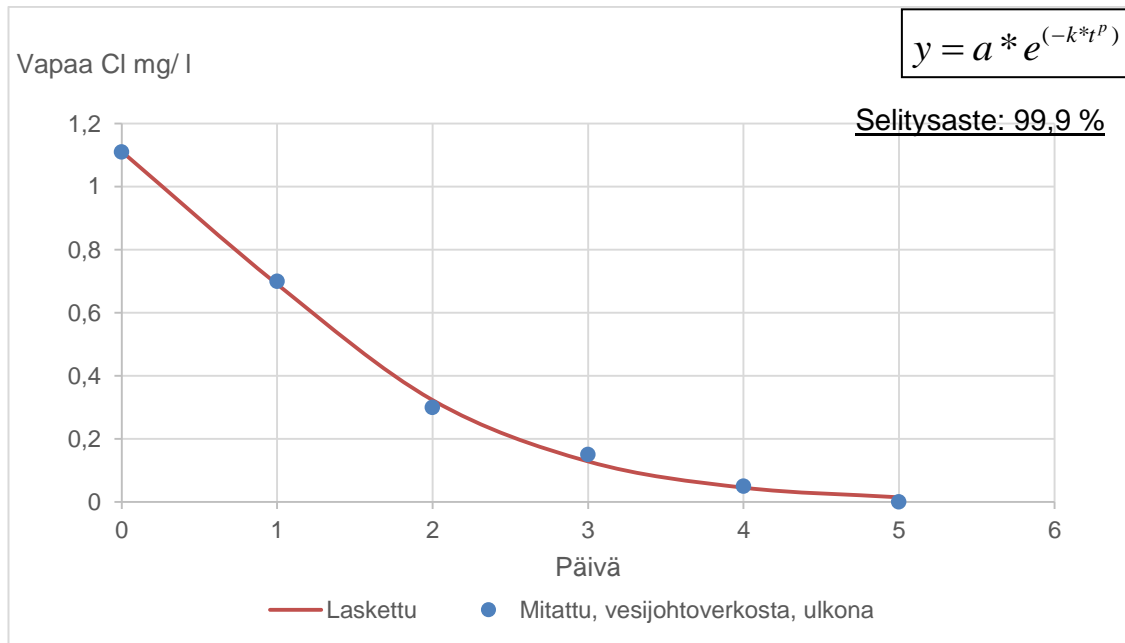
\bar{y} = Mitattujen pitoisuuksien keskiarvo

4.2 Mitatut vapaa klooripitoisuudet ja mallin selitysaste

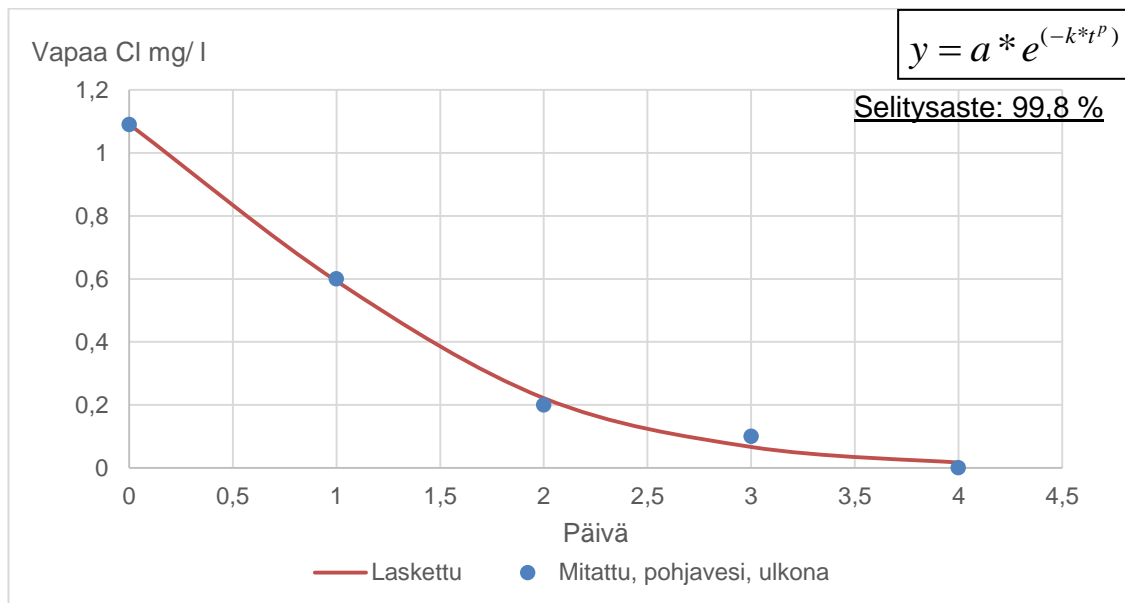
Kolmella eri menetelmällä hankitut talousvedet käsiteltiin natriumdiklooriisosyanuraattidihydraattijauheella, jota lisättiin 1,5 grammaa/säiliö (1000 litraa). Annostelulla saavutettiin vapaan kloorin aloituspitoisuudeksi n. 1,1 mg/litra. Vapaan kloorin pitoisuudet mitattiin kolorimetrisellä klooripitoisuusmittarilla, joka on esitelty teoriaosuiden kohdassa 4.3 mittalaitteet. Kaikki mittaukset toistettiin kolme kertaa liitteen 1 havaintomatriisin mukaisesti.



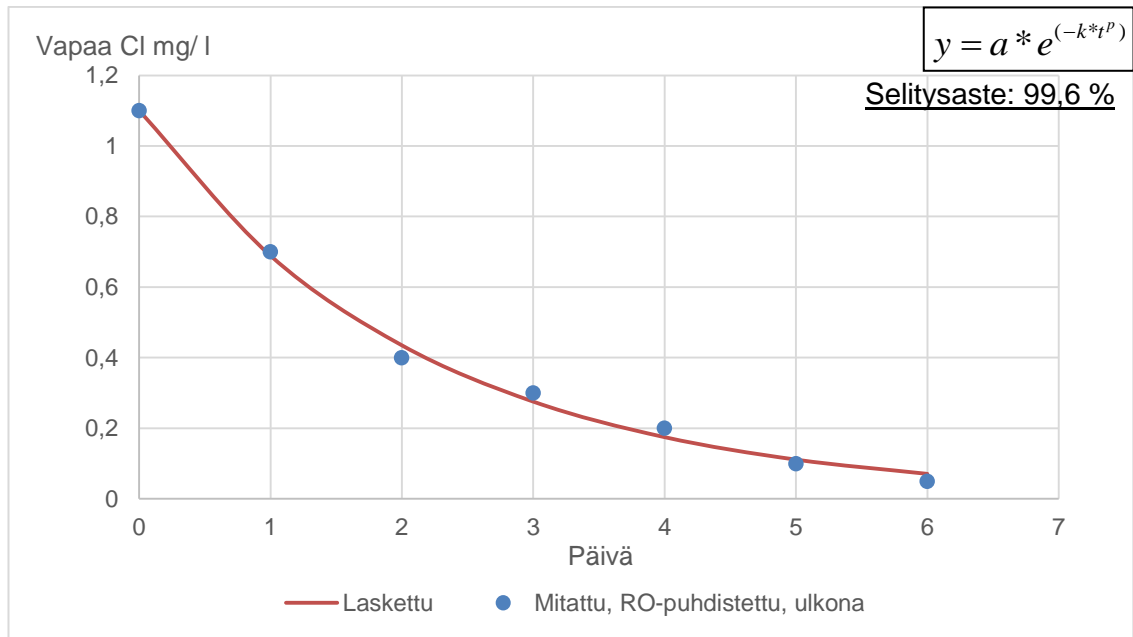
Kuva 8. Sarjassa 1. talousvesi otettiin vesijohtoverkosta, veteen lisättiin klooria ja vesisäiliö varastoitui rakennukseen, jossa lämpötila oli vakio ja olosuhteet olivat vakioit. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvoollisia vapaan kloorin pitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 97,6 %:n varmuudella.



