

Jatkuvatoimiset
mittarit talousveden
laadun valvonnassa
vesijohtoverkostossa
SWIM työpaketti 3
loppuraportti

Petri Juntunen

Ympäristötekniikan opetus- ja
tutkimusyksikkö

Sisällys

1	Tiivistelmä	3
2	Osallisuudet hankkeessa	4
3	Johdanto	5
3.1	Projektin sisältö	5
3.2	Mihin jatkuvatoimisia mittareita voidaan hyödyntää?.....	6
3.3	Katsaus erilaisiin jatkuvatoimisiin verkoston veden laadun mittausparametreihin ..	8
4	Esiselvitys: Markkinoilla olevan laitetarjonnan kartoitus.....	9
4.1	Kartoituksen sisältö	9
5	Pilot-kokeet.....	12
5.1	Savonian pilot-verkosto (WaterLoop).....	12
5.1.1	Pilot-kokeiden sisältö ja periaatteet.....	14
5.2	Pilot-kokeiden tulokset.....	16
6	Kenttäkokeet.....	21
6.1	Mittauskaivo	21
7	Johtopäätökset	23
7.1	Markkinaselvitys	23
7.2	Jatkuvatoimisten mittareiden hyödyntäminen	24
7.3	Jatkuvatoimisten mittareiden hankinnassa, sijoittamisessa ja käytössä huomioon otettavat asiat.....	25
7.3.1	Mittareiden sijainnin valinta (sensor placement).....	25
7.3.2	Laitteiden fyysisestä kestävyydestä	26
7.3.3	Mittausjärjestelmät erikokoisille ja erilaisille vesilaitoksille	26
7.4	Tiedonkäsittelyssä (siirto, keräys, validointi, säilytys, analysointi, raportointi ja tulkinta) huomioon otettavat asiat	27
7.5	Yleistä pohdintaa ja koneoppimiseen liittyviä lisätutkimustarpeita	28
7.5.1	Mittareiden kyvystä havaita erilaisia ja eritasoisia vedenlaadun häiriöitä.....	28
7.5.2	Jatkuvatoimiset sensorit vesilaitosten viranomaistarkkailun työkaluna	29
7.6	Yhteenveto	30

Liitteet

Tämän raportin liitteenä on esitetty mallisivut kustakin liitteestä .pdf muodossa. Mallisivussa on esitetty otsikkotasolla, mitä kukin liite pitää sisällään. Voit pyytää varsinaisen datan lähettämällä sähköpostia osoitteeseen mikko.auriola@savonia.fi.

Liite 1: Kirjallisuuskatsaus

Liite 2.1 Testausprotokolla

Liite 2.2 Data

Liite 2.3 Testauspäiväkirja

Liite 3: Laboratoriotulokset ja analyysimenetelmät

Jatkuvatoimiset mittarit talousveden laadun valvonnassa vesijohtoverkostossa – SWIM työpaketti 3 loppuraportti

1 Tiivistelmä

Vedenlaatusensorit ovat laitteita, jotka mittaavat veden fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia ominaisuuksia, kuten sähkönjohtavuutta, klooripitoisuutta, sameutta, partikkelien lukumäärää ja laatua tai mikrobikasvua. Vedenlaatusensoreiden avulla voidaan mitata veden laatua, seurata ja hallita vesijohtoverkoston toimintaa ja kuntoa sekä havaita mahdollisia häiriöitä tai saastumistilanteita. Perinteisiin näytteenotto- ja laboratoriopohjaisiin analyyseihin verrattuna sensorit pystyvät havaitsemaan erityisesti nopeita reaaliaikaisia vedenlaadun vaihteluita. Näytteenottoon perustuvien analyysien yhdeksi haittapuoleksi voidaan lukea se, että ne edustavat vain pientä otantaa koko vesimäärästä.

Tässä projektissa tutkittiin vesijohtoverkoston asennettavien jatkuvatoimisten vedenlaatusensoreiden käyttökelpoisuutta sekä pilot-ympäristössä että todellisissa verkosto-olosuhteissa. Työ jakaantui kolmeen vaiheeseen. Työn ensimmäisessä vaiheessa laadittiin esiselvitys markkinoilla olevista vedenlaadun sensoreista. Esiselvitysvaiheessa myös kilpailutettiin ja hankittiin testattavat sensorit. Toisessa vaiheessa toteutettiin vedenlaatusensoreiden testaus ja pilotointi. Testaus toteutettiin Savonia AMK:n pilottilaboratoriossa. Kolmannessa vaiheessa sensoreita testattiin myös oikeassa verkostoympäristössä. Sensorien mittaustietoja kerättiin ja analysoitiin pilvipalvelussa, josta ne ovat saatavilla esimerkiksi tutkijoiden käyttöön.

Pilotoinnin aikana seurattiin sensorien toimivuutta, luotettavuutta, ylläpidettävyyttä ja kustannustehokkuutta. Mittareiden tarkkuutta arvioitiin vertaamalla sensorien mittaustuloksia vesihuoltolaitosten omiin laboratorioanalyyseihin. Toisena tavoitteena oli selvittää, kuinka eri sensorit kykenevät reagoimaan erilaisiin kontaminaatioihin pilottiverkostossa. Pilotoinnin tulosten perusteella arvioitiin vedenlaatusensoreiden hyötyjä ja haasteita vesijohtoverkoston vedenlaadun varmistamisessa.

2 Osallisuudet hankkeessa

Projektin johto: **Patryk Wojtowicz**

Työpaketin 3 koordinointi ja kokeiden suunnittelu: **Petri Juntunen**

Koejärjestelyjen rakentaminen, asennukset ja koeajojen toteuttaminen: **Olli Torvinen, Juha Hämäläinen, Tero Kuhmonen, Ilpo Nuutinen ja Jari Sonninen**

Näytteenotto ja laboratorioanalyysit: **Laura Antikainen ja Iida Pulkkinen**

Datan siirron toteutus: **Mika Leskinen ja Marko Häkkinen**

Kirjallisuuskatsaus, testauksen suunnittelu: **Monika Wojciechowska**

Datan hallinta ja tietokantaratkaisut: **Kofi Agyekum, Jesse Honkanen, Rajeev Kanth, Sameer Karn, Md Z. Khan, Aija Koivistoinen, Hannu Korhonen, Timo Lassila, Jussi Nivamo, Omar Sabbagh ja Osman Torunogulu**

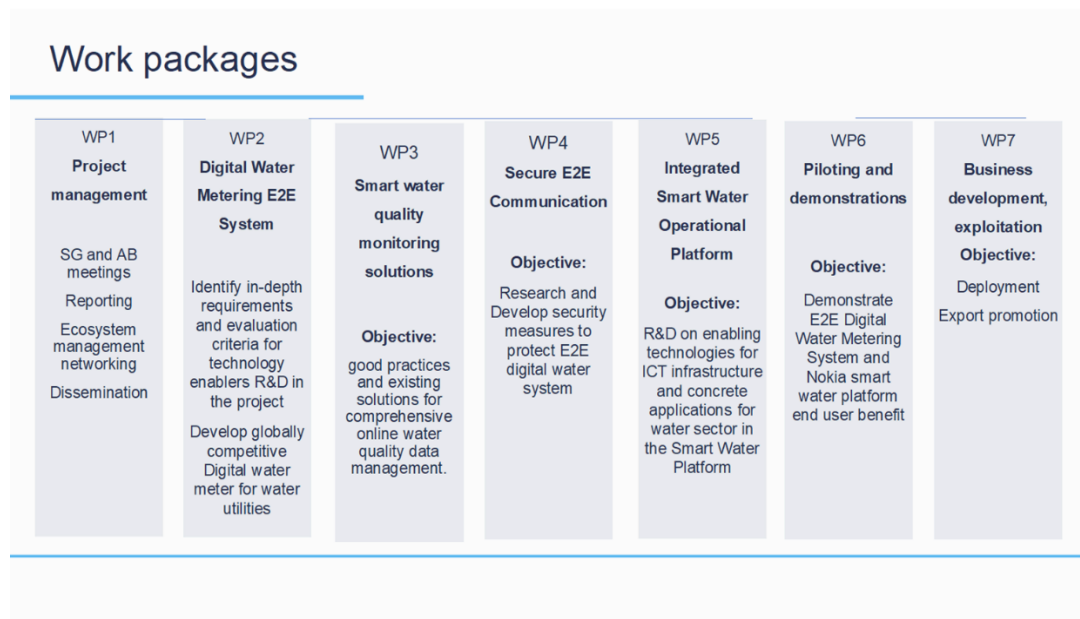
Ohjaus ja laadunvalvonta: **Eero Antikainen ja Aki Happonen**

Vesilaitosyhdistyksen vesilaitosryhmä on osallistunut SWIM-hankkeen työpaketin 3 suunnitteluun ja ohjaukseen Vesihuoltolaitosten kehittämisrahaston rahoittamana kärkihankkeena.

3 Johdanto

3.1 Projektin sisältö

Tässä raportissa esitetty työ liittyy laajempaan Business Finland Oy:n päärahoittamaan SWIM-hankkeeseen. Se toteuttaa myös Vesilaitosyhdistyksen vesilaitosryhmän suunnittelemaa Jatkuvatoimiset mittarit talousveden laadun valvonnassa vesijohtoverkossa - kärkihanketta, jonka rahoittajana on Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto. Sensoreiden testaus kuului pääosin työpakettiin WP3 (ks. kuva 1). Osahankkeen toteutti Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö.



Kuva 1. SWIM-hankkeen työpaketit. Tämä raportti koskee pääosin työpakettia 3 (WP3).

