

VEDEN TUOTANTOON JA JAKELUUN LIITTYVIEN HÄIRIÖIDEN MONITOROINTI

Laura Huikko
Ympäristötieteen koulutusohjelma
Kuopion yliopiston, ympäristötieteen laitos
heinäkuu 2007

KUOPION YLIOPISTO, Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta
Ympäristötieteen koulutusohjelma
Huikko, Laura: Veden tuotantoon ja jakeluun liittyvien häiriöiden monitorointi
Opinnäytetutkielma 51 sivua
Opinnäytetutkielman ohjaajat: FT Arja Hirvonen, FM Satu Mustonen ja DI Soile Tissari
heinäkuu 2007

Avainsanat: on-line-monitorointi, laskennallisesti älykkäät menetelmät, SOM-kartta, Sammonin kuvaus

Tiivistelmä

Talousveden tulee olla laadultaan hyvää ja terveydelle vaaratonta. Yleensä talousveden laadun heikkoudet eivät johdu vedenpuhdistusprosessista, vaan laadullisia ongelmia esiintyy vasta vesijohtoverkostossa. Yleisimmät vesijohtoverkostossa ilmenevät ongelmat ovat mikrobimäärän lisääntyminen, kohonnut rautapitoisuus (rautaputkistoissa) ja lisääntynyt sameus. Häiriötilanteiden tutkiminen todellisessa vesijohtoverkostossa on vaikeaa monien kontrolloimattomissa olevien muuttujien takia.

Tutkimuksessa käytettiin Pilot-vesilaitoksen ja koevesijohtoverkoston muodostamaa kokonaisuutta. Pilot-vesilaitos on tyypillisen suomalaisen pintavesilaitoksen pienoismalli, jossa raakavesi puhdistettiin rautasuolakoaguloinnin, pikahiekka-suodatuksen ja UV-käsittelyn avulla. Valmis vesi jälkidesinfioitiin kloorilla ja johdettiin koevesijohtoverkoston. Koevesijohtoverkosto koostuu kahdesta verkostosta, ns. runkolinjoista ja kiinteistöverkostoa simuloivasta ohutputkisemmasta verkostosta. Kiinteistöverkosto käsittää kaksi rinnakkaista 100 metriä pitkää kupari- ja polyeteenikomposiittiputkilinjaa. Kiinteistöverkostossa on jokaisella putkilinjalla on-line-monitorointia varten virtaus-, paine- ja lämpötilamittauslaitteet sekä rinnakkaisten putkilinjojen kesken vaihdettavissa olevat sameuden, pH:n ja sähkönjohtokyvyn mittauslaitteet. Lisäksi käytössä on yksi partikkelilaskuri. On-line-monitoroinnin data välittyy tietokantaan jatkokäsittelyä varten.

On-line-monitoroinnista saatua dataa tutkittiin laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla. Koevesijohtoverkoston simuloitujen häiriötilanteet (paineiskut ja veden virtausnopeuden nostot) voitiin erottaa ns. normaalitilanteista SOM kartan ja Sammonin kuvauksen avulla. Suurimmat muutokset havaittiin verkostoveden partikkelimäärässä ja sameudessa. Simuloitujen häiriöiden lisäksi paineiskukoejakson aikana havaittiin tahaton vedentuotantoprosessin häiriö, joka aiheutti veden pH-arvossa muutoksia. Myös tämä häiriötilanne oli selkeästi havaittavissa datasta laskennallisesti älykkäillä menetelmillä.

Eri putkimateriaalien välillä havaittiin eroja sekä mikrobistossa että häiriötilanteen aikana veteen irtoavan aineksen määrässä. Veden laadun on-line-monitoroinnissa käyttökelpoisimmiksi mittauslaitteiksi osoittautuivat sameus- ja partikkelimittauslaitteet. Laskennallisesti älykkäät menetelmät soveltuivat veden laadullisten muutosten tutkimiseen ja häiriötilanteiden havaitsemiseen, mutta lisätutkimuksia menetelmien soveltamiseen puhdasvesipuolella tarvitaan.

UNIVERSITY OF KUOPIO, Faculty of Natural and Environmental Sciences
Department of Environmental Sciences
Huikko, Laura: Monitoring of disturbances connected with the production and distribution of drinking water
Master's thesis 51 pages
Advisors: PhD Arja Hirvonen, MSC Satu Mustonen and MSC Soile Tissari
July 2007

key words: on-line-monitoring, computationally intelligent methods, Self Organizing Map, Sammon's mapping

Abstract

Drinking water needs to be of high quality and free of health hazards. Usually water treatment processes are not the reason for possible impurities in drinking water. In stead, problems with drinking water quality are found in the water distribution system. The most common problems found in water distribution systems are microbial growth, higher concentrations of iron and increased turbidity. Studying the interferences causing these changes in water quality is difficult in actual water distribution systems due to many uncontrollable variables.

This study used a Pilot water treatment plant with a pilot drinking water distribution system. The Pilot water treatment plant is a replica of a typical Finnish water treatment plant, where raw water from a lake is purified using iron sulphate coagulation, sand filtration and UV-light disinfection. The drinking water was also post-disinfected with chloride before it was released into the water distribution system. The drinking water distribution system consists of two complexes, a so-called base pipeline and a household pipeline. The latter included two parallel 100 meter long pipelines of copper and polyethenecomposite pipes. These pipelines were all on-line-monitored with velocity, pressure and temperature meters. Parallel pipelines could be monitored also with turbidity, pH and conductivity meters. There was also a particle counter connected to all four pipelines. The measured data was transmitted to a database for further processing.

The data from on-line-monitors was explored using computationally intelligent methods. The simulated fault situations (pressure shocks and water flow changes done in household pipeline) could be distinguished from normal situations by using SOM and Sammon's mapping. The largest changes were found in the particle amounts and the turbidity of the drinking water. In addition to the simulated interferences there was an unintended interference in the water treatment processes resulting in changes in pH of the drinking water. This interference was also detected from data with computationally intelligent methods.

There were differences between pipe materials in both microbes and particle amounts released into the drinking water during fault situations. Turbidity meter and particle counter were found to be the most useful on-line-monitoring devices for monitoring the drinking water quality. Computationally intelligent methods were suitable for studying changes in water quality and for detecting interferences but further studies are needed.

ESIPUHE

Lämpimät kiitokset ohjaajilleni Arja Hirvoselle, Satu Mustoselle ja Soile Tissarille kaikesta avusta, opastuksesta ja ideoimisesta tutkimus- ja kirjoitusprosessin aikana. Kiitokset myös kärsivällisyydestä kirjoittamisen venyessä sekä ennen kaikkea kannustavasta työilmapiiristä, jossa oli helppo oivaltaa ja onnistua!

Kiitokset Markku Lehtolalle, Tero Kuhmoselle ja Matti Pessille VAINU-projektin käytännön koejärjestelyiden esittelystä ja kaikkiin visaisiin kysymyksiini vastaamisesta. Teidän ansiosta oli helppo ymmärtää kokeiden tuloksia, vaikken itse kokeita ollut mukana tekemässä.

Kiitokset rakkaille kurssikavereilleni monista kahvitteluhetkistä kioskilla ja ajatusten jakamisesta. Lämpimät kiitokset vanhemmilleni ja veljelleni tuesta ja kannustuksesta. Te kaikki annoitte minulle voimia jaksaa kun kirjoittaminen takkusi ja olitte iloitsemassa kanssani kun työ eteni.

Aivan erityiset kiitokset omalle rakkaalle pojalleni Kasperille hillitystä aamupahoinvoinnista ja muutenkin kaikin puolin leppoisasti sujuneesta maha-asukkina olostasi. Kiitos, että maltoit odottaa kunnes sain kaiken kirjoitettua sillä nyt minulla on kaikki aika maailmassa suukotella ja halailla sinua!

Kuopiossa 30 lokakuuta 2007

LYHENTEET JA TERMIT

ANN = keinotekoinen neuroverkko, engl. Artificial Neural Network

AOC = mikrobeille käyttökelpoinen orgaaninen hiili, engl. Assimilable Organic Carbon

AODC = veden kokonaismikrobimäärä, määritetty mikroskooppisuoralaskennalla akriidiinioranssivärjäyksen jälkeen

Data = On-line-mittareiden mittaustulokset, jotka on tallennettu tietokantaan

HPC = heterotrofisten bakteerien määrä, engl. Heterotrophic Plate Count

MAP = mikrobeille käyttökelpoinen fosfori, engl. Microbially Available Phosphorus

Neuroni = Neuroverkkomalleissa keinotekoinen neuroni (artificial neuron), laskennallinen perusyksikkö joka kokoaa syötearvot, laskee niiden perusteella vasteen ja lähettää vasteen verkossa eteenpäin.

On-line-monitorointi = reaaliaikainen jatkuva mittaus

Opetus = Neuroverkkomallin parametrien viritys opetusjoukon avulla.

Opetusjoukko = Neuroverkon tyypillisestä toimintaympäristöstä kerätty joukko syötteitä ja haluttuja vasteita.

Outlier = Sammonin kuvauksessa normaalitilanteesta poikkeavia mittaustuloksia sisältävä ympyrä.

Painot, painokertoimet = Neuronien välisten kytkentöjen voimakkuudet, jotka yleensä toteutetaan jatkuva-arvoisina lukuina. Neuroverkoissa painoilla on keskeinen osuus verkkojen suorittaman informaationkäsittelytehtävän kannalta. Oppimisen tulos koodautuu painoihin

Sammonin kuvaus = iteratiivinen algoritmi, jolla n -ulotteinen datajoukko voidaan kuvata kaksiulotteiseksi siten, että datapisteiden väliset parittaiset suhteelliset keskinäiset etäisyydet ovat mahdollisimman lähellä alkuperäisiä

SOM = itseorganisoituva kartta, engl. Self-Organizing Maps. Tunnetuin ohjaamattomaan oppimiseen perustuvista neuroverkkomalleista, jota voi käyttää syötejoukon ryhmittelyyn ja visualisointiin

1. JOHDANTO	1
2. KIRJALLISUUS	2
2.1 Talousvesi	2
2.2 Talousveden laadun seuranta ja lainsäädäntö	5
2.3 Veden laadun monitorointi	11
2.4 Laskennallisesti älykkäät menetelmät	13
3. AINEISTO JA MENETELMÄT	15
3.1. Yleinen koejärjestely	15
3.1.1 Pilot-vesilaitos	15
3.1.2. Koevesijohtoverkosto	16
3.1.3 Vesianalyysit	18
3.1.4 On-line -monitorointi	19
3.2. Paineiskukoe	20
3.3. Veden virtausnopeuden nostokoe	21
3.4. On-line-datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.....	22
3.5. Tilastolliset menetelmät	23
4. TULOKSET	23
4.1. Paineiskukoe	23
4.1.1. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu	23
4.1.2. Koevesijohtoverkoston veden laatu	24
4.1.3. On-line -monitorointi	27
4.1.3.1. Partikkelit	27
4.1.3.2. Sameus	30
4.1.3.3. Sähkönjohtokyky	31
4.1.4. On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.....	32
4.1.5. Tilastolliset menetelmät	35
4.1.5.1. Korrelaatio	35
4.2 Veden virtausnopeuden nostokoe	35
4.2.1. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu	35
4.2.2. Koevesijohtoverkoston veden laatu	36
4.2.3. On-line -monitorointi	38
4.2.3.1. Partikkelit	38
4.2.3.2. Sameus	40
4.2.4. On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.....	40
5. TULOSTEN TARKASTELU	44
5.1 Yleinen koeasetelma	44
5.2 Koevesijohtoverkoston veden laatu	45
5.3 On-line -monitorointi	46
5.4 On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.....	48
6. JOHTOPÄÄTELMÄT	50
Lähteet.....	52

1. JOHDANTO

Talousveden tulee olla laadultaan hyvää ja terveydelle vaaratonta. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 461/2000 (STM 2000) ja Euroopan unionin neuvoston direktiivi 98/83/EY (EY 1998) asettavat tarkat laatuvaatimukset, jotka talousveden tulee täyttää koko matkan vedenpuhdistamolta verkostoa pitkin aina kuluttajalle saakka. Talousveden laatuun vaikuttavat tekijät ovat fysikaalis-kemiallisia sekä mikrobiologisia muuttujia. Olennaisesti laatuun vaikuttaa käytetyn raakaveden ominaisuudet, talousveden valmistusprosessi ja sen aikana tapahtuvat kemialliset muutokset vedessä, sekä jakeluverkoston ominaisuudet. Yleensä talousveden laadun heikkoudet eivät johdu vedenpuhdistusprosessista, vaan laadullisia ongelmia esiintyy vasta vesijohtoverkostossa. Yleisimmät vesijohtoverkostossa ilmenevät ongelmat ovat veden mikrobimäärän lisääntyminen, kohonnut rautapitoisuus (rautaputkistoissa) ja lisääntynyt sameus. Etenkin vanhoissa vesijohtoverkostoissa myös veden kulutus vaikuttaa veden laatuun huonontaan sitä korkean kulutuksen aikana (Lehtola ym. 2004a). Niin ikään jakeluverkoston äkilliset painenvaihtelut, erilaiset käyttöhäiriöt ja puutteellinen vedenpuhdistus vaikuttavat mm. raudan, mangaanin ja koliformisten bakteerien raja-arvojen ylityksiin talousvesissä (Zacheus, 2002).

Talousveden laatua määräävät tekijät ovat monitahoisia, joten niiden tutkiminen on haasteellista erityisesti todellisissa olosuhteissa; käytössä olevissa vesijohtoverkostoissa. Koevesijohtoverkosto on tutkimusympäristönä helpommin kontrolloitavissa kuin oikea vesijohtoverkosto ja sen avulla on mahdollista saada sovelluskelpoisempia tuloksia kuin laboratoriossa tehtävistä ns. pullokokeista.

Perinteisesti talous- tai jätevesien laatua seurataan lakisääteisten jaksottaisten mittausten avulla, jotka kuvaavat veden laadun muutosta ja sen suuntaa vain rajoitetusti. Etenkin jätevesien reaaliaikaisen eli on-line -monitoroinnin kehittäminen paremman vedenpuhdistustuloksen optimoimiseksi on ollut viime vuosina tutkimuksen kohteena (Vanrolleghem ja Lee 2003, Rosen ym. 2003). Lisäksi luonnonvesiä on monitoroitu on-line -mittareiden avulla: esim. Kaliforniassa sijaitsevan joen happipitoisuutta seurattiin ja tarvittaessa jokea ilmastettiin, mikäli mittaustulokset osoittivat liian matalia happipitoisuuksia (Quinn ym. 2005).

On-line -mittauslaitteiden ja -sensoreiden kehittyminen on mahdollistanut reaaliaikaisen prosessimonitoroinnin. Jatkuva monitorointi tuottaa kuitenkin valtavat määrät dataa, jota ei voida käsitellä perinteisin keinoin. Suurten datamäärien käsittelyyn on kehitetty ns. älykkään laskennan menetelmiä, joiden avulla voidaan analysoida tietoa ja jalostaa sitä eri loppukäyttäjille soveltuvaan muotoon. Nämä datan käsittelymenetelmät mahdollistavat myös datan visualisoinnin. Yhdistettäessä reaaliaikainen datan keruu keinotekoisien neuroverkon (Artificial Neural Network, ANN) käyttöön, voidaan jopa ennustaa ja pyrkiä välttämään vesijohtoverkoston halkeamia (Mounce ym. 2003). Myös luonnonvesien monitorointiin on kehitetty ennustemalleja ANN:ia hyödyntämällä. Tästä hyvänä esimerkkinä on Australiassa sijaitsevan puhdasvedenvalmistuksen kannalta erittäin tärkeän joen suolaisuuden ennustaminen (Bowden ym. 2005).

Tämän työn tarkoituksena on selvittää vedentuotanto ja -jakelu ympäristöön liittyvien häiriötilanteiden monitorointia on-line -mittausten avulla. Tutkimusaineistona on pilotmittakaavassa tehtyjen koesarjojen mittaustuloksia. Näissä koesarjoissa oli tutkittu veden virtausnopeuden muutosten ja äkillisten paineiskujen vaikutuksia talousveden laatuun veden johtamisen aikana. Työn tavoitteena on myös selvittää ns. datapohjaisten laskennallisesti älykkäiden menetelmien käyttökelpoisuutta on-line mittausaineiston käsittelyssä.

2. KIRJALLISUUS

2.1 Talousvesi

Suomessa on muuhun maailmaan verrattuna erittäin hyvä tilanne talousveden tuottamisen kannalta. Suomessa on lukemattomien järvien lisäksi paljon antoisia pohjavesialueita, joita kaikkia ei vielä edes käytetä vedentuotannossa. Suomessa on arvioitu muodostuvan pohjavettä vuorokaudessa lähes 6 miljoonaa m³, josta vain 0,7 miljoonaa m³ käytetään talousveden tuotantoon (www.ymparisto.fi-portaali, Pohjavesien kartoitus). Muualla Euroopassa raakavesivarannot ovat usein kontaminoituneita (Karttunen 2003). Veden laatu on huonontunut mm. lisääntyneen vedenkulutuksen ja puutteellisten jätevedenkäsittelyjen sekä lisääntyneen lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden käytön vuoksi. Euroopan vesistöihin kohdistuvat ympäristöongelmat aiheutuvat lähinnä suures-

ta väestötiheydestä, laajamittaisesta teollisuudesta ja tehokkaasta maataloudesta. Myös paikalliset geologiset ominaisuudet sekä luonnonilmiöt, kuten tulivuorenpurkaukset, mutavyöryt, tulvat ja kuivuus vaikuttavat raakaveden laatuun. Yhtenä suurena uhkana maailman makean veden lähteille on suolaantuminen. Suomessa talousveden tuotanto onkin suhteellisen edullista monipuolisten ja suhteellisen puhtaiden raakavesilähteiden ansiosta.

Talousveden tuotanto

Suomessa vesilaitokset käyttävät raakavetenä joko pohjavettä, pintavettä tai tekopohjavettä. Pohjaveden osuus käytetystä raakavedestä oli 61% vuonna 2001 (www.ymparisto.fi-portaali). Tekopohjavesi voi olla rantaimetytettyä tai allasimetytettyä järvivettä ja sen käsittely on parhaimmillaan samanlaista kuin luonnon pohjaveden käsittely. Pohjaveden käsittelyksi riittää yleensä aggressiivisuuden eli veden vapaan hiilidioksidin poisto alkaloinnilla. Myös ilmastus ja pikasuodatus on yleisesti käytettyjä pohjaveden käsittelykeinoja, mutta mikäli vesi on muuten hyvää, riittää käsittelyksi pelkkä alkalointi.

Hyvälaatuisen talousveden tuottamiseksi raakavetenä käytettyä pintavettä joudutaan puhdistamaan monin tavoin. Suomessa pintavedet sisältävät tyypillisesti paljon maaperästä liennutta humusta, mikä onkin merkittävin haaste pintavesilaitostekniikalle (Zacheus, 2002). Humus on hitaasti hajoavaa ja järvien pienen vesitilavuuden ja viipyvän vuoksi humuspitoisuus ei suurissakaan järvioltaissa juurikaan vähene (Kajosaari, 1981).

Talousveden kemialliseen ja mikrobiologiseen laatuun vaikuttavat seuraavat vedentuotannon prosessit: saostus, selkeytys, pikasuodatus (riippuen käytetystä suodatinmateriaalista), desinfiointi esim. UV-valon avulla, alkalointi sekä jälkiklooraus. Saostuksen tarkoituksena on poistaa vedessä olevaa humusta koagulantin avulla. Koagulanttina käytetään yleensä alumiini- tai rautasulfaattia, joka neutraloi veden kolloidisten hiukkasten pintavarauksen. Vettä hämmentämällä varauksettomat hiukkaset kasaantuvat isommiksi flokeiksi. Saostuksessa muodostetut humus-koagulantiflokit poistetaan selkeytyksessä, jonka lisänä käytetään pikahiekkasuodatusta. Suodatinmateriaalina on mahdollista käyttää esim. kalkkikivirouhetta, jonka avulla veden pH-arvoa voidaan

muuttaa. Yleisimmin veden pH-arvo säädetään sopivaksi alkalointikemikaalien, kuten kalsiumhydroksidin tai lipeän (NaOH), avulla.