Kuva 9. Sarjassa 2. talousvesi otettiin vesijohtoverkosta, veteen lisättiin klooria ja vesisäiliö varastoitiin ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvoollisia vapaan kloorin pitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 99,9 %:n varmuudella.



Kuva 10. Sarjassa 3. talousvesi hankittiin matalakairamenetelmällä pohjavedestä, veteen lisättiin klooria ja vesisäiliö varastoitiin ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvoollisia vapaan kloorin pitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 99,8 %:n varmuudella.

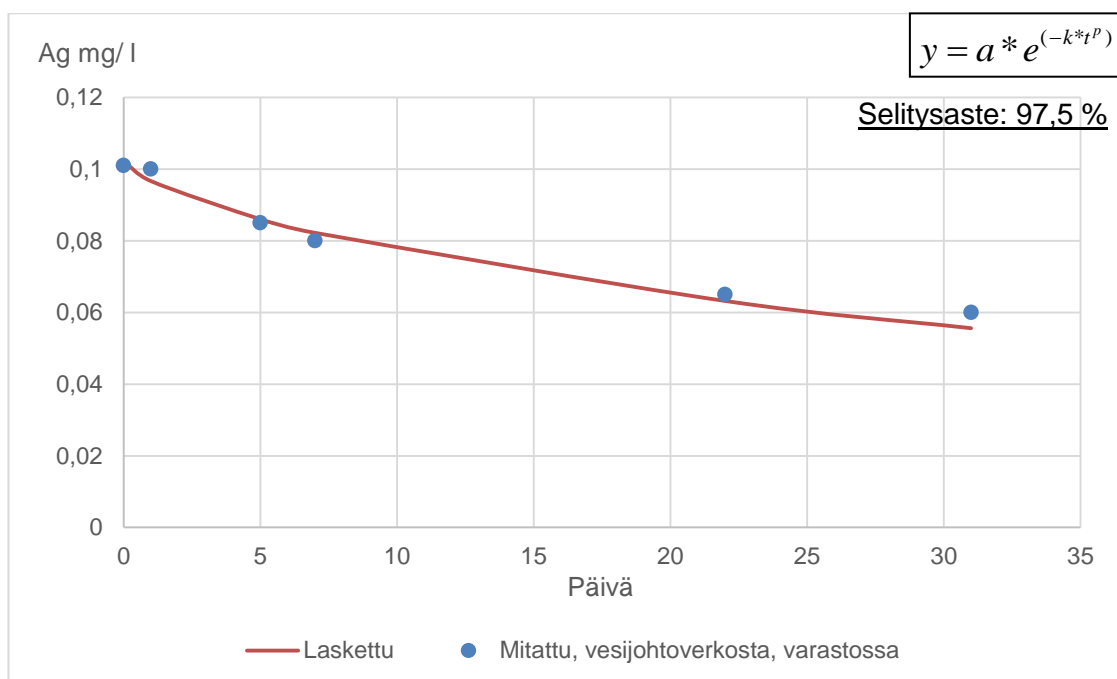


Kuva 11. Sarjassa 4. talousvesi tuotettiin käänteisosmoosiin perustuvalla vedenpuhdistuslaitteella, veteen lisättiin klooria ja vesisäiliö varastoitui ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvollisia vapaan kloorin pitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 99,6 %:n varmuudella.

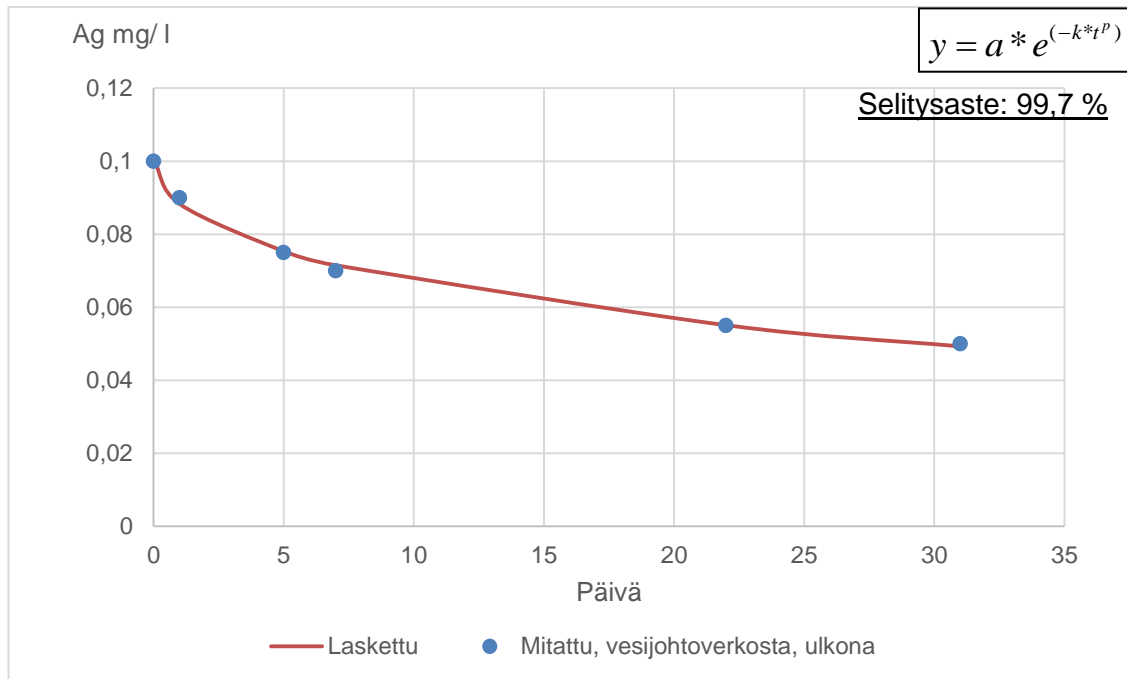
4.3 Mitatut hopeapitoisuudet ja mallin selitysaste

Hopeapitoisuusmittaukset toteutettiin MP-AES -laitteella, joka on esitelty teoriaosuuden kohdassa 4.3 mittalaitteet. Kaikki hopeapitoisuusmittaukset toteutettiin liitteen 1 havaintomatriisin mukaisesti. Säilöntäkemikaalina käytettiin hopeayhdistettä (AgNO_3) (Ag_2SO_4), jota lisättiin 10 grammaa/säiliö (1000 litraa). Annostelulla saavutettiin hopean aloituspitoisuudeksi 0,1 mg/litra.

