

Eero Jormalainen

JÄTEVEDENPUHDISTAMON VIRTAA- MAMITTAUSMENETELMIEN ANALYYSI JA VERTAILU

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Marja Palmroth, Silja Mustonen
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eero Jormalainen: Jätevedenpuhdistamon virtaamamittausten analyysi ja vertailu
Analysis and comparison of flowmeters at a wastewater treatment plant
Kandidaatintyö
Tampereen Yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Marraskuu 2023

Jätevedenpuhdistamoilla tapahtuva prosessi on monimutkainen sekä siihen kuuluu paljon ei-lineaarisia suhteita eri ominaisuuksien välillä. Prosessin ollessa lähes täysin automatisoitu, ovat on-line mittaustulokset ohjauksen ja optimoinnin kannalta erittäin kriittisessä roolissa. Laitoksen automaatio on täysin mittareiden varassa, jotka keräävät prosessista tietoa ja lähettävät sen ohjausjärjestelmään. Prosessin ohjaus perustuu operaattoreiden asettamiin parametreihin jätevedenpuhdistuksen eri vaiheissa. Vaikka laitoksilla käytetään muun muassa paine-, konsentraatio-, paino- ja tasomittareita, ovat virtaamamittarit näistä kaikista tärkeimmässä osassa. Tämä perustuu siihen, että laitoksen toiminta perustuu erilaisten nesteiden virtauksiin ja tarkan prosessikuvan tuottamiseksi tarvitaan virtaamatietoa lähes jokaisesta prosessin vaiheesta. Tätä tietoa arvioimalla prosessia voidaan optimoida, joka johtaa parempaan energia- ja resurssitehokkuuteen sekä taloudellisiin säästöihin.

Tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus jätevedenpuhdistamoilla käytettävistä virtaamamittareista, etsiä syitä niissä aiheutuviin virheisiin, sekä löytää menetelmiä kyseisten virheiden tunnistamiseen. Tätä varten suoritetaan vertailu kolmen eri teollisuusprosessissa yleisesti käytössä olevien virtaamamittareiden välillä: Coriolis-, ultraääni- ja magneetti. Näiden ominaisuuksista ja toimintaperiaatteista tehdään selvitys sekä vertailu vahvuuksista ja heikkouksista. Todetaan, että Coriolis -mittari eroaa ultraääni- ja magneettimittareista toimintaperiaatteiltaan sekä sovelluksiltaan ja on muita hintavampi, mutta myös tarkempi. Ultraääni- ja magneettivirtaamamittarit ovat jätevedenpuhdistamoilla yleisesti käytössä ja oikein asennettuina tuottavat tarkkaa ja luotettavaa mittaustulosta. Tutkimuksessa nostetaan myös esille, että vääränlainen asennus, vaihtelevat virtaamatyypit ja ulkoisista häiriötekijöistä aiheutuvat virheet toimivat yleisesti virhelähteinä virtaamamittauksissa ja saattavat johtaa väriin prosessinohjauspäätöksiin. Tämä aiheuttaa laitoksella työvoiman, energian ja resurssien tuhlausta sekä lisää ympäristön kuormitusta.

Lisäksi työssä on kokeellinen osuus, joka perustuu laitoksen operaattoreiden huoleen epäkuuntoisesta virtaamamittarista. Huolen nosti mittaustuloksien jatkuva suuri vaihteluväli lyhyellä ajalla. Työn kohteena kunnallinen kaksilinjainen aktiivilietelaitos, jossa on ilmastus ja jälkiselkeytys sekä fosforin poisto ferrikloridilla. Tämän takia työssä perehdytään erilaisiin menetelmiin, joiden avulla virtaamamittarin dataa voitaisiin varmentaa, ja niiksi löydettiin kemikaalisäiliön pinnanmittaukseen perustuva tilavuusvirtaamavertailu, sekä kemikaalipumppujen taajuuskäyrään perustuvaan laskennalliseen virtaamaan vertailu. Näistä jälkimmäinen todetaan tarkemmaksi pienemmän virhemarginaalin ja erotuksen keskihajonnan perusteella. Molemmat menetelmät ovat kuitenkin käyttökelpoisia virtaamamittareiden datan luotettavuuden arviointiin sekä tuottavat arvokasta tietoa mittarin toiminnasta.

Avainsanat: Jätevedenpuhdistamo, sensori, automaatio, prosessinohjaus, virtaamamittaus, data-analytiikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eero Jormalainen: Analysis and comparison of flowmeters at a wastewater treatment plant
Tampere Universities
Faculty of Engineering and Natural Sciences
Bachelor's thesis
November 2023

The process at wastewater treatment plants is complex and unique for each facility, involving numerous non-linear relationships between different characteristics. In an almost fully automated process, online measurement results play a critical role in control and optimization. The plant's automation relies entirely on meters that collect process data and transmit it to the control system. Process control is based on parameters set by operators at various stages of wastewater treatment. While pressure, concentration, weight, and level meters are used, flow meters are especially crucial. This is because the plant's operation depends on the flow of various liquids, and precise flow data is needed at nearly every stage of the process to generate an accurate process overview. By evaluating this information, the process can be optimized, leading to improved energy and resource efficiency as well as cost savings.

The goal of this study is to explore flow meters in wastewater treatment plants, their recurring issues, and methods to identify faulty data. A comparison was made among three commonly used flow meters in industrial processes: Coriolis, ultrasonic, and magnetic flow meters. An investigation into their features and operating principles was conducted, along with a comparison of their strengths and weaknesses. It was found that the Coriolis meter differs from ultrasonic and magnetic meters in both operating principles and applications. Although it is more expensive, the Coriolis meter is also more accurate. Ultrasonic and magnetic flow meters are commonly used in wastewater treatment plants and when correctly installed, provide accurate and reliable measurement results.

The study also highlighted that incorrect installation, varying flow types, and errors caused by external disturbances commonly act as sources of error in flow measurements, potentially leading to incorrect process control decisions. This results in the waste of manpower, energy, and resources at the plant, contributing to increased environmental impact.

Additionally, the study includes an experimental chapter based on operators' concerns about a malfunctioning flow meter showing consistently high variability in a short period. The study focuses on a fully covered two-line activated sludge plant with aeration and post-clarification with phosphorus removal using ferric chloride. Two methods were identified to verify flow meter data, and chemical tank level-based volumetric flow rate comparison and calculation-based flow rate comparison using chemical pump frequency response were used. The latter was determined to be more accurate based on a smaller margin of error and lower standard deviation. Both methods, however, are useful for assessing the reliability of flow meter data and provide valuable information about the meter's performance.

Keywords: Wastewater treatment plant, sensor, automation, process control, flow measurement, data analytics

This publication's originality has been verified using the Turnitin Originality Check program.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VIRTAAMAMITTAUKSET JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA.....	3
2.1 Prosessinohjaus ja automaatio.....	3
2.2 Virtaamamittausten rooli jätevedenpuhdistamossa.....	4
3. VIRTAAMAMITTAUSTEKNOLOGIAT	7
3.2 Virtaamamittareiden toteutuksia	7
3.2.1 Coriolis-virtaamamittari.....	7
3.2.2 Magneettiset virtaamamittarit	8
3.2.3 Ultraäänivirtaamamittarit	9
3.2.4 Mittarien vertailu.....	11
3.4 Virtaamamittareiden haasteet ja ongelmat	11
3.4.1 Virheiden merkitys.....	12
3.4.2 Virtaaman vaikutus.....	13
3.4.3 Asennuspaikan vaikutus.....	13
3.4.4 Ulkoiset häiriötekijät	14
4. AINEISTO JA MENETELMÄT	15
4.1 Kohteen kuvaus	15
4.2 Aineisto ja menetelmät	17
4.2.1 Kemikaalisäiliön pinnan muutos	18
4.2.2 Pumpun nimellistuotto	19
4.3 Datan analysointi.....	20
5. TULOKSET	23
5.1 Pinnanmuutokseen perustuva menetelmä	23
5.2 Taajuuskäyrään perustuva menetelmä.....	24
5.3 Vertailu ja tilastollinen tarkastelu	25
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	28
LÄHTEET	29
LIITTEET.....	31

1. JOHDANTO

Ympäristön suojelu ja sen kuormituksen vähentäminen sekä energiatehokkuus ovat keskeisessä roolissa kaupunkien toiminnassa. Uudet määräykset lakiehdotukset asettavat entistä tiukempia rajoituksia jätevesien käsittelyn päästöille, ja yhä useampi uusi investointi suunnitellaan edesauttamaan näihin pääsemistä. (Arola, 2012, s. 11) Työn kohteena oleva jätevedenpuhdistamo toimii pitkälti automaatiojärjestelmän avulla ja tämä pohjautuu suoraan eri vaiheisiin prosessia sijoitettaviin mittareihin. Prosessiparametrien, kuten virtausnopeuden, liuenneen hapen pitoisuuden ja saasteiden pitoisuuksien, dynaamisten ominaisuuksien vuoksi tutkimuksen kohteena olevien muuttujien välillä on nopeasti muuttuvia, ei-lineaaraisia suhteita (Li et al. 2022). Tästä syystä on näiden mittareiden jatkuva tarkkailu, kalibrointi ja optimointi erittäin tärkeää.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään jätevedenpuhdistuksessa yleisesti käytössä oleviin virtaamamittausteknologioihin sekä kokeellisessa osuudessa Suomessa sijaitsevan kunnallisen jätevedenpuhdistamon kemikaalisuotuksen virtaamamittarin toimintaan ja vertaillaan sen tuottamaa dataa laskennallisiin arvoihin. Sensorien luotettavuus ja niiden vaikutus eri toimintoihin ovat olleet keskeisiä tutkimusaiheita ympäristöalalla, koska sensorihäiriöiden esiintyminen on yleistä haastavien mittaolosuhteiden takia. Nämä häiriöt johtavat virheellisiin tulkintoihin, jotka aiheuttavat riskin prosessien luotettavuudelle ja turvallisuudelle. (Ba-Alawi et al. 2022)

Jätevedenpuhdistamoa suunnitellessa online-sensorit ovat merkittävä osa kokonais kustannuksia. Virtaamamittari on yksi tärkeimmistä sensortyypeistä puhdistamolla, sillä tämä ei ainoastaan anna tarkkaa kuvaa puhdistamon kuormituksesta ja prosessin toiminnasta, vaan myös tarjoaa alustan muiden mittarien toiminnan periaatteelle, kuten esimerkiksi epäpuhtauksien pitoisuuslaskennalle. Tästä syystä toimivat ja tarkat virtaamamittarit ovat ensisijaisen tärkeitä tehokkaan puhdistustuloksen saavuttamiseksi.

Selvittäessä puhdistamon ongelmallisia mittauksia dataan perustuvan vertailun lisäksi on tärkeää ylläpitää hyvää kommunikaatiota laitoksen operaattoreiden kanssa. He tuntevat laitoksen vahvuudet sekä heikkoudet ja heillä on kokemuskohtaista tietoa, jota ei muuten ole saatavilla. Operaattoreilta saa kokemukseen perustuvia näkökulmia, kuten

epäiltyjä näytteenottoaikoja, haastavia prosessin vaiheita, tunnettuja virheitä mittauksissa tai muita dokumentoimattomia toiminnallisia muutoksia. (Rieger et al. 2010)

Aihe on kiinnostava ja ajankohtainen, sillä puhdistamoiden optimointi edistää yhteiskunnan etuja kiertotalouden tehostamisen sekä ympäristön suojelun kautta. Laitosten optimoinnilla säästetään resursseja ja vähennetään päästöjä. Koska laitosten automaatio perustuu pitkälti prosessimittareiden dataan, on tämän oikeuttaminen ja virheiden löytäminen tärkeää optimoinnin kannalta.