Työ jakaantui kolmeen osaan: 1) Esiselvitys, 2) Pilot-kokeet ja 3) Kenttätestit

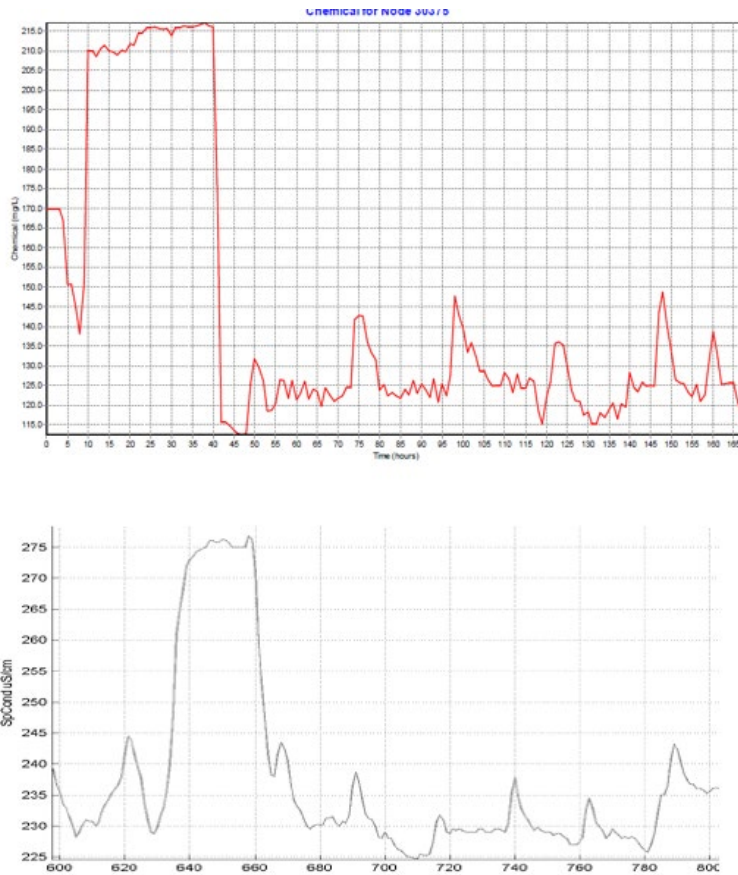
- 1) Esiselvitys- osiossa kartoitettiin markkinoilla olevien mittareiden laitetarjontaa, suoritettiin tarjouskyselyt ja laitehankinnat. Tästä on kerrottu enemmän kappaleessa 4.
- 2) Pilot-koevaiheessa testattiin eri sensoritoimittajien mittalaitteiden toimivuutta 7 kk:n seurantajakson aikana. Koejakson aikana simuloitiin erilaisia käyttö- ja häiriötilanteita. Tästä on kerrottu enemmän kappaleessa 5.
- 3) Pilot-kokeiden jälkeen kenttätestaukseen valittiin kolme laitetta, joita testattiin todellisessa verkostoympäristössä. Testit alkoivat 6/2023 ja jatkuivat projektin loppuun asti. Tästä on kerrottu enemmän kappaleessa 6.

3.2 Mihin jatkuvatoimisia mittareita voidaan hyödyntää?

Jatkuvatoimista vedenlaatu dataa voidaan hyödyntää usein eri tavoin vesilaitoksen toiminnassa. Dataa voidaan hyödyntää esimerkiksi päätöksenteossa, verkoston reaaliaikaisen tilannekuvan luomisessa, vedenlaadun seurantajärjestelmien (CWQM) rakentamisessa tai vedenlaatu datan tuottamisessa kuluttajille. Jatkuvatoimisen mittauksen lisäarvo perinteisiin näytteenotto- ja laboratoriopohjaisiin analyysihin verrattuna on, että ne pystyvät havaitsemaan erityisesti nopeita reaaliaikaisia vedenlaadun vaihteluita. Lähtökohtaisesti kuitenkin jatkuvatoimiset mittaukset vielä täydentävät, eivät korvaa, näytteenottoon perustuvia mittauksia.

Jatkuvatoimiset mittaukset päätöksenteon tukena

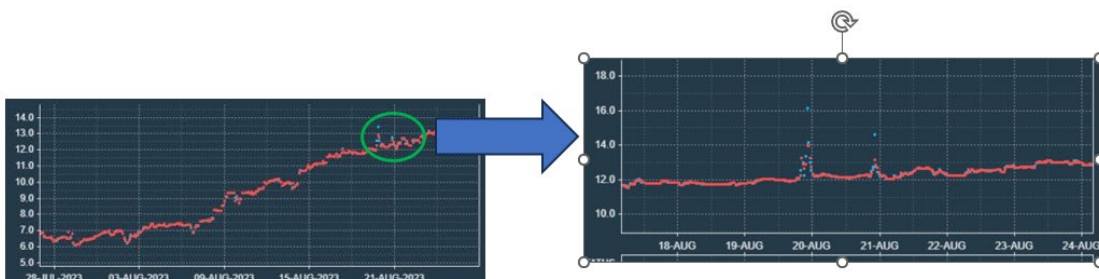
Sensoreilla kerätystä aikasarjadatasta voidaan johtaa erilaisia tunnuslukuja, joita voidaan hyödyntää strategisen päätöksenteon tukena esimerkiksi omaisuudenhallintaa tai riskinarviointia ajatellen. Tähän tarkoitukseen tuotettu data ei tarvitse olla reaaliaikaista, eikä siis edellytä vielä datan siirrolta on-line-tyyppistä järjestelmää. Jatkuvatoimisella mittauksella voidaan havaita esimerkiksi pitkän aikavälin muutoksia vedenlaadussa, ja tietoa voidaan hyödyntää muun muassa verkoston huuhteluiden ajoittamisessa. Ennen kaikkea jatkuvatoiminen data antaa tietoa verkostossa tapahtuvista nopeista muutoksista, joita ei näytteenottoon perustuvasta datasta ole mahdollista selvittää. Jatkuvatoimista laatu dataa on mahdollista yhdistää myös hydrauliseen dataan tai mallinnusdataan. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki, jossa vedenlaatumittausta on hyödynnetty hydraulisen mallin validoinnissa vertaamalla mallin antamaa tulosta ja mittaustulosta keskenään.



Kuva 2. Esimerkki jatkuvatoimisen vedenlaatudatan hyödyntämisestä pilottikohteessa. Tässä vedenlaatudataa on hyödynnetty mallin validoinnissa käyttämällä laatumittausa tracer-tyyppisenä indikaattorina vertaamalla sitä hydraulisen mallin antamiin tuloksiin. Ylemmässä kuvassa on esitetty mallinnettu arvo ja alemmassa mitattu.

Jatkuvatoimiset mittaukset tilannekuvan luomisessa

Sensoreiden reaaliaikaisesti pilvipalveluun tuottama data mahdollistaa verkostosta paremman tilannekuvan, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi verkoston operoinnissa tai mahdollisesti erilaisten häiriötilanteiden havaitsemisessa (kuva 3).



Kuva 3. Esimerkki jatkuvatoimisen vedenlaatudatan hyödyntämisestä pilottikohteessa. Kuvassa näkyy runkojohdon sulkemisesta johtuvan värähtelyn eteneminen verkostossa.

Vedenlaadun seurantajärjestelmät

Toisaalta laatusensorit ovat keskeisessä roolissa rakennettaessa vesilaitoksille jatkuvatoimisia vedenlaadun seurantajärjestelmiä (CWQM). Tässä järjestelmässä vedenlaatusensorit olisi edelleen yhdistetty yhdeksi vedenlaadun jatkuvatoimiseksi on-line-seurantajärjestelmäksi. Näiden järjestelmien tavoitteena on esimerkiksi Early warning -tyyppisen indikaation tuottaminen. Early warning -tyyppiset varoitussysteemit voisivat tunnistaa äkilliset kontaminaatioita ja antaa vesilaitokselle mahdollisuuden reagoida nopeasti. Tämä auttaisi vähentämään taloudellisia vahinkoja ja kuluttajien terveydelle aiheutuvia haittoja. Tällä hetkellä edellä mainitut järjestelmät ovat vielä kehitysvaiheessa, ja edellyttävät suuria datamassoja ja koneoppimiseen tai vastaavaan datankäsittelyyn perustuvia järjestelmiä.

Vedenlaatatiedon jakaminen kuluttajille

Lisäksi jatkuvatoimisilla laatumittauksilla voidaan täydentää juomavesidirektiivin edellyttämää, kuluttajille tarkoitettua viranomaisnäytteillä tuotettua vedenlaatatietoa. Teoriassa järjestelmä mahdollistaisi tiettyjen vedenlaatuparametrien jakamisen reaaliaikaisesti. Myös nämä sovellukset ovat vielä kehitysvaiheessa.

3.3 Katsaus erilaisiin jatkuvatoimisiin verkoston veden laadun mittausparametreihin

Tavoitteena on, että testattavien parametrien tulisi olla mahdollisimman luotettavia, edullisia ja mahdollisimman paljon hyödyllistä informaatiota tuottavia mittausparametreja, jotka toimivat useamman tyyppisissä vesijohtoverkostoissa ja joilla voidaan havaita yleisimpiä vedenlaadun poikkeamia.

Sensoreiden toiminta voi perustua esimerkiksi **optiseen** mittaukseen, kuten sirontaan (sameus), absorbanssiin (väriluku, UV-abs) tai niiden johdannaissuureisiin (epäsuora TOC, DOC). Näistä erityisesti sameus on hyvä yleisindikaattori kaikenlaisille veteen suspendoituneille hiukkasille (esim. mineraalipartikkelit tai mikro-organismit). **Partikkelimittarit** mittaavat vedessä suspendoituneiden hiukkasten määrää ja kokojakaumaa. Lisäksi osa laitteista pystyy myös jakamaan partikkelit eri luokkiin muodon perusteella. **Cytometria** on menetelmä, joka perustuu solujen ja hiukkasten mittaamiseen virtauksessa, ja jopa bakteerilajien tunnistaminen on mahdollista. Cytometriaan perustuvat

laitteet toimivat siten, että ne ohjaavat partikkeleita lasersäteeseen läpi, jolloin solut lähettävät takaisin heijastuneen valon, joka mitataan ja analysoidaan. Cytometriaan perustuvat mittaukset vaativat erityislaitteita ja asiantuntemusta. **Taitekertoimen (RI)** mittausta perustuu ominaisuuteen, joka kuvaa valon etenemistä veden läpi. Veteen liuenneet aineet muuttavat veden taitekerrointa, joka voidaan mitata. Menetelmä on ollut teollisuudessa käytössä erilaisten liuoksien pitoisuuden mittaamisessa, mutta on vesijohtoveden mittauksessa suhteellisen uusi menetelmä.

Toinen tärkeä sensoriryhmä ovat **elektropotentiaalitykyyn** perustuvat mittarit (pH, ORP). Veteen liuenneen hapen pitoisuus (tai pitoisuuden lasku) voi toimia kemiallisen ja/tai biokemiallisen aktiivisuuden indikaattorina verkostovedessä. Omana tärkeänä ryhmänä ovat klooripitoisuuden (kokonaiskloori, vapaa kloori, kloridi) mittaukset, koska tietty klooritaso on hyvä säilyttää verkostossa. **Johtokykyyn** perustuvat mittarit (johtokyky, DSS) korreloivat veteen liuenneiden, sähköä johtavien mineraaliaineiden kanssa.