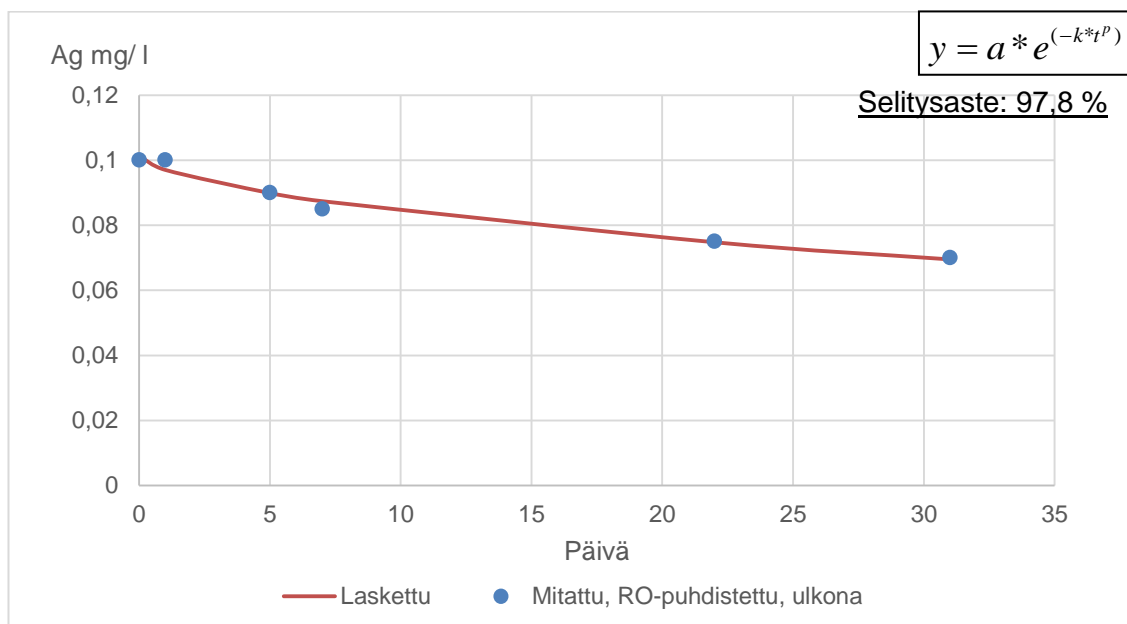
Mittaustuloksia pyrittiin selittämään matemaattisesti mallintamalla, joka toteutettiin pienimmän neliösumman menetelmällä liitteissä 1. Kuvissa 12. - 15. on esitetty graafisesti mittaustulosten keskiarvojen vertailua laskettuun matemaattiseen malliin.



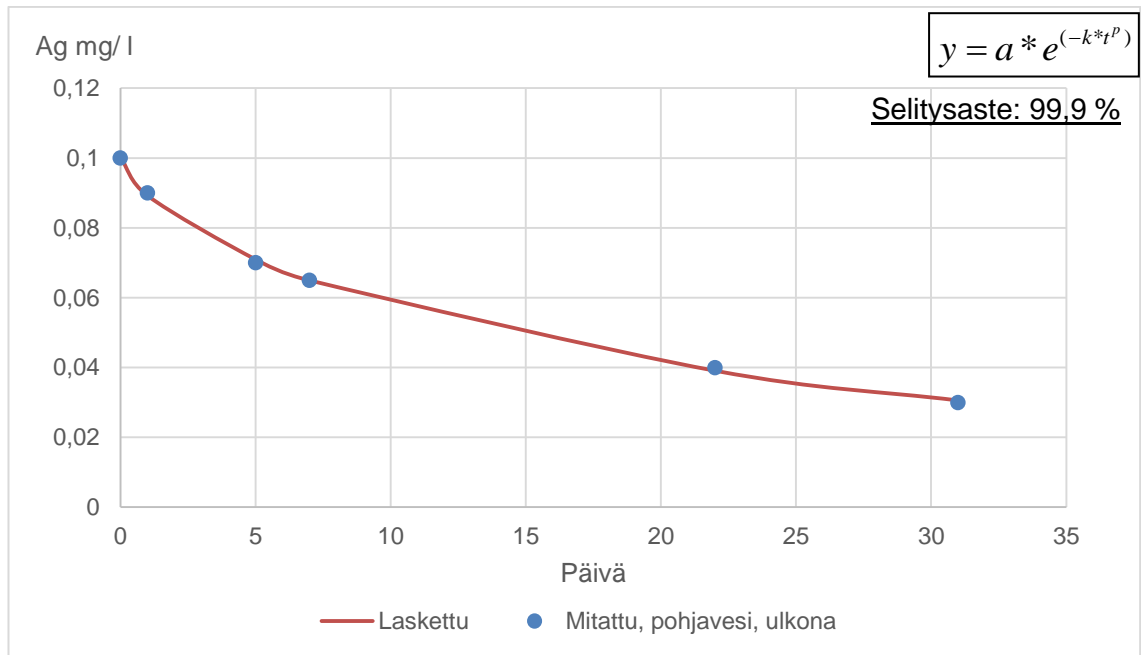
Kuva 12. Sarjassa 5. talousvesi otettiin vesijohtoverkosta, veteen lisättiin hopeayhdiste ja vesisäiliö varastoitiin rakennukseen, jossa lämpötila ja olosuhteet olivat vakioit. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvoisia hopeapitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 97,5 %:n varmuudella.



Kuva 13. Sarjassa 6. talousvesi otettiin vesijohtoverkosta, veteen lisättiin hopeayhdiste ja vesisäiliö varastoitui ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvollisia hopeapitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 99,7 %:n varmuudella.



Kuva 14. Sarjassa 7. talousvesi tuotettiin käänteisosmoosiin perustuvalla vedenpuhdistuslaitteella, veteen lisättiin hopeayhdiste ja vesisäiliö varastoitui ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvollisia hopeapitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 97,8 %:n varmuudella.