Pintavedestä valmistettu talousvesi joudutaan desinfiomaan sen sisältämien mikrobien vuoksi (Zacheus, 2002). Yleisimmin käytössä ovat klooriyhdisteet, mutta jotkut vesilaitokset ovat hyödyntäneet myös otsonointia ja UV-tekniikkaa talousveden desinfioinnissa.

Vedenjakeluverkosto ja erilaiset putkimateriaalit

Valmis talousvesi johdetaan verkostoja pitkin kuluttajille. Vedenjakeluverkostossa käytetyt materiaalit vaikuttavat talousveden laatuun. Jo muinaiset roomalaiset rakensivat vesijohtoverkostoja, akvedukteja, joiden materiaalin lyijyn, epäillään olevan yksi syy tämän suuren valtakunnan tuhoon. Nykyään käytössä on erilaisia muovi-, teräs- ja valurautaputkistoja, joiden lisäksi kiinteistöverkostomateriaalina käytetään etenkin Suomessa kuparia.

Monien kilometrien mittaiset monimutkaiset vedenjakeluverkostot ovat kuitenkin useiden tutkimuksien (mm. Lehtola ym., 2004a ja Zacheus ym., 2001) mukaan laadukkaan talousveden heikoin lenkki. Putkimateriaalien välillä on suuria eroja ja verkostoissa on lisäksi usein eri-ikäisiä putkia. Putkien liittymäkohdat ja etenkin muoviset pumput ovat mikrobikasvustoa suosivia ja siksi erittäin ongelmallisia.

Putkimateriaalilla on selvä vaikutus putkistoon kiinnittyneiden mikrobien biomassaan (Niquette ym, 2000). Biomassaan näyttää vaikuttavan samankaltaisten materiaalin huokoisuus ja pinnan karheus. Tutkimuksissaan Niquette ym. (2000) havaitsivat putkistoon kiinnittyneen mikrobibiomassan olevan paljon vähäisempää muoviputkistoissa (PE ja PVC) kuin sementti- tai rautaputkistoissa. Myös Camper ym. (2003) havaitsivat tutkimuksissaan, että mikrobipitoisuudet ovat pienet muoviputkistoissa ja suuremmat rautaputkistoissa.

Putkimateriaalin lisäksi mikrobien kasvumahdollisuuksin vedenjakeluverkostossa vaikuttavat mikrobeille käyttökelpoisten ravintoaineiden pitoisuus vedessä, ympäristötekijät (lämpötila, virtaus ja happipitoisuus) sekä fysikaalis-kemialliset tekijät, kuten putkis-

sa esiintyvät sedimentaatiot, putkimateriaalien korroosio ja vedenpuhdistuksessa käytetty jälkidesinfiointiaine (Van Der Kooij, 2000). Kiéné ym. (1998) mukaan kloorin kulutukseen vedenjaketuverkostossa vaikuttavat samat tekijät: orgaanisen hiilen määrä, veden lämpötila, putkimateriaali sekä putkistoissa oleva biofilmi ja putken korroosio. Mikrobikasvulle otollisissa olosuhteissa häviää näin ollen helposti myös suuret määrät jälkidesinfiointiaineena käytettyä klooria.

Kloorin hajoamiseen vedenjaketuverkostossa vaikuttavat sekä kloorin adsorboituminen putkimateriaalin että kloorin ja putken pinnan väliset kemialliset reaktiot (Al-Jasser, 2007). Putken sisäpinnan havaittiin muuttuvan putken käyttöiän pidentessä ja näin käyttöikä vaikuttaa myös kloorin kulutukseen. Etenkin valurautaputkistoissa havaittiin vanhimpien putkien kuluttavan huomattavasti enemmän klooria kuin uusien putkien. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin myös päinvastaista käyttäytymistä alle 25 vuotta käytössä olleissa muoviputkistoissa, joissa kloorin kulutus pieneni ensimmäisen kolmen käyttövuoden jälkeen. Dear ym. (2006) havaitsivatkin tutkimuksissaan kloorin adsorboituvan helposti polyetyleeniputkistoihin ja siten heikentävän putkien antioksidanttisia ominaisuuksia.

Rauta- ja kupariputkien käyttäminen samassa vedenjaketuverkostossa on veden korroosiota aiheuttavien ominaisuuksien kannalta hyvin vaikeaa (Elfström Broo ym., 1997). Olosuhteet, joissa kupariputkien korroosio on vähäisintä, eli korkea pH ja matala alkaliteetti, aiheuttavat puolestaan rautaputkien korroosiota. Lisäksi veteen liuennut happi aiheuttaa kupariputken korroosiota, ellei kupariputkeen ole muodostunut suojaava kupari(II)oksidikerrosta (Palit ja Pehkonen, 2000).

2.2 Talousveden laadun seuranta ja lainsäädäntö

Talousveden tulee täyttää sille asetetut laatuvaatimukset vesilaitokselta aina kuluttajalle saakka. Laatuvaatimuksien tarkoitus on suojella kuluttajaa ja taata turvallinen ja käyttökelpoinen talousvesi. Lisäksi laatuvaatimuksissa on huomioitu vedenjaketuverkostoon liittyviä rajoituksia putkimateriaalien suojaamiseksi mm. korroosiolta ja saostumilta.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 461/2000 talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista määrittelee tutkittavien näytteiden lukumäärät vesilaitoksen tuottamaan vesimäärään perustuen. Isoimmista vesilaitoksista (veden jakelu päivittäin yli 100 000 m³) jatkuvan valvonnan piiriin kuuluvia määrittelyjä tulee tehdä lähes päivittäin ja jaksoittaiseen seurantaan kuuluvia määrittelyjä noin kerran kuukaudessa. Kaikkein pienimmistä vesilaitoksista (veden jakelu päivittäin 10 – 50 m³) jatkuvan valvonnan määrittelyjä tehdään vain kerran vuodessa ja jaksoittaiseen seurantaan kuuluvia joka toinen vuosi.

Jatkuvaan valvontaan kuuluvat määrittelyt ovat haju, maku, sameus, väri, pH, sähköjohtavuus, rauta- ja mangaanipitoisuus sekä mikrobiologiset määrittelyt (*Clostridium perfringens*, *Escherichia coli* ja koliformiset bakteerit). Näytteet tulee ottaa tasaisin väliajoin eri puolilta vedenjakeluverkostoa kattavan kuvan saamiseksi. Vedenjakeluverkostosta otettavien näytteiden lisäksi vesilaitokset tarkkailevat säännöllisesti vesilaitokselta lähtevän veden laatua.

Veden haju, maku ja väri määritetään aistinvaraisesti. Arvio muutoksesta on hyvin subjektiivinen, joten tärkeintä onkin huomata onko muutosta tapahtunut vai ei. Hajun tai maun muutos saattaa olla merkki veden terveydellisistä laatuvaaroista.

Veden sameus johtuu vedessä olevista kolloidimuotoisista hiukkasista tai suuremmista hiukkasista. Sameutta aiheuttavat aineet voivat olla joko epäorgaanisia, kuten savishiukkasista, tai orgaanisia mikro-organismeja. Lisäksi veteen liuenneet kaasukuplat aiheuttavat sameutta (Kajosaari 1981). Sameus ei itsessään kerro veden terveydellisistä haittavaikutuksista, mutta se on kuitenkin yksi vedenjakeluverkostossa helposti havaittavista muuttujista.

Veden pH-arvo kuvaa veden vetyionipitoisuutta. Vesijohtoverkoston suojaamiseksi korroosiolta ja syöpymiseltä veden pH-arvo pyritään pitämään välillä 7-9 (Kajosaari 1981). Veden pH-arvon laskiessa alle 7,1 alkaa metallien liukeneminen putkista, mikä heikentää veden laatua ja kuluttaa vedenjakeluverkostoa.

Sähköjohtavuus kuvaa liuoksen kykyä johtaa sähkövirtaa. Puhdas vesi johtaa sähköä huonosti, mutta sähköjohtokyky paranee epäorgaanisten suolojen liuetessa veteen.

Sähkönjohtokyky riippuu veteen liuenneista ioneista ja niiden määrästä (Kajosaari 1981). Talousveden sähkönjohtokyvyn laatusuositus on alle 250 mS/m. Kuten sameus, myöskään sähkönjohtokyky ei kerro itsessään veden terveydellisistä haittavaikutuksista.

Rauta- ja mangaanipitoisuuden kohoaminen aiheuttaa saostumia vedenjakeluverkkoon. Mangaani aiheuttaa saostumien lisäksi epämiellyttävää makua. Pintavesissä rauta esiintyy yleensä humukseen sitoutuneena ja saattaa päätyä vedenjakeluverkkoon, mikäli vedenpuhdistuksessa humuksen poisto ei ole ollut tarpeeksi tehokasta. Vedenjakeluverkostossa havaittava rauta voi olla peräisin joko putkimateriaaleista (esim. galvanoitu teräs) tai verkostossa mahdollisesti olevasta rautaa sitovasta mikrobikasvustosta. Koagulaatiossa rautasuoloja käytettäessä kohonnut rautapitoisuus verkostovedessä voi myös olla merkki vedenkäsittelyn toimintahäiriöistä.

Mikrobiologiset määritykset varmistavat talousveden desinfioinnin tehoa. Talousveden partikkelipitoisuuksille ei tällä hetkellä ole asetettu raja-arvoja, vaan mikrobipitoisuudet määritetään viljelymenetelmien avulla. Vedessä on eri kokoluokkiin jakautuneita partikkeleita, joista virusten yleisin kokoluokka on 0,001 - 0,4 µm ja bakteereiden 0,2 - 5 µm (Kajosaari 1981). Partikkelimittauslaitteiden mittausalue on yleensä 1 – 100 µm, kun se sameusmittauslaitteissa on 0,1 – 10 µm (Hoyer ja Schell 1998). Kumpikin mittauslaite pystyy havaitsemaan vedessä olevia suspendoituneita kiintoaineita.

Talousveden kemiallisissa laatuvaatimuksissa mainitaan kupari. Kuparia ei raakavesissä esiinny suuria pitoisuuksia, vaan suurin osa talousvedessä olevasta kuparista on peräisin kiinteistöverkostojen materiaaleista. Tätä ongelmaa ilmenee erityisesti lämminvesiverkostoissa. Talousvesi on laadultaan helposti syövyttävää, mikäli vedenkäsittelyssä ei olla huolehdittu riittävästä alkaloinnista. Syövyttävyyden lisäksi myös veden lämpötila vaikuttaa siihen liukenevan kuparin määrään ja kohonneet kuparipitoisuudet ovatkin yleisiä etenkin lämmitetyssä vesijohtovedessä.

Talousveden laadun häiriöt

Sosiaali- ja terveysministeriön vuonna 2002 tekemässä selvityksessä 'Suurten vesilaitosten toimittaman talousveden laatu Suomessa vuosina 1996-1998' asetetut raja-arvot olivat ylittyneet raudan, mangaanin, sameuden sekä koliformisten bakteerien osalta.

Talousveden laadun heikkenemisen tärkeimmiksi syiksi nousevat vedenjakeluverkoston äkilliset painevaihtelut, talousveden valmistuksen käyttöhäiriöt sekä puutteellinen vedenkäsittely (Zacheus 2002). Tarkasteluun oli otettu mukaan vain ns. suuret vesilaitokset (yli 1 000 m³/vrk tai yli 5 000 kuluttajalle), joita oli yhteensä 171 kappaletta. Raja-arvot ylittyivät useimmin raudan (n. 50 vesilaitosta), mangaanin (n. 30), koliformisten bakteerien (n. 20-30), fluoridin (10) ja alumiinin (10) osalta. Lisäksi raja-arvon ylityksiä tapahtui värin, sameuden, nitriitin, hajun, maun, fekaalisten koliformien, hapettavuuden, atratsiinin, nikkelin ja ammoniumin osalta muutamissa vesilaitoksissa.

Taulukko 2.1. Sosiaali- ja terveysministeriön asettamat talousveden laatuvaatimukset ja -suositukset (STM 461/2000). Taulukossa on esitetty vain ne muuttujat, joiden osalta Zacheuksen tutkimuksessa todettiin laatuvaatimukset ja -suositukset ylittäviä arvoja (Zacheus, 2002).

Talousveden laatuvaatimukset (enimmäispitoisuus)		Talousveden laatusuositukset (tavoitteelliset enimmäisarvot)	
Kupari	2,0 mg/l	Alumiini	200 µg/l
Fluoridi	1,5 mg/l	Ammonium	0,5 mg/l
Nikkeli	20 µg/l	Kloridi	250 mg/l
Nitriitti	0,5 mg/l	Mangaani	50 µg/l
<i>Escherichia coli</i>	0 pmy/ 100 ml	Rauta	200 µg/l
Enterokokit	0 pmy/ 100 ml	Koliformiset bakteerit	0 pmy/ 100 ml
		Hapettavuus (COD _{Mn} -O ₂)	5,0 mg/l
		Sameus	käyttäjien hyväksyttävissä eikä epätavallisia muutoksia
		Väri	
		Haju ja maku	

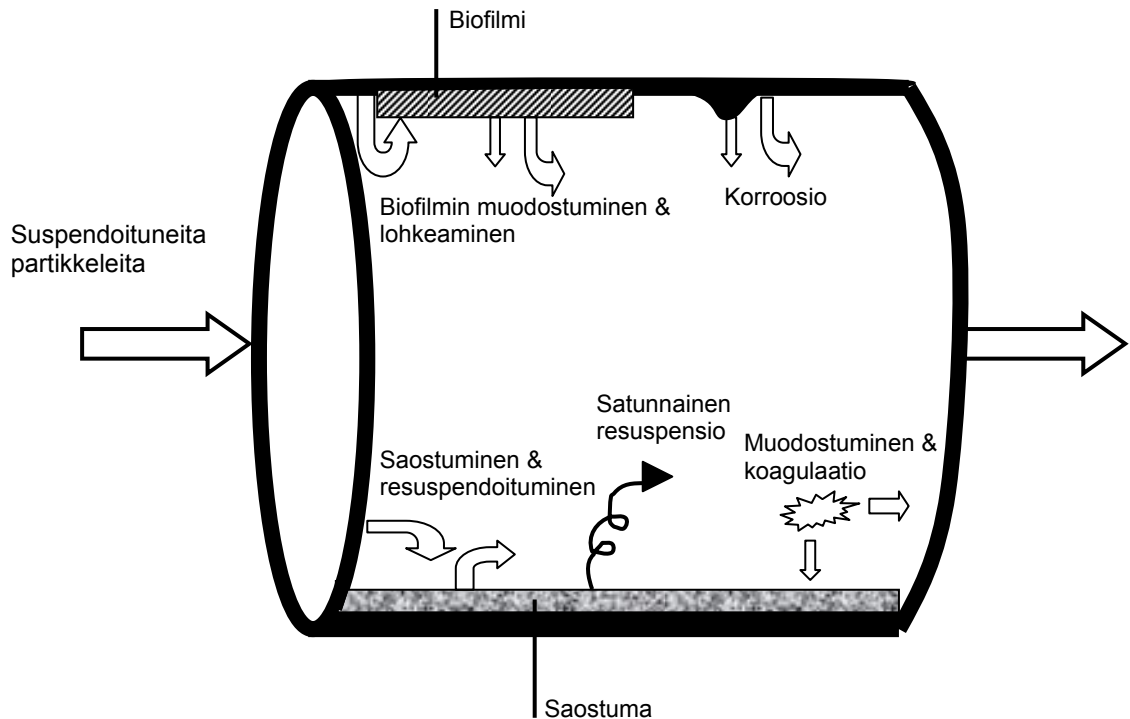
Raja-arvot ylittävä rautapitoisuus pysyi usein kuitenkin alle 1,0 mg/l ja vain muutamissa vesilaitoksissa rautapitoisuus nousi useisiin milligrammoihin litrassa. Yleisin syy rautapitoisuuden nousuun oli vedenjakeluverkoston äkillisten painevaihteluiden aiheuttama rautasakkojen irtoaminen. Lisäksi maaperäominaisuuksilla ja kiinteistöverkostojen materiaalilla oli vaikutusta rautapitoisuuteen (Zacheus, 2002).

Mangaanipitoisuus pysyi rautapitoisuuden tavoin suurimmaksi osaksi suhteellisen matalana (0,05-0,30 mg/l) ja nousi vain yksittäisissä tapauksissa yli 1,00 mg/l. Myös mangaanipitoisuuden kohoamiseen on syynä äkilliset painevaihtelut vedenjakeluverkostossa sekä maaperäominaisuudet (Zacheus, 2002).

Koliformisten bakteerien pitoisuus oli suurimmaksi osaksi alle 10 cfu/ 100 ml, mutta muutamissa tapauksissa bakteeripitoisuudeksi mitattiin kymmeniä, jopa satoja bakteeripesäkkeitä sadassa millilitrassa. Äkilliset paineenvaihtelut vedenjakeluverkostossa on talousveden valmistuksen käyttöhäiriöiden ja puutteellisen vedenkäsittelyn ohella syynä koliformisten bakteerien pitoisuuden kasvuun. Nämä toimintahäiriöt ovat syynä myös fekaalisten koliformien esiintymiseen talousvedessä.

Fluoridipitoisuuksien nousu on selvästi maaperän ominaisuuksiin liittyvä ongelma, sillä Kaakkois-Suomen maaperän korkean fluoridipitoisuuden vuoksi talousveden fluoridiongelma oli toistuva alueen vesilaitoksilla. Myös korkeat alumiinipitoisuudet selittyvät osaltaan maaperän ominaisuuksilla, lisäksi käyttöhäiriöillä on vaikutusta alumiinipitoisuuden nousuun (Zacheus, 2002).

Vedenjakeluverkostoa voidaan ajatella suurena biologisena ja kemiallisena reaktorina, jossa kuljetettu vesi reagoi mm. putkimateriaalin ja verkostoon muodostuneen biofilmin kanssa (Gauthier ym., 1999). Suspendoituneet orgaaniset ja epäorgaaniset partikkelit voivat kuljettaa mukanaan bakteereita ja samalla suojata niitä desinfiointiaineilta. Toisaalta kyseiset partikkelit voivat laskeutua ja kerääntyä vedenjakeluverkoston pinnalle saostumaksi.



Kuva 2.1. Kaavio biofilmin ja saostumien muodostumisesta ja irtoamisesta vedenjakeluverkostossa. Mukaeltu Vreeburg ym. 2006 kaaviosta.

Suomalaisissa vedenjakeluverkostoissa saostumat sisältävät mikrobien ja sienien lisäksi lähinnä rautaa, mangaania, alumiinia ja kalsiumia riippumatta siitä olivatko kerrostumat uusia vai vanhoja (Zacheus ym., 2001). Saostuman elinkykyisten bakteerien ja sienien määrän havaittiin olevan jopa tuhatkertainen verrattuna vedessä esiintyviin pitoisuuksiin. Lisäksi noin vuoden kuluttua vedenjakeluverkoston puhdistuksesta havaittiin tilalle muodostuneen uuden saostuman sisältävän lähes yhtä suuret bakteeri- ja sienipitoisuudet kuin vanhoissa saostumissa. Tutkimuksessa havaittiin myös, että mekaaninen puhdistus oli tehokkaampaa sileäpintaisissa polyetyleeniputkistoissa kuin karheammissa valurautaputkistoissa, mutta näiden kahden materiaalin välillä ei havaittu eroja uuden saostuman koostumuksissa.

Veden virtausnopeuden huippuhetkinä saostumasta voi liueta veteen mikrobeille käytökelpoista orgaanista hiiltä ja fosforia (Lehtola ym., 2004a). Tutkimuksessa havaittiin, että vedenlaadun parantuminen mekaanisen puhdistuksen ansiosta rautapitoisuuden ja sameuden osalta oli lähinnä hetkellistä.

Kloorintarve on lineaarisessa suhteessa saostuman typpipitoisuuteen (Gauthier ym., 1999). Saostuma tarjoaa mikrobeille orgaanisen aineksen muodossa ravintoa kasvuun ja

selviytymiseen, suojaa niitä verkostoveden jälkidesinfiointiaineilta sekä tarjoaa otollisen ekologisen lokeron suuren tilavuutensa ansiosta.