Työn kohteena olevan jätevedenpuhdistamon henkilökunta uskoo, että kemikaalialtaasta lähtevän virtauksen mittari on erittäin epäluotettava, eikä sitä voida täten hyödyntää. Tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus jätevedenpuhdistamoilla käytettävistä virtaamamittareista, etsiä syitä niissä aiheutuviin virheisiin sekä löytää menetelmiä kyseisten virheiden tunnistamiseen. Kokeellinen osuus koostuu kahdesta osasta: laitokselta saadun datan analysoinnista ja datan testaamisesta teoriaosuudessa löydetyillä menetelmällä.

Toisessa luvussa perehdytään virtaamamittareiden rooliin jätevedenpuhdistamoilla sekä kerrotaan kuinka ne liittyvät prosessin ohjaukseen ja automaatioon. Luvussa 3 tutustutaan itse mittareiden toimintaperiaatteisiin, erilaisiin toteutuksiin sekä niissä säännöllisesti kohdattaviin ongelmiin. Kokeellisessa osuudessa virtaamamittareiden tuottama lukemaa verrataan kemikaalisäiliön pinnan vaihtelun tuottamaan massataseeseen sekä pumppujen tuottokäyrän avulla laskettuun virtaamaan. Tällä tavalla selvitetään, pystyykö virtausmittarin dataa tarkistamaan ja onko se yhdenmukainen referenssiarvojen vaihtelun kanssa, kun tunnetaan altaan ulottuvuudet ja pumpun ominaisuudet. Pinnanmittaus on mittauksena huomattavasti yksinkertaisempi ja luotettavampi verrattuna virtaamamittaukseen, joten se toimii hyvänä referenssiarvona (Djalilov et al. 2023). Viidennessä luvussa esitetään kokeellisen osuuden tulokset ja viimeisessä luvussa johtopäätökset. Aineiston hankintaan kuuluu datan lisäksi mahdollisia haastatteluja henkilökunnan kanssa sekä vierailu itse laitoksessa.

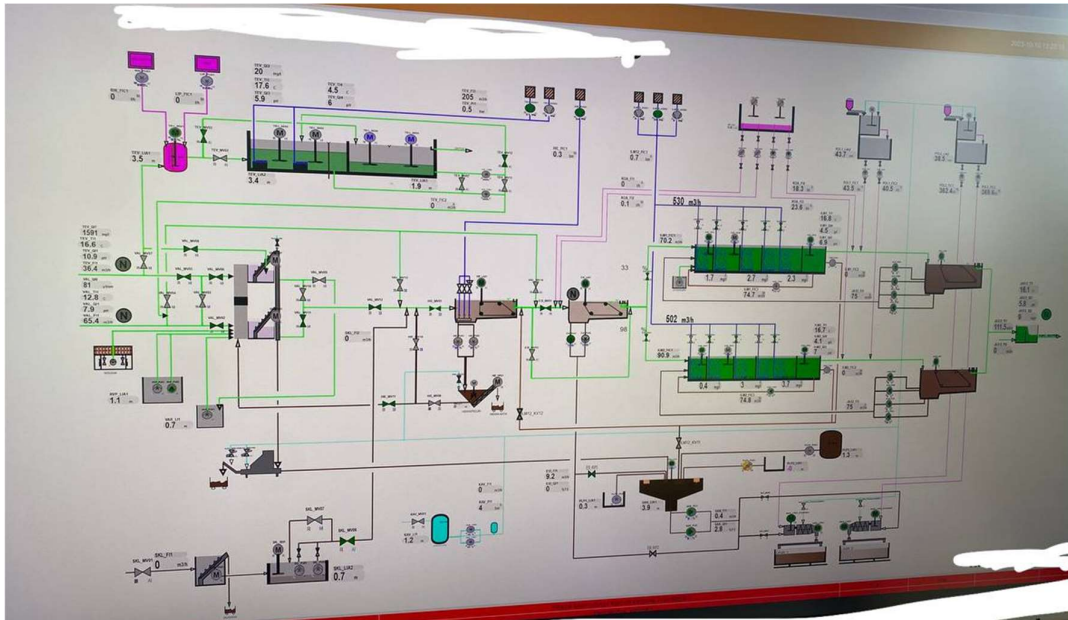
2. VIRTAAMAMITTAUKSET JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA

Tässä teorialuvussa perehdytään virtaamamittausten rooliin jätevedenpuhdistamossa suhteessa prosessinohjaukseen ja -automaatioon. Lisäksi avataan prosessimallinnuksen roolia jätevedenpuhdistamoiden suunnittelussa.

2.1 Prosessinohjaus ja automaatio

Jätevedenpuhdistamon prosessinohjauksella tarkoitetaan sensorien tuottamaan tiedon arviointia ja säätötoimenpiteiden tekoa tämän perusteella. Prosessinohjauksella ja automaatiolla on kolme tärkeää tehtävää: pitää prosessi käynnissä, ohjata prosessia tavoitteiden mukaisesti ja säästää energiaa ja resursseja (Olsson, 2014). Laitoksen toiminta on riippuvainen automaatiosta, mutta sen käyttäjien vastuulla on asettaa toimilaitteiden asetusarvoja ja huolehtia ohjauksen säännöistä halutun ajotavan mukaisesti. Laitoksesta kerättyä tietoa täydentävät operaattoreiden manuaaliset toimenpiteet, kuten käyttöpäiväkirjan pitäminen sekä tarkkailuvelvoite- ja/tai sisäisen laboratorion tiedot.

Reaaliaikainen valvonta automaattisella mittauslaitteistolla eli sensoriteknikalla käsitteilylaitoksessa voi merkittävästi edistää energian ja kustannusten säästöä tarkkojen, nopeiden ja tärkeiden toimintaparametrien arvioinnin avulla. Nykyaikaiset teknologiset edistysaskeleet mahdollistavat tällä hetkellä useiden parametrien, kuten johtavuuden, pH:n, sameuden, liuenneen hapen ja muiden, reaaliaikaisen valvonnan. Tämä mahdollistaa prosessin optimoinnin säätämällä kemikaalien lisäystä, virtaamanopeuksia, viipymää ja muita merkittäviä toimintasuhteita asianmukaisesti välttäen siten kemikaalien liikakäyttöä ja ilmastuslaitteiden ylimääräistä kuormitusta (Stamatelatos & Tsagarakis, 2015, s. 7). Kuvassa 1 on hyvin tyypillinen automaatiojärjestelmän ohjausnäky.



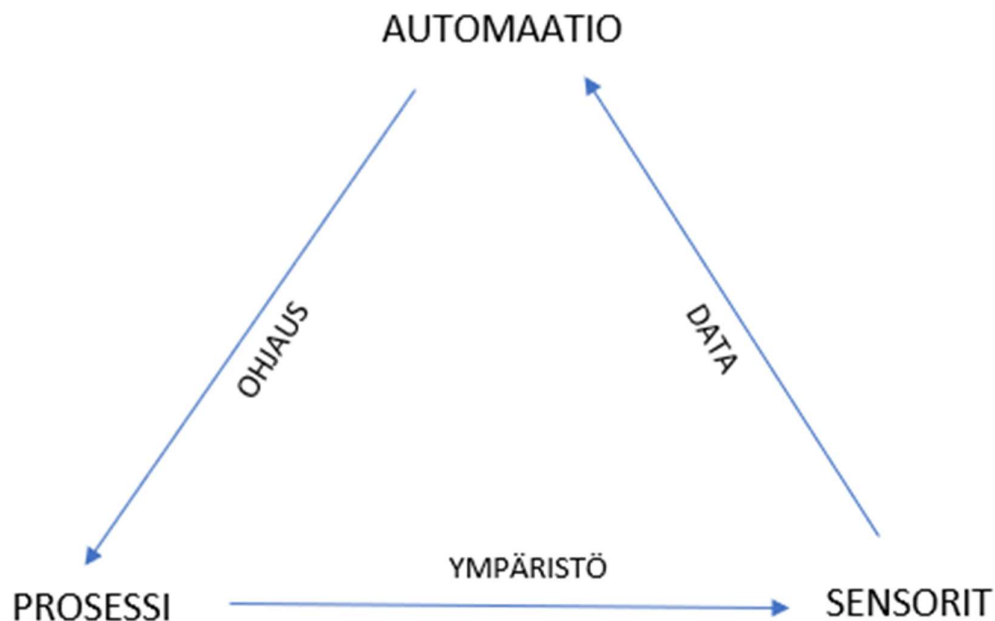
Kuva 1. Esimerkki jätevedenpuhdistamon automaatiojärjestelmän ohjaussovelluksen päänäkymästä

Kuva on jätevedenpuhdistamon valvomosta ja on erittäin tärkeä osa prosessikuvan ylläpidolle. Laitoksen operaattorit voivat yhdellä silmäyksellä tarkastaa prosessin tilan, ja valikosta pääsee pureutumaan tarkemmin lähes jokaiseen vaiheeseen prosessia. Samasta sovelluksesta asetetaan myös prosessinohjaukselle oleellisia parametrejä, kuten lieteikää, palautussuhdetta, kemikaalinsyöttöä ja ohitusta.

2.2 Virtaamamittausten rooli jätevedenpuhdistamossa

Puhuttaessa jätevedenpuhdistamon eri mittausten tärkeydestä on selvää, että virtaamamittaukset ovat oleellinen osa operointia ja automaatiota. Nesteiden virtaus on edellytys prosessille, ja näitä mittaavien mittareiden epätarkkuus vähentää kaikista muista mitta-reista saatavan tiedon hyödyllisyyttä. Esimerkiksi tietyn saapuvan epäpuhtauden pitoisuus tulevassa jätevedessä ei anna tarkkaa kuvaa sen määrästä puhdistamolla, jos tämän virtaamamittari on epätarkka. On siis selvää, että suunniteltaessa ja operoitaessa jätevedenpuhdistamoa on syytä panostaa mittaridatan oikeellisuuteen, optimointiin ja säännölliseen kalibrointiin. Jos prosessia ohjattaisiin jatkuvasti dataan perustuvalla tarkistuksella, puhdistamo voisi vastata tehottomuuteen ja prosessivirheisiin hyvin nopealla vasteella. Tätä kautta pystyttäisiin vähentämään laitoksen alhaallaoloaika, päästörajojen rikkomuksia ja energian, kemikaalien ja työvoiman tuhlaamista (Newhart et al. 2019). Alla olevassa Kuvassa 2 on havainnollistettu automaation, sensorien ja puhdistusprosessin vuorovaikutusta. Prosessi tarjoaa sensoreille ympäristön, josta kerätää dataa,

jonka sensorit lähettävät automaatiojärjestelmään. Automaatiojärjestelmä ohjaa prosessia datan sekä järjestelmään asetettujen operointiarvojen perusteella.