Markkinoilla on myös mikrobien aktiivisuuteen perustuvia, esim. bioluminenssiin perustuvia sensoreita. **Bioluminesenssi** on ilmiö, joka perustuu elävien organismien kykyyn tuottaa valoa kemiallisten reaktioiden avulla. Bioluminesenssiin perustuvat biosensorit voivat havaita tiettyjä yhdisteitä, kuten bakteerien entsyymejä. On tärkeää huomata, että mikrobien mittausten menetelmät vaativat tällä hetkellä erityislaitteita, -reagensseja ja -asiantuntemusta. Niiden käyttöönotto vesihuollossa edellyttää huolellista suunnittelua ja testausta. Lisäksi on otettava huomioon kustannukset ja tekniset rajoitukset esim. asennuspaikan ja jatkuvatoimisuuden suhteen.

4 Esiselvitys: Markkinoilla olevan laitetarjonnan kartoitus

4.1 Kartoituksen sisältö

Kirjallisuuskatsausvaiheessa kartoitettiin markkinoilla oleva laitetarjonta. Kartoitusvaiheeseen otettiin mukaan 32 eri laitetta. Selvitys on rajattu laitteisiin, jotka on tarkoitettu erityisesti vesijohtoverkostojen käyttöön. Vaatimuksena oli, että laitteistot voidaan asentaa verkostoon ja ovat tavalla tai toisella etäluettavia. Esimerkiksi ympäristömittaukseen tai puhtaasti teollisuuskäyttöön tarkoitettuja yksittäisiä antureita ei ole kartoituksessa käsitelty. Lisäksi edellytyksenä oli, että laitteella olisi maahantuojaja tai laite olisi muuten järkevästi hankittavissa Suomeen.

Laitteiden valintaprosessiin liittyvät neuvottelut ja tarjousvertailut ovat kriittisiä vaiheita teknologian hankinnassa. Tässä tapauksessa 15 laitetta valittiin tarkempaan tarkasteluun.

TEAMS-palaverien järjestäminen laitevalmistajien kanssa tarjosi arvokkaan tilaisuuden saada syvällistä tietoa laitteiden toiminnoista sekä huolto- ja muista palveluista. Tämä oli erityisen tärkeää, kun otetaan huomioon, että monet laitteet ovat vielä kehitysvaiheessa ja niiden täydellisiä manuaaleja ei kaikkien osalta ollut saatavilla. Kehitysvaiheessa olevien laitteiden tarkastelu voi tuoda esiin potentiaalisia riskejä ja mahdollisuuksia, jotka voivat vaikuttaa hankintapäätöksiin. Neuvottelujen pohjalta suoritettiin tarjouskyselyt, joiden perusteella hankittiin testattavat laitteet. Tämä prosessi ei ainoastaan varmista, että hankitut laitteet täyttävät tarvittavat vaatimukset, vaan myös että ne ovat kustannustehokkaita ja niiden huolto on turvattu tulevaisuudessa.

Yhteenvetona kartoituksesta voidaan todeta, että tällä hetkellä laitetoimittajien tarjoamia palveluja voidaan pitää hyvinkin kirjavana. Esimerkiksi datan siirto oli yleensä toteutettu laitevalmistajan omaan pilvipalveluun, mutta tiedonsiirtoa tästä eteenpäin ei ollut kuvattu kunnolla tai se puuttui kokonaan. Neuvotteluvaiheessa kävi myös ilmi, että useammalla laitetoimittajilla oli haasteita toimitusaikojen suhteen.

Selvityksen tulokset on esitetty liitteessä 1. Yhteenveto erilaisista sensorityypeistä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Erilaisia sensorityyppejä.

KATEGORIA	LAITTEEN NIMI	HINTA	MITÄ MITTAA
MULTIPARAMETRISENSORIT	Pipescan, Prominent	5-15 k€	fys-kem. parametrit
PARTIKKELIMITTAUKSET	Uponor Pamas	10-15 k€	partikkelit
MIKROBIEN AKTIIVISUUTEEN PERUSTUSVAT SENSORIT (ESIM. FLUORESENSSI)	BactControl, EZ-ATP, Colifast, Colilert, Microtox LX,	30 -60 k€	mikrobit
CYTOMETRIAAN PERUSTUVAT SENSORIT	Bactosense, Colisense	n. 50 k€	mikrobit
MUUT	Aquamonitrix	n. 30 k€	NO ₂ , NO ₃

Laitteiden hankinta

Saatujen tarjouspyyntöjen perusteella valittiin ja hankittiin testattavat laitteet. Laitteet pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustavat kattavasti erilaisia laitetyyppejä mm. mitattavien parametrien tai asennustyyppien suhteen. Hankitut laitteet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hankitut laitteet. Vihreä= hankitut laitteet, punainen= hankittu laite, ei enää markkinoilla, keltainen=laite oli testattavana mikrobikokeiden aikana.

Laitteen nimi	Mitattava parametri	Asennustapa	Mittausperiaate
Aquamonitrix	(NO ₃ , NO ₂)	sivuvirta	kemiallinen (vaatii reagenssin)
Masinotek	(TOC, turb)	sivuvirta	optinen
Optiqua	Veden taitekerroin	sivuvirta	optinen
Pipescan	(Turb, Ec, pH, UV-abs; Cl etc.)	suoraan putkeen	optinen + kemiallinen
Uponor Quomo	Partikkelit	sivuvirta	optinen
Prominent	(Turb, EC, pH, Cl, O ₂)	sivuvirta	optinen + kemiallinen
Tryptophan sensor & trios	tryptofaani, uv- abs	upotus altaaseen	optinen

Uponor Quomon osalta laitteen myynti lopetettiin projektin aikana, eikä sitä ole tällä hetkellä markkinoilla. Laitteella vietiin testit kuitenkin loppuun asti, koska se edustaa partikkelimittausta, joten laitteen antama data kuvastaa yleisesti partikkelimittauksen haasteita ja mahdollisuuksia.

Mikrobiologisia parametrejä mittaavat sensorit (cytometriset sensorit, ATP, E. Colin pikatunnistus jne.) suljettiin pois hankinnasta erityisesti laitteiden korkean hankintahinnan (30–60 k€) vuoksi. Lisäksi laitteiden käyttökustannukset ovat erittäin korkeat; pahimmillaan yhden mittauksen hinnaksi olisi tullut jopa satoja euroja. Toisaalta em. laitteiden käyttö ja ylläpito vaatii paljon erikoisosaamista. Lisäksi laitteistojen etäluettavuus ja on-line-valmius ei olisi ollut täysin vaaditulla tasolla.

Tryptofaanisensori

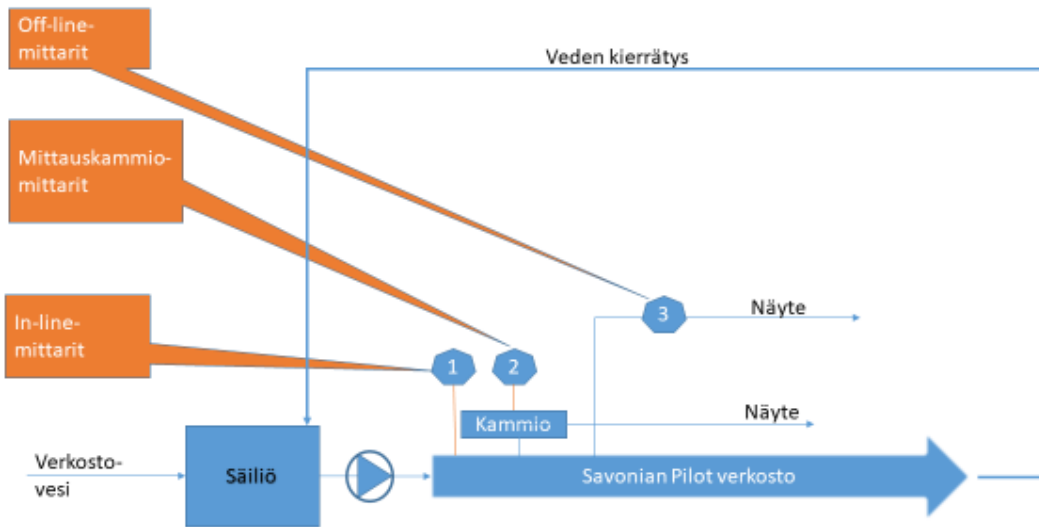
Edellä mainittujen sensoreiden lisäksi koejakson loppuvaiheessa testattiin myös tryptofaanisensorin yleistä toimivuutta vesijohtoverkostoympäristössä. Kysymyksessä on optinen, fluoresenssiin perustuva mittari, joka mittaa tryptofaanin pitoisuutta suoraan vedestä. Tryptofaani on aminohappo, joka esiintyy yleisesti elävissä soluissa. Yleensä kyseisellä sensorilla arvioidaan esimerkiksi pintavesien mikrobikontaminaatioita uimavesistä.

5 Pilot-kokeet

Lähtökohtana testeihin valituille parametreille olivat kirjallisuudessa löytyvät suositukset (esim. USEPA: Distribution System Water Quality Monitoring: Sensor Technology Evaluation Methodology and Results. A Guide for Sensor Manufacturers and Water Utilities).

5.1 Savonian pilot-verkosto (WaterLoop)

Kokeet suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n vesilaboratorion pilot-verkostossa (kuva 4), johon testattavat sensorit liitettiin. Kokeessa käytetyn verkoston kokonaispituus on 600 m, ja putken materiaali on pääosin 50–10 PE. Lisäksi verkostoon kuuluu 4 m³ vesisäiliö, jonka tehtävänä on simuloida vesijohtoverkostossa olevaa ylävesisäiliötä. Vedenkierrätys toteutetaan verkostossa normaalilla paineenkorotuspumpulla, jonka tehtävänä on pitää paine verkostossa vakiona (4 bar). Natriumhypokloriitin lisäys toteutettiin omalla annostelupumpulla, jonka annosta säädeltiin manuaalisesti. Kontaminantit lisättiin verkostoon omilla annostelupumpuilla. Pilot-ajot suoritettiin oman automaatiojärjestelmän kautta, johon kerättiin myös verkoston mittausdata (hydrauliset mittaukset, käyntitiedot sekä kemialliset mittaukset (esim. pH, johtokyky, sameus jne.). Testattavien sensoreiden data kerättiin laitetoimittajien oman pilvipalvelun kautta, josta data siirrettiin edelleen Savonian mittaustietokantaan. Näin saatiin testattua myös laitetoimittajien tiedonsiirron sekä datapalveluiden taso. Tässä kokeessa kaikissa laitteissa käytettiin tiedonsiirtoon GSM-modeemeja. Dataa kerättiin lähtökohtaisesti 1 minuutin resoluutiolla tai mikäli laitteen kapasiteetti ei riittänyt tähän, laitteen maksimiresoluutiolla (esim. Aquamonitrix 15 min). Kaiken kaikkiaan kerättyjä parametreja oli noin 150 kpl ja 1 min resoluutio ja aika (6.9.2022 – 16.4.2023) huomioiden kaiken kaikkiaan kertyi noin 43 miljoonaa mittausta.