2.3 Veden laadun monitorointi

Mittaus- ja sensoriteknologian kehittyminen on tehnyt mahdolliseksi reaaliaikaisen jatkuvan mittauksen eli ns. on-line -monitoroinnin. Reaaliaikainen data on havaittu tärkeäksi monitoroitaessa jätevedenpuhdistamoiden puhdistustehokkuutta, luonnonvesiä, kuten jokisuistoja, sekä raakaveden ottopisteitä (Gunatilaka ja Dreher 2003). Näiden monitorointikohteiden joukosta selvästi erottuvat jätevedenpuhdistamot, joissa mittauslaitteisiin kohdistuu paljon räsistystä. Mittauslaitteiden herkät sensorit likaantuvat jätevesissä hyvin nopeasti ja niiden luotettavuus ja kalibroituavuus kärsii (Vanrolleghem ja Lee 2003).

Jätevesien mittauslaitteille asettamista suurista vaatimuksista huolimatta, tai juuri niiden vuoksi, on-line -monitorointia on kehitelty suurimmaksi osaksi jätevesilaitosten tehokkuuden optimoinnin apuvälineeksi. Bonastre ym. (2005) listaavat nykyisiä ja tulevaisuuden trendejä jätevesien on-line -monitoroinnissa. Käytössä olevat sensorit voidaan luokitella virtaavassa vedessä oleviin ja vedestä näytteen ottaviin, joista ensimmäiset ymmärrettävästi joutuvat suurempaan likaantumisvaaraan. Sensorit perustuvat ionin vaihtoon, potentiometriaan, UV-spektroskopiaan sekä klassisiin mittausperusteisiin (esim. lämpötila, sähkönjohtokyky, sameus, jne). Uusimpina sensoreina kehitteillä ovat ns. elektroniset nenät, optiset sensorit, tietokoneavusteiset virtuaalisensorit, jotka reaaliaikaisesti laskevat mitattujen signaalien sisältämän tiedon, sekä biosensorit, joissa reagoivana osana on mikro-organismeja. Tulevaisuuden trendeistä tärkeimpinä Bonastre ym. pitävät luotettavampien ja kestävämpien sensoreiden kehittämistä sekä toisaalta etenkin kemiallisten analyysien täydellistä automatisointia.

Luonnonvedet ovat luonteeltaan lähempänä talousvettä. Luonnonvesissä on-line -monitorointia on käytetty mm. Kaliforniassa sijaitsevan joen happipitoisuuden seuramiseen. Kyseisen joen ranta on hyvin suolapitoista maata ja veden happipitoisuuden laskiessa riittävän alhaalle rantatörmästä liukenee toksista seleeniä. Jokiveden happipi-

toisuuden seurannan tueksi kehitettiin simulaatiomalli, johon on-line -mittareilta saatua dataa sovellettiin ja tarvittaessa jokea ilmastettiin (Quinn ym. 2005).

Talousvesipuolella on-line -monitorointia on käytetty lähinnä raakaveden laadun seuraamiseen. Eräs sovellus on Englannissa sijaitsevan joen käyttömahdollisuuden arviointi raakaveden lähteenä ja sen antoisuuden selvittäminen (Drage ym. 1998). Raakaveden laadun seuraamisessa Hoyer ja Schell (1998) havaitsivat hyviksi välineiksi sameusmittarit ja partikkelilaskurit, vaikka sameusdata antoikin vain viitteellistä tietoa veden mikrobiologisesta laadusta. Sameusmittaria voidaan kuitenkin käyttää varoittavana mittarina raakavedenottopisteessä ja se onkin erittäin tehokas työkalu vedenjakeluverkoston alkupäässä. Monitoroimalla sekä raakaveden että vedenjakeluverkkoon menevän talousveden sameutta voidaan helposti havaita vedenlaadun muutokset ja siten korjata partikkeleiden poiston osalta vedenpuhdistusprosesseja optimaalisiksi.

Vedenjakeluverkostoissa on käytössä lähinnä virtaus- ja painemittareita sekä joissain tapauksissa myös sameusmittareita. Näiden mittareiden avulla pyritään estämään mahdolliset putkirikot tai ainakin havainnoimaan ne mahdollisimman nopeasti. Putkirikon seurauksena vedenjakelujärjestelmään voi päästä bakteeripitoista vettä tai putkistossa oleva talousvesi voi vuotaa aiheuttaen häviöitä vedenjakelussa. Etenkin vanhat putket ovat alttiita vuodoille (Mounce ym. 2003).

On-line -monitoroinnin avulla voidaan esimerkiksi seurata trihalometaanin muodostumista suoraan vesijohtoverkostosta kaasukromatografian avulla (Brown ja Emmert 2006), organoklooriyhdisteitä, pestisidejä, koagulaatioprosessista jääneiden liukoisen alumiinin ja raudan pitoisuutta (Benson ja Worsfold 1993). Elektronisten nenienkin käyttöä on tutkittu on-line -monitoroinnissa, mm. *Streptomyces*-bakteerien itiöiden tunnistamiseen talousvedestä (Bastos ja Magan 2006).

Verberk ym. (2006) tutkivat partikkeli- ja sameusmittareiden avulla Amsterdamin vedenjakeluverkostossa esiintyvien suspendoituneiden partikkelien pitoisuutta ja koostumusta. Tutkimuksessa havaittiin partikkelimittarin olevan huomattavasti sameusmittaria herkempi havaitsemaan vedenlaadun muutoksia. Partikkelikokoluokat jakautuivat eri tavalla etäisyyden kasvaessa vedenpuhdistamolta. Vedenpuhdistamon läheisyydessä mitattiin hyvin pieni pitoisuus suurempia partikkeleita kun taas kauempana vedenjake-

luverkostossa pienimpiä partikkeleita oli vähemmän. Tämän eron syynä voi mahdollisesti olla esim. pienten partikkelien sedimentaatio tai flokkulaatio isommiksi partikkeleiksi. Suurempien partikkelien muodostumisen syynä voivat olla koagulaatio, putkimateriaalina käytetyn sementin huuhtoutuminen tai saostumassa normaalisti tapahtuvat saostumis-resuspendoitumis-sykli (kuva 2.1).

On-line -monitoroinnin avulla on siis mahdollista havaita vedenlaadun äkilliset lyhytaikaiset muutokset, jotka jäävät helposti havaitsematta vain kerran päivässä otetuista näytteistä.

2.4 Laskennallisesti älykkäät menetelmät

On-line -monitorointi tuottaa valtavat määrät dataa, jonka käsittely perinteisillä keinoilla on hyvin haastavaa. Tällaisen moniulotteisen datan käsittelyyn on kehitetty laskennallisesti älykkäitä menetelmiä, joiden avulla datan dimensioita (muuttujat, tapaukset) voidaan vähentää. Laskennallisesti älykkäät menetelmät toimivat ihmisaivojen tavoin oppimalla, muistamalla ja tunnistamalla malleja datasta (Kolehmainen ym. 2000, Kohonen 2006).

Yleisesti käytettyjä laskennallisesti älykkäitä menetelmiä ovat keinotekoinen neuroverkko (Artificial Neural Network, ANN), sumea logiikka (fuzzy logic), Bayesian neuroverkot ja geneettiset algoritmit. Laskennallisesti älykkääksi menetelmäksi voidaan myös ajatella datapohjainen tiedonlouhinta eli data-mining. Tiedonrikastuksessa pyritään löytämään menetelmiä, joiden avulla suuresta datamäärästä voidaan ”rikastaa” informaatiota.

Itseorganisoiva kartta (Self-Organizing Maps, SOM) on ohjaamattomaan opetukseen perustuva neuroverkko. SOM soveltuu hyvin tiedonrikastukseen. Sen tarkoituksena on muodostaa epäjärjestyksessä olevasta datasta järjestäytynyt abstrakti kartta (Kohonen 2006). SOM muodostaa datasta painovektoreiden ja naapurisuusvektoreiden avulla vähitellen valittujen opetusmuuttujien mukaan ryhmitellyn kartan. Painovektoreiden arvot ovat aluksi sattumanvaraisia. Datarivien ja neuroneiden painovektoreiden välinen euklidinen etäisyys lasketaan ja datarivi sijoitetaan neuroniin, johon etäisyys on pienin. Näin

saadaan selville voittajaneuroni. Voittajaneuronin ja sen naapurineuronien painovektorit siirtyvät oppimisprosessin edetessä lähemmäs alkuperäisiä syötevektoreita (Kolehmainen ym. 2000). Alkuperäinen mittausdata lajitellaan painovektoreiden mukaan neuroneihin niin, että jokaisessa neuronissa sekä sen välittömässä läheisyydessä olevat neuronit ovat mittausdataaltaan samankaltaisia (Kolehmainen ym. 2001).

Sammonin kuvaus (Sammon's Mapping) on iteratiivinen gradienttihakuun perustuva menetelmä, joka SOM:n tavoin mahdollistaa moniulotteisen datan kuvaamisen kaksiulotteisena. Sammonin kuvausalgoritmi sijoittaa alkuperäisen moniulotteisen datan mittausvektorit kohdeavaruuteen (kuvaajaan) siten, että muodostunut kuva toistaa mahdollisimman tarkasti alkuperäisten datarivien keskinäisiä suhteita. Sammonin kuvauksessa ympyröiden, jotka vastaavat SOM-kartan neuroneita, koko, päällekkäisyys ja etäisyys toisistaan kertovat datasta erilaista tietoa kuin SOM ja siksi näitä kahta algoritmia on hyödyllistä käyttää yhdessä (Kolehmainen ym. 2000).

Sammonin kuvaus ja SOM ovat osoittaneet käyttökelpoisuutensa ilmatutkimuksissa mm. ilmanlaadun ennustemallinnuksessa (Kolehmainen ym. 2000) ja ilmansaasteiden mallintamisessa (Niska ym. 2003). Vesiympäristössä on käytetty enemmän keinotekoisia neuroverkkoja apuna mm. vedenjakelujärjestelmän putkirikkojen ennustamisen mallinnuksessa (Mounce ym. 2003). Australiassa sijaitsevan Murray joen suolapitoisuuden ennustamiseen on testattu kahta eri keinotekoisien neuroverkon muotoa mallinnuksen pohjana, Partial Mutual Information (PMI)-algoritmiin perustuvaa sekä SOM-algoritmin ja hybridiseen geneettiseen algoritmin ja yleisen regression neuroverkon yhdistelmää. Molemmissa tapauksissa saatiin sopivat mallinnukseen käytettävät syötteen (input), mutta käytännössä toimivampi malli muodostui PMI-algoritmin pohjalta (Bowden ym., 2004).

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1. Yleinen koejärjestely

3.1.1 Pilot-vesilaitos

Koevesijohtoverkoston johdettiin pilot-mittakaavaisen vesilaitoksen tuottamaa vettä. Verkoston syötetyn veden tasalaatuisuutta ja veden puhdistusvaiheessa mahdollisesti tapahtuvia häiriötilanteita pystyttiin oman vedentuotantolaitoksen ansiosta helposti seuraamaan.

Pilot-vesilaitoksessa käytetään raakavetenä tyypillisen itäsuomalaisen humuspitoisen (TOC 10–12 mg/l (Myllykangas 2003)) järven vettä. Vesi pumpataan Kallavedestä kahdelta syvyydeltä (5 m ja 15 m) ja johdetaan rumpusuodattimen ja pikahiekkasuodattimen kautta tasausaltaaseen. Esikäsittelyn tarkoituksena on estää mm. suurempien partikkeleiden ja oksien yms. pääsy vedenpuhdistukseen.

Vesilaitoksen tasausallas on tilavuudeltaan 1,2 m³ ja se toimii vesisäiliönä varmistuen saostusaltaalle tulevan veden tasaisen syötön. Raakaveden virtaus saostusaltaaseen on 1,2 m³/h. Saostusallas on kaksiosainen, jossa ensimmäiseen osaan lisätään raakaveden kalsiumhydroksidia (Ca(OH)₂) raakaveden saostus-pH:n optimoimiseksi. Saostusaltaan toiseen osaan syötetään koagulantiksi ferrisulfaattia (Kemwater PIX-322) annostuksella 18 g Fe/m³. Toinen osa varmistaa kemikaalien tasaisen sekoittumisen veteen. Molemmissa saostusaltaan osissa on koaguloitumista edesauttavat pikasekoittimet.

Koaguloinnissa muodostunutta mikroflokkeja sisältävää vettä sekoitetaan mekaanisesti kolmessa peräkkäisessä flokkausaltaassa (á 300–500 l). Flokkausaltaissa sekoitusnopeus pienenee flokkien koon kasvaessa. Ensimmäisessä flokkausaltaassa sekoitus on 68,5 Hz kun se viimeisessä altaassa on 35,1 Hz.

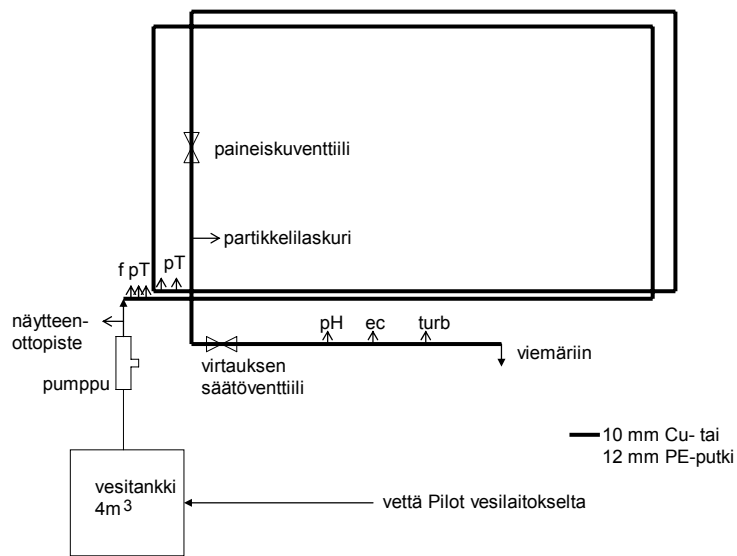
Muodostuneet flokit poistetaan flotaation avulla. Flotaatioaltaaseen johdetaan ilmalla ylikyllästettyä dispersiovetä, jonka pienet ilmakuplat nostavat flokit veden pintaan. Automaattinen kaavin poistaa pinnalle nousseen lietteen noin 1 000 vesilitran välein.

Flotaatioaltaasta vesi johdetaan monikerrossuodatukseen. Vesi suodattuu alaspäin hiekkakerrosten läpi, joista ensimmäinen kerros on antrasiittiä, toinen kvartsia ja viimeinen kerros karkeaa soraa. Suodattimen pintakuorma on noin 1,4 m/h. Hiekkasuodatin puhdistuu automaattisesti kerran päivässä ensin vesi-paineilma-seoksella 6 minuutin ajan ja lopuksi pelkällä vedellä 4 minuutin ajan, jolloin suodatinkerrokset asettuvat takaisin paikoilleen.

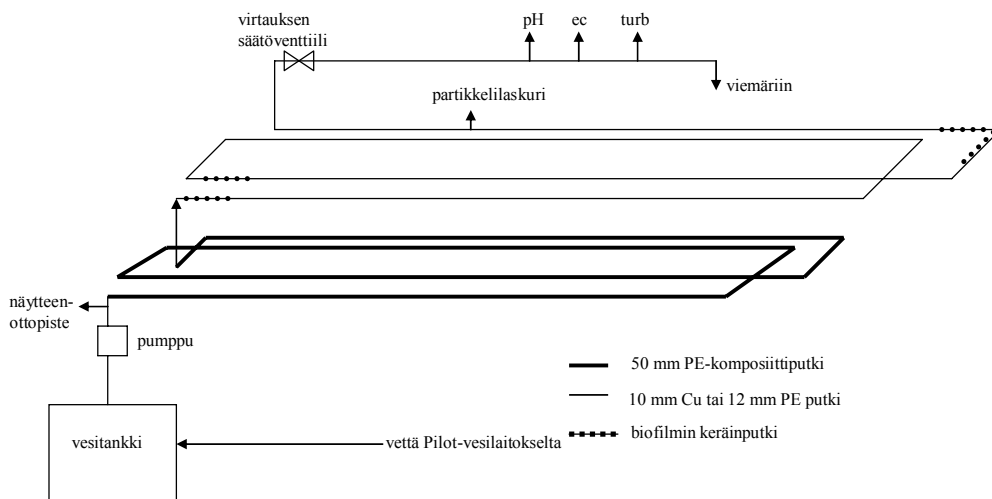
Suodatettu vesi johdetaan UV-käsittelyn kautta kloorausaltaaseen. UV-annos vedelle on 60 mWs/cm^2 . Kloorausaltaassa veteen lisätään natriumhypokloriittia (NaOCl) annostuksella $0,6 \text{ mg/l Cl}_2$. Kloorausaltaan jälkeen vesi johdetaan jälkikemikalointialtaaseen. Jälkikemikaloinnissa veden alkaliteetti, kovuus ja pH säädetään kalsiumhydroksidin (Ca(OH)_2) ja hiilidioksidin (CO_2) avulla. Jälkikemikaloinnin pH-tavoite on 8,3. Puhdistettu vesi johdetaan vesisäiliöön (4 m^3), josta se johdetaan joko koevesijohtoverkoston tai ylivaluntana viemäriin.

3.1.2. Koevesijohtoverkosto

Koevesijohtoverkosto koostuu kahdesta verkostosta, ns. runkolinjoista ja kiinteistöverkostoa simuloivasta ohutputkisemmasta verkostosta. Runkolinjoina toimii kaksi 100 m pitkää 50 mm halkaisijaltaan olevaa polyeteeniputkea, jotka liittyvät kiinteistöverkkoon. Kiinteistöverkosto koostuu neljästä 100 metriä pitkästä putkilinjasta, joista kaksi on 10 mm halkaisijaltaan olevaa kupariputkea ja kaksi 12 mm halkaisijaltaan olevaa polyeteeniputkea.



Kuva 3.1. Paineiskukokeessa käytetty koevesijohtoverkosto.



Kuva 3.2. Veden virtausnopeuden nostokokeessa käytetty koevesijohtoverkosto.

Kiinteistöverkostoon on asennettu jokaiselle neljälle putkilinjalle oma virtausmittari sekä kaksi paine- ja lämpötilamittaria, jotka mittaavat jatkuvasti sekunnin välein. Paine- ja lämpötilamittarit sijaitsevat verkoston alussa ja lopussa. Jokaiselle putkimateriaalille on oma pH-, sähkönjohtokyky- ja sameusmittari. Näitä kolmea mittaria voidaan vaihtaa manuaalisesti putkilinjojen välillä (linjalta Cu1 linjalle Cu2 ja linjalta PE1 linjalle PE2).

Verkostoon on asennettu jokaiseen putkilinjaan neljä irrotettavissa olevaa biofilminäytteenottoon tarkoitettua putkikeräintä. Putkikeräimet sijaitsevat verkostossa 2, 48, 50 ja 100 metrin päässä verkoston alkupisteestä.

3.1.3 Vesianalyysit

Vesinäytteitä otettiin Pilotilta ja koevesijohtoverkostosta koesuunnitelmien mukaisesti. Näytteistä määritettiin raudan ja kuparin pitoisuus, kaliumpermanganaattiluku, mikrobiologiset indikaattorit AODC, HPC, AOC, MAP ja kokonaisfosforin määrä sekä sameus. Mikrobiologiset määritykset tehtiin Kansanterveyslaitoksen Kuopion toimipisteessä. Koevesijohtoverkostosta otettiin myös biofilminäytteitä irrotettavista putkikeräimistä, joita oli jokaisella linjalla ja näytteet analysoitiin Kansanterveyslaitoksen Kuopion toimipisteessä.

Ns. päivittäisanalytiikkaa tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa, joka sijaitsi verkoston läheisyydessä. Päivittäisanalytiikassa käytettiin veden kovuuden, vapaan kloorin sekä kupari-, rauta-, sulfaatti- ja kloridipitoisuuksien määrittämiseen HACH DR/2010 spektrofotometriä valmistajan ohjeiden mukaan. Sähkönjohtokyvyn laboratoriomittauksiin käytettiin Inolab Cond Level 2 johtokykykymittaria. Veden pH-arvon laboratoriomittauksiin käytettiin WTW pH320-mittaria. Alkaliteetti mitattiin potentiometrisen titrauksen avulla SFS 3005:1981-menetelmällä. Kaliumpermanganaattiluvun määrittäminen tehtiin SFS 3036:1981-menetelmällä.