Kuva 2. Automaation, prosessin ja sensorien vuorovaikutuskaavio

Tarkan prosessikuvan tuottamiseksi virtaamamittareita asennetaan lähes jokaiseen prosessin vaiheeseen eri säiliöiden välille. Esimerkiksi tulevan veden kulkeutuminen esiselkeytykseen, jakautuminen mahdollisiin prosessilinjoihin, ilmastusaltaat, jälkiselkeytys, ohitus, lähtevä vesi sekä kemikaalisyötöt ovat tärkeimpiä mittauspisteitä. Tehokkaan käsittelytuloksen kannalta on siis erittäin oleellista, että jäteveden virtaama tunnetaan tarkkaan sekä sitä mittaavat instrumentit on valittu huolella tulevan jäteveden ja puhdistamon prosessin ominaisuuksien perusteella. (Sun et al. 2021)

Virtaamamittaukset ovat kaikista tärkeimpiä mittauksia myös prosessinmallinnuksen näkökulmasta, sillä jokainen pitoisuus on kerrottava virtauksella malliin syötettävän kuorman laskemiseksi. Ilman toimivaa virtaamamittausta ei siis ole toimivaa puhdistamoaa tai sen mallia. Mittareiden anturit vaativat paljon huoltoa, ja koska niitä sijoitetaan usein haastaviin olosuhteisiin, kuten kemikaalisäiliöihin ja -putkiin. Täten niiden tarkkuus on yleensä alhaisempi, ja alaraja havaitsemiselle on korkeampi kuin standardoiduissa laboratorio-olosuhteissa (Rieger et al. 2010).

Jätevedenpuhdistamon prosessien mallintaminen on tällä hetkellä tärkeä aihe alan tutkimuksessa, ja prosessimittaukset ovat tässä ratkaisevassa roolissa. Matemaattinen

mallinnus ja jätevedenkäsittelyprosessien optimointi ovat muodostuneet tehokkaiksi työkaluiksi puhdistamoille ja konsulteille ympäri maailmaa prosessien suunnittelussa. Jätevedenkäsittelyprosessien matemaattinen mallinnus ja optimointi auttavat ennustamaan jätevedenkäsittelyprosessien käyttäytymistä sekä virtaamanopeuden ja epäpuhtauksien pitoisuuksien vaihteluita ilman häiriöitä todellisessa järjestelmässä. (Rani & Chang, 2021, s. 1) Prosessimallinnusta voidaan käyttää myös mittareiden toiminnan varmistamiseen, koska tämä antaa referenssiarvon verrattaessa mittarien tuottamaan dataan. Tarkempi prosessikuva helpottaa optimointia vähentäen energian ja kemikaalien kuluusta. Lisäksi jätevesiprosessien mallinnukset voivat tarjota oivalluksia laitospäivityksiin, uusiin laitossuunnitelmiin ja toiminnanohjauksen parannuksiin. Jätevedenpuhdistamoiden suunnittelussa ja optimoinnissa tehdyillä päätöksillä on merkittäviä taloudellisia ja ympäristövaikutuksia. (Serdarevic & Dzubur, 2016)

3. VIRTAAMAMITTAUSTEKNOLOGIAT

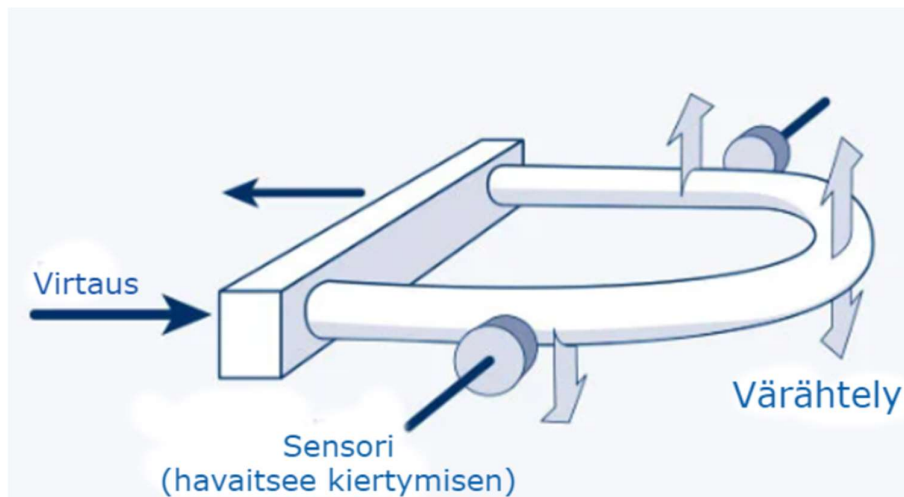
Virtaamamittareiden saatavuus, tarkkuus ja luotettavuus on parantunut teknologiakehityksen myötä. Tässä luvussa tutustutaan virtaamamittausten teknologiaan ja erilaisiin mittaritoteutuksiin sekä niiden heikkouksiin ja vahvuuksiin. Vaikka laitoksilla käytetään muun muassa paine-, konsentraatio-, paino- ja tasomittareita, ovat virtaamamittarit näistä keskeisimpiä. Virtaamamittaukset ovat tärkeä aihe jätevedenpuhdistuksessa, sillä kaikki sen prosessit perustuvat erilaisten nesteiden virtauksiin. Virtaamamittaus suoritetaan virtaamamittareiden avulla. Virtaamamittari on laite, joka on suunniteltu mittaamaan nesteen virtaaman määrää suljetussa putkessa tai avoimessa kanavassa, ja niitä voidaan jaotella esimerkiksi syntyyvuoden perusteella. Mittausmenetelmiä on erilaisia, ja ne voidaan luokitella perinteisiin (ennen 1950-lukua) ja uusiin menetelmiin (1950-luvun jälkeen). Uusiksi menetelmiksi luetaan Coriolis-, magneetti-, ultraääni-, vorteksi- ja lämpövirtaamamittarit. Perinteisiin virtaamamittaustekniikoihin kuuluvat paine-ero-, turbiini- ja tilavuusvirtaamamittarit. Vaikka yleinen suuntaus on kohti uusia uudempia mittareita pois päin perinteisistä mittareista, tämä muutos vaihtelee huomattavasti teollisuuden ja sovelluksen mukaan. (Yoder & Morley, 2015)

3.2 Virtaamamittareiden toteutuksia

Suomessa, erityisesti vanhemmilla jätevedenpuhdistamoilla on käytetty mainittujen virtaamamittareiden lisäksi V-mittapatoja. Nämä ovat jätetty tarkastelun ulkopuolelle, sillä tämän luvun virtaamamittareiden toteutuksien esittelyssä keskitytään uudempiin, 1950-luvun jälkeen keksittyihin menetelmiin, sillä alan trendi liikkuu tähän suuntaan ja on täten oleellisempi.

3.2.1 Coriolis-virtaamamittari

Coriolis-virtaamamittari on nimetty ranskalaisen matemaatikon Gustave Coriolisin mukaan. Vuonna 1835 Coriolis osoitti, että inertiaovoima on otettava huomioon kuvattaessa kappaleiden rotaatiota. Coriolis-virtaamamittarit koostuvat yhdestä tai useammasta värähtelevästä taivutetuista putkesta. Yksiputkisen Coriolis-virtaamamittarin toimintaa on havainnollistettu Kuvassa 3. Mitattava neste kulkee putkien läpi ja kiihtyy liikkeessään kohti suurinta värähtelypistettä ja hidastuu poistuessaan siitä. Tämä johtaa putkien kiertävään liikkeeseen, ja kiertymisen aste on suoraan verrannollinen massavirtaukseen. (Yoder & Morley, 2015)



Kuva 3. Coriolis-virtaamamittarin toimintaperiaate (*Bronkhorst CORI-FLOW Meters, 2022*)

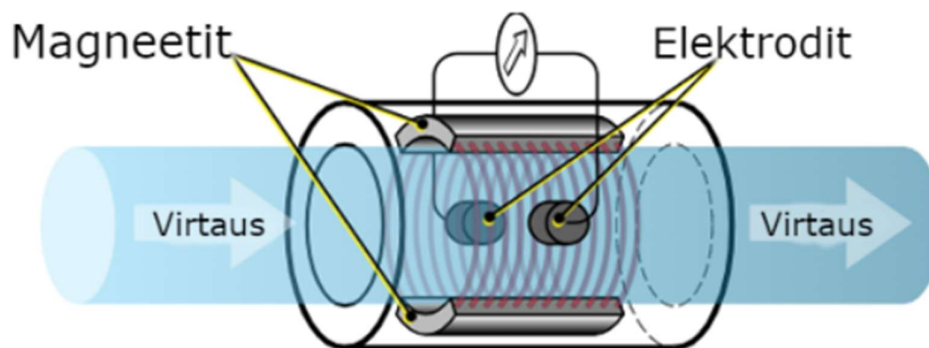
On huomionarvoista, että Coriolis-virtaamamittarit mittaavat massavirtausta suoraan, toisin kuin muut virtaamamittarit, jotka laskevat massavirtauksen käyttämällä pääteltyä tiheyden arvoa (Yoder & Morley, 2015). Tiheyden arvolla laskettu virtaama käytännössä lisää yhden välivaiheen laskuyhtälölle, joka altistaa tuloksen korkeammalle virheelle. Luotettavuus on yksi Coriolis-virtaamamittarin suurimmista eduista saavuttaen jopa 0.1% tarkkuuden tasaisilla virtauksilla (Henry & Mercado, 2005)

Useimmilla toimittajilla on omia toteutuksia taivutetuille putkille. Toiset yritykset tarjoavat yhden taivutetun putken, kun taas toisilla on kaksi taivutettua putkea, tai suoraputkisia mittareita. Suoraputkiset mittarit ovat helpommin puhdistettavissa kuin taivutetut mittarit ja niissä on myös vähemmän painehäviötä. Coriolis-mittaria voidaan käyttää sekä nesteen, että kaasun mittaamiseen. Vaikka nämä mittarit ovat kalliimmasta päästä – n.3000 euroa kappalehinta – on kysyntä tarkoille ja luotettaville mittareille suuri. Korkeasta hankintahinnasta huolimatta mittareilla on matalat ylläpitokustannukset (Yoder & Morley, 2015)

3.2.2 Magneettiset virtaamamittarit

Magneettiset virtaamamittarit perustuvat sähkömagneettiseen induktioon. Tämän periaatteen mukaan sähköjännite syntyy johtavassa aineessa, kun se kulkee magneettikentän läpi. Tämä jännite on suoraan verrannollinen magneettikentän tiheyteen, johdinten pituuteen ja johtavan aineen nopeuteen. Magneettiset virtaamamittarit käyttävät johdinsilmukoita, jotka on asennettu putken päälle tai sen ulkopuolelle. Tätä on havainnollistettu Kuvassa 4. Näihin silmukoihin syötetään sitten jännite, mikä luo magneettikentän

putken sisälle. Kun johtava neste kulkee putken läpi, syntyy jännite, ja se havaitaan mittarissa elektrodien avulla. Virtaamamittari käyttää tätä arvoa virtaamanopeuden laskeamiseen. (Yoder & Morley, 2015)