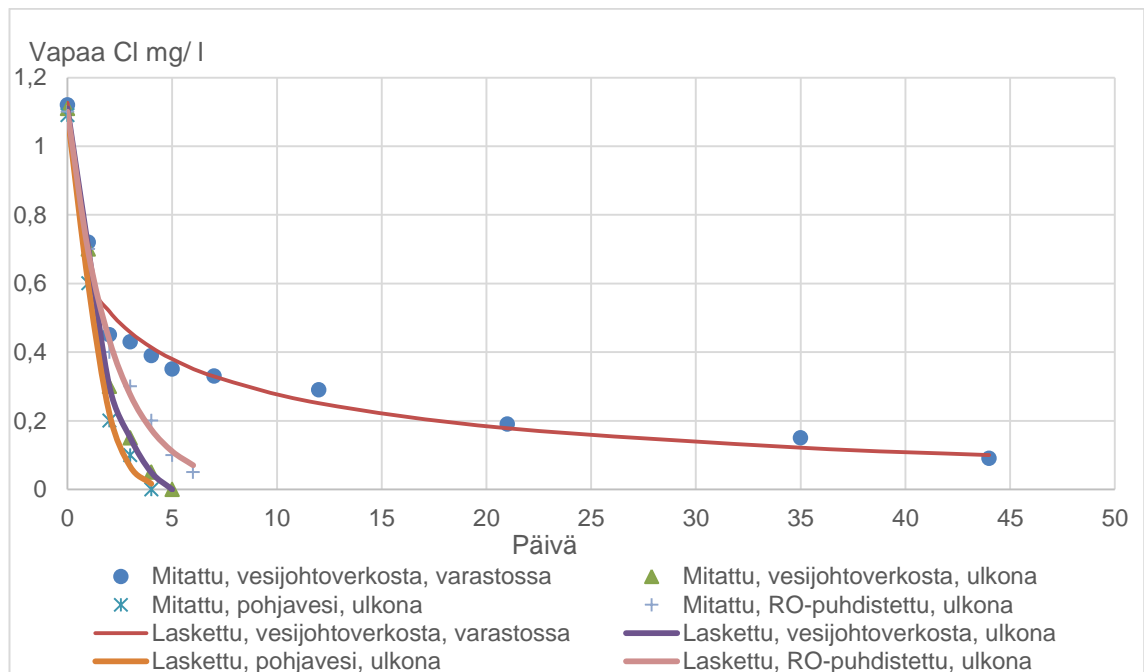


Kuva 15. Sarjassa 8. talousvesi hankittiin matalakairamenetelmällä pohjavedestä, veteen lisättiin hopeayhdiste ja vesisäiliö varastoituiin ulkona, jossa säiliö altistui lämpötilan muutoksille, sekä auringosta johtuvalle UV-säteilylle. Kuviossa voidaan verrata kolmen mittauksen keskiarvoisia hopeapitoisuuksia mallin avulla laskettuun pitoisuuteen. Yhtälö selittää mittaustuloksia 99,9 %:n varmuudella.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Vapaa klooripitoisuus

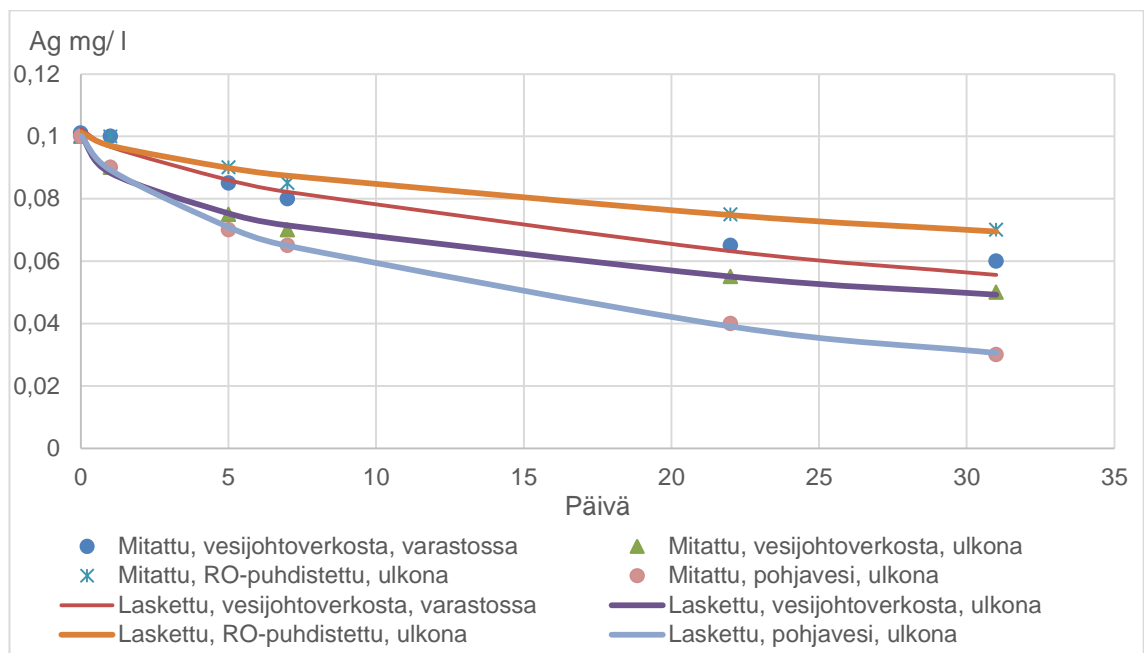
Kuviossa 16. nähdään tutkimuksessa varastoitujen talousvesien vapaan kloorin pitoisuuksien eroja. Varastossa säilytetyssä talousvedessä oli vapaata klooria mitattavissa useiden viikkojen jälkeen, kun taas kaikissa ulkona varastoiduissa säiliöissä pitoisuudet laskivat muutamassa vuorokaudessa lähelle nollaa. Lämpötilan vaihtelut sekä säiliöiden altistuminen auringon UV-säteilylle voivat selittää pitoisuuksien nopeampaa alenemaa ja tätä tukee myös teoriaosuudessa käsitelty (sivu 15) klooripitoisuuden lasku lämpötilan noustessa.



Kuva 16. Kuvasta nähdään olosuhteiden vaikutus vapaan kloorin pitoisuuteen. Ulkona varastoiduissa talousvesissä pitoisuudet laskivat nopeammin, kuin sisällä varastoidussa talousvedessä. Tutkimuksen mukaan raakaveden laadulla on myös vaikutusta vapaan kloorin pitoisuuteen.

5.2 Hopeapitoisuus

Kuvassa 17. nähdään graafisesti tutkimuksessa varastoitujen talousvesien hopeapitoisuuksien eroja. Tulosten perusteella hopeapitoisuus säilyi parhaiten kun käytössä oli käänteisosmoosilaitteella puhdistettu talousvesi. Hopeapitoisuuden säilyvyys oli heikoin kun käytössä oli matalakairamenetelmällä hankittu pohjavesi. Varastointi olosuhteet eivät vaikuttaneet yhtä voimakkaasti hopeapitoisuuksien eroihin, kuin klooripitoisuuksiin.



Kuva 17. Kuvasta nähdään olosuhteiden vaikutus talousveden hopeapitoisuuteen. Hopeapitoisuus säilyi parhaiten, kun raakavesi oli puhdistettu RO -laitteella. Heikoiten kemikaalipitoisuus säilyi pohjaveden varastoinnissa. Käänteisosmoosilaitteella puhdistetun veden ja matalakairamenetelmällä hankitun pohjaveden laatuero pystyi havaitsemaan myös silmämääräisesti. Suodattamaton pohjavesi sisältää epäpuhtauksia, joiden kanssa hopea reagoi.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa selvitettiin kahden erityyppisen desinfiointikemikaalin pitoisuuksien muutosta varastoitavassa talousvedessä. Tuloksista voidaan päätellä talousveden hankintamenetelmällä olevan merkitystä molempien tutkittujen kemikaalityyppien pitoisuuksiin varastointiaikana. Varastointiolosuhteet vaikuttavat myös talousveden kemikaalipitoisuuteen.