3.1.4 On-line -monitorointi

Koeverkostossa seurattiin on-line -mittareiden avulla vedenlaadun muutoksia (sähkönjohtavuus, pH, UV-absorbanssi, sameus ja partikkelit) sekä verkostoveden yleistä tilaa (lämpötila, paine ja virtaus). On-line -mittareiden mittaamat arvot siirtyivät keskustietokoneen kautta tietokantaan, jonne ne tallennettiin jatkokäsittelyä varten.

Partikkelit

Koevesijohtoverkostossa olevien partikkeleiden mittaukseen käytettiin PAMAS Partikelmess- und analysesysteme GmbH WaterViewer-partikkelilaskuria. Näyte virtasi (25ml/min) partikkelimittariin ohjelmoidun aikataulun mukaisesti eri putkilinjoilta. Vesinäytteessä olevat partikkelit mitattiin optisella yksittäishiukkasen laskentaperiaatteella. Sensorin läpi virtaavan vesinäytteen jokainen yli 1 µm kokoinen partikkeli aiheutti jännitepulssin. Jännitepulssin korkeus oli suoraan verrannollinen partikkelikokoon. Mitatut jännitepulssit WaterViewer laski ja analysoi pulssikorkeusanalyysiperiaatteella. Mittauksissa käytettyjä kokoluokkia olivat 8: 1-1.5 µm, 1.5-2 µm, 2-4 µm, 4-8 µm, 8-15 µm, 15-25 µm, 25-50 µm ja yli 50 µm. Lisäksi tuloksissa näkyy kumulatiivinen partikkelikokoluokka, yli 1 µm.

Sameus

Koevesijohtoverkoston sameuden on-line -mittaukseen käytettiin HACH 1720F Turbidimeter -mittaria. Sameusmittari otti jatkuvana sivuvirtana (25 ml/min) koevesijohtoverkostosta vettä mittauskammioon. Litran kokoisessa mittauskammiossa oleva vesi vaihtui jatkuvan virtauksen ja ylivalunnan avulla. Mittauskammion sensori havaitsi vedessä olevien suspendoituneiden aineiden aiheuttaman valon sironnan. Sensori lähetti mittaustuloksia sekunnin välein.

Sähkönjohtavuus

Koevesijohtoverkoston sähkönjohtokyvyn on-line -mittaukseen käytettiin Bürkert Fluid Control Systems:n Conductivity transmitter 8225 -mittaria. Sähkönjohtokykyä mitattiin

koevesijohtoverkoston asennetun läpivirtauskammion avulla. Kammiossa olevat elektrodit mittasivat läpivirtaavan veden johtokykyä. Mittari välitti mittaustuloksen sekunnin välein tietokoneelle.

pH

Koevesijohtoverkoston pH:n on-line -mittaukseen käytettiin Bürkert Fluid Control Systems:n pH lähetintä 8025. Veden pH-arvoa mitattiin koevesijohtoverkoston asennetun läpivirtauskammiollisen pH-mittarin avulla. Mittarin sensori oli yhdistelmäelektrodi, joka mittasi läpivirtaavan veden vetyionipitoisuutta yhdistelmäelektrodin havaitseman sähköisen varauksen avulla. Mittari välitti mittaustuloksen sekunnin välein tietokoneelle.

Muut on-line -mittarit

Koevesiverkoston oli asennettu jokaisella putkilinjalla oma virtausmittari sekä kaksi paine- ja lämpötilamittaria. Virtausmittari sijaitsi koevesijohtoverkoston alkupäässä yhdessä paine- ja lämpömittarin kanssa. Verkoston puolella välissä sijaitsivat toiset paine- ja lämpömittarit.

3.2. Paineiskukoe

Paineiskut simuloitiin pysäyttämällä verkostoveden virtaus paineilmaventtiilillä hyvin nopeasti ja avaamalla se taas noin viiden sekunnin kuluttua. Venttiilin avauksen jälkeen virtausnopeus muuttui äkillisesti ensin pysähdyksissä olevasta virtauksesta n. 2,2 – 2,5 litraan minuutissa. Virtausnopeus tasaantui nopeasti takaisin laminaariseen 1,0 l/min.

Paineisku tehtiin ensimmäisen kerran neljän viikon tasaisen (virtaus 1 l/min) jakson jälkeen. Ensimmäisen ja toisen paineiskun välillä koevesijohtoverkoston annettiin tasaantua kaksi viikkoa ja seuraavien paineiskujen välissä olevaa tasaantumisaikaa lyhennettiin kunnes kuudes ja seitsemäs isku tehtiin perättäisinä päivinä. Tasaantumisvälit ennen iskuja olivat 28, 14, 7, 4, 3, 2 ja 1 päivää. Paineiskujen välistä tasaantumisaikaa

lyhennettiin, jotta paineiskun jälkeisen kertymisajan vaikutuksia mitattaviin parametreihin voitiin tutkia.

Paineiskukokeen aikana otettiin vesinäytteitä säännöllisesti Pilot-vesilaitokselta ja koevesijohtoverkostosta ennen paineiskua ja paineiskun jälkeen. Lisäksi vesinäytteitä otettiin kolmen päivän välein ensimmäisen ja toisen paineiskun jälkeen. Partikkelilaskuri mittasi kokeen aikana jokaista linjaa vuorotellen 5 minuutin ajan. Jokaisen linjavaihdon välissä partikkelilaskuri huuhtoi 5 minuutin ajan ennen seuraavan mittauksen alkua. Tästä johtuen partikkelilaskurin tuloksia on käytettävissä 40 minuutin välein jokaiselta mittauslinjalta (Cu1, Cu2, Pe1 ja Pe2). Sameus-, pH- ja sähkönjohtokykykymittarit mittasivat vain linjoja Cu2 ja Pe2.

3.3. Veden virtausnopeuden nostokoe

Veden virtausnopeutta nostettiin koevesijohtoverkoston asennettujen kiertovesipumppujen avulla. Jokaisessa putkilinjassa oli oma kiertovesipumppunsa. Kokeen aikana vesi johdettiin pilotilta runkolinjoihin ja niistä edelleen koevesijohtoverkoston. Veden vaihtuvuus pidettiin koko koejakson ajan kiinteistöverkostossa tasaisena (0,2 l/min). Veden virtausnopeus nostettiin ensin 0.2 l/min:sta 0.4 l/min, sitten 0.8 l/min ja viimeiseksi 1.3 l/min. Jokaisen virtausnopeuden noston jälkeen koevesijohtoverkoston annettiin tasoitua uudella virtausnopeudella kolme viikkoa ennen seuraavaa nostoa

Koevesijohtoverkostosta otettiin biofilminäytteet noin vuorokausi ennen virtausnopeuden nostoa ja kolme viikkoa viimeisen noston jälkeen. Vesinäytteitä koevesijohtoverkostosta otettiin jokaiselta putkilinjalta juuri ennen virtausnopeuden nostoa ja noston jälkeen 1, 5, 10 ja 30 minuutin kuluttua. Lisäksi vesinäytteitä otettiin nostopäivien välillä. Pilot-vesilaitokselta otettiin vesinäytteitä nostopäivien välillä kahden - neljän päivän välein. Partikkelilaskuri mittasi kokeen aikana 40 minuutin välein jokaiselta putkilinjalta kuten paineiskukokeessakin, mutta virtausnostohetkiltä partikkelilaskuri mittasi 1 minuutin välein n. 30 minuutin ajan kerrallaan nostovuorossa olevaa putkilinjaa. Sameus-, pH- ja sähkönjohtokykykymittareiden mittauslinjaa vaihdettiin päivittäin linjaparilta toiselle (Cu1 ja Pe1 -> Cu2 ja Pe2 -> jne.). Virtausnostohetkiksi mittarit vaihdettiin aina nostettaville linjoille.

3.4. On-line-datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla

On-line-mittareiden lähettämä data tallentui tietokantaan aikaleimalla varustettuna. Tietokantaan tehdyillä sql-kyselyillä muodostettiin halutut tutkimusaineistot esimerkiksi tietyltä aikajaksolta tai tietyn parametrin kaikki mittaustulokset. Yksi datarivi sisälsi siis tietyinä ajanhetkenä mitatut arvot kaikilta mittareilta. Datan käsittelyssä haettiin tietokannasta partikkelilaskurin mukaan datarivit, sillä partikkelilaskuri lähetti on-line -mittareista harvimminkin dataa tietokantaan (10 minuutin välein, muut 1 sekunnin välein).

Haetuista datariveistä osa oli joidenkin parametrien suhteen puutteellisia tai mittaustulos oli selvästi virheellinen (esim. negatiivinen tai huomattavan pieni/ suuri) mittalaitteen virheellisestä toiminnasta johtuen. Esimerkiksi paineiskukokeesta puuttui muutamalta päivältä kokonaan partikkelilaskurin mittaustulokset ja siten kyseisten päivien dataa ei ole käsitelty muidenkaan parametrien osalta. Muiden parametrien kuin partikkelimäärien osalta puuttuva ja/ tai virheellinen data korvattiin lineaarisen interpoloinnin ja SOM-korvauksen avulla. Partikkelilaskuri on kuitenkin toiminut moitteettomasti molemmissa koejaksoissa häiriötilanteiden aikana sekä niiden jälkeen.

SOM-karttojen tekemisessä huomattiin ensiarvoisen tärkeäksi se, että käytetyt datarivit sisältävät vain yhden putkilinjan dataa. Tietokannasta saatu raaka-data jaettiin ensin partikkelilaskurin mukaan neljään osaan (Cu1, Cu2, Pe1, Pe2) ja näistä otettiin tarkasteluun paineiskukokeen datasta Cu2 ja Pe2 ja virtausnopeuden nostokokeen datasta kaikki linjat. Virtausnopeuden nostokokeesta poistettiin lisäksi ne sameus-, pH- ja sähköjohtokykykymittareiden datarivit, joissa mittarit mittasivat eri linjaa kuin partikkelilaskuri.

SOM-karttojen ja Sammonin kuvauksen tekoon käytettiin Visual Data-ohjelmaa. Datan esikäsittelyyn käytettiin varianssiskaalausta.

3.5. Tilastolliset menetelmät

Paineiskukokeessa käytettiin parittaista t-testiä selvittäessä paineiskun aiheuttamia muutoksia ja riippumattomien muuttujien t-testiä selvittäessä kyseisten muutoksien putkimateriaalien aiheuttamia eroja. Veden virtausnopeuden nostokokeen osalta laskettiin eri virtausnopeuksille partikkelikokoluokkien ja sameuden välisiä korrelaatioita. Korrelaatiot ja t-testit laskettiin SPSS 11.5 for Windows-ohjelmalla.

Parittaisen t-testin arvoina käytettiin partikkelilaskurin mukaan saatuja arvoja, jolloin ”ennen”-tilanne on 40 minuuttia ennen iskuhetkeä oleva mitta-arvo ja ”jälkeen”-tilanne heti paineiskun jälkeen mitattu arvo. Riippumattomien muuttujien t-testissä verrattiin putkimateriaalien välillä ”ennen” ja ”jälkeen” tilanteiden erotuksia. Virtausnostokokeen korrelaatioita ei voitu laskea partikkelikokoluokkien ja sameuden autokorrelaation vuoksi.

4. TULOKSET

4.1. Paineiskukoe

4.1.1. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu

Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatua seurattiin ottamalla vesinäytteitä ennen veden johtamista verkostoon. Näytteenottopiste oli ylävesisäiliön ja koevesijohtoverkoston välissä olevan pumpun jälkeen. Veden laatua kuvaavat arvot on esitetty Taulukossa 4.1. Veden kokonaismikrobimäärä (AODC), heterotrofisten bakteerien lukumäärä (HPC) ja mikrobeille käyttökelpoisen fosforin (MAP) määrä vaihtelivat laadullisista tekijöistä eniten koejakson aikana, muilta osin Pilot-vesilaitos tuotti hyvin tasalaatuista vettä.

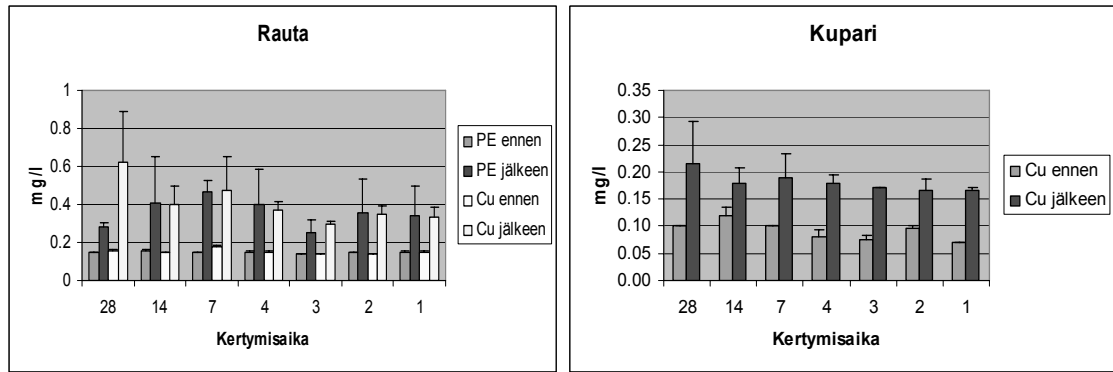
Taulukko 4.1. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu paineiskukokeen aikana.

Parametri	Yksikkö	Keskiarvo ± keskihajonta (n)
pH		7.9 ± 0.2 (10)
Sähkönjohtokyky	µS/cm	183 ± 8 (10)
Lämpötila	°C	7.3 ± 1 (10)
Alkaliteetti	mmol/l	0.84 ± 0.09 (17)
Kovuus	mmol/l	0.83 ± 0.03 (17)
Kloridi	mg/l	3.5 ± 0.4 (17)
Sulfaatti	mg/l	46 ± 0.7 (17)
KMnO ₄ -luku	mg/l	9.6 ± 0.8 (17)
Rauta	mg/l	0.15 ± 0.01 (17)
Kupari	mg/l	0.03 ± 0.01 (16)
HPC	cfu/ml	200 ± 110 (19)
AODC	bact/ml	37700 ± 13300 (21)
Sameus	NTU	0.18 ± 0.04 (21)
AOC	µg/l	66 ± 14 (9)
MAP	µg/l	0.19 ± 0.10 (9)
Kokonaisfosfori	µg/l	2.3 ± 0.5 (10)
Vapaa kloori	mg/l	0.03 ± 0.01 (11)

4.1.2. Koevesijohtoverkoston veden laatu

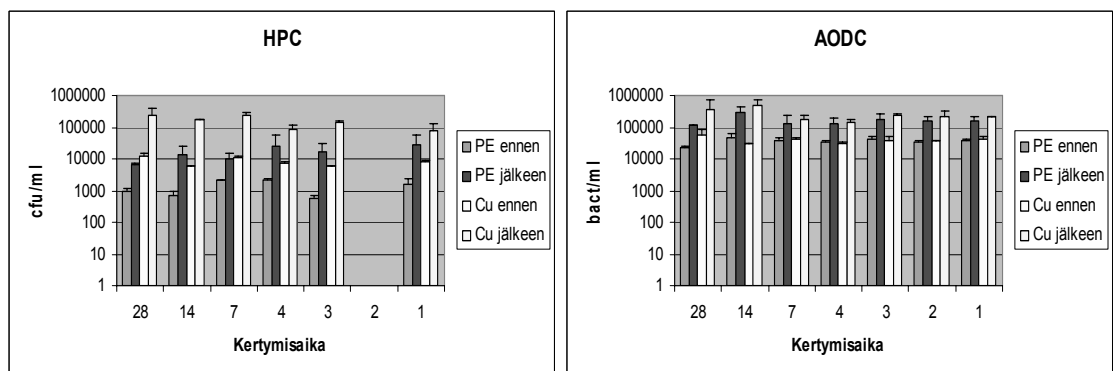
Simuloidut paineiskut nostivat verkostoveden rauta- ja kuparipitoisuutta (Kuva 4.1). Kuparipitoisuutta mitattiin vain kupariputkistoista. Paineiskujen välinen kertymisaika ei vaikuttanut kummankaan metallipitoisuuden suhteelliseen nousuun. Kuparipitoisuus nousi keskimäärin 0.09 mg/l. Kupariputkessa rautapitoisuus nousi keskimäärin 0.26 mg/l ja muoviputkistossa keskimäärin 0.21 mg/l.

Muoviputkistoissa rautapitoisuuden nouseminen vaihteli kupariputkistoja enemmän eri paineiskujen välillä, mutta kummallakin materiaalilla muutos oli merkitsevä (muovilla $p < 0.001$, kuparilla $p = 0.016$). Rautapitoisuus pysyi muoviputkistossa suurimmaksi osaksi matalammalla pitoisuudella kuin kupariputkistossa, vaikka materiaalien välinen ero ei ollutkaan tilastollisesti merkitsevä.



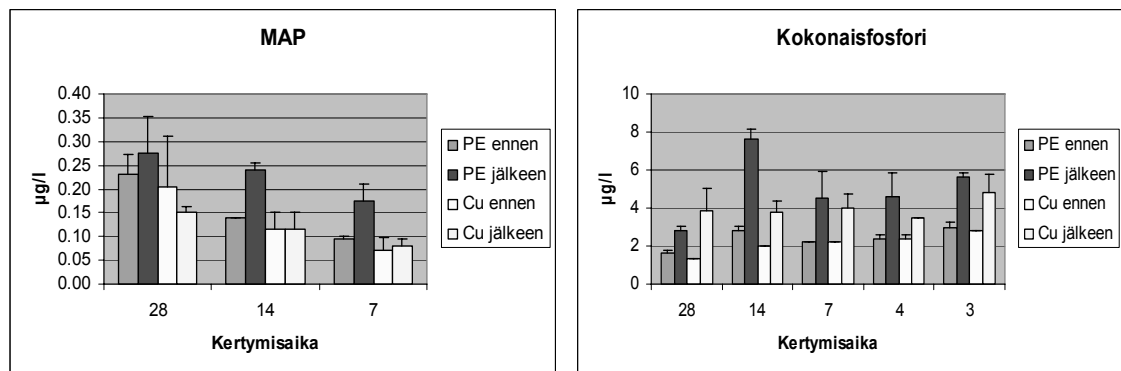
Kuva 4.1. Raudan ja kuparin pitoisuus koevesijohtoverkoston vedessä ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymisäika kuvaa päivien määrää erillisten iskujen välillä.

Simuloidut paineiskut lisäsivät verkostovedessä sekä heterotrofisten bakteerien määrää (HPC) että bakteerien kokonaismäärää (AODC) (Kuva 4.2). Heterotrofisten bakteerien määrä nousi kupariputkistossa enemmän kuin muoviputkistossa (keskimäärin kupari-putkistossa n. 152 000 cfu/ml ja muoviputkistossa n. 15 000 cfu/ml). Kummallakin materiaalilla sekä HPC:n nousu että materiaalien välinen ero oli tilastollisesti erittäin merkittävää. Myös bakteerien kokonaismäärään kohoamisessa putkimateriaalien välillä on eroa. Kupariputkistossa AODC:n nousu oli keskimäärin 222 000 bact/ml kun se muoviputkistossa oli keskimäärin 128 000 bact/ml. AODC:n nousussa ei putkimateriaalien välinen ero ollut tilastollisesti merkitsevä, mutta kummallakin materiaalilla AODC:n muutos oli tilastollisesti merkitsevä (kuparilla $p=0.007$, muovilla $p=0.004$).