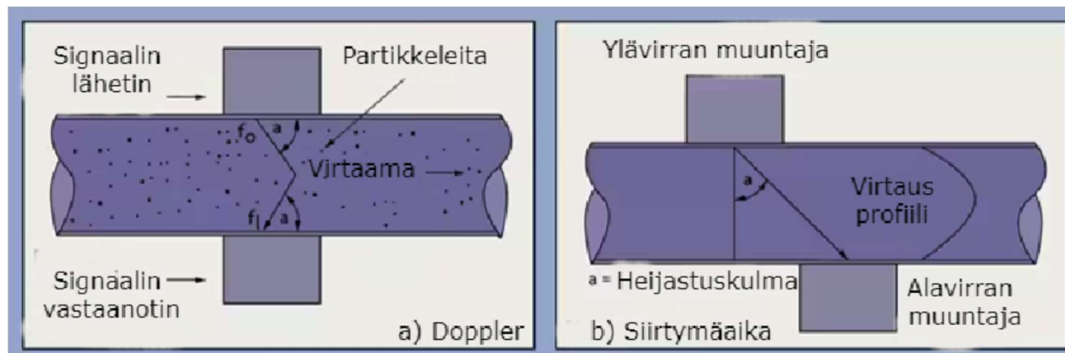


Kuva 4. Magneettisen virtaamamittarin toimintaperiaate (Sousek, 2023)

Magneettisia virtaamamittareita käytetään pääasiassa johtavien nesteiden, kuten lietteiden ja paperimassaliemien virtauksen mittaamiseen. Magneettivirtaamamittarit ovat melko tarkkoja, mutta eivät yhtä tarkkoja kuin Coriolis- ja ultraäänivirtaamamittarit, eivätkä ne aiheuta painehäviötä (Yoder & Morley, 2015). Ne kuitenkin täyttävät virtaamamittarin vaatimukset saavuttaen jopa 0.685% prosentin tarkkuuden (Ge et al. 2020). Niiden alkuperäinen hankintahinta on suhteellisen korkea, vaikka useimmat magneettivirtaamamittarit ovat hinnoiteltu alemmiksi kuin vastaavat Coriolis-mittarit. Magneettiset virtaamamittarit ovat yksi suosituimmista ratkaisuista nestevirtauksen mittauksessa, ja niitä käytetään lähes 30 prosentissa vesiteollisuuden laitoksissa. Niiden suurimmat rajoittavat tekijät ovat toimimattomuus kaasujen kanssa, sekä vaatimus täytenä virtaavasta putkesta. (Yoder & Morley, 2015)

3.2.3 Ultraäänivirtaamamittarit

Ultraäänivirtaamamittarit esiteltiin ensimmäisen kerran teolliseen käyttöön vuonna 1963 ja ne jaetaan kahteen päätyyppiin: läpimenoaika ja Doppler, jotka ovat esitelty Kuvassa 5. Läpimenoaikaan perustuvissa ultraäänimittareissa on sekä lähettäjä että vastaanotin. Ultraäänisignaali lähetetään putken poikki viistossa ja mittari mittaa ajan, joka signaalilla kestää kulkea puolelta toiselle. Signaalin kulkiessa virtauksen mukana, se liikkuu nopeammin kuin vastavirtauksessa. Mittari laskee kaksi aikaa: signaalin kulku virtauksen suuntaisesti ja sitä vastaan ja näiden aikojen ero on verrannollinen virtaamanopeuteen (Yoder & Morley, 2015).



Kuva 5. Doppler-ilmiöön ja läpimenoaikaan perustuvien virtaamamittareiden toimintaperiaatteet (*Omega*, 2005)

Doppler-ultraäänivirtaamamittarit lähettävät myös ultraäänisignaalin putken poikki. Sen sijaan, että signaali lähetettäisiin vastaanottimelle putken toisella puolella, se heijastuu virtaamakanavassa kulkeviin hiukkasiin. Signaalin kulkiessa virtauksen läpi sen taajuus muuttuu suhteessa nesteen keskimääräiseen nopeuteen. Vastaanotin havaitsee heijastuneen signaalin ja mittaa sen taajuuden. Luodun ja havaitun taajuuden ero on verrannollinen virtaamanopeuteen. Doppler-ultraäänivirtaamamittareita käytetään likaisille nesteille tai lietteille, kun taas läpimenoaikaan perustuvaa mittaria käytetään puhtaille nesteille. Läpimenoaikaan perustuva mittari soveltuu siis heikosti jätevesille, sillä tämä sisältää runsaasti signaalia häiritseviä partikkeleita. Yksipolkuisessa ultraäänimittarissa virtaamanopeus lasketaan yhden polun perusteella, mikä tekee siitä alttiin virtaamaprofiilin poikkeavuuksille. Monipolkuiset virtaamamittarit ovat tarkempia, koska ne käyttävät useampien polkujen keskiarvoa (yleensä neljästä kuuteen) virtaamalaskentaa varten. Ultraäänivirtaamamittareita käytetään sekä nesteille että kaasuille, mutta näiden ominaisuudet tulee tuntea (Yoder & Morley, 2015). Mittareiden tarkkuus on hieman matalampi kuin aiemmin esitetyillä mittareilla, saavuttaen 2–3 % tarkkuuden. Ne ovat kuitenkin kaikista alttiimpia virtaustyyppin vaikutuksesta aiheutuvalla virheelle. (Berrebi et al. 2004)

3.2.4 Mittarien vertailu

Taulukossa 1 on tiivistetty esiteltyjen mittareiden käyttökohteet, hyödyt sekä haitat vertailua varten. On huomionarvoista, että mittareiden hinnat ja tarkkuus vaihtelee mitattavan putken halkaisijan mukaan. Suuremmilla putkikoilla mittaaminen on hankalampaa ja tämä kasvattaa mittausvirhettä.

Taulukko 1. Esiteltyjen mittareiden vertailutaulukko

Mittari	Käyttökohde	Hyödyt	Haitat
Coriolis	Nopeasti, alle kuuden tuuman putkessa virtaavat puhtaat nesteet ja kaasut.	Erittäin tarkka, matalat ylläpitokustannukset.	Korkea hankintahinta, vaikea saatavuus isoille putkille
Magneetti	Sähköä johtava neste tai liete.	Tarkka, kohtuullinen hankintahinta	Ei sovellu kaasuille, eikä mittaa hiilivetyjä. Tarkka mittaus vaatii täytenä virtaavan putken.
Ultraääni	Läpimenoaikamittareilla puhtaat, Dopplermittareilla likaiset nesteet ja kaasut, joiden ominaisuudet tunnetaan.	Tarkka (jos useita mittausreitejä), luotettava, ei painehäviöitä.	Herkkä häiriöille turbulentsissa virtauksissa. Mitattavan nesteen ominaisuudet tulee tuntea, joka rajoittaa käyttökohteita.

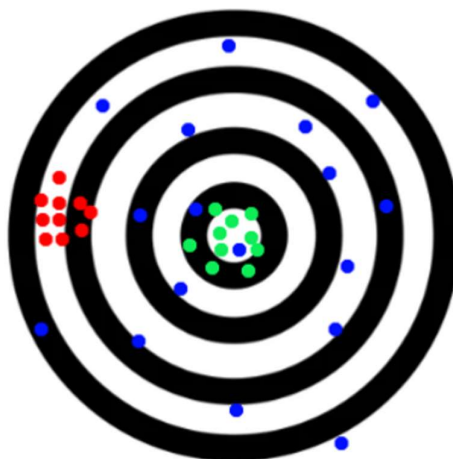
Taulukon mittareista magneetti- sekä ultraäänimittarit ovat laajasti käytössä jätevedenpuhdistusteollisuudessa, kun taas Coriolis-mittarit ovat yleisempiä ruoka-, lääke- ja öljyteollisuudessa (Anklin et al. 2006). Coriolis-mittari saavuttaa mittareista korkeimman tarkkuuden, mutta kaikki mittarit täyttävät tarkkuuden osalta mittareille asetetut standardit.

3.4 Virtaamamittareiden haasteet ja ongelmat

Se, minkälaisia haasteita virtaamamittareihin liittyy, vaihtelee valitun mittarityypin mukaan. Osa mittareista saattaa sijaita putken sisällä, jolloin kalibrointi ja säätö on erittäin hankalaa ja vaatii pahimmassa tapauksessa koko prosessin alasajon toimenpiteiden ajaksi. Suurin osa käytössä olevista mittareista kuitenkin asennetaan putken ulkopuolelle, jolloin kalibrointi ja huolto onnistuu prosessia häiritsemättä. Kyseisiä mittareita ovat muun muassa jo aikaisemmin esiteltyt ultraääni- ja magneettivirtaamamittarit.

3.4.1 Virheiden merkitys

Virtaaman mittaamisessa esiintyy erilaisia virhelähteitä ja nämä voivat vaikuttaa suoraan tai epäsuorasti virtaamadatan luotettavuuteen. Tämä täytyy huomioida jo vesijohtoverkostoja sekä -laitoksia suunniteltaessa. Jäteveden mittaamisen virhelähteet liittyvät pääasiassa automaatiojärjestelmiin ja niiden ominaisuuksiin. Virheellinen asennus tai väärän tyyppisen aineen mittaaminen johtaa mittausepävarmuuden kasvuun. Automaatiojärjestelmissä esiintyvät ongelmat tai virheelliset ohjausparametrit voivat aiheuttaa merkittäviä virheitä mittareiden tuottamaan dataan. (Laaksonen, 2015, s. 41). Virheellinen virtaamadata johtaa vääristyneeseen tulkintaan prosessin tilasta, jolloin päädytään helposti epäoptimaaliseen ajomalliin. Erilaisia virhetyyppejä on havainnollistettu Kuvassa 6



Kuva 6. Esimerkki datasetistä, jossa systemaattista virhettä kuvattu punaisella ja satunnaista sinisellä sekä oikeita pisteitä vihreällä.

Kuvassa 6 vihreällä on kuvattu oikeat datapisteet, jotka ovat lähellä keskustaa. Punaisella olevat datapisteet esittävät systemaattista virhettä. Näissä pisteiden välinen vaihtelu on pientä, mutta ne ovat kaikki kaukana todellisista datapisteistä. Tällöin virheen keskiarvo voi olla suurta, mutta keskihajonta pientä. Satunnaisen virheen pisteet on esitetty sinisellä. Nämä eivät noudata mitään tiettyä kaavaa, vaan ovat kaikki satunnaisella etäisyydellä. Satunnaisesta virhettä omaavassa datasetissä hajonta on aina suurta. Virheen keskiarvo kertoo kuinka kaukana mittauspisteet toisistaan keskimääräisesti. Keskihajonta kertoo, paljonko vaihtelua pisteiden erotuksessa on.