Kuva 4. Kaaviokuva SAVONIA-AMK Oy:n pilot-verkostosta.

Testauslaboratorioon (kuva 5) sekä mittauskaivoon (kuva 6) pääsee tutustumaan [täältä](#) (mene kohtaan Virtual WaterLab).



Kuva 5. Yleiskuva Savonian (WaterLoop). Virtuaalinen esittely löytyy [täältä](#).

5.1.1 Pilot-kokeiden sisältö ja periaatteet

Testit suoritettiin 9/2022–4/2023 välisenä aikana. Työ sisälsi koejärjestelyn kokoonpanon, sen operoinnin seurantajakson ajan, sekä seurantajakson aikana toteutettavien laboratoriossa tehtävien rinnakkaisten seuranta-analyysien toteutuksen. Lisäksi työhön kuului tulosten koonti ja raportointi seurantajakson aikana ja sen päätyttyä. Saadut kokemukset koottiin tähän loppuraporttiin. Koejaksojen aikana pilot-verkostossa simuloitiin erilaisia verkoston reaaliaikaisen tilannekuvan kannalta keskeisiä olosuhteita, joiden avulla selvitettiin sekä tutkittavien mittareiden käytettävyyttä kenttäolosuhteissa, että kykyä tunnistaa erilaisia käyttö- ja häiriötilanteita. Koejakson pituus oli 7 kk. Sensoreiden antamat tulokset varmistettiin ottamalla vertailunäytteitä, jotka analysoitiin Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n vesilaboratoriossa.

Seurantakoe toteutettiin simuloiden erilaisia käyttö- ja poikkeamatilanteita. Varsinaisen testijakson aikana ajettiin kaiken kaikkiaan 33 erilaista testiskenaariota (ks. kuva 6). Kaikki skenaariot oli valittu siten, että joko niille oli tarve tai kysymyksessä oli oikeasti tapahtunut kontaminaatiotilanne. Ennen koejaksoa verkostoa ajettiin puhtaalla verkostovedellä niin kauan, että kaikki laitteet saatiin toimimaan luotettavasti. Varsinaiset koeajot voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

1. mekaaniset (paineiskut, ilman lisäys verkostoon)
 2. kemialliset testit (esim. putkistosta irtoavien sakkujen kloorin tai muiden kemikaalien yliannostus)
 3. mikrobiologiset (esim. pintavesi- ja jätevesikontaminaatiot)
- Koejakson jälkeen verkosto huuhdeltiin ja tehtiin tehoklooraus, kuten vastaavasti todellisessa verkostotilanteessakin.

Koodi	skenaario
T1	Valmistelutyö
T2	Perustaso: koeajo - ei kloorin lisäystä
E1	Koeajot eri lämpötiloilla
E2	Koeajot eri virtaamilla
E5	Paineiskut (äkillinen pumpun pysäytys, äkilliset venttiilinvaihdot)
E3	Erilaisia osatapahtumia eri painetasoilla
E6	Rautaflokin lisäys verkostoon
E7	Alumiiniflokin lisäys verkostoon
E9	Kiintoaineen lisäys verkostoon
E10	Aktiivihiihen lisäys verkostoon
E4	Ilman lisäys verkostoon
E12	Vesijohtoverkoston täyttötilanne huollon jälkeen
E14	Desinfointiaineen annostelupumpun toimintahäiriön simulointi
E13	Kloorin ylianostus
E15	Kemiallinen saastuminen NaCl: lla (suola)
E16	Kemiallinen saastuminen torjunta-aineilla
E17	Lannoitteiden aiheuttama kemiallinen saastuminen
E18	Väriin muutos vesiliukoisella aineella
E19	Kemiallinen saastuminen sitruunahapolla
E20	Pintavesikontaminaatio
E21	Jäteveden lisääminen
E22	Jäteveden, suspendoituneen kiintoaineen ja pintaveden lisääminen
T3	Verkoston tehoklooraus
T4	Waterloopin huuhtelu ja palautusnormaalitilaan
T5	Anturien tekninen tarkistus
T6	Tekninen tauko, waterloopin huuhtelu ja desinfiointi
T7	Anturien uudelleenkalibrointirutiini
T8	Vesisäiliön puhdistus
T9	Vesisäiliön vedenvaihto
T10	Tauko testauksessa

Kuva 6. Testausprotokolla. Testausprotokolla on esitetty tarkemmin liitteessä 2.1.

Laboratoriokokeet

Tulosten vertailua varten pilot-verkostosta otettiin näytteitä laboratoriomittauksia varten. Näytteitä otettiin skenaarion tarvitsema määrä (2 kertaa päivässä – kerran viikossa)

Sensoreiden mittaustuloksia verrattiin laboratoriotesteihin. Analysoidut parametrit on esitetty taulukossa 3. Testeissä käytetyt standardit, menetelmät ym. on esitetty liitteen 3 kohdassa menetelmät ja laitteet.

Taulukko 3. Laboratoriossa analysoidut parametrit.

Parametri	Yksikkö
pH	
Lämpötila	°C
Sähkönjohtokyky	μS/cm
Happi	mg/l
Sameus	FTU
Väri	mg/l Pt
Kokonaiskloori	mg/l
Vapaa kloori	mg/l
TOC	mg/l
UV-absorbanssi, 254 nm	1/cm
NO ₃ , NO ₂	mg/l

Seurantajakson aikana seurattiin erityisesti seuraavia tekijöitä mittalaitteiden toiminnassa:

- Mittalaitteiden tuottaman datan eroavuudet/samankaltaisuudet ja niiden vertaaminen laboratorioanalysein saataviin tuloksiin; mittaustulosten luotettavuuden arviointi
- Mittalaitteiden näyttämässä tapahtuva mahdollinen ryömintä ja/tai muut poikkeamat/muutokset seurantajakson aikana
- Kalibrointitarpeet ja/tai muut huoltotoimenpiteiden tarpeet seurantajakson aikana
- Muita mahdollisia mittalaitteiden luotettavuutta kuvaavia tekijöitä.

5.2 Pilot-kokeiden tulokset

Taulukkoon 4 on koottu niiden mittalaitteiden mittaustarkkuudet, jotka mittaavat taulukossa 3 esitettyjä suureita. Taulukossa "Scada"-sarakkeella tarkoitetaan WaterLoopin omia, kiinteitä laatusensoreita. Lisäksi Uponor-mittarin ilmoittama sameuslukema ei ole varsinainen sameuslukema, vaan partikkelimittauksesta mallinnettu johdannaissuure.

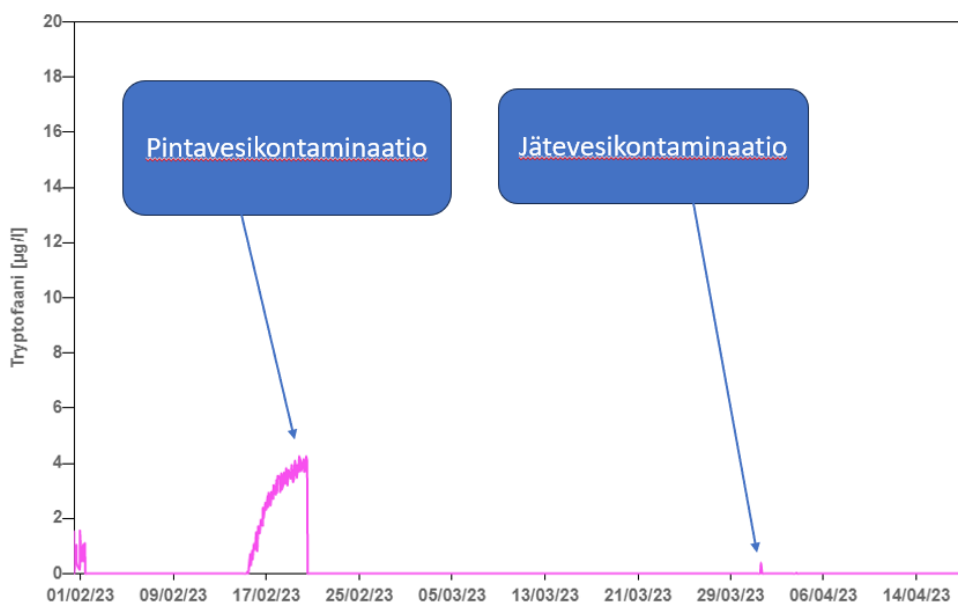
Taulukko 4. Mittattujen laitteiden tarkkuus verrattuna laboratoriomittauksiin (korrelaatio). * osa mittauksista mittaustarkkuuden alarajalla, minkä takia korrelaatio ei ole täysin vertailukelpoinen. Vihreä=hyvä, keltainen=kohtalainen, punainen=huono.

	Scada	Prominent	Aquamonitrix	Masinotek	Pipescan	Uponor
pH	0,86	0,59			0,74	
sähkönjohtokyky, $\mu\text{S}/\text{cm}$	0,83	0,81			0,83	0,84
Happi, mg/l		0,90				
Väri, PtCo					0,98	
Sameus, NTU	0,91	0,73		0,48	0,97	0,20
UV-abs (Abs/cm)					0,98	
Kokonaiskloori mg/l	0,94	0,94				
Vapaa kloori, mg/l					0,28*	
TOC, mg/l				0,30	0,30	
NO ₃ -N, mg/l			0,60			

Alla on kuvattu erikseen Tryprofaani, Uponor ja Optiqua -mittareiden toimintaa. Näiden tuloksia tarkastellaan erikseen, koska kyseiset sensorit eivät mittaa edellä esitettyjä parametrejä.

Tryptofaanisensorin tulokset

Tryptofaanisensorin tuloksia on esitetty kuvassa 6. Tätä sensoria testattiin ainoastaan koejakson loppuvaiheessa (mikrobitestit).