Tutkimuksessa käytetty kloorivalmiste soveltuu paremmin tilanteisiin, joissa tarvitaan nopea desinfiointivaikutus, mutta arvioitu talousveden varastointiaika on vain muutamia vuorokausia. Lisäksi varastointiolosuhteet vaikuttavat klooripitoisuuteen vedessä, jolloin talousvesi olisi hyvä suojata mahdollisimman hyvin lämpötilan vaihteluilta ja muilta ympäristövaikutuksilta, kuten auringosta johtuvasta UV-säteilystä.

Tutkimuksessa käytetty hopeavalmiste soveltuu kloorivalmistetta paremmin talousveden pitkäaikaiseen varastointiin tai olosuhteisiin, joissa talousvesi altistuu enemmän laatua heikentäville ympäristövaikutuksille. Tutkimuksen perusteella hopeapitoisuus ei laske talousvedessä yhtä voimakkaasti kuin vastaavissa olosuhteissa käytetty kloorivalmiste.

Jatkotutkimuksena voisi olla esimerkiksi mikrobiologinen näkökulma, jossa tutkitaan erilaisten vedenpuhdistuskemikaalien vaikutusta vesisäiliöiden seinämiin muodostuvan biofilmin kasvuun. Lisäksi voisi tutkia säiliölogistiikkaan perustuvaa vesihuoltojärjestelmää ja sitä, millaisia kemikaalipitoisuuksia on talousvedessä jäljellä, kun vesi päätyy useiden säiliöiden jälkeen loppukäyttäjälle.

Lähteet

- 1 Talousvesi..<www.thl.fi/web/ymparistoterveys/vesi/talousvesi/talousveden-laadunvalvonta> Luettu 1.7.2016
- 2 Talousvesi. <www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveydensuojelu/talousvesi> Luettu 1.2.2016
- 3 Puolustustilalaki. <www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1991/19911083> Luettu 2.3.2016
- 4 Vikman, Hannu ja Arosilta, Anna. 2006. Ympäristöopas/ vesihuollon erityistilanteet ja niihin varautuminen/
- 5 Puolustusvoimat. 2009. Kenttähygieniakäsikirja
- 6 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista. <www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140442> Luettu 2.3.2016
- 7 Colilert. <www.valvira.fi/documents/14444/50159/Rap017_2009_lopullinen.pdf> Luettu 15.3.2016
- 8 Colilert. <www.idexx.com/pdf/en_us/water/colilert-brochure.pdf> luettu 15.3.2016
- 9 Puolustusvoimat. 2002. Huoltopalveluopas
- 10 EVIRA. 2014. Elintarvikkeiden ja talousveden kemialliset vaarat
- 11 Kärcher, 2010. 1600 GT käyttöohje
- 12 HACH Pocketcolorimeter2 käyttöohje
- 13 Vesi- ja viemärlaitosyhdistys. 2013. Vesilaitostekniikka ja hygienia
- 14 Kloori. <www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chlorine.pdf> Luettu 1.6.2016
- 15 Hopea. <www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/silver.pdf> Luettu 1.6.2016
- 16 Q.L. Feng, G.Q. Chen, F.Z. Cui, T.N. Kim, J.O. Kim. 1999-2000. A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*
- 17 Finncont. Käyttöohje. vesisäiliö 1000 litraa

- 18 Kloori. <www.hach.com/cms-portals/hach_com/cms/documents/pdf/LIT/L7019-ChlorineAnalysis.pdf> Luettu 22.4.2016
- 19 MP-AES.
<www.agilent.com/cs/library/slidepresentation/Public/ASTS2013_Lower_Operating_Costs_Safer_Operation_More_Productive_MP-AES.pdf> Luettu 12.5.2016
- 20 Opinnäytetyö. Aili Kähkönen. 2010. Puolustusvoimien vedenhankintamenetelmät poikkeusoloissa
- 21 Kloori. <www.ttl.fi/ova/kloori.html> Luettu 12.6.2016
- 22 Hopea. <www.katadyn.com> Luettu 12.6.2016

LIITE 1: Mallinnus pienimmän neliösumman menetelmällä

Havaintomatriisi, vapaan kloorin pitoisuudet

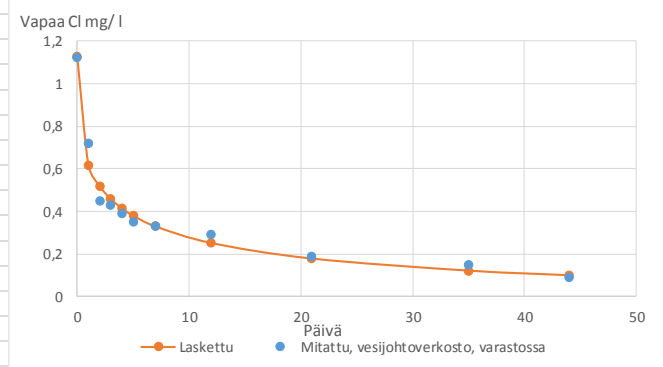
Vapaa Cl-mittaukset			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Päivä	Vesilähde	Varastointi	Cl pitoisuus 1	Cl pitoisuus 2	Cl pitoisuus 3	Pitoisuus keskiarvo
0	Vesijohtoverkko	Sisällä	1,12	1,13	1,12	1,12
0	Vesijohtoverkko	Ulkona	1,11	1,12	1,11	1,11
0	Pohjavesi	Ulkona	1,09	1,09	1,09	1,09
0	RO-puhdistettu	ulkona	1,1	1,11	1,09	1,10
1	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,72	0,71	0,73	0,72
1	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,69	0,71	0,7	0,70
1	Pohjavesi	Ulkona	0,6	0,61	0,6	0,60
1	RO-puhdistettu	ulkona	0,71	0,7	0,7	0,70
2	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,45	0,46	0,45	0,45
2	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,3	0,3	0,31	0,30
2	Pohjavesi	Ulkona	0,2	0,21	0,2	0,20
2	RO-puhdistettu	ulkona	0,4	0,4	0,4	0,40
3	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,43	0,42	0,43	0,43
3	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,15	0,16	0,14	0,15
3	Pohjavesi	Ulkona	0,1	0,1	0,09	0,10
3	RO-puhdistettu	ulkona	0,3	0,3	0,31	0,30
4	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,39	0,4	0,39	0,39
4	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,05	0,05	0,05	0,05
4	Pohjavesi	Ulkona	0	0	0	0,00
4	RO-puhdistettu	ulkona	0,2	0,2	0,21	0,20
5	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,35	0,34	0,35	0,35
5	Vesijohtoverkko	Ulkona	0	0	0	0,00
5	RO-puhdistettu	ulkona	0,1	0,1	0,09	0,10
6	Vesijohtoverkko	Sisällä	ei mitattu	ei mitattu	ei mitattu	
6	RO-puhdistettu	ulkona	0,05	0,04	0,05	0,05
7	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,33	0,32	0,34	0,33
12	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,3	0,29	0,3	0,30
21	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,19	0,2	0,19	0,19
35	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,15	0,14	0,15	0,15
44	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,09	0,09	0,1	0,09