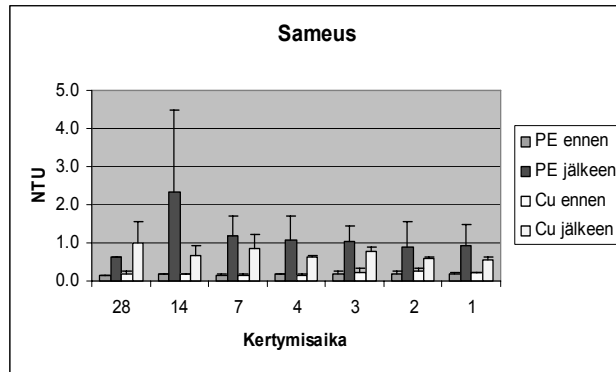
Kuva 4.2. Heterotrofisten bakteerien määrä (HPC) ja bakteerien kokonaismäärä (AODC) koevesijohtoverkoston vedessä ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymisäika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää. Heterotrofisten bakteerien määrän mittauksessa kahden päivän kertymän jälkeiset tulokset eivät olleet luotettavia, joten niitä ei ole ilmoitettu.

Mikrobeille käyttökelpoisen fosforin (MAP) määrän todettiin nousevan paineiskun seurauksena vain muoviputkistossa ($p=0.025$), mutta kokonaisfosforin määrä kohosi paineiskun jälkeen sekä muovi- että kupariputkissa (Kuva 4.3). Kokonaisfosforin määrä nousi ensimmäistä ja neljättä paineiskua lukuunottamatta enemmän muovi- kuin kupariputkistossa. Kokonaisfosforin määrän nousu oli muoviputkistossa keskimäärin $2,7 \mu\text{g/l}$ ja kupariputkistossa keskimäärin $1.9 \mu\text{g/l}$. Kokonaisfosforin määrän nousu oli sekä muovi- että kupariputkistossa tilastollisesti merkitsevää (muovilla $p=0.019$, kuparilla $p<0.001$).



Kuva 4.3. Mikrobeille käyttökelpoisen fosforin (MAP) sekä kokonaisfosforin määrä koesesijohtoverkoston vedessä ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymisaika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää.

Koeverkostoveden sameutta mitattiin kahdella tapaa. Verkostosta otettiin 1 litran vesinäytteitä, jotka analysoitiin laboratoriossa. Toisaalta sameuden muutoksia seurattiin online-monitoroinnin avulla. Paineiskut lisäsivät sameutta selvästi molemmilla materiaaleilla (Kuva 4.4). Ensimmäistä ja toista paineiskua lukuun ottamatta sameus kohoaa enemmän muoviputkistossa (keskimäärin muovilla 0.98 NTU ja kuparilla 0.53 NTU). Paineiskujen välisellä kertymisajalla ei ollut vaikutusta sameuteen laboratoriomittausten perusteella.



Kuva 4.4. Koevesijohtoverkoston veden sameus ennen ja jälkeen paineiskun otetuissa vesinäytteissä. Kertymisaika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää.

Koevesijohtoverkoston vedestä määritettiin myös mikrobeille käyttökelpoisen orgaanisen hiilen määrää (AOC) sekä kaliumpermanganaattiluku. Paineiskut eivät aiheuttaneet muutoksia kummassakaan parametrissa.

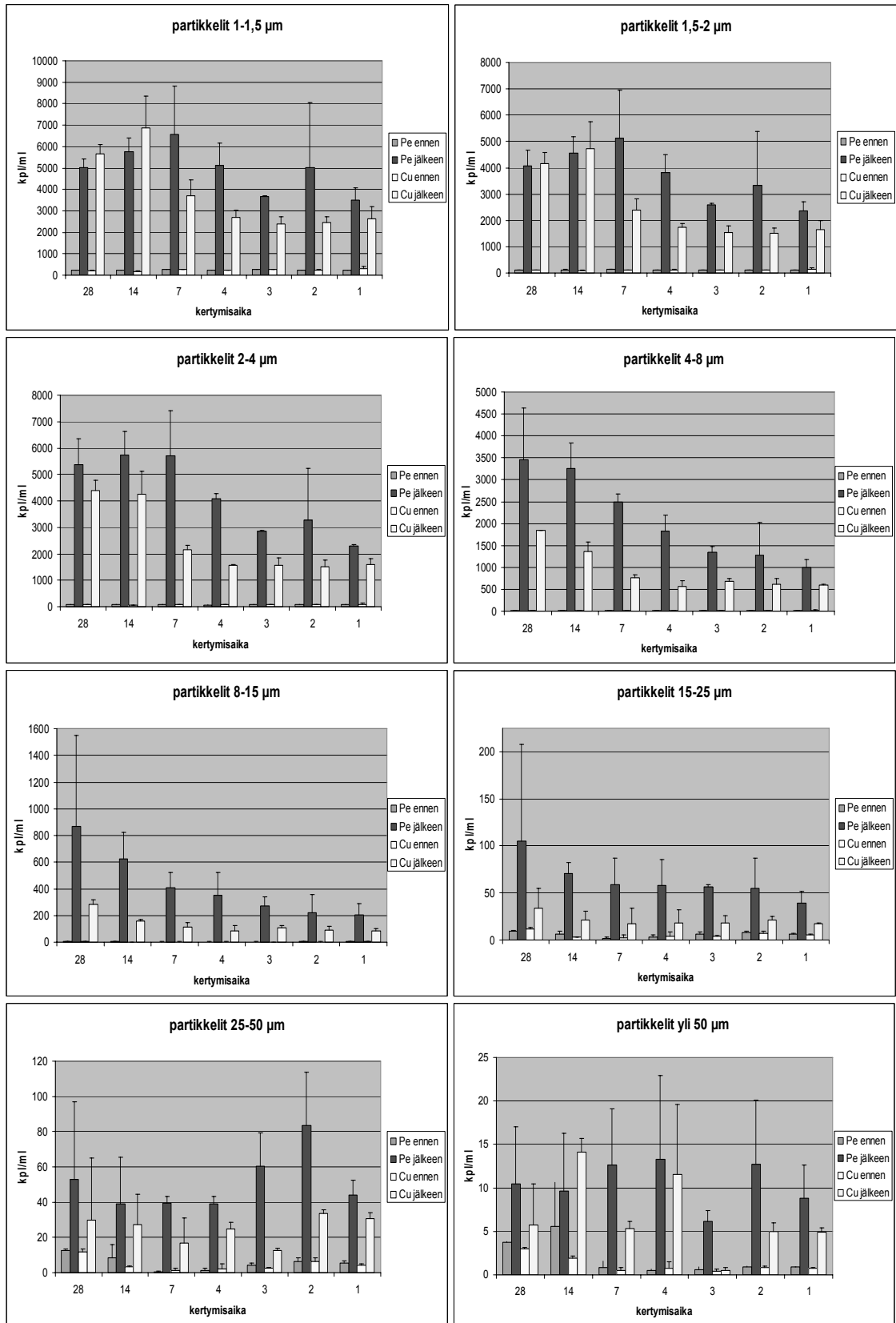
4.1.3. On-line -monitorointi

Koeverkoston veden laatua seurattiin on-line -mittareiden avulla. Simuloidut paineiskut näkyivät partikkeleiden, sameuden ja sähkönjohtokyvyn muutoksina, mutta eivät aiheuttaneet muutoksia pH:ssa. Virtaus ja paine pysyivät tasaisina koko koejakson ajan. Lämpötilassa ei esiintynyt muita muutoksia kuin pientä vuorokausirytmää, joka oli havaittavissa lämpötilan lievänä nousuna (keskimäärin noin 2 astetta) verrattaessa päivä- lämpötiloja yölämpötiloihin. Lisäksi lämpötilat olivat poikkeuksetta noin asteen korkeammat jälkimmäisessä mittauspisteessä kuin kiinteistöverkoston alussa.

4.1.3.1. Partikkelit

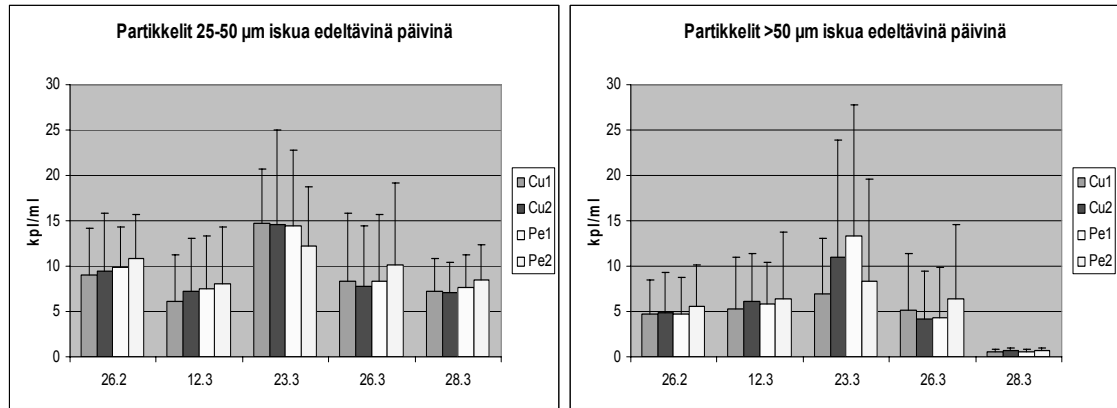
Simuloidut paineiskut vaikuttivat merkittävästi partikkelien määrään verkostovedessä. Paineiskut kohottivat kymmenkertaisiksi pienten partikkelien (kokoluokat 1 – 4 µm) määrän (Kuva 4.5). Selkein vaikutus kertymääjällä irtoavien partikkelien määrään on partikkelikokoluokissa 4-8 µm ja 8-15 µm. Suurimmissa kokoluokissa (etenkin 25 – yli 50 µm) paineiskut eivät aiheuta normaalia pitoisuuden vaihtelua suurempia muutoksia (Kuva 4.6).

Sekä muovi- että kupariputkistossa pienimpien partikkelikokoluokkien pitoisuus yli kymmenkertaistui. Partikkelimäärän keskimääräinen nousu on partikkelikokoluokissa 1 – 4 μm ollut suurempaa muoviputkistossa kuin kupariputkistossa. Suurin ero materiaalien välillä on kuitenkin kokoluokassa 4 – 8 μm , jossa muoviputkistossa keskimääräinen partikkelimäärän nousu oli n. 2000 kpl/ml kun se kupariputkistossa oli keskimäärin n. 800 kpl/ml. Tässä partikkelikokoluokassa havaittu materiaalien välinen ero oli tilastollisesti melkein merkitsevä ($p=0.046$).



Kuva 4.5. Partikkelien määrä kokoluokittain koevesijohtoverkostossa ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymis aika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää. Kuvissa kahden putkilinjan (Cu1 ja Cu2, Pe1 ja Pe2) keskiarvot ja hajonta.

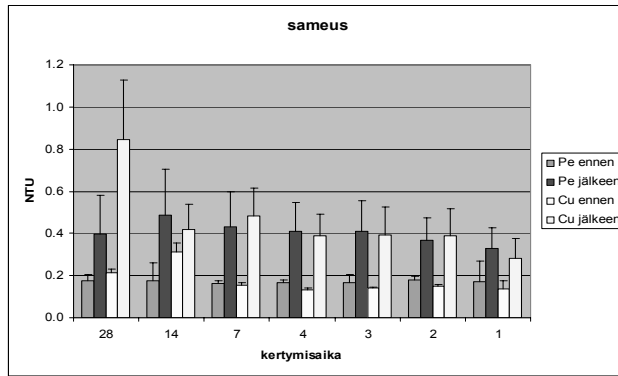
Eniten vaihtelua partikkelimäärän normaalitasossa todettiin kahdessa suurimmassa partikkelikokoluokassa (25-50 μm ja yli 50 μm , Kuva 4.6). Etenkin yli 50 μm kokoluokassa normaalin, häiriöttömän päivän huippuarvo (n. 27 kpl/ml) oli suurempi kuin yksikään paineiskun jälkeen mitatuista arvoista.



Kuva 4.6. Kahden suurimman partikkelikokoluokan paineiskua edeltävän vuorokauden normaali vaihtelu putkilinjoittain. Pylväs on koko kyseisen vuorokauden keskiarvo. Tuloksia puuttuu 19.3 ja 29.3 (paineiskupäivä).

4.1.3.2. Sameus

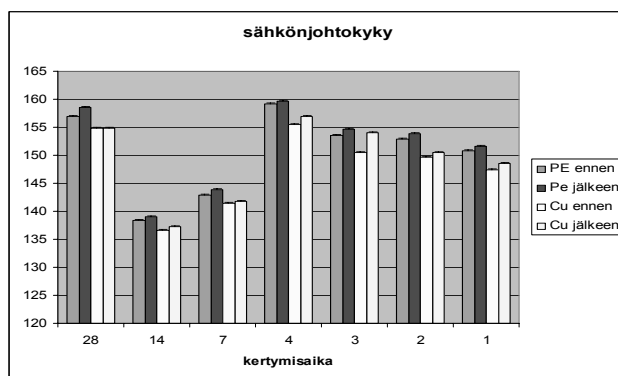
Paineiskut nostivat verkostoveden sameutta on-line -mittauksen perusteella (Kuva 4.7). Sameus nousi keskimäärin enemmän kupariputkistossa (+0.28 NTU) kuin muoviputkistossa (+0.23 NTU), mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Molemmilla putkimateriaaleilla paineiskun aiheuttama sameuden nousu oli tilastollisesti merkitsevää (kuparilla $p=0.008$, muovilla $p<0.001$).



Kuva 4.7. Koevesijohtoverkoston veden sameus ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymisäika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää. Kuvassa esitetty "ennen" tilanne on 40 minuuttia ennen paineiskua ja jälkeen tilanne heti iskun jälkeen, molemmat tilanteet ovat viiden minuutin keskiarvoja.

4.1.3.3. Sähkönjohtokyky

Paineiskut nostivat veden sähkönjohtokykyä molemmilla putkimateriaaleilla (Kuva 4.8). Toisen ja kolmannen iskupäivän matalampi taso johtuu ilmeisesti Pilot-vesilaitoksen hiilidioksidisyötön häiriöstä. Muoviputkistoissa mitattiin kupariputkistoja korkeampi sähkönjohtokyvyn normaalitaso, mutta sähkönjohtokyvyn keskimääräinen kohoaminen paineiskun vaikutuksesta on molemmilla materiaaleilla saman suuruinen. Sähkönjohtokyvyn muutos on sekä muovi- että kupariputkistossa tilastollisesti merkitsevä.



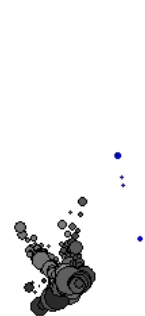
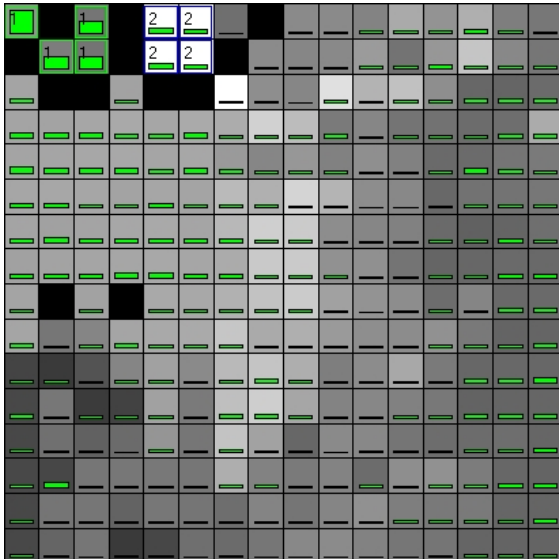
Kuva 4.8. Koevesijohtoverkoston veden sähkönjohtokyky ennen ja jälkeen paineiskun. Kertymisäika kuvaa erillisten iskujen välissä olevien päivien määrää. Kuvassa ennen tilanne on 40 minuuttia ennen paineiskua ja jälkeen tilanne heti iskun jälkeen, molemmat tilanteet ovat viiden minuutin keskiarvoja.

4.1.4. On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla

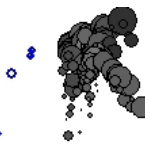
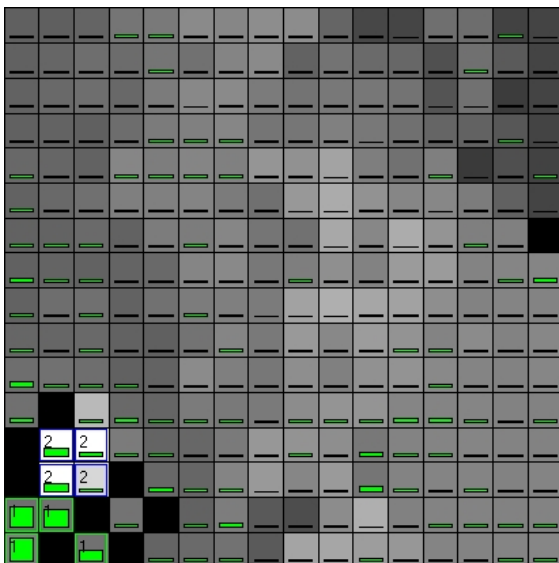
SOM-kartan opetusmuuttujina kokeiltiin eri yhdistelmiä ja paineiskuhetken erottamiseen selkeimmäksi muuttujaksi havaittiin partikkelit ja sähkönjohtokyky. Paineisku vaikutti lähinnä pienimpiin partikkelikokoluokkiin, kuten pylväistäkin (Kuva 4.5) on havaittavissa. Kalkinsyöttöhäiriö nosti myös partikkelimääriä, mutta se vaikutti mitatuista parametreista eniten veden sähkönjohtokykyyn. Kalkinsyöttöhäiriö aiheutti myös pH:n kohoamista, mikä voidaan havaita SOM-kartassa klusterin 2 neuronien valkoisena taustaväriä (Kuvat 4.9 ja 4.10). Sen sijaan paineiskujen aikana veden pH-arvossa ei havaittu muutoksia (klusterin 1 neuronit). SOM-kartassa pylväinä esitetty sameus on selvästi suurimmillaan paineiskuhetkinä ja etenkin muovilla (Kuva 4.10) sameus pysyy tasaisena normaalitilanteessa.

SOM-kartalla neliöinä esitetyt neuronit vastaavat Sammonin kuvauksen ympyröitä. Sammonin kuvauksessa ympyrän halkaisija kuvaa siinä olevien datarivien määrää eli mitä isompi ympyrä on, sitä enemmän siinä on datarivejä. Sekä SOM-kartoista että Sammonin kuvaajista voidaan huomata erikoistilanteiden selkeä erottuminen ns. normaalitilanteesta. Molemmilla putkimateriaaleilla häiriötilanteet erottuvat muista neurooneista SOM-kartassa tyhjien (mustien) neuronien ympäröiminä. Häiriötilanteiden lisäksi kummankaan klusterin neuronit eivät sisältäneet muita datarivejä.

Sammonin kuvauksessa ns. normaalitilanne ilmenee neuroneita kuvaavien ympyröiden rykelmänä, josta erillään olevat ympyrät, ns. outlierit, sisältävät normaalista poikkeavia datarivejä. Paineiskuneuronit eroavat hyvin paljon normaalitilanteesta ja ovat sen vuoksi Sammonin kuvaajassa hyvin kaukana normaalitilannetta kuvaavasta ympyrärykelmästä. Kalkinsyöttöhäiriö ei nostanut partikkelimääriä yhtä korkealle kuin paineisku (suurimmillaankin vain n. 4 000 kpl/ml), mistä johtuen kalkinsyöttöhäiriön neuronit eivät eroa normaalitilanteesta yhtä suuresti kuin paineiskun neuronit ja sijaitsevat Sammonin kuvauksessa näin ollen suhteellisen lähellä normaalitilannetta kuvaavaa neuronirykelmää.