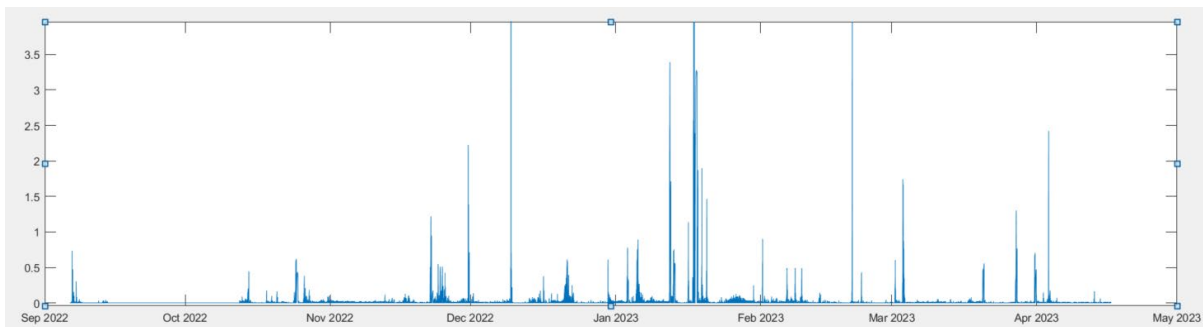
Kuva 7. Tryptofaanitestien tulokset.

Yhteenvedona tryptofaanisensorin toiminnasta voidaan sanoa seuraavaa:

- Laitte pysyi toimintakuntoisena testijakson ajan, eikä vaatinut huoltoa tai korjausta
- Tryptofaanisensori pystyi havaitsemaan pintavesikontaminaation kohtuullisen pienellä määrällä (alle 1 % konsentraatio)
- Sensori havaitsi jätevesikontaminaation, kun järjestelmään oli injektoitu jätevettä $> 1 \text{ l/m}^3$, eli $< 0,1 \%$ pitoisuudella, mikä on suhteellisen korkea pitoisuus. Toisaalta on huomioitava, tryptofaanisensorin osalta kysymyksessä olevat testit ovat enemmän alustavia (laitetta ei myydä verkostokäyttöön kuten muita sensoreita), ja asia vaatisi lisätutkimuksia.

Optiqua

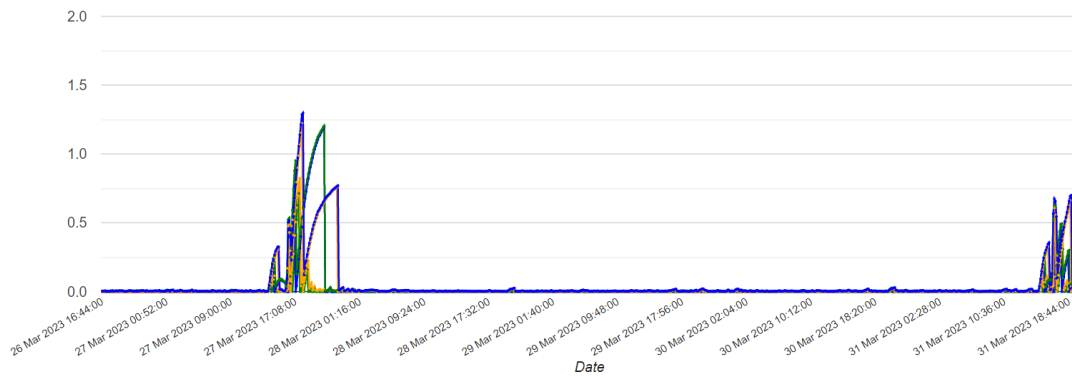
Optiqua-mittaus on tarkoitettu mittaamaan veteen liuenneiden kemikaalien määrän muutosta vedessä. Näin ollen laite reagoi kemikaalimuotoisiin kontaminaatioihin sekä jäteveteen, mutta ei niinkään partikkeleihin. Laitteella ei voida kuitenkaan luokitella kemikaalin tai kontaminaation laatua.



Kuva 8. Optiqua-mittarin "response"-parametrin dataa testijaksolta. Asteikko perustuu valmistajan omaan algoritmiin, jonka sisältöä tai merkitystä ei ole kuvattu tarkemmin.

Kuvassa 8 on esitetty Optiquan "response"-parametrin data testijakson aikana. Laitteen valmistajan mukaan kysymyksessä on eränlainen lämpötilakorjattu raakadata, joka kuvaa vedenlaadun muutosta ajan funktiona. "Response"-arvo perustuu laskenta-algoritmiin, jota valmistaja ei ole avannut tarkemmin. Parametrin absoluuttisella arvolla tai asteikolla ei ole valmistajan mukaan informaatioarvoa.

Kvalitatiivisesti voidaan kuitenkin nähdä, että sensori on reagoinut parhaiten, kun veteen on lisätty liuenneissa muodossa olevia kemikaaleja (esim. klooripitoisuus). Vastaavasti partikkelimuotoisiin kontaminaatioihin (sakat tai mikrobit) sensori reagoi heikommin tai ei ollenkaan.

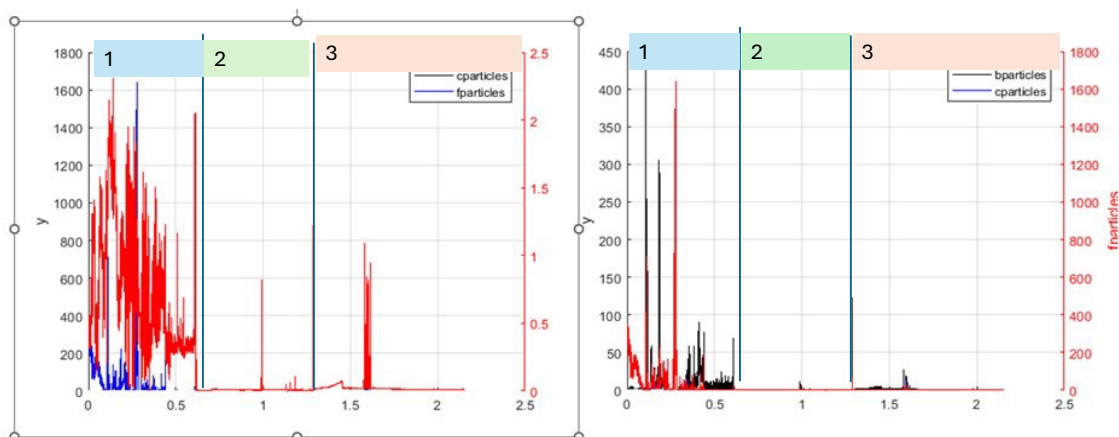


Kuva 9. Esimerkki Optiqua-mittarin datasta jätevesikontaminaatiojaksolta (sininen= B1Res, vihreä= B2Res ja keltainen=B3Res). Kysymyksessä olevat parametrit reagoivat vedenlaadun muutoksiin erilaisilla reagointinopeuksilla (sininen hitain, keltainen nopein). Koska laite esittää ainoastaan veden laadun muutokset, mittaus on reagoinut testijakson alkuun ja loppuun.

Mittauksen tuottamasta indeksistä on huomioitava, että se reagoi ainoastaan muutoksiin (ns. high pass filter, kuva 9).

Uponor Quomo

- Partikkelien kokonaismäärä
- Pienet partikkelit (< 1 µm)
- Suuret partikkelit (> 2 µm)
- B-partikkelit (mineraali tai biofilmpartikkelit)
- F-partikkelit (kuitumaiset partikkelit)
- C-partikkelit (mikrobimaiset partikkelit, jäte- tai hulevesi)



Kuva 10. Uponor mittarin tulokset koko koejakson ajalta. Aikaskaala: 1: mekaaniset ja partikkelikontaminaatiot, 2: kemikaalikontaminaatiot, 3: mikrobikontaminaatiot. Vasemmassa kuvassa: punaisella kokonaispartikkelit x1000, mustalla c-partikkelit, sinisellä f-partikkelit. Oikealla: punainen f-partikkelit, musta b-partikkelit, sininen c-partikkelit.

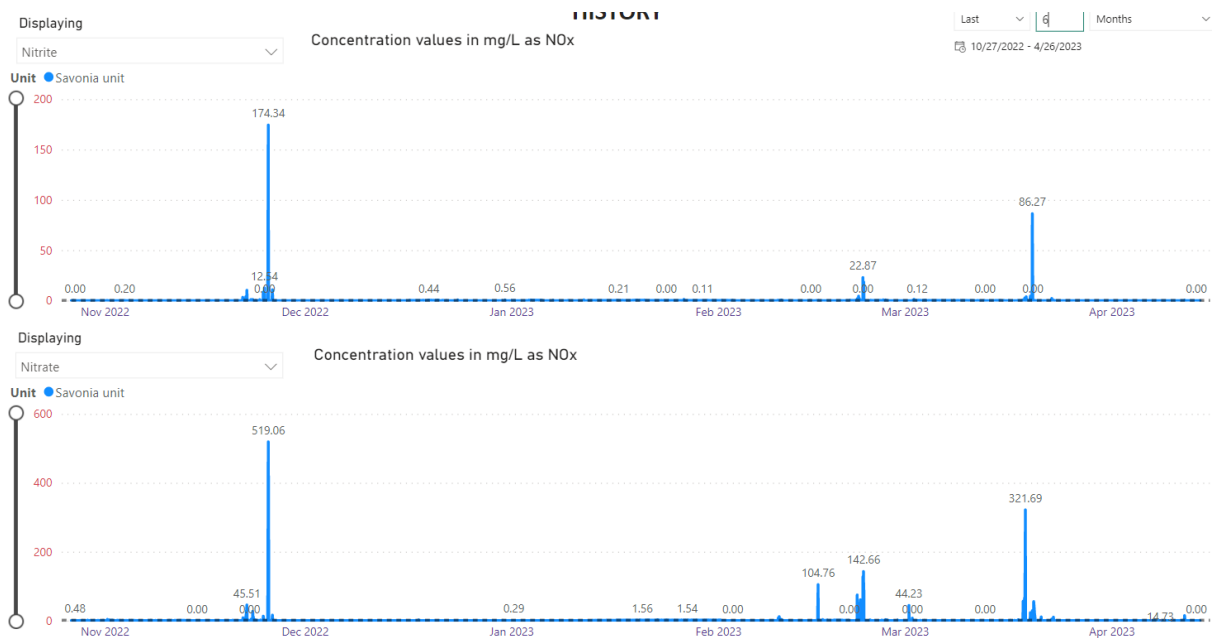
Johtopäätöksiä voidaan todeta seuraavaa:

- Laite reagoi selvästi partikkelimuotoisiin kontaminaation lähteisiin
- Laite ei reagoanut juurikaan kemikaaleihin
- Laite reagoi myös pintavesi- ja jätevesikontaminaatioon, mutta selvästi heikommin kuin partikkelikontaminaatioon.
- Laitteen kyky arvioida partikkelien laatua (kuitu- mineraali- tai bakteerimaiset partikkelit) ei ollut selkeää

Aquamonitrix

Laite mittaa veden nitriitti- ja nitraattipitoisuutta. Laite toimii optisella periaatteella, mutta vaatii reagenssin. Laitteen minimimittausväli on 15 minuuttia. Johtopäätöksiä voidaan todeta seuraavaa:

- Laitteiston tarkkuus verrattuna vertailumittauksiin oli kohtalainen (0.6)
- Laitteisto vaati kohtalaisen paljon huoltoa varsinkin käyttöönottoaiheessa (ks. liite 2 päiväkirja).