Vapaa klooripitoisuus

a	1,126725841			
k	0,600955101			
p	0,368004447			
	Vesijohtoverkosta, varastossa	$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	mitattu vapaa kloori mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	1,12	1,126725841	4,52369E-05	0,5041
1	0,72	0,617769938	0,010450986	0,0961
2	0,45	0,518789762	0,004732031	0,0016
3	0,43	0,457919516	0,000779499	0,0004
4	0,39	0,414114852	0,000581526	0,0004
5	0,35	0,380117433	0,00090706	0,0036
7	0,33	0,329392596	3,6894E-07	0,0064
12	0,29	0,251498336	0,001482378	0,0144
21	0,19	0,178483941	0,00013262	0,0484
35	0,15	0,121927154	0,000788085	0,0676
44	0,09	0,100288262	0,000105848	0,1024
summa	4,51	4,497027632	0,020005639	0,8454
Keskiarvo	0,41	0,408820694		

$$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$$

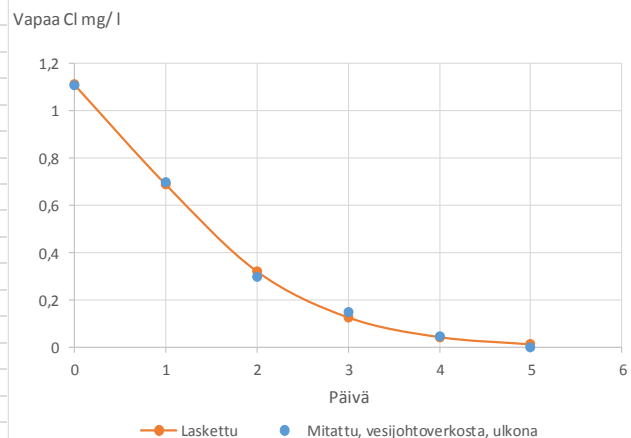
0,976 *100 %
Selitysaste 97,6 %



a	1,111878701			
k	0,476465466			
p	1,376298472			
	Vesijohtoverkosta, ulkona	$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	Mitattu vapaa kloori mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	1,11	1,111878701	3,52952E-06	0,525625
1	0,7	0,690448178	9,12373E-05	0,099225
2	0,3	0,32275551	0,000517813	0,007225
3	0,15	0,128075216	0,000480696	0,055225
4	0,05	0,04482503	2,67803E-05	0,112225
5	0	0,01413168	0,000199704	0,148225
summa		2,312114315	0,001319761	0,94775
Keskiarvo	0,385	0,385352386		

$$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$$

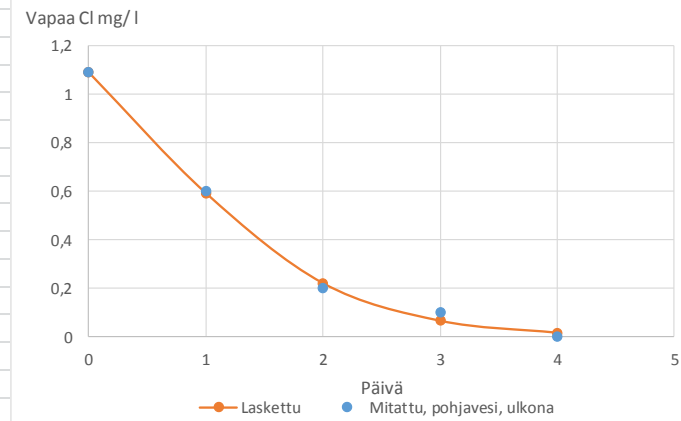
0,999 *100 %
Selitysaste 99,9 %



a	1,091174142			
k	0,609575265			
p	1,387760697			
	Pohjavesi, ulkona	$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SSt = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	Mitattu vapaa kloori mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	1,09	1,091174142	1,37861E-06	0,478864
1	0,6	0,593142293	4,70281E-05	0,040804
2	0,2	0,221388825	0,000457482	0,039204
3	0,1	0,066354612	0,001132012	0,088804
4	0	0,016795397	0,000282085	0,158404
summa	1,99	1,988855269	0,001919986	0,80608
Keskiarvo	0,398	0,397771054		

$$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$$

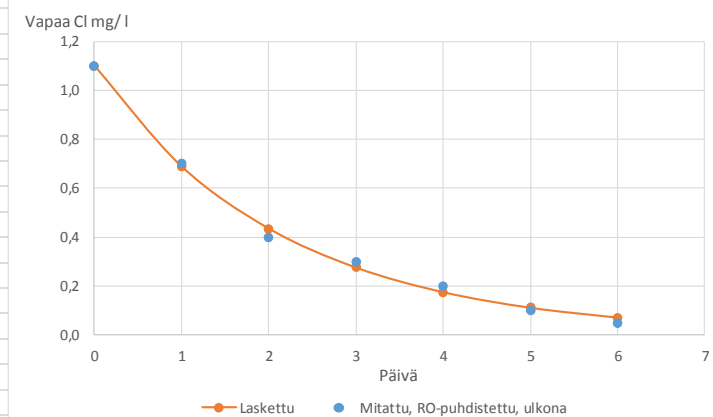
Selitysaste 0,998 *100
Selitysaste 99,8 %



a	1,100654494			
k	0,46823357			
p	0,987238935			
	RO, ulkona	$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SSt = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	Mitattu vapaa kloori mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	1,1	1,1	4,28E-07	0,48
1	0,7	0,7	1,18E-04	0,09
2	0,4	0,4	1,23E-03	0,00
3	0,3	0,3	6,01E-04	0,01
4	0,2	0,2	6,36E-04	0,04
5	0,1	0,1	1,22E-04	0,09
6	0,05	0,1	4,27E-04	0,13
summa	2,85	2,9	3,13E-03	0,84
Keskiarvo	0,41	0,4		