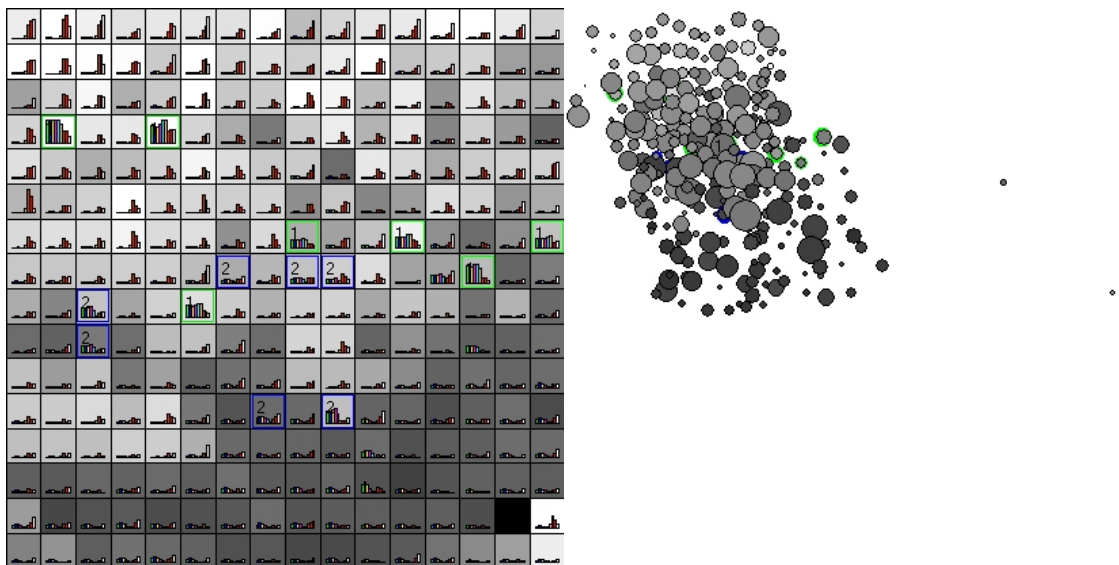


Kuva 4.9. Kupariputken SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molemmissa kuvissa taustavärin harmaan sävyt kuvaavat veden pH-arvoa (tumma sävy: matala pH, vaalea: sävy korkea pH). SOM-kartan pylväissä on sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat paineiskuhetkiä ja siniset klusterit (numero 2) kalkinsyöttöhäiriötä. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.



Kuva 4.10. Muoviputken SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molemmissa kuvissa taustavärin harmaan sävyt kuvaavat veden pH-arvoa (tumma sävy: matala pH, vaalea sävy: korkea pH). SOM-kartan pylväissä on sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat paineiskuhetkiä ja siniset klusterit (numero 2) kalkinsyöttöhäiriötä. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.

Esimerkkinä kuvassa 4.11 on SOM-kartta ja Sammonin kuvaus, jossa opetusmuuttujana on käytetty häiriötilanteita huonosti erottelevia parametreja. Paineiskut eivät aiheutta- neet muutoksia opetusmuuttujina käytetyissä lämpötila-, paine- ja virtausdatoissa, jol- loin häiriötilanteet eivät eronneet muista datariveistä. SOM-kartan pinnalla on esitetty pylväinä eri partikkelikokoluokkia. Pylväiden erilaisten jakaumien perusteella on voitu löytää häiriötilanteet erillisiksi klustereiksi. Paineiskuhetkinä kaikkien partikkelikoko- luokkien partikkelimäärät ovat nousivat selvästi normaalitilanteeseen verrattuna. Myös kalkinsyöttöhäiriössä kaikkien partikkelikokoluokkien määrät nousivat tasaisesti, mutta suhteessa vähemmän kuin paineiskuissa. Sammonin kuvauksessa neuroneita vastaavat ympyrät eivät ole pakkautuneet tiiviiksi normaalitilannetta kuvaavaksi rykelmäksi. Ope- tusmuuttujina käytetyissä parametreissa on mm. vuorokausirytmien aiheuttamaa vaihte- lua ja tämä vaihtelu on hyvin tasaista, jolloin kauemmas normaalitilanteesta sijoittunei- na neuroneina ilmeneviä suuria poikkeustilanteita ei ole. Molemmat häiriötilanteet ”hä- viävät” normaalitilannetta kuvaavien neuronien sekaan, koska opetusmuuttujina käytet- tyjen parametrien arvot eivät poikkeakaan häiriötilanteessa normaalista.



Kuva 4.11. Esimerkki huonosti dataa jaottelevista opetusmuuttujista kuparilla. Opetusmuuttujina on käytetty lämpötilaa, painetta ja virtausta. Molemmat häiriötilanteet häviävät hajanaisen datan keskelle. Molemmissa kuvissa taustaväriä on sameus ja SOM-kartan pylväissä on esitetty partikkelikokoluokat, joiden avulla on erotettu häiriötilanteet klustereiksi. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat paineiskuhetkiä ja siniset klusterit (numero 2) kalkinsyöttöhäiriötä.

4.1.5. Tilastolliset menetelmät

4.1.5.1. Korrelaatio

Eri partikkeliluokat korreloivat keskenään selvästi. Pienimmät partikkelikokoluokat (kokoluokat 1-8 µm) ja suurimmat partikkelikokoluokat (8- yli 50 µm) korreloivat hyvin vahvasti keskenään.. Suurten ja pienten partikkelikokoluokkien välillä ei ole korrelaatiota.

Partikkelikokoluokat ja sameus korreloivat erittäin merkittävästi kummallakin putkimateriaalilla (Taulukko 4.2). Vain suurimman partikkelikokoluokan (>50 µm) ja sameuden välinen korrelaatio on heikompaa kuin muilla kokoluokilla, mikä selittyy kyseisen partikkelikokoluokan reagoimattomuudella paineiskuihin.

Taulukko 4.2. Partikkelikokoluokkien ja sameuden välinen korrelaatio molemmille putkimateriaaleille (n=14). (*) p=0.001 (**) p=0.01 (*) p=0.05.**

	1-1,5 µm	1,5-2 µm	2-4 µm	4-8 µm	8-15 µm	15-25 µm	25-50 µm	>50 µm
sameus Cu	0.842***	0.851***	0.887***	0.936***	0.958***	0.934***	0.890***	0.628*
sameus PE	0.909***	0.903***	0.926***	0.950***	0.964***	0.926***	0.784**	0.705**

4.2 Veden virtausnopeuden nostokoe

4.2.1. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu

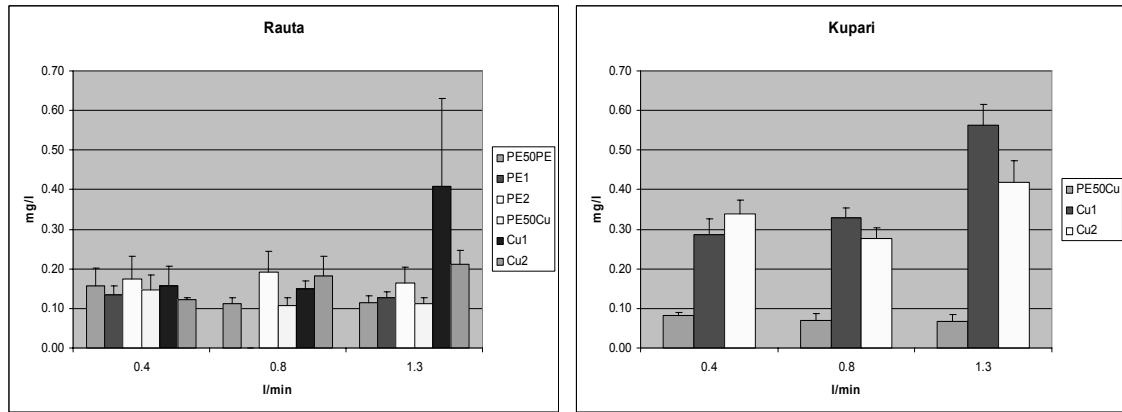
Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatua tarkkailtiin koejakson aikana vastaavalla tavalla kuten paineiskukokeessakin (Taulukko 4.3). Veden kokonaismikrobimäärä (AODC) ja heterotrofisten bakteerien lukumäärä (HPC) vaihtelivat laadullisista tekijöistä eniten, muilta osin Pilot-vesilaitos tuotti hyvin tasalaatuista vettä

Taulukko 4.3. Pilot-vesilaitokselta lähtevän veden laatu veden virtausnopeuden nostokokeen aikana.

Parametri	Yksikkö	Keskiarvo ± keskihajonta (n)
pH		8.1 ± 0.2 (25)
Sähkönjohtokyky	µS/cm	178 ± 8.6 (15)
Alkaliteetti	mmol/l	0.74 ± 0.08 (17)
Kovuus	mmol/l	0.75 ± 0.03 (6)
KMnO ₄ -luku	mg/l	9.1 ± 1.0 (17)
Rauta	mg/l	0.11 ± 0.02 (29)
Kupari	mg/l	0.07 ± 0.02 (8)
HPC	cfu/ml	870 ± 440 (30)
AODC	bact/ml	52400 ± 15300 (9)
AOC	µg/l	61 ± 23 (11)
MAP	µg/l	0.14 ± 0.06 (8)
Vapaa kloori	mg/l	0.01 ± 0.00 (13)

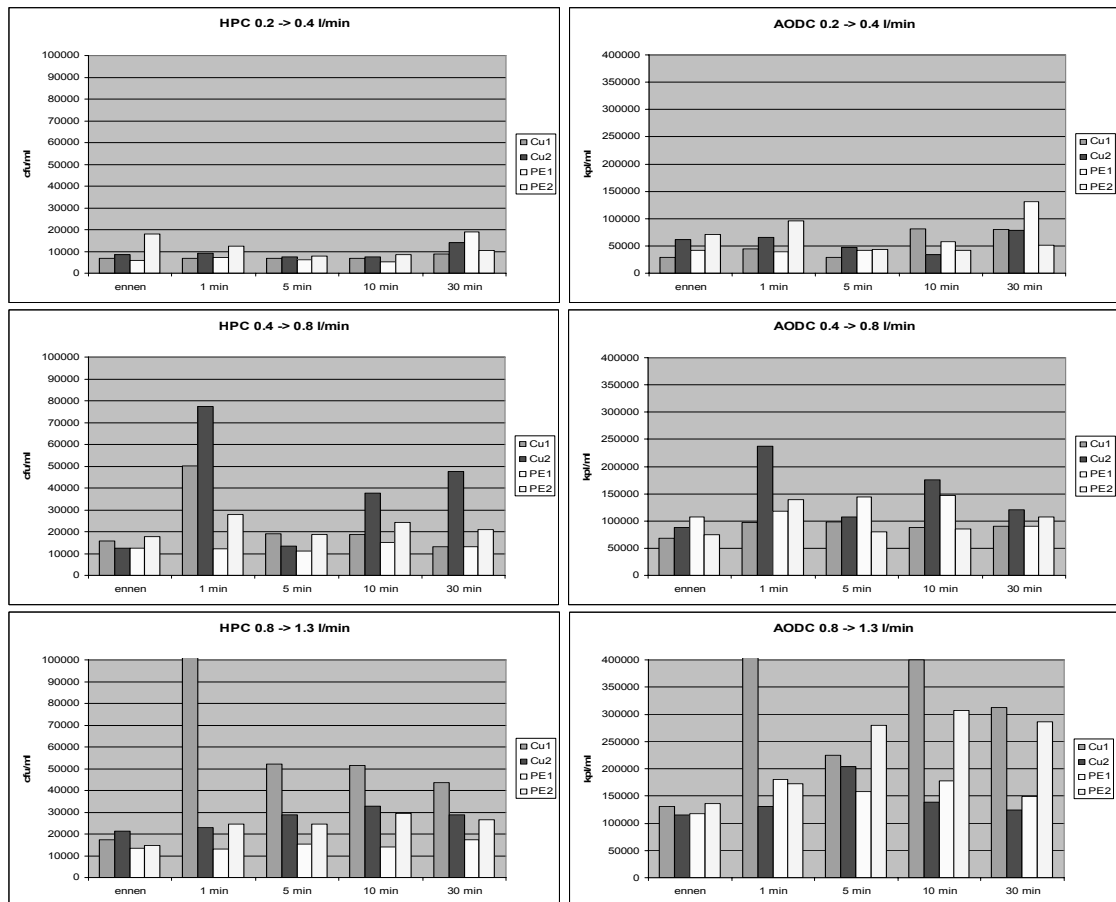
4.2.2. Koevesijohtoverkoston veden laatu

Veden virtausnopeuden nosto nosti kupariputkistoista mitattua kuparipitoisuutta jokaisella nostokerralla (Kuva 4.12). Verkostoveden kuparipitoisuus nousi eniten viimeisessä virtausnopeuden nostossa (0.8 -> 1-3 l/min). Virtausnopeuden nostoilla ei ollut yhtä suurta vaikutusta rautapitoisuuteen. Rautapitoisuuden nousu oli suurimmillaan 0.3 mg/l, kun kuparipitoisuuden nousu oli suurimmillaan 0.45 mg/l. Rautapitoisuuden nousussa ei putkimateriaalien välillä havaittu eroja.



Kuva 4.12. Raudan ja kuparin konsentraatioiden nousu 30 minuutin kuluessa virtausnostosta.

Veden virtausnopeuden nosto kohotti sekä heterotrofisten bakteerien määrää että bakteerien kokonaismäärää (Kuva 4.13). Jokaisella virtausnopeudella on oma tasapaino bakteerien määrässä (HPC n. 8000, 15000 ja 17000, AODC n. 55000, 85000 ja 130000). Ensimmäisessä virtausnopeuden nostossa (0.2 -> 0.4 l/min) heterotrofisten bakteerien määrä kohoaa hitaasti saavuttaen suurimmat pitoisuudet vasta 30 minuutin kuluttua nostohetkestä. Toisessa (0.4 -> 0.8 l/min) ja kolmannessa (0.8 -> 1.3 l/min) virtausnopeuden nostossa bakteerimäärät kohoavat nopeammin etenkin kupariputkissa. Lisäksi kupariputkistojen vedessä heterotrofisten bakteerien määrät kohoavat enemmän kuin muoviputkistoissa. Bakteerien kokonaismäärän muutokset ovat hyvin samankaltaiset verrattuna heterotrofisten bakteerien kokonaismäärän muutoksiin.



Kuva 4.13. Heterotrofisten bakteerien määrä (HPC) ja bakteerien kokonaismäärä (AODC) koevesijohtoverkoston vedessä eri putkilinjoilla ennen virtausnopeuden nostoa ja 1, 5, 10 ja 30 minuutin kuluttua nostosta.

4.2.3. On-line -monitorointi

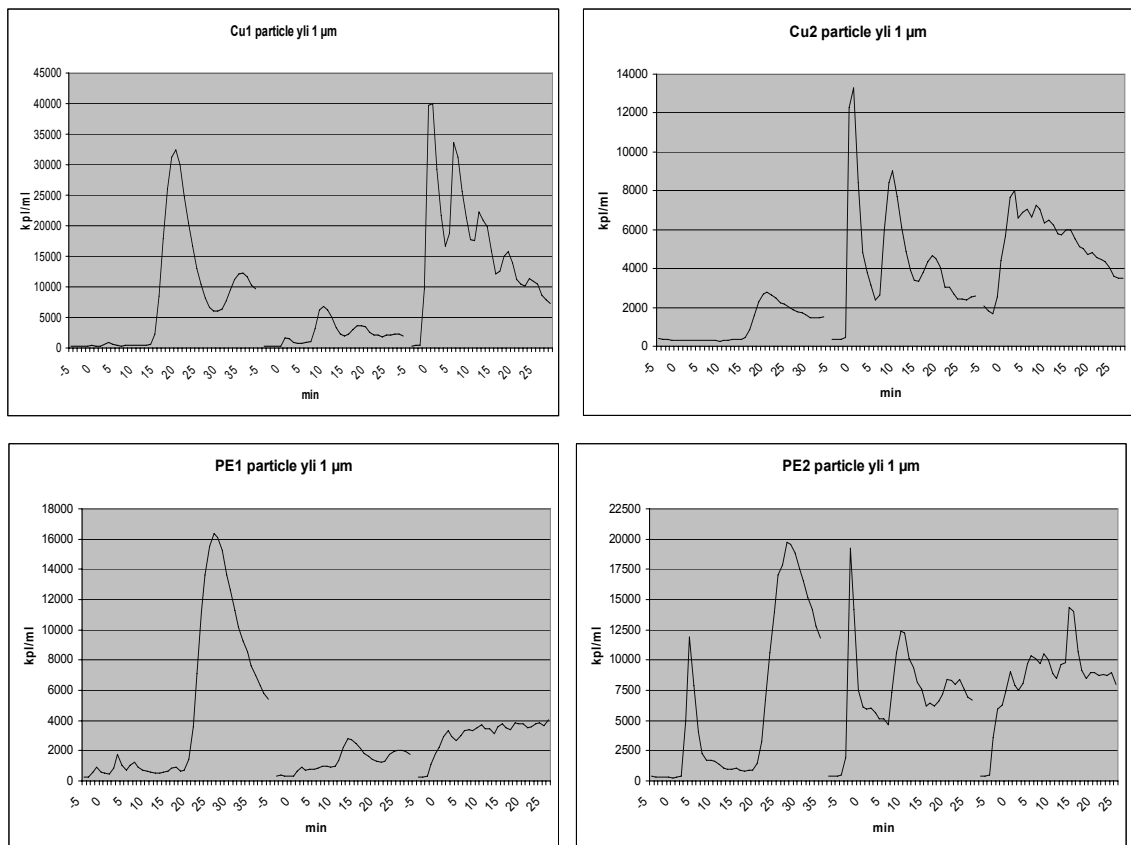
Veden virtausnopeuden muutos ei vaikuttanut verkostoveden lämpötilaan, paineeseen, veden pH-arvoon eikä sähkönjohtokykyyn.

4.2.3.1. Partikkelit

Veden virtausnopeuden muutokset nostivat partikkelimäärää jokaisella nostokerralla (Kuva 4.14). Kuten paineiskukokeessa, virtausnopeuden muutokset eivät vaikuttaneet verkostovedessä olevien isojen partikkelikokoluokkien (25 – yli 50 μm) määrään. Suurimmat partikkelimäärän muutokset olivat Cu1-linjalla (viimeisessä nostossa n. 40 000

kpl/ml), mutta myös PE2-linjalla partikkelimäärä nousi selvästi (n. 20 000 kpl/ml). PE1- ja Cu2-linjojen partikkelimäärän nousut jäivät PE2-linjaa pienemmiksi (n. 16 000 kpl/ml ja 14 000 kpl/ml).

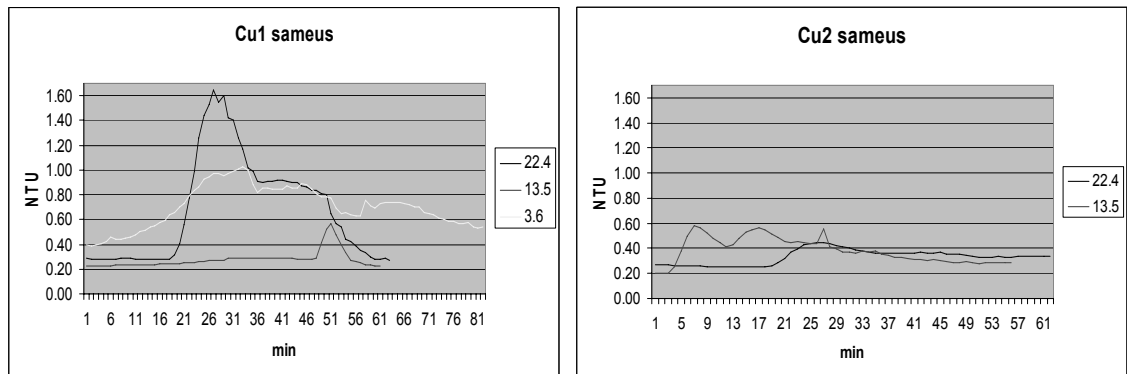
Jokainen virtausnopeuden nosto aiheutti erilaisen muutoksen verkostoveden partikkelimäärissä.. Veden partikkelipitoisuus reagoi viiveellä veden virtausnopeuden nostoon etenkin ensimmäisessä virtausnostossa. Osassa nostoista (etenkin Cu2 ensimmäinen nosto ja PE1 toinen nosto) partikkelimäärä nousi vain vähän (n. 2500 kpl/ml). Suurimassa osassa mittauksista partikkelimäärät olivat korkeat mittausjakson päätyttyä ja tasaantuivat normaalitasolle vasta muutaman tunnin kuluttua virtausnostosta.