Nykyaikaisen jätevedenpuhdistamon tuottaman datan määrästä huolimatta, siitä saadaan irti vain rajoitetusti hyödyllistä tietoa, usein epäasianmukaisen anturien sijoittelun, asennuksen ja/tai ylläpidon vuoksi. Tämän seurauksena resurssit - sekä aika että pääoma - jotka on käytetty prosessiantureiden asentamiseen ja ylläpitämiseen, sekä ope- rointitietojen keräämiseen ja tallentamiseen tietokantoihin, ovat suurelta osin hukkaan heitettyjä. Tämä johtuu siitä, että kerättyä tietoa on haastava todentaa käyttökelpoiseksi dataksi, jolla optimoida järjestelmää. Datan todentaminen onnistuu esimerkiksi massa- taseiden tai prosessimallinnuksen avulla. (Rieger et al. 2010)

3.4.2 Virtaaman vaikutus

Jäteveden liike putkistoissa noudattaa hydrauliiikan lakeja, ja virtauksen luonteen ym- märtäminen on olennaista. Virtaus jaetaan yleisesti kolmeen päätyyppiin: laminaarinen virtaus, joka liittyy yleensä hitaisiin, viskoosisiin nesteisiin. Turbulenttinen virtaus on no- peampaa ja kaottisempaa virtausta ja se on yleisempää luonnossa. Siirtymävirtaamaa taasen syntyy, kun virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Laminaarista vir- tausta pyritään usein saavuttamaan putkivirtauksessa, mutta tämä on haastavaa. (Laak- sonen, 2015)

Virtaustyyppien ominaisuudet vaikuttavat siihen, miten niitä voidaan parhaiten lähestyä tut- kimuksissa, ja esimerkiksi laminaarista virtausta voidaan lähestyä matemaattisesti, kun taas turbulenttinen virtaus on liian epäsäännöllinen ja monimutkainen matemaattiseen analyysiin (Laaksonen, 2015, s. 42). Jätevedenpuhdistamoille etenkin pumppujen lähei- syydessä, virtaama pitkälti on turbulenttista (Ragessi et al. 2022).

3.4.3 Asennuspaikan vaikutus

Tyypilliset tutkimukset keskittyvät virheellisten tietojen tunnistamiseen jätevedenpuhdis- tamolla asennettujen antureiden joukosta. Kuitenkin vain vähän huomiota kiinnitetään siihen, miten antureita voidaan asentaa siten, että virheiden havaitseminen ja tunnista- minen olisi tehokasta ja tarpeeksi nopeaa reagointia varten. (Li et al. 2022). Asennus- paikka on yksi merkittävimpiä syitä mittauksen epävarmuuteen. Mittarin asennuspaikan vaikutus mittausepävarmuuteen vaihtelee paljon, noin 0 ± 30 %. Mittari tulisi asentaa siten, että ennen mittaria olisi mahdollisimman paljon suoraa putkea. Suorassa putkessa virtaama ehtii muuttua turbulenttisesta laminaariseksi, jolloin sen mittaaminen on huo- mattavasti suoraviivaisempaa ja tarkempaa. (Laaksonen, 2015, s. 42)

Mittarin sijoittelussa muita huomioitava tekijöitä ovat sijoitustilan lämpövaihtelu, tärinä, korroosio ja puhtaus. Jäteveden tapauksessa erityisesti korroosio ja puhtaus ovat merkittäviä tekijöitä. Jos jätevedessä on runsaasti liukenematonta kiinteää ainesta, se voi vaikuttaa virtaamadatan laatuun merkittävästi. Lisäksi putkistojen liitetyt laitteet, kuten pumput, voivat aiheuttaa tärinää, mikä on otettava huomioon mittarin sijoittelussa. Suurin osa mittauksien epävarmuuksista aiheutuu mittareiden ulkopuolelta tulevista vaikutuksista, joten mittaustarkkuus ei aina kasva mittaria vaihtamalla. (Laaksonen, 2015, s. 42)

3.4.4 Ulkoiset häiriötekijät

Ulkoisiksi häiriötekijöiksi lasketaan virtaamamittarin tapauksessa puhdistamon muista fyysisistä kappaleista, kuten virtapiireistä ja johtimista syntyvä magneettikenttä ja automaatiojärjestelmän tiedonsiirtoon liittyvät ongelmat. Mitattavan putken ulkoinen magneettikenttä häiritsee magneettisia virtausmittareita huomattavasti, etenkin jos näitä ei ole maadoitettu oikein tai niiden asennuksessa sensorin ja muuntimen välillä on käytetty liian pitkiä johtoja. Sillä magneettinen virtaamamittari perustuu sähkömagneettiseen kenttään ja Faradayn lakiin, on se altis ulkoisten magneettikenttien aiheuttamalle häiriölle. (Huaheng Instruments, 2019)

Tiedonsiirtoon liittyviä ongelmia ovat muun muassa tiedonsiirron katkokset tai häiriö lähettimen ja vastaanottimen välillä. Tiedonsiirtokatkot ovat yleinen syy virheelliseen virtaamadataan, erityisesti sateisella säällä. On kuitenkin tärkeää muistaa, että tiedonsiirtokatko sinänsä ei vääristä virtaamadataa. Katkon aikana kokonaisvirtaama säilyy ennallaan, mutta tuntikohtaisen datan tarkastelu vaikeutuu. Tiedonsiirtokatkon päätyttyä sen aikana mitatut datapisteet summataan ja lähetetään yhtenä mittauksena, jolloin kompromissina on nollarivejä, jonka lopussa on yksi suuri luku (Laaksonen, 2015). Jos signaalin siirtymisen aikana lähettimeltä vastaanottimelta ilmenee häiriötä, esimerkiksi kaapeleissa tai muissa laitteiden komponenteissa, voi signaali vääristyä ja aiheuttaa täten virhettä mittauksissa (Rieger et al. 2010).

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa esitetään kokeellisen osuuden aineisto ja menetelmät. Aineisto on kerätty puhdistamon automaatiojärjestelmästä ja menetelmiä haettu alan kirjallisuudesta.

4.1 Kohteen kuvaus

Tämän kandidaatintyön kokeellisen osuuden kohteena on kunnallinen jätevedenpuhdistamo. Tietoturvasyistä kohdetta ei nimetä, eikä sen tuottamaa operointidataa jaeta. Kohde, joka otettiin käyttöön vuonna 2016, käsittelee lähikaupungin, osuuskuntien ja kahden elintarviketeollisuuslaitoksen jätevedet, jotka saapuvat puhdistamolle erillisiä siirtoviemäreitä pitkin. Puhdistamon asukasvastineluku on 32 900. Puhdistamo on täysin katettu kaksilinjainen aktiivilietelaitos, jossa on ilmastus ja jälkiselkeytys sekä fosforin poisto ferrikloridilla. Teollisuusjätevedet käsitellään erillisessä ilmastetussa tasaalaltaassa ennen yhdyskuntajätevesien ja teollisuusjätevesien yhdistymistä esiselkeytyksessä. Kuivattu liete kuljetetaan muualle jatkokäsiteltäväksi.

Vaikka laitos on suhteellisen uusi, ovat sen operaattorit nostaneet esille virheellisiä mitaustuloksia. Ferrikloridialtaan syöttöputkesta lähtevää virtaamamittausta epäillä epäluotettavaksi, eikä sitä voida siten hyödyntää laitoksen optimoinnissa. Ferrikloridia käytetään prosessissa fosforin saostukseen. Lisättäessä jäteveeseen rauta- tai alumiinipohjaisia saostuskemikaalia veteen liukenee metallin kahden- tai kolmenarvoisia ioneja (Fe^{2+} , Fe^{3+} tai Al^{3+}). Fosforin saostuminen tapahtuu suorana sitoutumisena ferri- tai alumiinifosfaattiin sekä adsorboitumisena hydroksidisakkaan. Näistä jälkimmäinen mukaan merkittävämpi mekanismi. Raudan pitää kolmenarvoiseksi hapetuttuaan mahdollisimman pian reagoida fosfaatin kanssa. Muodostuva metallifosfaatti on veteen liukene maton ja voidaan poistaa lietteen mukana (Vesilaitosyhdistys, 2020, s. 11). Kemikaalia syötetään altaasta kahteen kohtaan prosessia: esi- ja jälkiselkeytykseen. Kohteessa ferrikloridin syöttöputken virtaamamittausta mitataan Sonotec -yrityksen valmistamalla mittarilla SONOFLOW CO.55. ultraääneen perustuvalla virtaamamittarilla. Sonotecin valmistamia virtaamamittareita käytetään laitoksella muidenkin kemikaalivirtaamien mittaukseseen. Kemikaaliputken ympäri asennettu mittari näkyy Kuvassa 7.



Kuva 7. Sonotec SONOFLOW CO.55. virtaamittari ferrikloridi syöttöputken ympärillä
Ferrikloridin pinnanmittaus on oleellinen kokeellisen työn kannalta, sillä pinnanvaihtelua tullaan käyttämään varmentamaan virtaamittausta referenssiarvona. Tässä mittarina toimii Endress+Hauserin valmistama Prosonic M FMU41 ultraääneen perustuva pintamittari. Laitoksella kemikaalisäiliönä toimii suorakulmion muotoinen allas, joka on katettu metallikannella. Pintamittari asennettuna kemikaalisäiliön kanteen näkyy Kuvassa 8.



Kuva 8. Endress+Hauserin valmistama Prosonic M FMU41 pintamittari, jolla mitataan kemikaalisäiliön pinnan korkeutta.

Altaasta voidaan syöttää ferrikloridia prosessin esi- ja jälkiselkeytykseen, mutta normaalin ajon aikana kemikaalia syötetään vain jälkiselkeytykseen. Syöttö virtaama vaihtelee automaattisesti ja ohjausasetuksena toimii ilmastukseen tuleva virtaama linjakohtaisesti.

4.2 Aineisto ja menetelmät

Kokeellisen osuuden tavoitteena on selvittää, millaisilla keinoilla virtaamamittausta voidaan varmentaa, eli selvittää onko mittaustulokset oikeellisia vai ei. Aineistona toimii vierailu työn kohteena olevalla puhdistamolla, sen operaattoreiden haastattelua sekä tunti-kohtainen data seuraavista prosessimittareista: Ferrosulfaatin virtaama esiselkeytykseen linjoilla 1 ja 2, ferrosulfaatin virtaama jälkiselkeytykseen linjoilla 1 ja 2, vastaavien pumppujen taajuus, ferrikloridialtaan pinnanmittaus ja jäteveden virtaama esiselkeytykseen linjalla 2. Lisäksi aineistoon kuuluu kemikaalipumppujen tuottokäyrä. Laitoksesta saadun datan sekä laskennallisten arvojen perusteella suoritetaan vertailu, jonka tuloksille tehdään tilastollinen tarkastelu. Tässä menetelmien luotettavuutta arvioidaan ver-

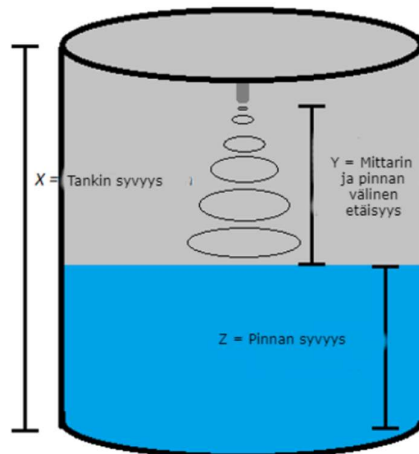
tailtavien mittauspisteiden erotusten virheen keskiarvon sekä keskihajonnan avulla. Näiden lisäksi tuloksista muodostetaan box-plot kuvaaja, joka tarjoaa selkeän visuaalisen esityksen datan jakaumasta, keskikohdasta ja hajonnasta. Kuvassa on "laatikko", jonka yläosa kertoo, missä 75 % datan arvoista sijaitsee, ja alaosa kertoo, missä 25 % sijaitsee. Viiva laatikon sisällä on mediaani eli keskikohta. "Viikset" osoittavat datan hajonnan ja mahdolliset pisteet laatikon ulkopuolella voivat olla poikkeamia, jotka aiheutuvat virheellisestä mittaustuloksesta tai laskennasta.