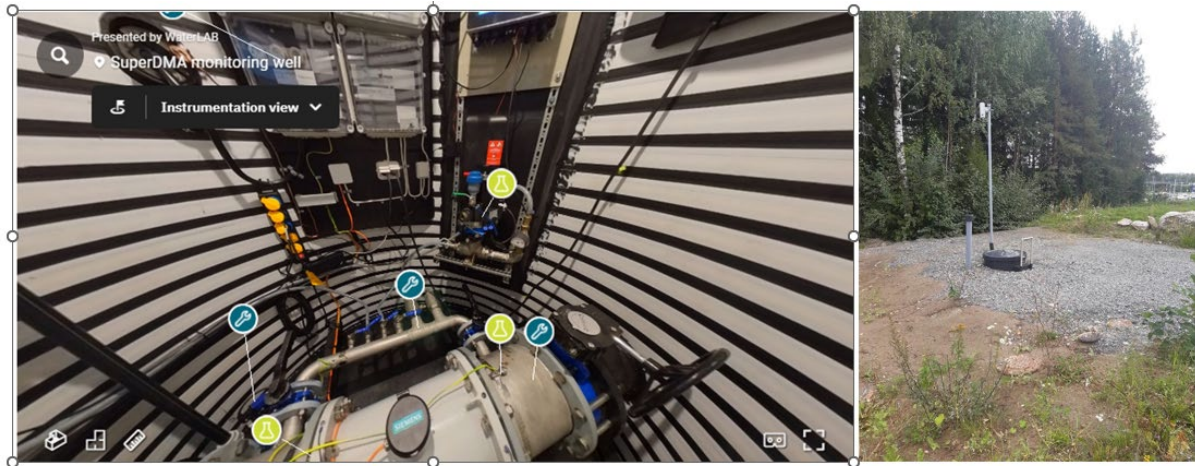


Kuva 11. Aquamonitrix-laitteen tulokset. Yllä nitriitti- ja alla nitraattipitoisuus.

6 Kenttäkokeet

6.1 Mittauskaivo

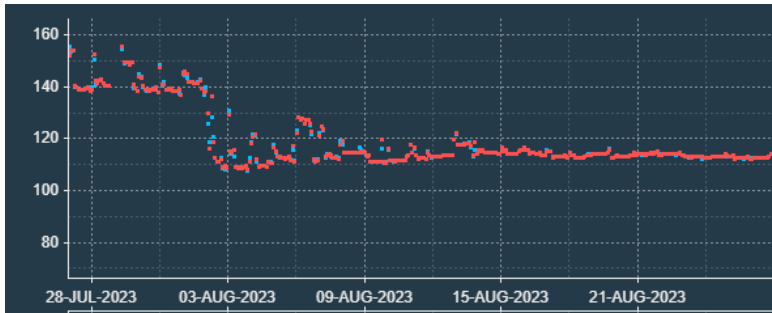
Mittauskaivo sijaitsee Kuopion Veden verkostossa Savilahden alueella. Mittauskaivo on esitetty kuvassa 8. Mittauskaivossa testattiin noin 6 kuukauden ajan Optiqua- ja Pipescan-mittareita.



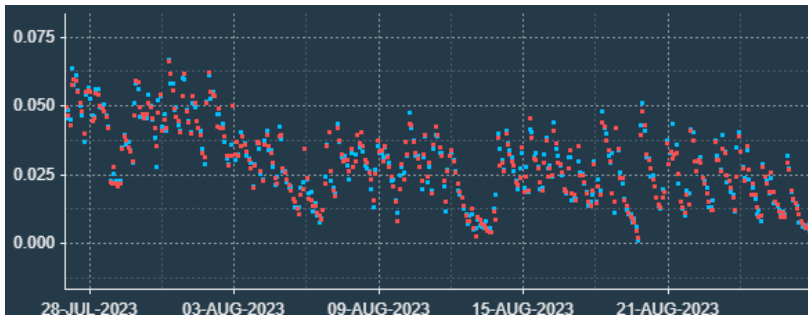
Kuva 12. Mittauskaivo. Virtuaalinen esittely löytyy [täältä](#).

Yhteenvedona voidaan todeta seuraavaa:

- Molemmat mittaukset toimivat testijakson ajan ilman suurempia käyttökatoja
- Molemmat mittarit huollettiin noin 4 kk:n käytön jälkeen. Optisissa mittareissa havaittiin likaantumista, mikä nähdään myös optisten mittausten ryömimisenä (kuva 16).
- Koejakson aikana havaittiin kohtuullisen selviä ja nopeita veden laadun muutoksia ilman, että verkostossa olisi tapahtunut häiriöitä. Tämä on tärkeää ottaa huomioon tulosten tulkinnassa ja tuntee verkoston normaalit vaihtelut (kuvat 13–15). Tällä hetkellä on mahdollista kehittää sellainen ennakkovaroitusjärjestelmä, joka vertaa mitattuja tuloksia aiemmin verkostossa mitattuihin keskiarvotuloksiin. Eri viikonpäiville voidaan lisäksi laskea perustasot näiden mittausten mukaan.
- Kun vesilaitoksen operointitavat olivat tiedossa, laatu data oli kohtuullisen helposti tulkittavissa ja käyttäytyi loogisesti verrattuna verkostossa tapahtuneisiin veden laadun muutoksiin.
- Optiqua-mittarin osalta datasta ei ollut mahdollista tehdä merkittäviä tulkintoja. Mittari havaitsee kyllä muutoksia, mutta sillä ei ole esim. raja-arvoa, jonka jälkeen tilanne voidaan tulkita kontaminaatioksi (kuva 17).



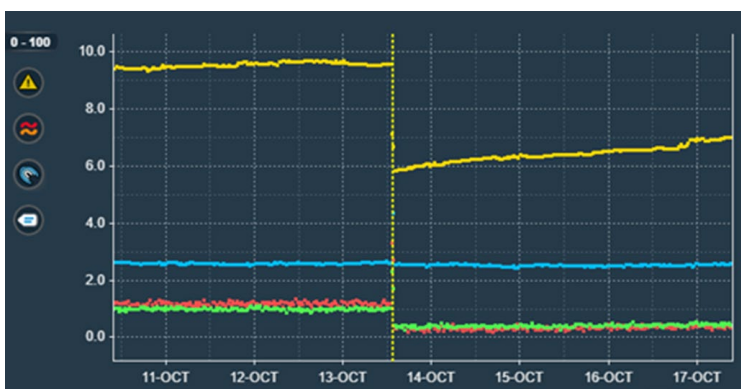
Kuva 13. Esimerkki normaalista (= ei häiriötä) johtokyvyn vaihtelusta verkostossa yhden kuukauden aikana. Kuvassa Pipescan-mittarin dataa.



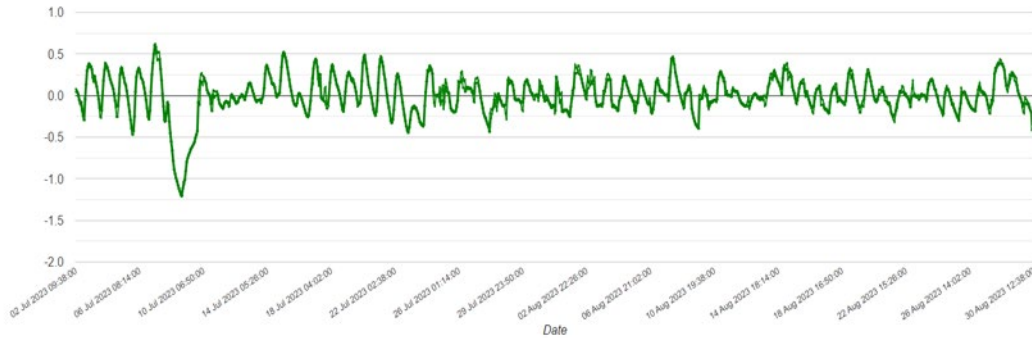
Kuva 14. Esimerkki normaalista klooripitoisuuden (vapaa kloori) vaihtelusta verkostossa yhden kuukauden aikana. Kuvassa Pipescan-mittarin dataa.



Kuva 15. Esimerkki väriluvun vaihtelusta verkostossa yhden kuukauden aikana. Ympyröity piikki johtuu runkojohdon sulkemisesta. Kuvassa Pipescan-mittarin dataa.



Kuva 16. Sensoreiden puhdistuksen vaikutus optisten mittausten arvoihin 4 kk:n kohdalla. Kuvassa Pipescan-mittarin dataa.



Kuva 17. Esimerkki Optiqua-sensorin datasta. Kuvassa "response"-parametrin dataa.

7 Johtopäätökset

7.1 Markkinaselvitys

Yhteenveto markkinaselvityksestä on esitetty liitteessä 1, jonka voit tilata sähköpostiosoitteesta mikko.auriola@savonia.fi. Kartoituksessa mukana olleet 32 laitetta osoittavat, että markkinoilla on useita erilaisia vesijohtoverkostojen käyttöön soveltuvia sensorityyppejä, kuten multiparametrisensorit, partikkelimittaukset tai erilaiset mikrobien aktiivisuuteen perustuvat sensorit. Näiden hintahaarukka (5 000–50 000 €) ja mittausolosuhteet vaihtelivat merkittävästi. Selvityksessä korostuivat erityisesti:

1. **Neuvottelujen merkitys:** TEAMS-palaverit laitevalmistajien kanssa olivat kriittisiä, sillä ne tarjosivat syvällistä tietoa laitteiden toiminnoista, huollosta ja muista palveluista. Tämä oli erityisen tärkeää kehitysvaiheessa olevien laitteiden kohdalla, joiden täydelliset manuaalit eivät olleet saatavilla.
2. **Toimitusajat ja toimitusten sisältö:** Useilla laitetoimittajilla ilmeni haasteita toimitusaikojen sekä esim. asennusohjeiden tai muiden manuaalien suhteen, mikä voi vaikuttaa hankintapäätöksiin ja projektien aikatauluihin.
3. **Datan Siirto:** Laitteiden tarjoamat palvelut olivat kirjavia, erityisesti datan siirron osalta. Useimmissa tapauksissa data siirrettiin valmistajan omaan pilvipalveluun, mutta tiedonsiirto tästä eteenpäin oli usein puutteellisesti kuvattu tai puuttui kokonaan.
4. **Huolto:** Huollon, varaosien ja datapalveluiden turvaaminen tulevaisuudessa oli tärkeä kriteeri.