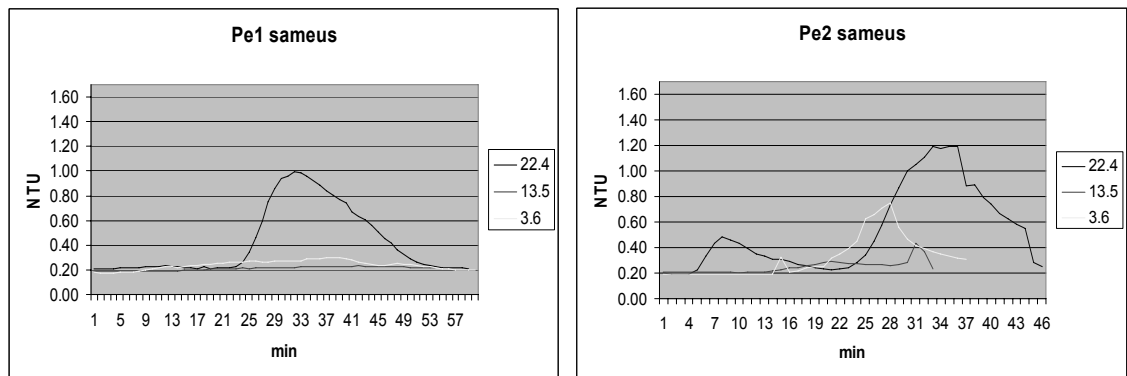
Kuva 4.14 Partikkeleiden summaparametri eri putkilinjoilla virtausnopeuden muutoshetkillä. Mittaukset 1 minuutin välein kaikilta kolmelta virtausnopeuden nostohetkiltä. Jokainen mittausjakso on aloitettu viisi minuuttia ennen virtausnostohetkeä (0-kohta). Viivakuvaaja on katkaistu mittauksen päätyttyä.

4.2.3.2. Sameus

Veden virtausnopeuden nostot erottuvat sameusdatassa jokaisella nostokerralla (Kuvat 4.15 ja 4.16). Kuparin 2-linjaa lukuun ottamatta sameus nousee eniten ensimmäisenä nostopäivänä. Kuparin 1-linjalla ja muovin 2-linjalla myös kolmas virtausnopeuden nosto erottuu selvästi sameudessa.



Kuva 4.15. Kupariputkien sameus virtausnostohetkiltä. Kuparin 2-linjan kolmannen virtausnopeuden noston tiedot eivät olleet luotettavia, joten niitä ei ole esitetty. X-akselilla mittausaika minuutteina, mittaus aloitettu virtausnopeuden nostohetkestä.



Kuva 4.16. Muoviputkien sameus virtausnostohetkiltä. X-akselilla mittausaika minuutteina, mittaus aloitettu virtausnopeuden nostohetkestä.

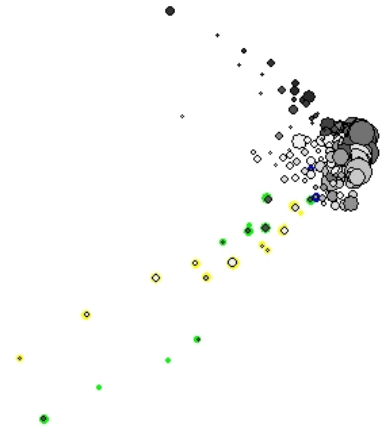
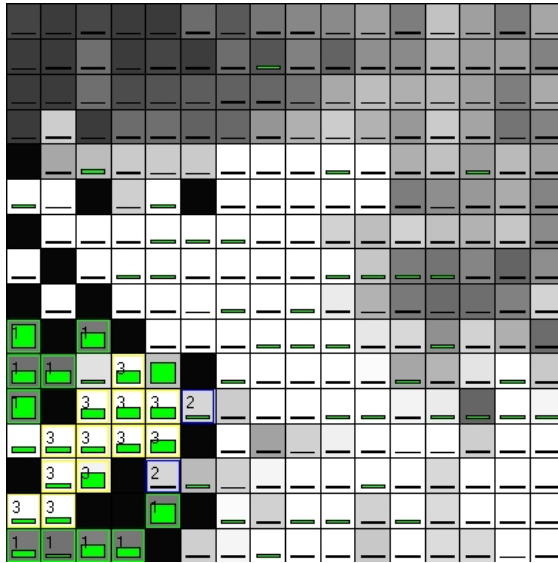
4.2.4. On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla

Veden virtausnopeuden nostot vaikuttivat veden laatuun eri tavalla kuin paineiskut. Paineiskuissa häiriö havaittiin kuvassa impulssimaisena kun virtausnopeuden nostossa häi-

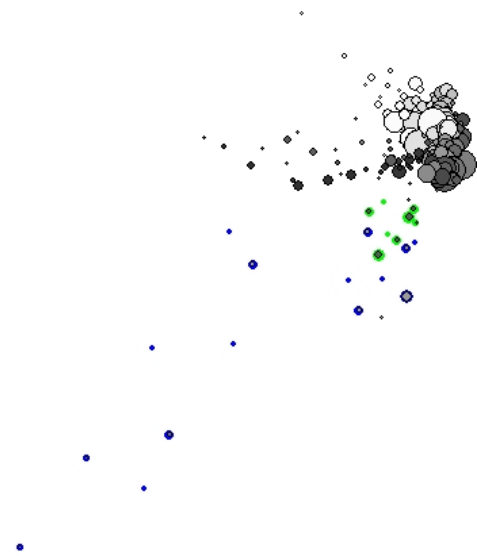
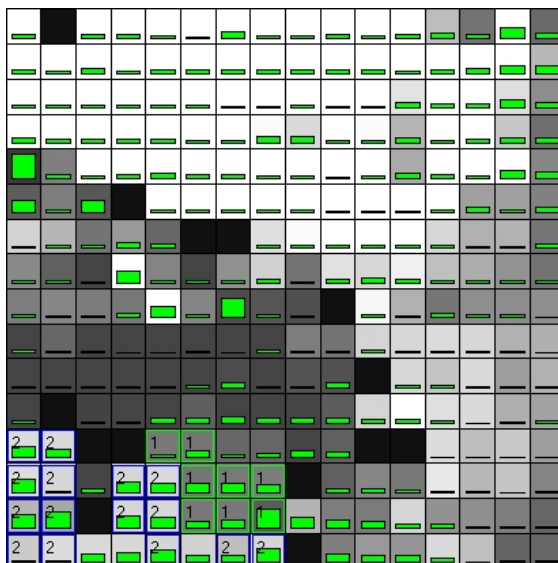
riö eteni enemmän viuhkamaisena. Etenkin Sammonin kuvaajissa (Kuvat 4.17-4.20) on havaittavissa selkeä ero verrattuna paineiskukuviin. Suhteellisen tasainen kohoaminen ja laskeutuminen partikkelimäärissä (Kuva 4.14) aiheuttaa SOM-kartassa häiriötilanteen datarivien ryhmittymisen useampaan neuroniiin. Tämä puolestaan näkyy Sammonin kuvauksessa ympyröiden viuhkamaisena levittäytymisenä.

Kaikkein selkeimmin virtausnopeuden nostot erosivat toisistaan ja normaalitilanteesta muovin 1-linjalla, mikä on nähtävissä tasaisesti ryhmittyneestä SOM-kartasta ja Sammonin kuvaajasta (Kuva 4.19). Rinnakkaisella muovin 2-linjalla puolestaan neuronit ovat kaikkein vähiten ryhmittyneet kussakin klusterissa ja Sammonin kuvaajassa eri neuronit näyttävät sijoittuneen satunnaisesti ympäri kuvaajaa (Kuva 4.20).

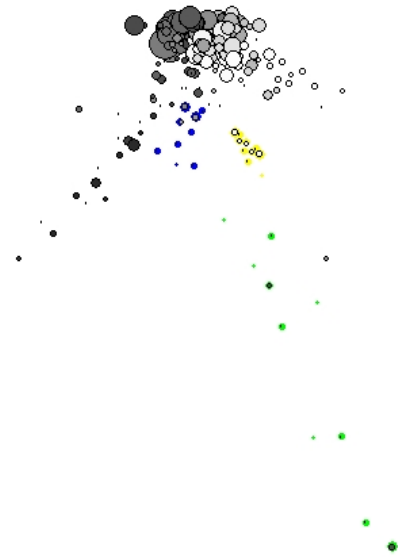
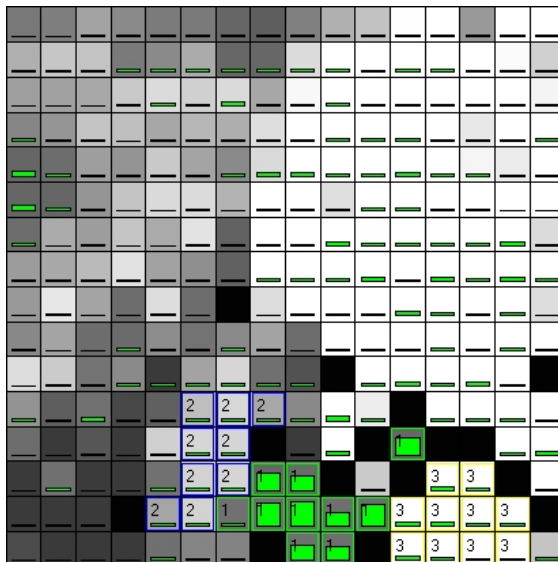
Kuparin 2-linjalla toinen ja kolmas virtausnopeuden nosto ovat aiheuttaneet ensimmäistä nostoa suuremmat muutokset partikkelimäärissä ja ne erottuvat Sammonin kuvaajassa selkeinä outliereina (Kuva 4.18). Kuparin 1-linjalla toinen virtausnopeuden nosto ei poikennut merkittävästi normaalitilanteesta, sillä kyseiset neuronit eivät erotu outliereina normaalitilannetta kuvaavasta rykelmästä (Kuva 4.17).



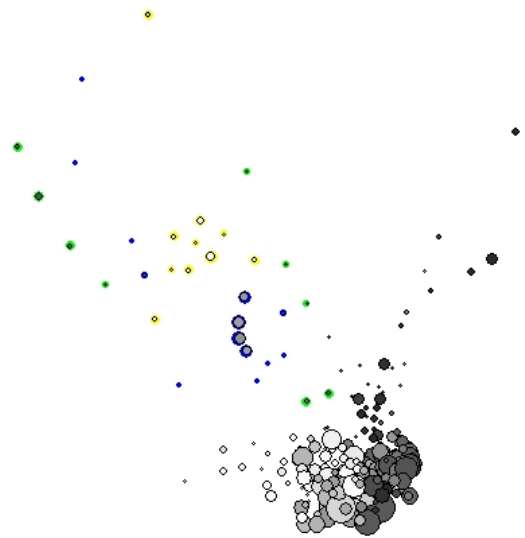
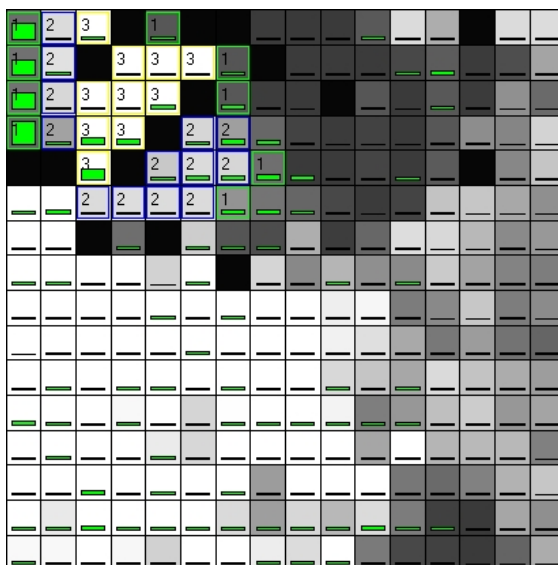
Kuva 4.17. Kuparin 1-linjan SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molempien kuvien taustavärinä on virtausnopeus ja SOM-kartan pylväissä sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat ensimmäistä virtausnopeuden nostoa, siniset klusterit (numero 2) toista virtausnopeuden nostoa ja keltaiset klusterit (numero 3) kolmatta virtausnopeuden nostoa. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.



Kuva 4.18. Kuparin 2-linjan SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molempien kuvien taustavärinä on virtausnopeus ja SOM-kartan pylväissä sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat ensimmäistä virtausnopeuden nostoa ja siniset klusterit (numero 2) toista virtausnopeuden nostoa. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.



Kuva 4.19. Muovin 1-linjan SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molempien kuvien taustaväriä on virtausnopeus ja SOM-kartan pylväissä sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat ensimmäistä virtausnopeuden nostoa, siniset klusterit (numero 2) toista virtausnopeuden nostoa ja keltaiset klusterit (numero 3) kolmatta virtausnopeuden nostoa. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.



Kuva 4.20. Muovin 2-linjan SOM-kartta (vasemmalla) ja Sammonin kuvaus (oikealla). Molempien kuvien taustaväriä on virtausnopeus ja SOM-kartan pylväissä sameus. Vihreät klusterit (numero 1) kuvaavat ensimmäistä virtausnopeuden nostoa, siniset klusterit (numero 2) toista virtausnopeuden nostoa ja keltaiset klusterit (numero 3) kolmatta virtausnopeuden nostoa. Kartan opetusmuuttujina on käytetty kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä.

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Yleinen koeasetelma

Tässä tutkimuksessa käytettiin pilot-mittakaavan vesilaitoksen tuottamaa vettä, joka johdettiin koevesijohtoverkoston. Koevesijohtoverkosto voitiin jakaa kahteen osaan, runkolinjoihin ja kiinteistöverkoston, joista molempia tai vain kiinteistöverkostoa käytettiin häiriötilanteiden simuloinnissa. Sekä runkolinjat että kiinteistöverkosto olivat pituudeltaan 100 metriä ja kumpaakin putkimateriaalia (polyeteenikomposiitti ja kupari) oli rinnakkaiset verkostot. Käytössä ollut Pilot-vesilaitos ja koevesijohtoverkosto eivät ole ainutlaatuisia maailmassa. Yhdysvalloissa Environmental Protection Agency:n käytössä on 27 metriä pitkä koevesijohtoverkosto (mm. Rossmann ym., 2001) ja muutamissa biofilmitutkimuksissa on käytetty pieniä, noin 4 metrin pituisia putkistoja. Biofilmitutkimuksia ja putkimateriaalien vaikutusta veden laatuun on tutkittu myös vedellä täytettyjen putkien avulla (mm. Silhan ym., 2006) ja perinteisemmällä pullokoikeilla. Toisaalta myös todellisessa vesijohtoverkostossa on tehty kokeita, mm. Lehtola ym. (2004a) tutkivat vesijohtoverkoston mekaanisen puhdistuksen vaikutusta veden laatuun ja verkostossa kasvavaan biofilmiin. Todelliset vesijohtoverkostot ovat monien kilometrien mittaisia ja koostuvat eri ikäisistä ja mahdollisesti monista eri materiaaleista valmistetuista putkistoista. Vaikka koevesijohtoverkostot ovat huomattavasti todellisia verkostoja lyhyempiä, niissä voidaan tarkemmin kontrolloida koeolosuhteita kuin todellisessa vesijohtoverkostossa.

Pilot-vesilaitoksen käyttö mahdollistaa myös verkostoon syötetyn veden paremman kontrolloinnin. Lisäksi mahdolliset vedentuotannossa ilmenevät häiriötilanteet voidaan havaita lähes välittömästi, koska Pilot-vesilaitos sijaitsee koevesijohtoverkoston välittömässä läheisyydessä. Kalkinsyötössä ilmennyt häiriötilannetta lukuun ottamatta Pilot-vesilaitos tuotti hyvin tasalaatuista talousvettä. Pilot-vesilaitos on myös vedentuotantoprosesseiltaan hyvin vertailukelpoinen täyden mittakaavan pintavesilaitoksien kanssa (Kajosaari, 1981).

Veden virtausnopeus kiinteistöverkostossa on normaalivirtaamalla yleensä enintään 3 m/s (Ympäristöministeriön asetus kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistoista 2007). Koe-

vesijohtoverkostossa paineiskukokeen aikana käytetty veden virtausnopeus 1 l/min vastaa Cu-putkissa 0.22 m/s ja PE-putkissa 0.15 m/s. Koejaksoissa käytetyt veden virtausnopeudet ovat siis huomattavasti todellisessa kiinteistöverkostossa esiintyviä virtausnopeuksia pienempiä. Pienempien virtausnopeuksien seurauksena simuloidut häiriötilanteet saattavat näkyä veden laadun hitaampana palautumisena häiriötilanteesta. Toisaalta korkeammilla, lähempänä todellista normaalivirtaamaa olevilla virtausnopeuksilla simuloidut häiriötilanteet saattaisivat aiheuttaa esim. suurempia partikkelimäärän nousuja. Koejaksoista saadut tiedot veden laadun muutoksista eri häiriötilanteissa ovatkin lähinnä suuntaa-antavia.

Veden laadun muutoksia parhaiten kuvaavat parametrit olivat rauta- ja kuparipitoisuus, mikrobiologiset indikaattorit, partikkelit, sameus, sähkönjohtavuus ja pH. Tutkituista parametreista edellä mainitut kertovat eniten veden turvallisuudesta niin kuluttajaa kuin vedenjakeluverkostoaikin ajatellen.

5.2 Koevesijohtoverkoston veden laatu

Koevesijohtoverkoston rauta- ja kuparipitoisuudet nousivat molemmissa koejaksoissa. Pilot-vesijohtolaitokselta lähtevän veden rauta- ja kuparipitoisuudet olivat huomattavasti matalampia kuin häiriötilanteiden jälkeen mitatut pitoisuudet. Syy pitoisuuksien nousuun on mitä ilmeisimmin koevesijohtoverkoston kerääntyneessä saostumassa, joka koejaksoilla aiheutettujen häiriöiden (paineiskut ja veden virtausnopeuden muutos) ansiosta lähtee liikkeelle. Zacheus ym. (2001) ovat tutkimuksessaan todenneet suomalais-ten vesijohtoverkoston saostumissa esiintyvän mm. rautaa.

Saostumat sisältävät Zacheuksen ym. (2001) tutkimuksen mukaan myös mikrobeja, mikä voi osaltaan selittää molemmissa koejaksoissa havaittua heterotrofisten bakteerien lukumäärän ja bakteerien kokonaismäärän kasvua. Bakteeripitoisuuksien nousu voi myös johtua koevesijohtoverkostossa olevan biofilmin lohkeilusta ja irtoamisesta. Putkimateriaalien välillä havaittu ero bakteeripitoisuuksissa saattaa johtua käytetyistä viljely- ja värjäysmenetelmistä, jotka mahdollisesti suosivat joitain bakteerilajeja. Mikroskooppitutkimuksissa on havaittu eri putkimateriaaleille muodostuvan omanlaisensa bakteeripopulaatiot (Lehtola ym., 2004b).

Simuloidut paineiskut vaikuttivat etenkin PE-putkissa mikrobeille käyttökelpoisen fosforin (MAP) sekä molemmilla putkimateriaaleilla kokonaisfosforin pitoisuuteen. Muoviputkistoista on havaittu irtoavan käytön alkuvaiheessa, noin kolmen ensimmäisen vuoden aikana fosforia (Al-Jasser, 2007). Tämä voi osaltaan selittää PE-putkistojen korkeammat fosforipitoisuudet. Veden virtausnopeuden nostokokeessa ei nostohetkiltä tutkittu veden MAP- ja kokonaisfosforipitoisuuksia.

5.3 On-line -monitorointi

Yksi paineiskukokeen hypoteeseista oli, että paineiskut puhdistaisivat koevesijohtoverkostoa, jolloin kertymisaika ja mitatun parametrin pitoisuus korreloisivat keskenään. Hypoteesin mukainen trendi on havaittavissa vain partikkelikokoluokassa 4-8 μm . Muissa partikkelikokoluokissa paineiskut aiheuttivat joko jokaisella kerralla erittäin suuren partikkelimäärän nousun (etenkin partikkelikokoluokat 1-1.5 μm ja 1.5-2 μm) tai eivät aiheuttaneet minkäänlaista muutosta normaaliin partikkelimäärän vaihteluun (etenkin partikkelikokoluokka > 50 μm).