$$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$$

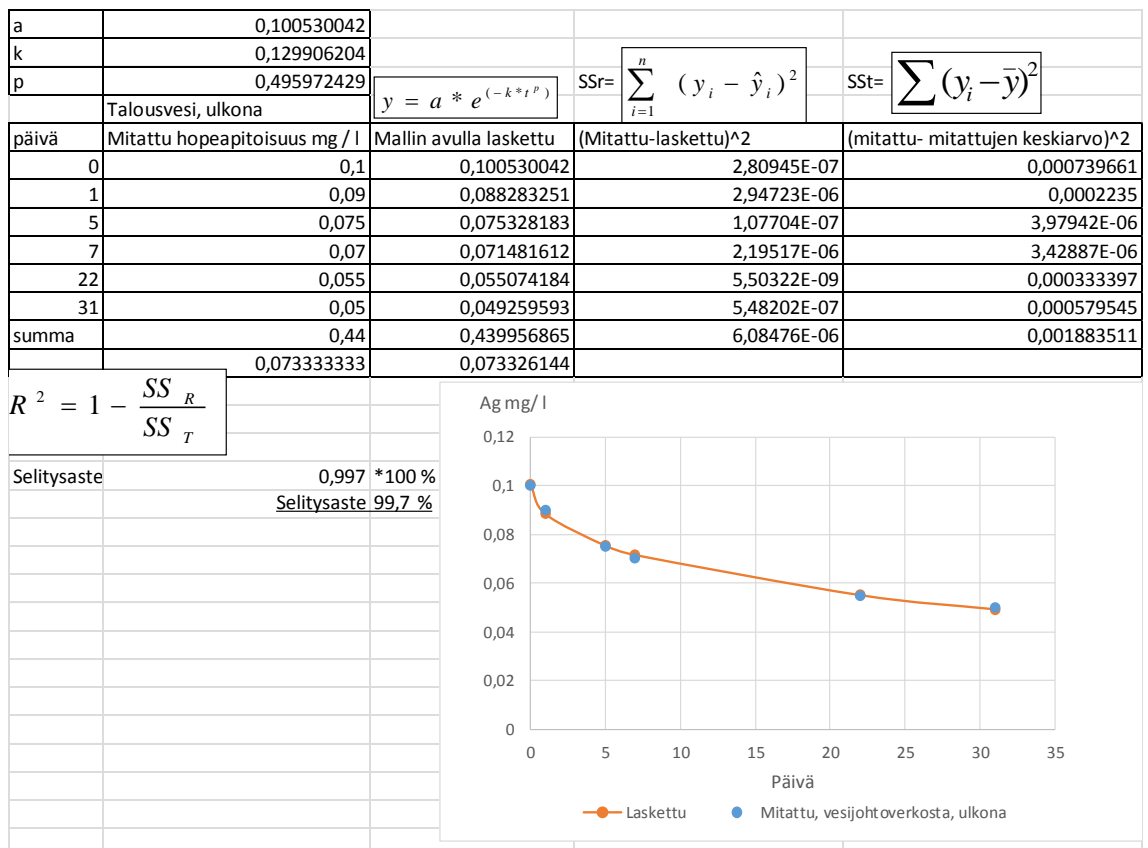
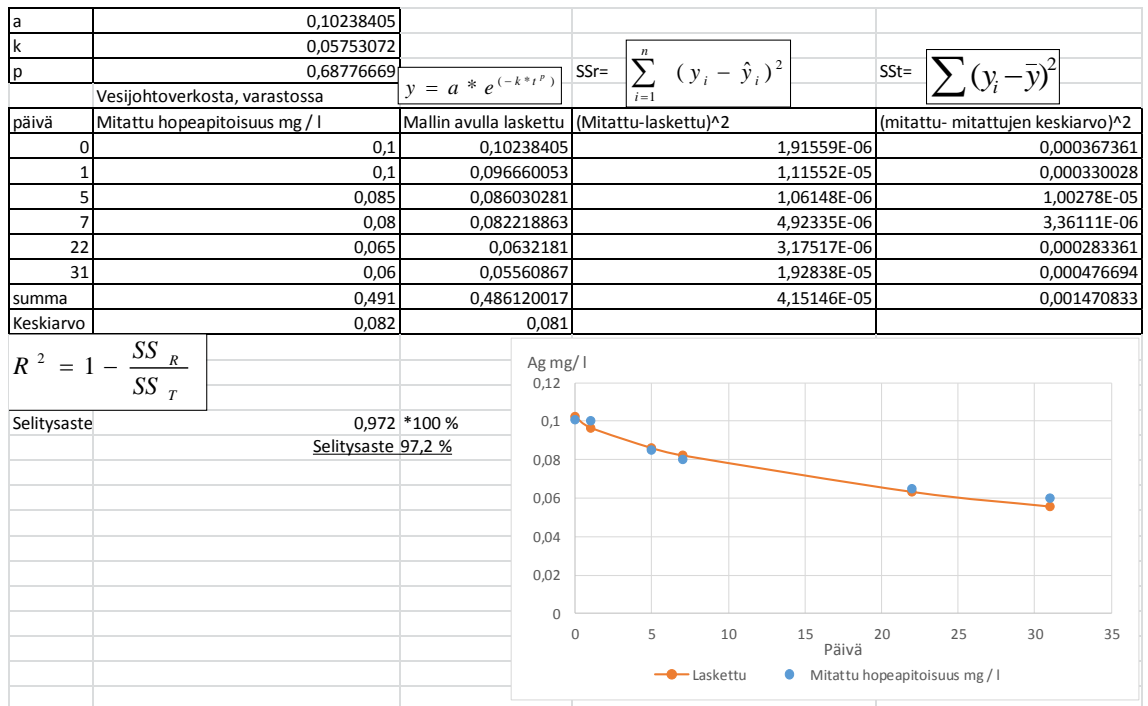
Selitysaste 0,996 *100%
Selitysaste: 99,6 %



Havaintomatriisi, hopeapitoisuudet

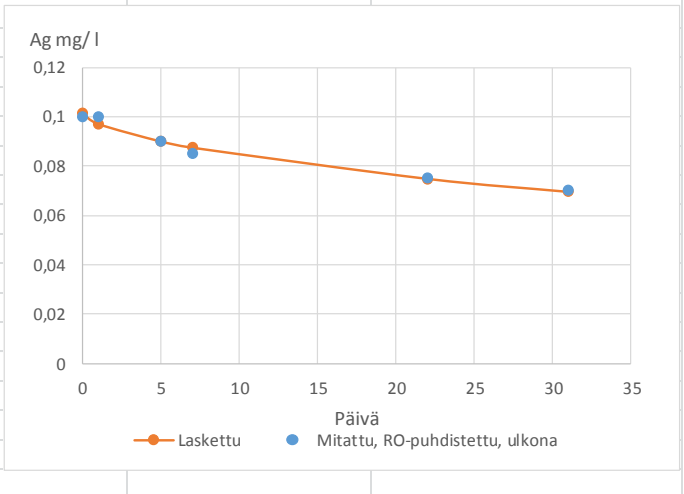
Hopeapitoisuusmittaukset			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Päivä	Vesilähde	Varastointi	Hopeapitoisuus 1	Hopeapitoisuus 2	Hopeapitoisuus 3	Pitoisuus keskiarvo
0	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,101	0,101	0,101	0,101
0	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,1	0,1	0,1	0,1
0	Pohjavesi	Ulkona	0,1	0,1	0,1	0,1
0	RO-puhdistettu	Ulkona	0,1	0,1	0,1	0,1
1	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,1	0,1	0,1	0,1
1	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,09	0,09	0,09	0,09
1	Pohjavesi	Ulkona	0,09	0,09	0,09	0,09
1	RO-puhdistettu	Ulkona	0,1	0,1	0,1	0,1
5	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,085	0,085	0,085	0,085
5	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,075	0,075	0,075	0,075
5	Pohjavesi	Ulkona	0,07	0,07	0,07	0,07
5	RO-puhdistettu	Ulkona	0,09	0,09	0,09	0,09
7	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,08	0,08	0,08	0,08
7	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,07	0,07	0,07	0,07
7	Pohjavesi	Ulkona	0,065	0,065	0,065	0,065
7	RO-puhdistettu	Ulkona	0,085	0,085	0,085	0,085
22	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,065	0,065	0,065	0,065
22	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,055	0,055	0,055	0,055
22	Pohjavesi	Ulkona	0,04	0,04	0,04	0,04
22	RO-puhdistettu	Ulkona	0,075	0,075	0,075	0,075
31	Vesijohtoverkko	Sisällä	0,06	0,06	0,06	0,06
31	Vesijohtoverkko	Ulkona	0,05	0,05	0,05	0,05
31	Pohjavesi	Ulkona	0,03	0,03	0,03	0,03
31	RO-puhdistettu	Ulkona	0,07	0,07	0,07	0,07