4.2.1 Kemikaalisäiliön pinnan muutos

On suositeltavaa käyttää massatasapainoja tyypillisten prosessimuuttujien, esimerkiksi tulevan jäteveden datan varmentamiseen. Tämä vaatii kohteesta runsaasti historiadataa tarkan arvion tekemiseen (Rieger et al. 2010). Yksi tässä työssä käytetyistä menetelmistä on ferrikloridialtaan pinnan muutoksesta laskettu tilavuusvirta, joka lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti

$$Q = A * \Delta h \quad (1)$$

jossa, Q on tilavuusvirtaamavirtaama, A on altaan pinta-ala ja Δh on pinnankorkeuden muutos. Tämän tulisi täsmätä kaikkien altaasta lähtevien kemikaalisyöttöjen summaan eli poistuvaan tilavuusvirtaamaan. Pintamittauksesta laskettua virtaamaa käytetään myös muun muassa vesiverkostoissa tiedon keräämiseen täysin ilman virtaamamittareita. Pinnanmittauksen käyttö virtaaman laskemiseen toimii hyvin, sillä pintamittaus on yksi luotettavimmista mittauksista puhdistamolla. Tämä perustuu siihen, että mittauksen tekniikka on yksinkertaisempi ja mitattava neste staattinen (kemikaalisäiliössä). Ultraääneen perustuvalla pinnanmittauksella voidaan saavuttaa jopa 1,5 % tarkkuus (Djalilov et al. 2023). Mittarin toimintaperiaatetta on havainnollistettu Kuvassa 9.



Kuva 9. Ultraääneen perustuvan pinnanmittauksen toimintaperiaate (SMD Fluid Controls, 2016).

Mittari lähettää ultraäänipulsseja nesteen pinnan suuntaan, josta ne heijastuvat takaisin ja vastaanotetaan anturilla. Laite mittaa ajan pulssin lähettämisen ja vastaanoton välillä. Mittauslaite käyttää tätä aikaa ja äänen nopeutta laskemaan etäisyyden anturikalvon ja nesteen pinnan välillä. Tämä etäisyys ja altaan ulottuvuudet tuntemalla voidaan laskea pinnan korkeus.

4.2.2 Pumpun nimellistuotto

Toinen tutkittava menetelmä on pumppukohtaisen taajuuden tarkastelu, josta saadaan laskettua virtaama laitevalmistajalta saadun tuottokäyrän perusteella. Tuottokäyrän perusteella laskettu virtaama on luotettava silloin, kun pumppujen ominaisuudet eivät ole kulumisen takia muuttuneet. On syytä huomioida, että esimerkiksi pumpun nimellistuotto laskee pumpun ikääntyessä. Pumpun kulumisen käytössä on yleinen syy pumpun vaihtoon. (Laaksonen, 2015, s. 35) Laskennassa tehdään oletus, että pumpun tuottama virtaama on suoraan verrannollinen sen taajuuteen. Virtaama on laskettu kaavan (2) mukaan

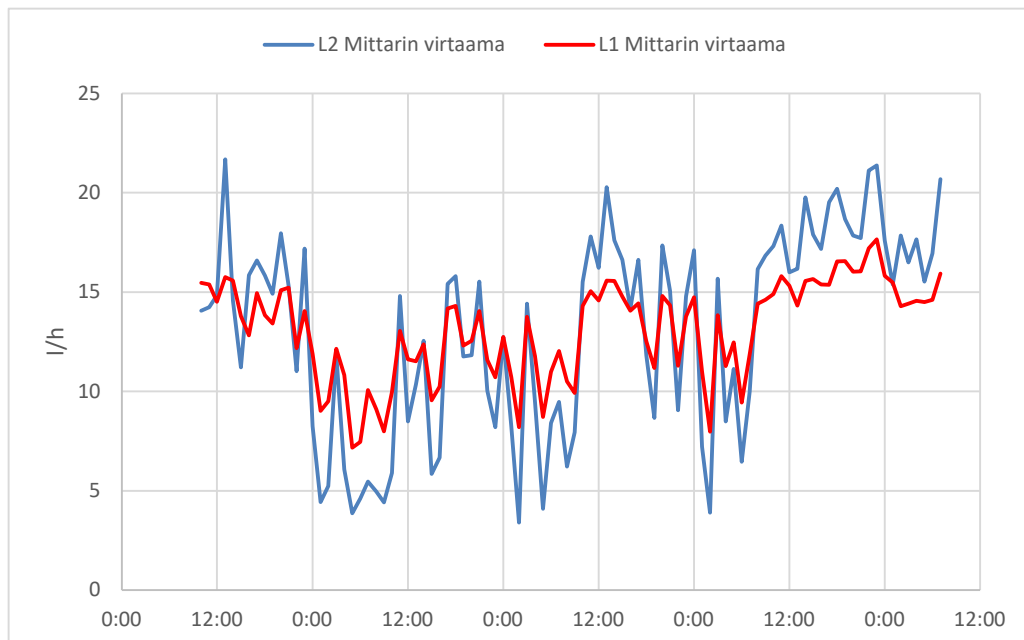
$$Q = \frac{Q_{max}}{f_{max}} * f * s \quad (2)$$

jossa Q on pumpun tuottama virtaama, Q_{max} on pumpun teoreettinen maksimivirtaama, f_{max} on pumpun teoreettinen maksimitaajuus, f on mittauspisteen taajuus ja s on is-

kunsvyvyys. Kohteessa olevan kemikaalipumpun teknisessä esitteessä on ilmoitettu pumpun tiedoiksi 175 l/h, maksimipaine on 10 bar, iskupituus 12 mm, iskunopeus 72 spm ja moottorien pyörimisnopeus 1500 RPM. Laitoksen operaattoreiden mukaan pumppuja ajetaan 20 % iskunsvyvyydellä. Laitos on kuitenkin ollut käytössä vuodesta 2016, joten pumpun kulumisen ja ominaisuuksien muuttuminen on oletettavaa.

4.3 Datan analysointi

Laitoksen operaattorit epäilevät ferrikloridialtaasta jälkiselkeytykseen lähtevän syöttöputken virtaamamittarin olevan viallinen. Tämä perustuu siihen, että mittarin lukemien ei pitäisi vaihdella lyhyellä välillä niin paljon, kuin alla olevasta Kuvasta 10 voi huomata.

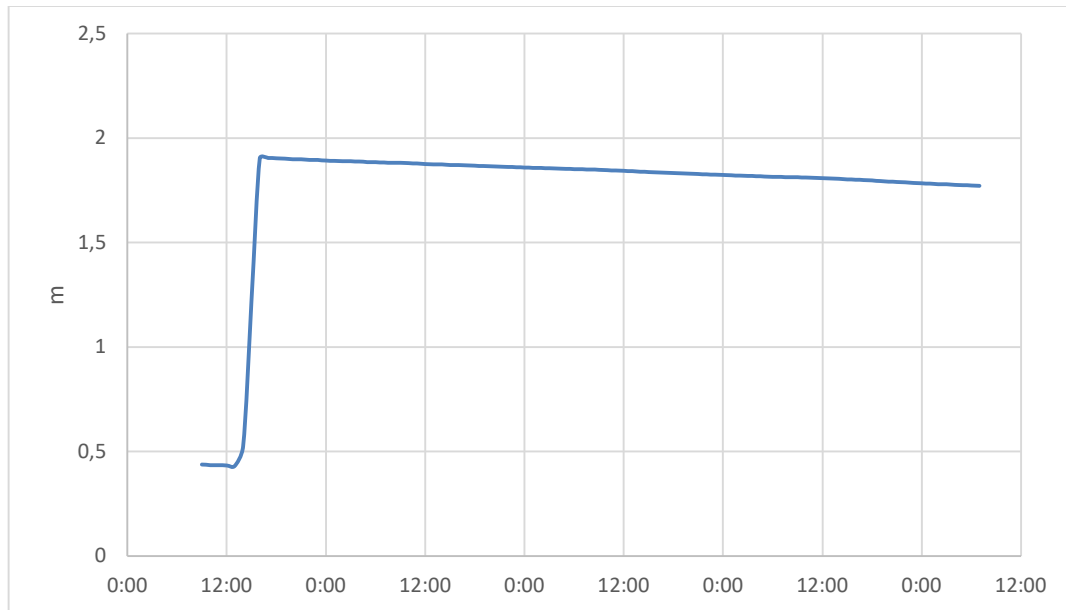


Kuva 10. ferrikloridialtaasta jälkiselkeytykseen lähtevän syöttöputken virtaama n. kahden viikon ajalta.

Ensimmäisenä ajatuksena kokeellista työtä suunnitellessa oli testata, pystyykö ferrikloridialtaan syöttöputken virtaamamittausta todentamaan altaan pinnanmittauksen avulla. Kun tunnetaan altaan halkaisija, voidaan pinnan vaihtelun avulla laskea altaasta poistuneen kemikaalin määrä. Näitä vertailemalla voidaan todeta vastaavatko virtaamamittauksen tulokset pinnanmittauksen tietojen avulla saatuja tietoa virtaamasta.

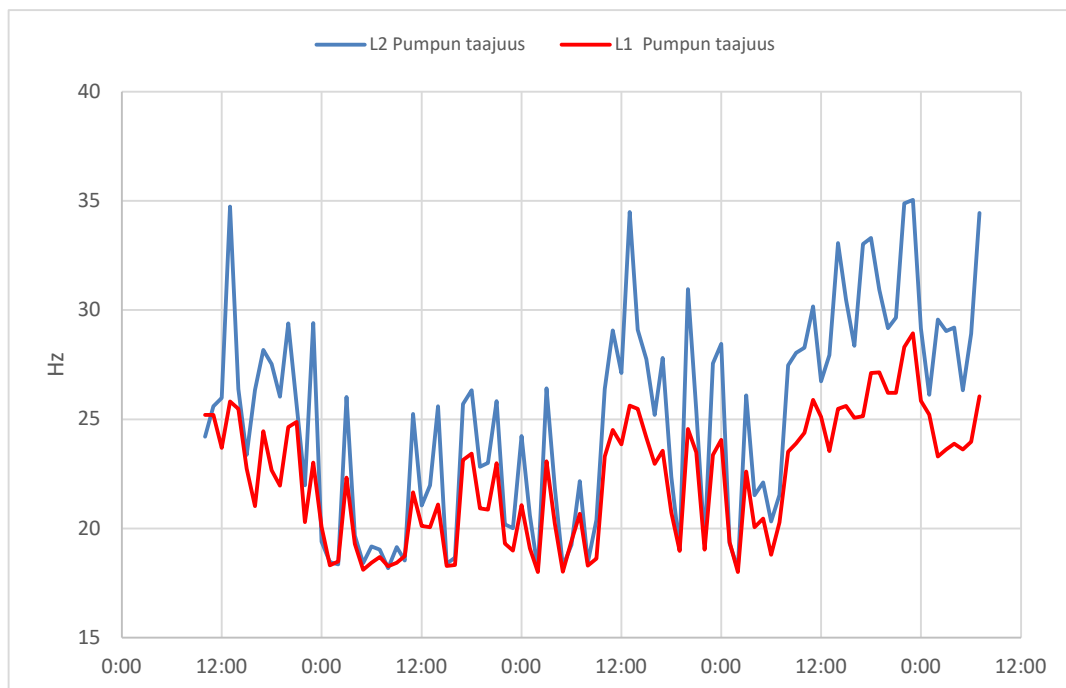
Alla olevassa Kuvasta 11 voi seurata kemikaalisäiliön pinnankorkeutta n. kahden viikon aikana. Kuvaaja on tasainen, siinä ei ole sarjasta eroavia mittapisteitä eikä heittoa. Tämä tukee väitettä siitä, että ultraäänen perustuva pinnanmittaus staattisesta nesteestä on

luotettava ja tarkka mittaus. Sarjan alussa näkyvä pinnan äkillinen nousu johtuu kemikaalisäiliön täydennyksestä.