Yhteenvetona voidaan todeta, että markkinoilla on kohtuullisen monipuolinen valikoima vesijohtoverkostojen käyttöön soveltuvia laitteita, mutta niiden tarjoamat palvelut ja toimitusajat ja -organisaatiot vaihtelevat. Lisäksi laitteita poistui markkinoilta projektin aikana

(esim. Uponor Quomo ja Optiqua). Tästä syystä huolellinen neuvottelu ja tarjousvertailu ovat keskeisiä vaiheita kustannustehokkaiden ja luotettavien laitteiden hankinnassa.

7.2 Jatkuvatoimisten mittareiden hyödyntäminen

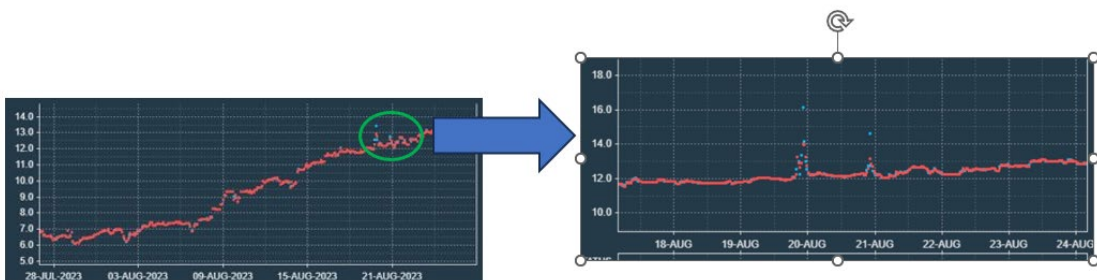
Jatkuvatoimista vedenlaatudataa voidaan hyödyntää vesilaitoksen toiminnassa esimerkiksi:

Päätöksenteon tukena

- Tunnuslukujen kerääminen ja tilastoiminen vedenlaatudatasta esimerkiksi omaisuudenhallintaa tai riskinarviointia ajatellen ja niiden vertaaminen asiakaspalautteeseen.
- Pitkän aikavälin muutosten seuranta (esim. sameuden muutokset verkoston huuhteluvälin arvioinnissa)
- Jatkuvatoimista laatudataa on mahdollista yhdistää myös hydrauliseen dataan tai mallinnusdataan (vedenlaatumallit, laatudatan hyödyntäminen mallien validoinnissa).

Tilannekuvan luomisessa

- Kun sensoreiden tuottama data yhdistetään on-line-tyyppisesti toimivaan pilvipalveluun, tämä mahdollistaa verkostonoperoinnin, reaaliaikaisen tilannekuvan muodostamisen tai mahdollisesti erilaisten häiriötilanteiden havaitsemisen (**kuva 18**).



Kuva 18. Esimerkki jatkuvatoimisen vedenlaatudatan hyödyntämisestä pilottikohteessa. Kuvassa näkyy runkojohdon sulkemisesta johtuvan väripiikin eteneminen verkostossa. Huomaa piikin pieni korkeus normaaliin vaihteluun verrattuna.

Vedenlaadun seurantajärjestelmissä

- Tässä järjestelmässä vedenlaatusensorit olisi edelleen yhdistetty yhdeksi vedenlaadun jatkuvatoimiseksi on-line-seurantajärjestelmäksi, joka yhdistää ja käsittelee sensoreiden tuottamaa dataa esimerkiksi koneoppimisen avulla.
- Tavoitteena Early warning- eli ”ennakkovaroitus” -tyyppisen indikaation tuottaminen.
- Tällä hetkellä edellä mainitut järjestelmät ovat vielä kehitysvaiheessa, ja edellyttävät suuria datamassoja ja koneoppimiseen tai vastaavaan menetelmään perustuvia järjestelmiä.

Vedenlaatatiedon jakamisessa kuluttajille

- Jatkuvatoimisilla laatumittauksilla voidaan täydentää kuluttajille tarkoitettua viranomaisnäytteillä tuotettua vedenlaatatietoa.

7.3 Jatkuvatoimisten mittareiden hankinnassa, sijoittamisessa ja käytössä huomioon otettavat asiat

7.3.1 Mittareiden sijainnin valinta (sensor placement)

Vedenlaatusensoreiden optimaalinen sijoittaminen verkostossa on suosittu tutkimusaihe, johon löytyy runsaasti tutkimusta ja erilaisia algoritmeja [ks. esim. Sensor Placement in Municipal Water Networks with Temporal Integer Programming Models, July 2006, Journal of Water Resources Planning and Management 132:218-224 DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:4(218) tai Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing ,Water contaminants detection using sensor placement approach in smart water networks, Volume 14, pages 4971–4986, (2023)].

Sensoreiden sijoitteluun perustuvia simulointiohjelmiä on esimerkiksi TEVA-SPOT, joka toimii hydraulisten verkostomallien päällä. Ohjelma simuloi verkostomallissa erilaisia kontaminaatiotilanteita, joita eri pisteisiin sijoitetut sensorit havaitsevat tietyllä kattavuudella ja vasteajalla. Optimointitehtävän tavoitteena on sijoittaa käytettävissä olevat sensorit mahdollisimman kattavasti ja nopeasti reagoivasti verkostoon siten, että esimerkiksi mikrobikontaminaation sattuessa mahdollisimman vähän ihmisiä sairastuisi. Tässä tutkimuksessa ei ole tutkittu sensoreiden optimaalista sijoittelua teoreettiselta kannalta.

Yllä mainittujen seikkojen lisäksi mittareiden sijoittamiseen verkostoon sisältyy kuitenkin runsaasti monia käytännön seikkoja, jotka tulee ottaa huomioon mittareiden sijoittelussa. Näitä ovat muun muassa:

- Sähkön tarve ja saatavuus
- Mahdollinen viemäröinnin tarve
- Tilavaatimukset; itse sensorin lisäksi tarvitaan asialliset tilat mahdollisesti loggerille, tiedonsiirrolle tai virtalähteelle
- Kuinka koko laitteisto (ml. tiedonsiirtoyksikkö) kestää pakkasta ja kosteutta?
- Tarvitseeko laite sivuvirran vesijohdosta vai onko suoraan putkeen asennettava, ja kuinka asennus on toteutettavissa?
- Onko asennuspaikassa tarvittavat liitokset valmiina, jotta asennus voidaan tehdä ilman, että verkoston osa joudutaan tekemään paineettomaksi?
- Valitun tiedonsiirtosignaalin kuuluvuus; tiedonsiirrossa käytetyn verkon kuuluvuus asennuspisteessä on varmistettava
- Työolot ja työturvallisuus (saavutettavuus, huollot, kuten laitteiden puhdistukset, kalibroinnit ja sensoreiden vaihdot on mahdollista toteuttaa helposti)

7.3.2 Laitteiden fyysisestä kestävydestä

Laitteiden fyysistä kestävyttä selvitettiin myös koejaksojen aikana. Laitteiden käyttöönottovaiheessa oli jonkin verran laitteiden kestävyteen liittyviä haasteita (vuotavia liitoksia, jumittuvia näytteenottimia tms.), joihin kannattaa varautua. Kun käyttöönottovaiheen viat oli saatu korjattua, suurimmalla osalla laitteista ei ollut ongelmia pitkän aikavälin kestävydessä testijakson aikana. Joillakin laitteista oli IP 68 luokitukset, mutta luokitus saattoi koskea pelkästään sensoriosaa tai vaatia lisävarusteina hankittavia liittimiä.

7.3.3 Mittausjärjestelmät erikokoisille ja erilaisille vesilaitoksille

Vesilaitosten mittausjärjestelmän suunnittelussa on tärkeä ottaa huomioon monia eri tekijöitä, kuten verkoston koko, veden laatu, automaatioaste, kustannukset, mittauspisteiden ympäristötekijät, hälytykset ja raportointi sekä joustavuus ja laajennettavuus. Jokainen vesilaitos on ainutlaatuinen, ja sen tarpeet voivat vaihdella suuresti, joten mittausjärjestelmän valinnassa on tärkeää tehdä huolellinen arviointi ja valita järjestelmä, joka vastaa parhaiten kyseisen laitoksen tarpeita ja vaatimuksia. Luotettavasti toimivan jatkuvatoimisen vedenlaatusensoreiden mittausjärjestelmän rakentaminen - ja ennen kaikkea ylläpito - vaatii kohtuullisen suuret resurssit vesilaitokselta.

Resursseja tarvitaan muun muassa:

- Mittauspisteiden suunnitteluun, rakentamiseen ja asentamiseen liittyvät resurssit
- Sähkö- instrumentointi- ja automaatioalan osaamista ja resursseja
- Näytteenotto- ja laboratorio-osaamista ja resursseja
- Datan käsittelyyn ja tulkintaan riittävästi resursseja

Periaatteessa kaikki yllä esitetyt asiat on mahdollista toteuttaa myös ostopalveluna, kunhan vesilaitokselta löytyy riittävät resurssit laadukkaan hankinnan toteuttamiseksi. Palvelun toimittaja tarvitsee joka tapauksessa runsaasti yhteistyötä tarvittavien lähtötietojen hankkimiseksi ja töiden yhteensovittamiseksi. Mikäli edellä esitetyt resurssit eivät toteudu, yhtenä vaihtoehtona ovat kampanjaluontoiset vedenlaatumittaukset esimerkiksi ostopalveluna toteutettuna. Onnistuneesti toteutetun mittauskampanjan perusteella voi myöhemmin harkita muutamaa yksittäistä mittauspistettä, joilla vedenlaatumittauksia lähdetään harjoittelemaan. Pienillä laitoksilla kannattaa panostaa mittauksissa erityisesti luotettavuuteen ja helppokäyttöisyyteen, eikä niitä välttämättä tarvitse eikä kannata kytkeä hälytysjärjestelmään.

7.4 Tiedonkäsittelyssä (siirto, keräys, validointi, säilytys, analysointi, raportointi ja tulkinta) huomioon otettavat asiat

Käytännöt on esitetty loppuraportin kohdassa T6.2 - **Smart water platform tests** (Savonia Smart Water Data Platform – SWDP). Tässä muutamia erityisiä jatkuvatoimisiin sensoreihin liittyviä suosituksia:

1. Siirto ja keräys:

- Varmista, että laitetoimittaja pystyy toimittamaan laitteistoonsa tiedonsiirtojärjestelmän, joka on vesilaitoksen käytettävissä (GSM, Lora, NB-IoT jne.)
- Signaalin kuuluvuus varmistettava asennuspaikassa
- Käytä turvallisia protokollia tiedon siirtoon.
- Varmista, että laitteistotoimittaja kykenee siirtämään datan kaikkien rajapintojen yli.
- Varmista, että keräysjärjestelmä on luotettava ja tietoturvallinen.