Hopeapitoisuudet



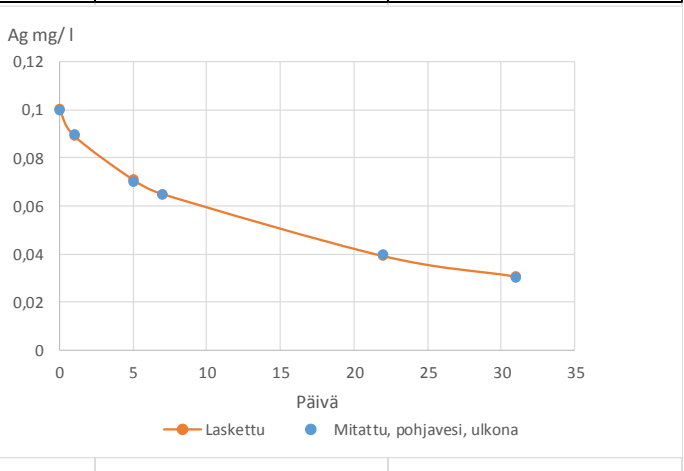
a	0,101335567			
k	0,04343946			
p	0,629241259			
RO, ulkona		$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SSt = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	Mitattu hopeapitoisuus mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	0,1	0,101335567	1,78374E-06	0,000177778
1	0,1	0,097027845	8,83371E-06	0,000177778
5	0,09	0,089913187	7,53648E-09	1,11111E-05
7	0,085	0,087413006	5,8226E-06	2,77778E-06
22	0,075	0,074786276	4,5678E-08	0,000136111
31	0,07	0,069509542	2,40549E-07	0,000277778
summa	0,52	0,519985423	1,67338E-05	0,000783333
keskiarvo	0,086666667	0,086664237		

$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$	
Selitysaste	0,979 *100 % Selitysaste 97,9 %

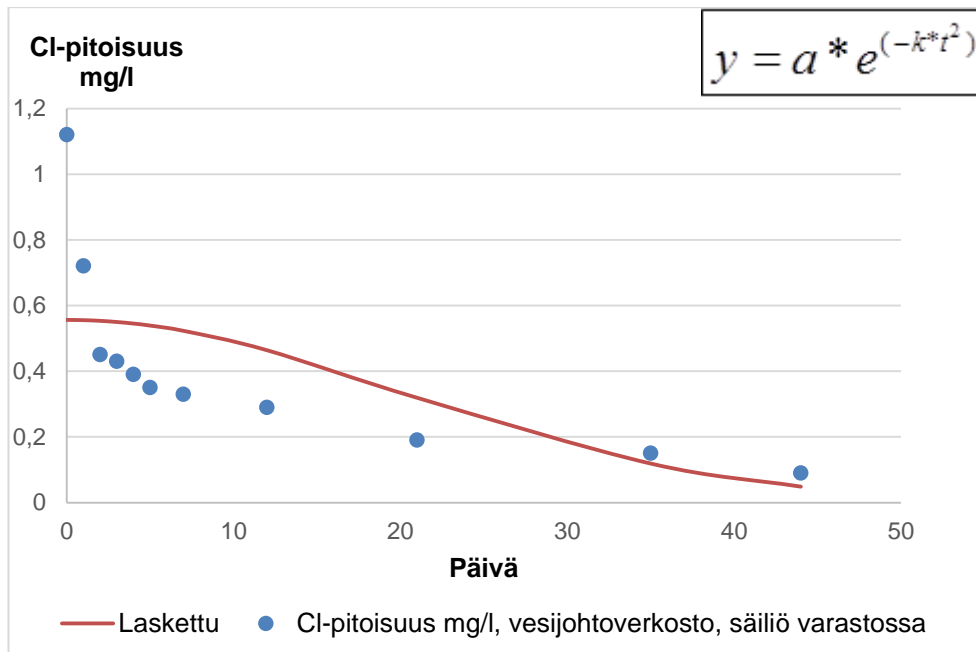


a	0,100252279			
k	0,116517861			
p	0,676117244			
pohjavesi, ulkona		$y = a * e^{(-k * t^p)}$	$SSr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$SSt = \sum (y_i - \bar{y})^2$
päivä	Mitattu hopeapitoisuus mg / l	Mallin avulla laskettu	(Mitattu-laskettu)^2	(mitattu- mitattujen keskiarvo)^2
0	0,1	0,100252279	6,36445E-08	0,001167361
1	0,09	0,089225952	5,99151E-07	0,000584028
5	0,07	0,070935272	8,74734E-07	1,73611E-05
7	0,065	0,064935974	4,09937E-09	6,94444E-07
22	0,04	0,039085059	8,37116E-07	0,000667361
31	0,03	0,030567339	3,21873E-07	0,001284028
Summa	0,395	0,395001874	2,70062E-06	0,003720833
Keskiarvo	0,065833333	0,065833646		

$R^2 = 1 - \frac{SS_R}{SS_T}$	
Selitysaste	0,999 *100 % Selitysaste 99,9 %

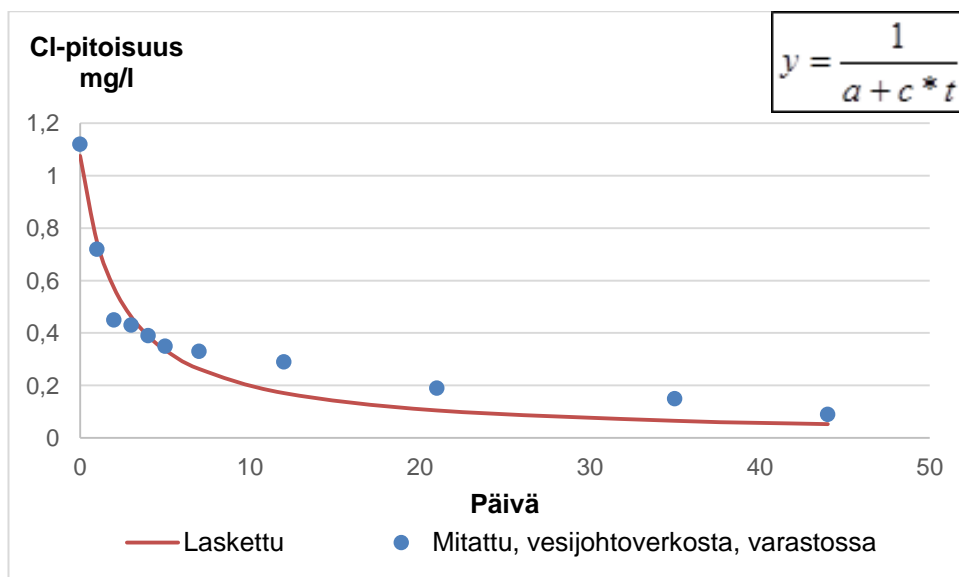


Sovitteiden vertailu:



Ei sopiva sovite:

$$y = a * e^{(-k*t^2)}$$



Osittain sopiva sovite:

$$y = \frac{1}{a + c*t}$$