Kuva 11. Kemikaalisäiliön pinnanmittauksen kuvaaja n. kahden viikon ajalta.

Kuvassa 12 näkyy ferrosulfaattia jälkiselkeytykseen linjoille 1 ja 2 pumppeavien kemikaalipumppujen taajuuskäyrä. Pumpun taajuus kertoo kuinka monta kertaa pumppu suorittaa täyden pumppaussyklin sekunnissa ja on suoraan verrannollinen pumpattuun virtaamaan.



Kuva 12. Jälkiselkeytyksen kemikaalipumppujen taajuuskäyrä n. kahden viikon ajalta

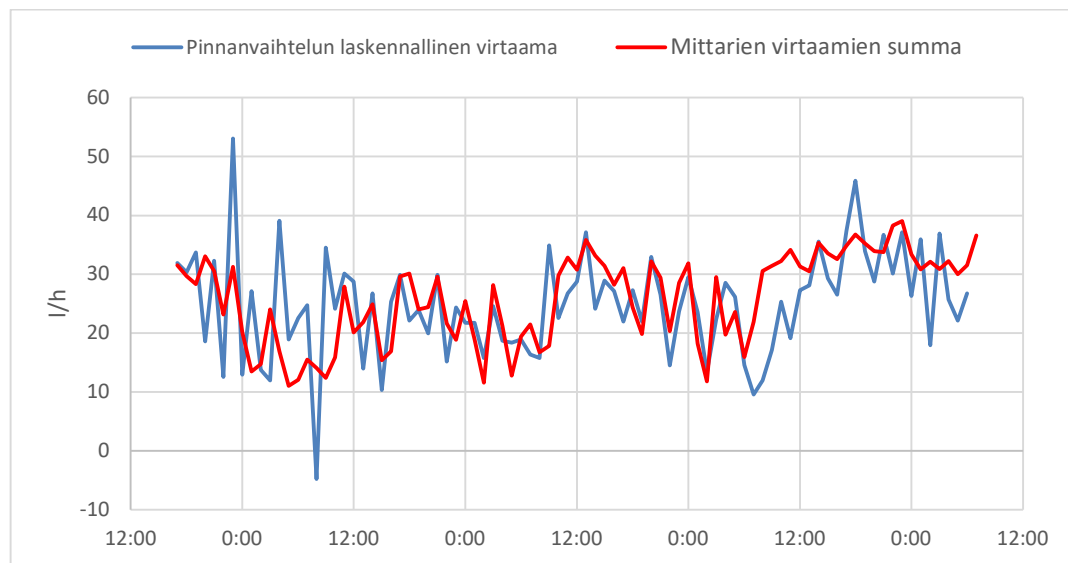
Pumpun taajuuskäyrän data muistuttaa virtaamamittarien tuottamaa dataa: tämä voi viitata siihen, että virtaamamittarit tuottavat oikeaa dataa ja operaattorien epäilyksestä toimimattomista mittauksista osoittautuisi vääräksi. Tämän toteaminen vaatii kuitenkin tarkempaa tarkastelua ja tilastollisiin menetelmiin perustuvaa analyysiä.

5. TULOKSET

Tuloksia varten suoritettiin vertailu esiteltyjen menetelmien välillä. Vertailuajaksi valittiin kolmen päivän tuntikohtainen data.

5.1 Pinnanmuutokseen perustuva menetelmä

Pinnanmuutokseen avulla suoritettu vertailu perustuu tilavuusvirtaamaan. Kemikaalisäiliön pinta laskee nesteen poistuessa säiliöstä ja syöttöputkiin asennettujen virtaamien summan tulisi vastata tätä. Vertailua on havainnollistettu Kuvassa 13.



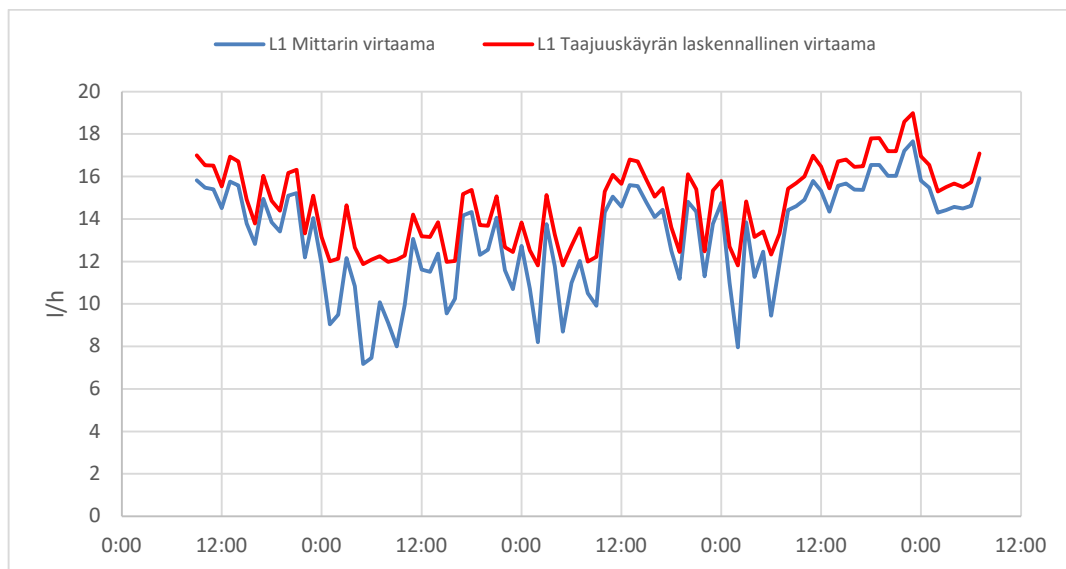
Kuva 13. Pinnanmuutoksen ja virtaamamittarien yhteenlasketun virtaaman tulokset

Kuvajasta voidaan huomata pinnanmittaukseen perustuvan virtaaman seuraavan mittarien yhteenlaskettua virtaamaa osittain, mutta viivoissa on myös paljon eroja. Sillä mittarien antama data perustuu tunnin virtaaman keskiarvoon, voi piirretyissä viivoissa ilmetä paljon eroa etenkin silloin, kun vaihtelu on suurta. Lisäksi hyvin pientä virhettä voi aiheuttaa virtaaman kulkeutumisessa mittauskohtaan kuluva aika, sillä tämä aiheuttaa mittauspisteisiin pientä viipymää. Datasarjassa virhe on suurimmalta osin sattumanvaraista, sillä kahden verrattavan arvon välillä oleva ero ei ole koko aikasarjalla sama, vaan virhe heittelee runsaasti.

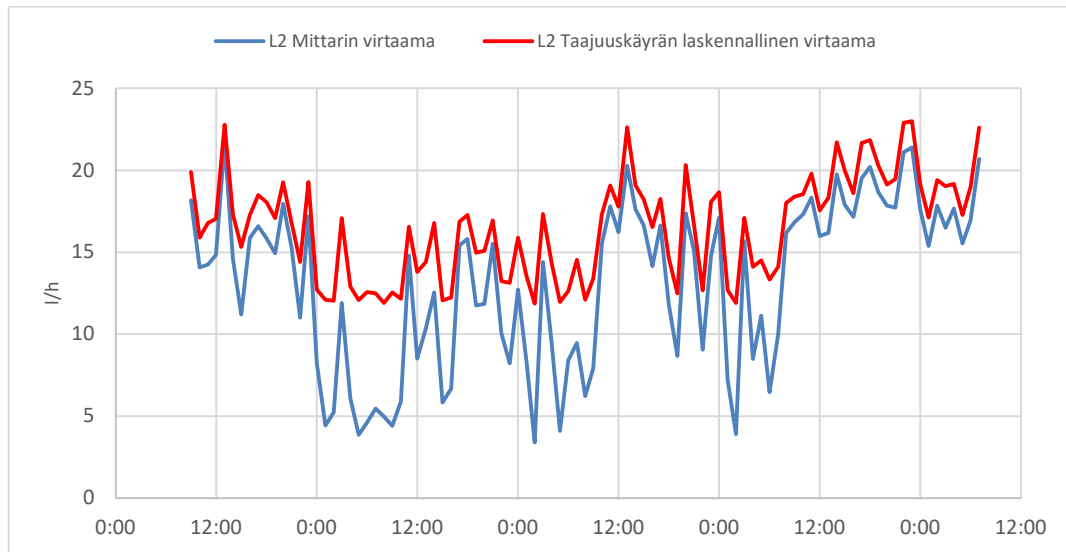
5.2 Taajuuskäyrään perustuva menetelmä

Taajuuskäyrään perustuvassa menetelmässä muodostettiin laskennallinen virtaama, joka perustui pumppauksen taajuuteen, sillä tämä on suoraan verrannollinen virtaamaan. Tätä on vertailtu linjakohtaisesti alla olevissa Kuvissa 14 a) ja b).

a)



b)

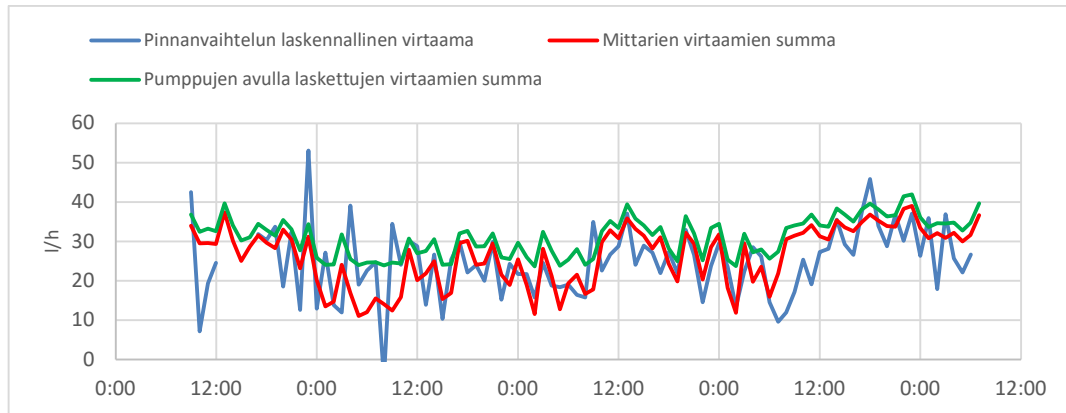


Kuva 14 a) ja b). Pumpun taajuuskäyrän avulla lasketun virtaaman ja mittarin virtaaman tulokset linjoilla 1 ja 2

Tuloksista voidaan huomata, että taajuuskäyrän avulla lasketussa virtaamassa on huomattavasti vähemmän eroa mittaridataan, kun pinnanmuutoksen avulla lasketussa referenssiarvossa. Tuloksessa esiintyy selvästi systemaattista virhettä, sillä laskennallinen arvo on lähes koko ajanjaksolla tietyn vaiheen verran verrattavan arvon yläpuolella. Tämä voi johtua väärin toteutetusta laskennasta. Linjalla 2 mittaukset taajuuden avulla piirretty viiva seuraa yhä tarkasti mittarin dataa, mutta erot linjaan 1 ovat suurempia, mutta edelleen pienempiä kuin toiseen pinnanvaihteluun perustuvassa vertailussa. Myös linjan kaksi pumpun perusteella lasketussa arvossa esiintyy systemaattista virhettä.