2. Validointi:

- Tulosten validointi näytteenottoon perustuvien laboratorioanalyysien säännöllisin väliajoin
- Tarkista mittaustiedon oikeellisuus ja eheys.
- Käytä standardoituja menetelmiä validointiin.

3. Säilytys:

- Lähtökohtaisesti laitteistotoimittajat tarjoavat ratkaisua, jossa data siirretään laitevalmistajan omaan pilvipalveluun. Laitevalmistajien kyky siirtää dataa reaaliaikaisesti tästä eteenpäin vesilaitoksen omaan järjestelmään vaihtelee

suuresti ja tämä on varmistettava tarjouspyyntövaiheessa. Tiedon siirto voi olla hankalasti toteutettavissa.

- Täytyy myös harkita datan sensitiivisyys. Onko data niin sensitiivistä, että data tulisi suoraan vesilaitokselle, eikä pilvipalvelun kautta?
- Määrittele tietojen säilytysaika ja -paikka.
- Huolehdi tietojen suojaamisesta ja varmuuskopioinnista.

4. Analysointi ja raportointi:

- Datan analysointimenetelmät ovat kehittymässä
- Mitä dataa jaetaan ja kenelle: lähtökohtaisesti vesilaitosten data on luonteeltaan sensitiivistä, mutta toisaalta kuluttajille tulisi tiedottaa juomaveden laadusta mahdollisimman kattavasti
- Käytä asianmukaisia työkaluja ja menetelmiä.
- Raportoi tulokset selkeästi ja ymmärrettävästi.

5. Tulkinta:

- Ymmärrä mittaustietojen taustalla olevat ilmiöt. Ilmiöiden ymmärtäminen vaatii koko vedentuotantoketjun ymmärtämistä ja vesilaitoksen henkilökunnan laajaa osallistumista ilmiöiden ymmärtämiseksi.
- Käytä asiantuntijoiden apua tarvittaessa.

7.5 Yleistä pohdintaa ja koneoppimiseen liittyviä lisätutkimustarpeita

7.5.1 Mittareiden kyvystä havaita erilaisia ja eritasoisia vedenlaadun häiriöitä

Jatkuvatoimisten vedenlaatusensoreiden avulla on mahdollista saada reaaliaikainen ja kattava tilannekuva verkostossa tapahtuvista vedenlaadun muutoksista. Hyvä tilannekuva helpottaa verkoston operointia niin normaalissa verkoston tilassa, häiriötilanteen aikana kuin toipumisvaiheessakin. Havaitun poikkeustilanteen aikana sensoreilla nähdään, kuinka tilanne etenee verkostossa ja milloin tilanne on ohi. Häiriön toipumisvaiheessa sensorit voivat antaa tietoa, kuinka verkostohuuhtelut purevat verkostossa.

Sen sijaan vedenlaadun häiriötilanteiden tunnistaminen ja niiden luokittelu eri luokkiin esimerkiksi kontaminaatiolähteiden mukaan (esim. mikrobikontaminaatio) vaatii vielä lisätyötä. Tässä vaiheessa ei ole selvää minkälaisia häiriöluokkia tulisi järjestelmälle opettaa ja tulisiko häiriöt luokitella kontaminaation mukaan (mikrobikontaminaatio), kontaminaation lähteen mukaan (jätevesi), vai skenaarion mukaan (raakaveden saastuminen jätevedellä). Kaikki nämä vaativat täysin erilaisen opetusaineiston ja järjestelmän rakentamisen.

Yksityiskohtaisemmat arviot tutkittujen jatkuvatoimisten mittareiden kyvystä havaita erilaisia ja eritasoisia vedenlaadun häiriöitä on esitetty SWIM loppuraportin (VTT:n pääraportti) kohdissa T6.1 (**Testing AI applications for online water quality monitoring**) ja T6.3 (**Intelligent Alarming**). Näiden työpakettien tulokset tullaan esittämään VTT:n myöhemmin julkaisemassa osuudessa. Molempien työpakettien tuloksia käsitellään myös vuoden 2024 aikana julkaistavissa tieteellisissä artikkeleissa. Aihe vaatii kuitenkin lisätutkimusta; tässä

tutkimuksessa syntynyt data-aineisto on ladattavissa tutkijoiden käyttöön. Voit pyytää datan lähettämällä sähköpostia osoitteeseen mikko.auriola@savonia.fi.

7.5.2 Jatkuvatoiniset sensorit vesilaitosten viranomaistarkkailun työkaluna

Jatkuvatoininen vedenlaadun seuranta antaa uusia työkaluja riskiperusteiseen lähestymistapaan veden laadun turvaamiseksi, koska pistemäisen, näytteenottoon perustuvan datan ohella käytössä on ajallisesti kattavaa, jatkuvatoimista dataa. Jatkuvatoinisen mittausdatan perusteella on havaittavissa, että normaalissakin toiminnassa voi olla nopeita muutoksia vedenlaadussa, joita ei välttämättä havaita näytteenottoon perustuvalla mittauksella.

Vaikka ”early warning” -tyyppiset sovellukset ovat vielä kehitysvaiheessa, reaaliaikaisesta mittausdatasta on kuitenkin hyötyä esimerkiksi yhteisen tilannekuvan jakamisessa viranomaisten kanssa (kuinka häiriö etenee verkostossa, tai kuinka huuhtelu tehoaa).

Toisaalta uudessa juomavesidirektiivissä yhtenä periaatteena on juomaveden laadusta tiedottaminen entistä tehokkaammin. Direktiivin mukaan tiedottamisen on oltava läpinäkyvää ja käyttäjäystävällistä, ja tiedot on esitettävä verkossa. Vaikka direktiivi ei edellytä jatkuvatoimisen mittausdatan jakamista verkossa, tietyiltä osin esimerkiksi online-tason sameusdatan jakaminen yleisölle voisi palvella tätä periaatetta.

Periaatteessa jatkuvatoimisilla online-mittauksilla olisi mahdollista myös saada aikaan säästöjä verrattuna näytteenottoon ja laboratorioissa tehtäviin vesitutkimuksiin. On pohdittu, voisiko viranomaistarkkailua korvata osittain jatkuvatoimisilla mittareilla. Vaikka tämä olisi mahdollista, on huomioitava, että myös sensorien luotettavan toiminnan varmistamiseksi on tehtävä näytteenottoon perustuvia laboratorioanalyysijärjestelmän validointia ja laaduntarkkailua varten. Tästä syystä voidaan olettaa, että jatkuvatoimiset mittaukset eivät olennaisesti vähennä laboratorioanalyysien määrää tai niiden aiheuttamia kustannuksia. Sensorien elinkaarikustannuksia arvioitaessa on huomioitava, että ne vaativat kohtuullisen paljon antureiden huoltoa ja ylläpitoa toimiakseen luotettavasti. Lisäksi kun otetaan huomioon, että jatkuvatoimiset mittaukset eivät ole niin luotettavia kuin laboratorioissa tehtävät analyysit, niin ainakin tällä hetkellä niiden rooli on viranomaistarkkailun näkökulmasta täydentävä, ei korvaava.

7.6 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta seuraavaa:

- Sensorit voivat olla toimintaperiaatteeltaan esim. fysikaalis-kemiallisia (johtokyky, pH), optisia (sameus, partikkelit, cytometria) tai mikrobien aktiivisuuden perustuvia (colilert)
- Tällä hetkellä laitteiden hankintakanavat ja ”laitetuki” ovat vielä kirjavia. Kaikille laitteille ei ole esimerkiksi maahantuoja. Tästä syystä laitteita hankittaessa on erityisen tärkeää varmistaa, että laitteille on saatavissa riittävää tuotetukea.
- Samasta syystä on tärkeää varmistaa ennen laitteen hankkimista, että laitteiden ylläpito ja huolto onnistuu joko vesilaitokselta itseltään tai ulkopuolisena palveluna.
- Laitteiden huoltoon ja ylläpitoon tulisi olla riittävästi resursseja. Kokemuksemme mukaan sensoreiden likaantumisherkkyys vaihtelee veden laadun ja asennuspaikan mukaan. Tässä projektissa laitteiden huoltoväliksi arvioitiin 3–4 kk, mutta sopiva huoltoväli tulisi varmistaa koeajoilla asennuskohteessa.
- Tällä hetkellä laitteiden paikallinen tuotetuki on vielä vaillinaista. Tämä kannattaa huomioida laitteiden ylläpidossa; esim. tärkeimmät varaosat, kuten sensorit, kannattaa hankkia omaan varastoon.
- Tällä hetkellä perinteiset fysikaalis-kemialliset mittaukset toimivat luotettavimmin ja tuottavat hyödyllisintä informaatiota. Valittaessa mitattavia parametreja, kannattaa valita toisaalta luotettavia mittauksia, ja toisaalta mittauksia, joiden tuottama informaatio täydentää parhaiten muita mittauksia. Suositeltavaa voisi olla mitata 2–4 eri parametria esim. johtokyky, sameus ja kokonaiskloori.
- Häiriöiden tunnistaminen ja luokittelu (erityisesti mikrobikontaminaation tunnistaminen) ei ole vielä luotettavaa ja vaatii lisätyötä.
- Tällä hetkellä sensoreilla voidaan havaita suhteellisen herkästi lähinnä erilaisista partikkeleista johtuvia veden laadun muutoksia. Näitä ovat esimerkiksi verkostosta irronneet sakat, biofilmit tai likavesien kiintoaineet.
- Veteen liuenneita kemikaaleja (pl. kloori) on selvästi hankalampi havaita. Tässä tapauksessa veden taitekertoimeen perustuva mittaus antoi herkimmän vasteen.
- Mikrobikontaminaatioiden osalta partikkelimittaukset ja sameus reagoivat (<0.1 %) kontaminaatioon, mutta yksiselitteinen tunnistaminen mikrobikontaminaatioksi ei ollut selvää. Esimerkiksi partikkelimittauksen c-parametri (mikrobimuotoiset partikkelit) reagoi mikrobikontaminaatioiden lisäksi myös häiriöihin, joissa veteen ei lisätty mikrobeja (erityisesti huuhtelut ja aktiivihiihikontaminaatio).
- Sensoreiden tuottaman informaation ansiosta on mahdollista saada reaaliaikaista ja ajallisesti ja alueellisesti kattavaa tilannekuvaa verkostosta.