Veden virtausnopeuden nostokokeessa partikkelit reagoivat kokoluokasta riippumatta kaikki hyvin samankaltaisesti. Ensimmäisessä virtausnostossa on jokaisella putkijonalla havaittavissa n. 15 minuutin viive ennen partikkelimäärien kohoamista, mikä voi johtua virtausnopeuden pienestä, vain 0.2 l/min noususta. Seuraavissa virtausnostoissa vastaavaa viivettä ei havaittu. Havaittu viive voi myös johtua eri mittauslaitteiden kellojen eriaikaisuuksista. Paineiskukokeesta poiketen veden virtausnopeus aiheutti rinnakkaisissa putkistoissa keskenään erilaisia reaktioita. Lisäksi partikkelimäärät tasaantuivat jokaisella nostolla ja jokaisella putkijonalla eri tavalla.

Veden virtausnopeuden nostokokeessa sameus palautui ns. normaalitasolle huomattavasti hitaammin kuin paineiskukokeessa. Paineiskukokeessa sameus nousi piikkimaisesti ja palautui normaalitasolle 40 minuutin kuluessa kun se veden virtausnostokokeessa oli jopa muutaman vuorokauden kohollaan. Kuparin 2-linjaa lukuun ottamatta veden virtausnostokokeessa sameus myös nousi huomattavasti enemmän kuin paineiskukokeessa, parhaimmillaan yli 1.6 NTU (Cu1 ensimmäinen nosto, kuva 4.15) kun paineis-

kukokeessa kupariputkistossa suurin arvo oli n. 1.1 NTU (ensimmäinen paineisku, kuva 4.7). Ensimmäisten virtausnopeuden nostojen aiheuttamat suuremmat sameuden nousut voivat osaltaan johtua siitä, että linjojen kiertovesipumput käynnistettiin ensimmäistä kertaa vasta ensimmäisillä nostohetkillä.

Sameus- ja partikkelimittauslaitteet havaitsevat osittain samaa veden laadun häiriötä, lähinnä suspendoituneita kiintoaineita ja bakteereja (Hoyer ja Schell, 1998). Molemmissa koejaksoissa sameus- ja partikkelimittauslaitteet reagoivat samansuuntaisesti simuloituun häiriöön, paineiskukokeessa nopeana piikkimäisenä vasteena ja veden virtausnopeuden nostokokeessa hitaampana, tasaisempana nousuna ja laskuna. Gauthier ym. (1999) havaitsivat tutkimuksessaan, että hydraulisen häiriön aiheuttama veden mikrobipitoisuus saattoi edelleen olla korkea, vaikka vesi ei enää ollut ulkonäöltään sameaa. Kyseisessä tutkimuksessa havaittiin sameuden nopeasti pienenevän suurimpien partikkeleiden laskeuduttua. Sameus ja mikrobiologiset indikaattorit reagoivat simuloituihin häiriötilanteisiin myös tässä tutkimuksessa keskenään samanlaisella trendillä. Mittausaikatauluista johtuen ei voida kuitenkaan arvioida, olivatko mikrobipitoisuudet kohollaan vielä sameuden palauduttua normaalitasolle.

Partikkelimittauslaite on sameusmittauslaitetta informatiivisempi, sillä sen avulla saadaan kvantitatiivista ja kvalitatiivista (kokoluokat) tietoa häiriötilanteesta. Partikkelimittauslaite on myös herkempi havaitsemaan pienetkin muutokset veden laadussa. Erittäin mielenkiintoista on eri partikkelikokoluokkien reagoiminen eri tavalla häiriötilanteissa, minkä myös Verberk ym. (2006) havaitsivat tutkiessaan Amsterdamin vedenjakeluverkoston veden partikkelimääriä ja sameutta. He havaitsivat myös isompien partikkeleiden (yli 31 μm) ilmestymisen vedenjakeluverkostoon vasta kauempana, usean kilometrin päässä vesilaitoksesta. Vastaavat partikkelikokoluokat eivät reagoineet häiriötilanteeseen paineiskukokeessa, mutta niiden lukumäärä oli huomattavasti suurempi kuin Verberkin ym. tutkimuksessa (paineiskukokeessa 5-30 kpl/ml, Amsterdamin vesijohtoverkostossa n. 1 kpl/ml). Todellista normaalivirtaamaa huomattavasti pienemmät virtausnopeudet näyttävät siis vaikuttavan vedessä oleviin suuriin partikkeleihin ja niiden laskeutumiseen.

5.4 On-line -datan käsittely laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla

Molempien koejaksojen koeasetelmat ovat ensisijaisesti mikrobiologisesta näkökulmasta suunniteltuja. Tästä johtuen mm. veden virtausnopeuden nostokokeessa on partikkelilaskuri mitannut virtausnostohetkillä eri linjoille eri pituisia mittausjaksoja. Lisäksi kyseisen koejakson aikana sameus-, pH- ja sähkönjohtokyvyn mittauslaitteita käytettiin vuoropäivinä rinnakkaisilla putkilinjoilla, mutta virtausnostohetkillä ne asetettiin mittaamaan nostovuorossa olevaa putkilinjaa. Paineiskukokeen aikana sameus-, pH- ja sähkönjohtokyvyn mittauslaitteita käytettiin vain 2-putkilinjoille, mutta partikkelilaskuri mittasi jokaista putkilinjaa vuorotellen. Nämä molemmat käytännöt olivat datan perinteisemmän käsittelyn kannalta ymmärrettäviä. Tämä kuitenkin aiheutti datan rikkonaisuutta ja vaikeutti datan käsittelyä laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.

Datan synkronointi osoittautui ongelmalliseksi, sillä muista on-line -mittauslaitteista poiketen partikkelilaskurin mittaustulokset siirtyivät eri tietokoneen kautta tietokantaan. Tämän todetun aikaviiveen lisäksi eri mittauslaitteiden sijainti koevesijohtoverkostossa aiheutti vedenlaadun muutosten ”näkyminen” eri aikaisesti eri mittauslaitteissa. Erilaisien vedenlaadullisten muuttujien huippuarvoja ei siis pystytty kohdentamaan. Käytetty data haettiin tietokannasta käyttämällä hakuparametrinä partikkelilaskurin mittaustuloksia, jolloin paineiskukokeen osalta mittaustuloksia oli 40 minuutin välein putkilinjaa kohden. Veden virtausnopeuden nostokokeen osalta dataa oli nostohetkiltä tiheämmin, 1 minuutin välein putkilinjaa kohden. Tämä osaltaan vaikeuttaa koejaksojen vertailua keskenään.

SOM-kartan opetusmuuttujia valittaessa havaittiin tärkeäksi käyttää laadullisia muutoksia havaitsevia parametrejä, kuten partikkelimäärät, sameus, sähkönjohtokyky ja pH. Näiden parametrien avulla voitiin havaita häiriötilanteet selkeinä outlierina. Sammonin kuvauksessa havaittiin molempien koejaksojen osalta myös vähemmän selkeästi erottuvia outliereita, joissa ei kuitenkaan havaittu normaalista vaihtelusta poikkeavia arvoja. Käytettyjen datapohjaisten laskennallisesti älykkäiden menetelmien voidaan katsoa soveltuvan hyvin myös tällaisen datan käsittelyyn, sillä niiden avulla pystytään erottamaan

halutut tilanteet (häiriöt) aivan kuten esim. ilmansaaste-episodit on pystytty erottamaan normaalitilanteesta (Kolehmainen ym. 2000).

Molempien koejaksojen SOM-karttojen opetusmuuttujina käytettiin kahdeksaa partikkelikokoluokkaa ja sähkönjohtokykyä. Sähkönjohtokyky muuttui eniten tahattomasta kalkinsyöttöhäiriöstä johtuen. SOM-karttojen keskinäisen vertailun helpottamiseksi sähkönjohtokykyä kuitenkin käytettiin myös veden virtausnopeuden nostokokeen SOM-karttojen opetusmuuttujana. Molempien koejaksojen SOM-kartoissa esitettiin sameuden muutos pylväinä. Koejaksojen SOM-kartat ja Sammonin kuvaukset eroavat toisistaan vain taustavärin suhteen: paineiskukokeessa harmaan sävyt kuvaavat veden pH-arvoa ja veden virtausnopeuden nostokokeessa veden virtausnopeutta.

Sammonin kuvauksesta näkyy selkeästi häiriötilanteiden ero, paineiskukokeessa häiriötilanteen outlierit erottuvat yksittäisinä ja selkeinä kun taas veden virtausnopeuden nostokokeen häiriötilanteen outlierit levittäytyvät viuhkamaisena. Koejaksoista mitatuista partikkelien kokonaismääristä (kokoluokka yli 1 μm) suurin pitoisuus oli kolmannessa veden virtausnopeuden nostossa Cu1-linjalla (n. 40 000 kpl/ml, kuva 4.14). Paineiskukokeessa partikkelien kokonaismäärä oli suurimmillaan 16 000 – 26 000 kpl/ml. Vastaavasti pienimmät partikkelimäärän nousut olivat veden virtausnopeuden nostokokeessa n. 3 000 kpl/ml ja paineiskukokeessa n. 6 300 kpl/ml. Tärkein syy häiriötilanteiden ilmenemiseen Sammonin kuvauksessa eri tyyppisinä saattaa siis olla mittausstiheydessä. Veden virtausnopeuden nostokokeesta on häiriötilanteesta dataa 1 min välein per putkijonja, jolloin partikkelimäärän nousu ja lasku jakautuu moniin neuroneihin ja niitä Sammonin kuvauksessa kuvaaviin ympyröihin. Paineiskukokeessa häiriötilanne on piikkimäinen ja jokaista paineiskua vastaava datarivi voidaan löytää häiriötilannetta kuvaavista neljästä outlierista (kuvat 4.9 ja 4.10).

Molempien koejaksojen SOM-kartoissa sameutta kuvaavat pylväät ovat häiriötilannetta kuvaavissa neuroneissa. Partikkelimäärien ja sameuden välinen yhteys on siis havaittavissa myös SOM-kartoista. Poikkeuksena on ainoastaan veden virtausnopeuden nostokokeen osalta Cu2-linja (kuva 4.18), jossa sameus on ollut satunnaisesti nousseena myös ns. normaalitilanteessa. Syynä tähän on häiriötilanteessa mitatut pienet sameuden nousut, keskimäärin 0.2 – 0.4 NTU (kuva 4.15), mistä johtuen normaalitilanteen sameuden vaihtelut tulevat varianssiskaalatuissa pylväissä esiin. Muilla linjoilla sameus

on noussut häiriötilanteessa huomattavasti enemmän, keskimäärin 0.8 – 1.4 NTU, eikä sameuden normaalivaihtelu siksi näy yhtä korkeina pylväinä.

6. JOHTOPÄÄTELMÄT

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kahden koejakson avulla on-line-monitorointia vedenjaku-ympäristössä. On-line-mittauslaitteilla kerättyä dataa käsiteltiin ns. perinteisempien keinojen lisäksi laskennallisesti älykkäiden menetelmien avulla.

Eri putkimateriaalien välillä on eroja sekä mikrobistossa että veteen irtoavan biofilmin ja saostuman määrässä. Aikaisemmissa tutkimuksissa on huomattu putkimateriaalin vaikuttavan niin mikrobien kasvuun kuin jälkidesinfiointiaineena käytetyn kloorin kulu-tukseenkin. Lisäksi putkimateriaalien pinnat ovat erilaisia huokoisuudeltaan ja reagoivat etenkin veden kemiallisen laadun vaihteluun eri tavalla. Molemmassa tässä tutkimukses-sa käytetyissä putkimateriaaleissa havaittiin mikrobikasvustoa saostumassa ja/tai bio-filminä. Mobilisoitunut saostuma voidaan havaita veden sameuden ja partikkelimäärän nousuna. Lisätutkimuksia tarvitaan etenkin eri putkimateriaaleille ominaisista mikrobi-populaatioista.

Sameus- ja partikkelimittauslaitteet kertovat paljon veden laadullisista muutoksista. Partikkelikokoluokat voivat antaa osviittaa siitä, minkä tyyppisistä partikkeleista voi mahdollisesti olla kyse (yksittäisiä bakteereja, epäorgaanisia kolloidisia hiukkasia, bio-filmin palasia, jne.). Häiriötilanteissa veteen irtoavista partikkeleista tarvitaan lisätutkimuksia. Sameus- ja partikkelimittauslaitteiden käyttö vedenjaku-ympäristön on-line-monitoroinnissa olisi hyvin informatiivista nykyisenkin tiedon valossa, sillä etenkin partikkelit ovat herkkiä reagoimaan häiriötilanteisiin.

Laskennallisesti älykkäät menetelmät soveltuvat myös veden laadullisten muutosten tutkimiseen ja häiriötilanteiden havaitsemiseen. Menetelmiä voidaan käyttää myös hie-man rikkonaisemmalla datalla, vaikka luotettavimmat tulokset saadaan jatkuvan ja riit-tävän tiheän mittauksen avulla. Tässä tutkimuksessa laskennallisesti älykkäitä menetel-miä käytettiin lähinnä tiedonlouhintaan, mutta vedenjaku-ympäristön on-line-monitoroinnista on varmasti mahdollista kehittää automaattisia hälytysjärjestelmiä ja kenties jopa häiriöti-

lanteita ennustavia ohjelmia. Lisätutkimuksia laskennallisesti älykkäiden menetelmien soveltamiseen puhtasvesipuolella tarvitaan.

Lähteet

- Al-Jasser A.O. 2007. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water Research* 41:387-396.
- Bastos A.C. ja Magan N. 2006. Potential of an electronic nose for early detection and differentiation between *Streptomyces* in potable water. *Sensors and Actuators B-Chemical* 116:151-155.
- Benson R.L. ja Worsfold P.J. 1993. A flow-injection approach to the continuous monitoring of residual coagulants (aluminum and iron) in potable and treated waters. *Science of the Total Environment* 135:17-25.
- Bonastre A., Ors R., Capella J.V., Fabra M.J. ja Peris M. 2005. In-line chemical analysis of wastewater: present and future trends. *Trends in Analytical Chemistry* 24:128-137.
- Bowden G.J., Maier H.R. ja Dandy G.C. 2004. Input determination for neural network models in water resources applications. Part 2. Case study: forecasting salinity in a river. *Journal of Hydrology* 301:93-107.
- Brown M.A. ja Emmert G.L. 2006. On-line monitoring of trihalomethane concentrations in drinking water distribution systems using capillary membrane sampling-gas chromatography. *Analytica Chimica Acta* 555:75-83.
- Camber A.K., Brastrup K., Sandvig A., Clement J., Spencer C. ja Capuzzi A J. 2003. Effect of distribution system materials on bacterial regrowth. *Journal of American Water Works Association* 95:107-121.
- Dear J.P. ja Mason N.S. 2006. Effect of chlorine on polyethylene pipes in water distribution networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications* 220:97-111.
- Drage B.E., Upton J.E. ja Purvis M. 1998. On-line monitoring of micropollutants in the River Trent (UK) with respect to drinking water abstraction. *Water Science and Technology* 38:123-130.
- Elfström Broo A., Berghult B. ja Hedberg T. 1997. Copper corrosion in drinking water distribution systems- The influence of water quality. *Corrosion Science* 39:1119-1132.
- EY, Euroopan unionin neuvosto 1998. Euroopan unionin neuvoston direktiivi ihmisten käyttöön tarkoitettun veden laadusta. Direktiivi 83/ EY. Euroopan unionin neuvosto. Brysseli.
- Gauthier V., Rard B.G., Portal J.-M., Block J.-C. ja Gatel D. 1999. Organic matter as loose deposits in a drinking water distribution system. *Water Research* 33:1014-1026.
- Gunatilaka A ja Dreher J. 2003. Use of real-time data in environmental monitoring: current practices. *Water Science and Technology* 47:53-61.

- Hoyer O. ja Schell H. 1998. Monitoring raw water quality and adjustment of treatment processes – Experiences at the Wahnbach reservoir. *Water Science and Tehcnology* 37:43-48.
- Kajosaari E. 1981. RIL 124 Vesihuolto. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Karttunen E. 2003. RIL 124-1 Vesihuolto I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Kiééné L., Lu W. ja Lévi Y., 1998. Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems. *Water Science and Technology* 38:219–227.
- Kohonen T. 2006. Self-organizing neural projections. *Neural Networks* 19:723-733.
- Kolehmainen M., Martikainen H., Hiltunen T. ja Ruuskanen J. 2000. Forecasting air quality parameters using hybrid neural network modelling. *Environmental Monitoring and Assessment* 65:277-286.
- Kolehmainen M, Ruuskanen J., Rissanen E. ja Raatikainen O. 2001. Monitoring odorous sulfur emissions using self-organizing maps for handling ion mobility spectrometry data. *Journal of the Air and Waste Management Association* 51:966-971.
- Lehtola M.J., Nissinen T.K., Miettinen I.T., Martikainen P.J. ja Vartiainen T. 2004a. Removal of soft deposits from the distribution system improves the drinking water quality. *Water Research* 38: 601–610.
- Lehtola M.J., Miettinen I.T., Keinänen M.M, Kekki T.K., Laine O., Hirvonen A., Vartiainen T. ja Martikainen P. 2004b. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plasti pipes. *Water Research* 38:3769-3779.
- Mounce S.R., Khan A., Wood A.S., Day A.J., Widdop P.D. ja Machell J. 2003. Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system. *Information Fusion* 4: 217–229.
- Myllykangas T. Prevention of bromine-containing disinfection by-products during drinking water treatment. Publications of the National Public Health Institute A3/2004. 78-81.
- Niska H, Hiltunen T, Kolehmainen M, Ruuskanen J. Hybrid models for forecasting air pollution episodes. In: David W. Pearson, Nigel C. Steele, Rudolf F. Albrech , eds. *Artificial Neural Nets and Cenetic Algorithms Proceedings of the International Conference*, Roanne, France, April 23-25, 2003, p. 80-84. Springer-Verlag, 2003.
- Niquette P., Servais P. ja Savoir R. 2000. Research note. Impacts of pipe material on densities of fixed bacterial biomass in drinking water distribution system. *Water Research* 34:1952-1956

Palit A. ja Pehkonen S.O. 2000. Copper corrosion in distribution systems: evaluation of a homogenous Cu₂O film and a natural corrosion scale as corrosion inhibitors. *Corrosion Science* 42:1801-1822.

Quinn N.W.T., Jacobs K., Chen C.W. ja Stringfellow W.T. 2005. Elements of a decision support system for real-time management of dissolved oxygen in the San Joaquin River Deep Water Ship Channel. *Environmental Modelling and Software* 20: 1495–1504.

Rosen C., Röttrop J. ja Jeppsson U. 2003. Multivariate on-line monitoring: challenges and solutions for modern wastewater treatment operation. *Water Science and Technology* 47(2): 171–179.

Rossmann L.A., Brown R.A., Singer P.C. ja Nuckols J.R. 2001. DBP-formation kinetics in a simulated distribution system. *Water Research* 35: 3483–3489.

Silhan J., Corfitzen C.B. ja Albrechtsen H.J. 2006. Effect of temperature and pipe material on biofilm formation and survival of *Escherichia coli* in used drinking water pipes: a laboratory-based study. *Water Science and Technology* 54:49-56.

STM, Sosiaali- ja terveysministeriö 2000. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. - Asetus 461. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki.

Van Der Kooij D. 2000. Biological stability: A multidimensional quality aspect of treated water. *Water Air and Soil Pollution* 123:25-34.

Vanrolleghem P.A. ja Lee D.S. 2003. On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art. *Water Science and Technology* 47(2): 1–34.

Verberk J.Q.J.C., Hamilton L.A., O'Halloran K.J., Van der Horst W. ja Vreeburg J. 2006. Analysis of particle numbers, size and composition in drinking water transportation pipelines: results of online measurements. *Water Science and Technology* 6:35-43.

Zacheus O.M., Lehtola M.J., Korhonen L.K. ja Martikainen P.J. 2001. Soft deposits, the key site for microbial growth in drinking water distribution networks. *Water Research* 35:1757-1765.

Zacheus O.M. 2002. Suurten vesilaitosten toimittaman talousveden laatu Suomessa vuosina 1996-1998. Sosiaali- ja terveysministeriön selvityksiä 2002:4