5.3 Vertailu ja tilastollinen tarkastelu

Lopuksi tarkastellaan, kuinka vertailumenetelmät suoriutuvat samassa kuvassa, jolloin saamme selvän kuvan menetelmien eroista. Kuvaan 15 on kerätty pinnanmuutoksen avulla laskettu virtaama, taajuuskäyrään perustuvien virtaamien summa, sekä mittarien tuottamien virtaamien summa.



Kuva 15. Pinnanvaihtelun ja pumppujen avulla lasketut virtaamat ja mittarien virtaamat

Molemmat menetelmät seuraavat muutoksia hyvin lyhyellä vasteajalla, jopa lähes välittömästi. Tästä huolimatta ero kahden vertailtavan menetelmän välillä on kuitenkin selvä. Taajuuskäyrään perustuvassa laskennallisessa arvossa virhe on lähes koko aikasarjassa systemaattista molemmilla linjoilla, kun taas pinnanvaihteluun perustuva laskennallinen arvo on pitkälti sattumanvaraista.

Alla olevaan taulukossa 2 on laskettu analyysin kannalta oleellisia parametrejä. Laskennan pohjana toimii kokeellisen työn menetelmien avulla saatuun referenssidatan erotusta mittarien tuottamiin datapisteisiin. Tästä erotuksesta laskettiin keskiarvo, keskihajonta ja pääteltiin virheen tyyppi jokaisen menetelmän kohdalla. Keskiarvo μ kuvaa datapisteiden summan suhdetta datapisteiden määrään. Keskihajonta σ kuvaa keskimääräistä poikkeamaa odotusarvosta tai populaation keskiarvosta.

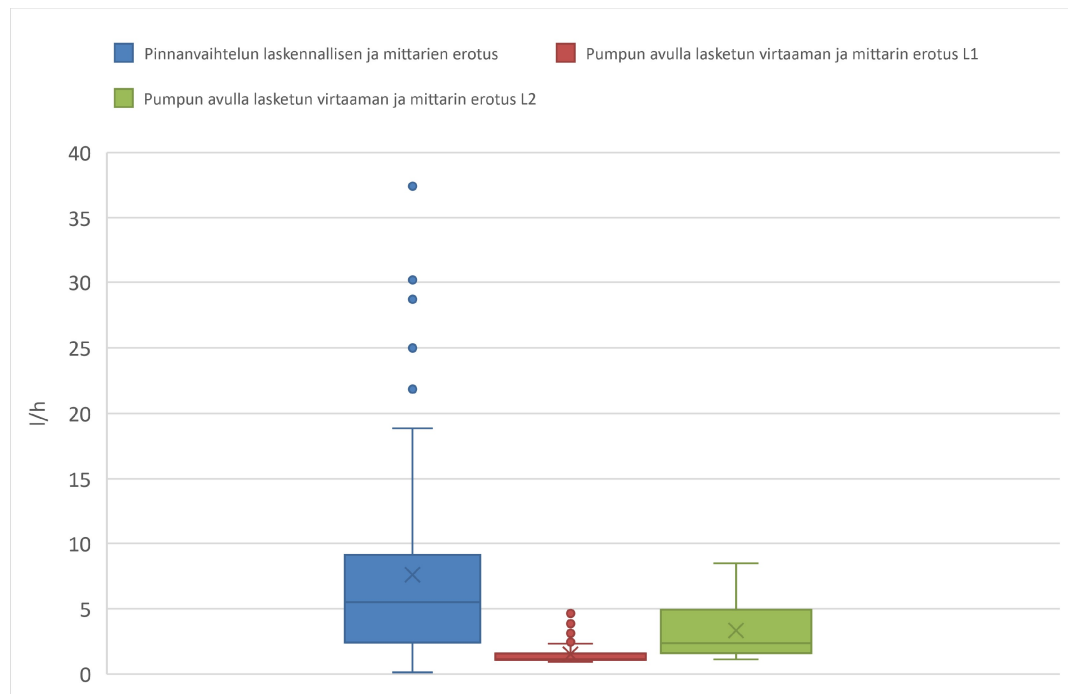
Taulukko 2. Menetelmien datapisteiden erotuksien analyysin keskiarvo- ja hajonta sekä virhe

Menetelmä	Keskiarvo μ	Keskihajonta σ	Virhe
Pinnanvaihtelu	7.593	7.284	Satunnaista
Taajuuskäyrä L1	1.518	0.807	Systemaattista
Taajuuskäyrä L2	3.339	2.123	Systemaattista

Taulukosta 2 voi päätellä eri menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia. Pinnanvaihteluun perustuvassa menetelmässä on huomattavissa suurin virheen keskiarvo ja hajonta, mikä tarkoittaa, että menetelmä ei ole yhtä luotettava, kuin taajuuskäyrään perustuva mene-

telmä. Virhettä kuitenkin myös selittää se, että pinnanvaihtelussa lasketaan tilavuusvirtaamaa, joka jakautuu kahteen eri putkeen, jota mittaa kaksi eri mittaria. Tämä jättää enemmän tilaa virheille.

Taajuuskäyrien kohdalla datapisteiden erotuksien keskiarvo ja keskihajonta on huomattavasti matalampi, kuin pinnanvaihtelussa. Linjalla 1 mittaus on vielä tarkempaa kuin linjalla 2. Tätä voisi selittää esimerkiksi pumppukohtainen ero ja erilainen kuluminen tai mahdolliset huoltotyöt ja kalibroinnit. Matala keskihajonta viittaa systemaattiseen virheeseen. Tilastollista vertailun syventämiseksi Kuvassa 16 esitetty box plot -kuvaajat eri menetelmistä



Kuva 16. Box plot -kuvaajat pinnanvaihtelun ja pumpun avulla lasketuista menetelmistä

Kuvan tulkitseminen tukee aikaisempia väitteitä: Pinnanvaihtelun avulla lasketussa menetelmässä hajonta ja virhe on suurta, kun taas pumpun avulla lasketuissa arvot pysyttelevät lähempänä toisiaan ja virhe on pienempää. Linjalla 1 saaduissa tuloksissa arvot ovat kaikista tarkimpia.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteena oli tehdä kirjallisuuskatsaus jätevedenpuhdistamoilla käytettävistä virtaamamittareista, etsiä syitä niissä aiheutuviin virheisiin, sekä löytää menetelmiä kyseisten virheiden tunnistamiseen. Mittariratkaisuista yleisimmiksi todettiin ultraääni- ja magneettivirtaamamittarit, jotka ovat oikein käytettyinä ja asennettuina luotettavia tiedonlähteitä prosessin tilasta. Yleisesti kohdattaviksi ongelmiksi todettiin datan luotettavuus ja käyttökelpoisuus, sillä puhdistamossa virtaavat nesteet ovat usein hankalasti mittaattavia ja virhelähteet, kuten asennukseen, virtaaman laatuun ja ulkoisiin tekijöihin liittyvä virhe on merkittävä. Johtopäätöksissä voidaan todeta, että vertailu kahden eri virtausmittausmenetelmän välillä antaa referenssiä ja näkökulmaa jäteveden virtauksen tarkkuuteen ja luotettavuuteen.

Tulosten perusteella voidaan tehdä seuraavia päätelmiä: pinnanmuutokseen perustuva virtaaman laskentamenetelmä tarjoaa hyvän vertailupisteen virtaukselle, mutta kuitenkin sen laatu saattaa vaihdella suuresti etenkin suurten vaihteluiden aikana, johtuen tunnin virtaaman keskiarvosta. Tällä menetelmällä virheen keskiarvoksi saatiin noin 7.6 l/h ja keskihajonnaksi 7.3 l/h. Taajuuskäyrään perustuva menetelmä tarjoaa tarkempia tuloksia ja pienempiä eroja mittaridataan verrattuna. Linjalla 1 virheen keskiarvo ja hajonta olivat noin 1.5 l/h ja 0.8 l/h, kun taas linjalla 2 vastaavat luvut olivat n. 3.3 l/h ja 2.1 l/h. Seuraamalla virtauksen muutoksia nopeasti, tämä menetelmä voi olla parempi vaihtoehto erityisesti tilanteissa, joissa virtauksessa on suuria vaihteluita. Molemmat menetelmät ovat reagoineet nopeasti virtauksen muutoksiin ja tarjoavat arvokasta tietoa jäteveden virtauksen seurantaan ja optimointiin.

Yhteenvedona voidaan todeta, että valitun virtausmittausmenetelmän tarkkuus ja soveltuvuus riippuvat suuresti jäteveden erityispiirteistä ja prosessiolosuhteista. Päätöksen tekemiseksi on harkittava huolellisesti, kumpi menetelmä on paras kussakin tilanteessa.

LÄHTEET

- Anklin, M., Drahm, W., & Rieder, A. (2006). Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(6), 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2006.07.004>
- Arola, M. (2012). *Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto*.
- Ba-Alawi, A. H., Loy-Benitez, J., Kim, S., & Yoo, C. (2022). Missing data imputation and sensor self-validation towards a sustainable operation of wastewater treatment plants via deep variational residual autoencoders. *Chemosphere*, 288, 132647. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132647>
- Berberi, J., Martinsson, P.-E., Willatzen, M., & Delsing, J. (2004). Ultrasonic flow metering errors due to pulsating flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(3), 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2003.12.003>
- Bronkhorst CORI-FLOW Meters. (2022, toukokuuta 27). <https://psctexas.com/coriolis-mass-flow-measuring-principle/>
- Djalilov, A., Sobirov, E., Nazarov, O., Urolov, S., & Gayipov, I. (2023). Study on automatic water level detection process using ultrasonic sensor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1142(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012020>
- Ge, L., Chen, J., Tian, G., Zeng, W., Huang, Q., & Hu, Z. (2020). Study on a New Electromagnetic Flow Measurement Technology Based on Differential Correlation Detection. *Sensors*, 20(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/s20092489>
- Henry, M., & Mercado, R. (2005). Advances in Coriolis mass flow metering research and technology. *ATP International*, 3, 26–32.
- Huaheng Instruments. (2019, tammikuuta 17). <http://www.china-transmitters.com/info/the-causes-of-electromagnetic-flowmeter-error-31985744.html>
- Laaksonen, V. (2015). Viemärvirtaaman mittaus ja luotettavuuden arviointi. 26.11.2015, 2015.
- Li, W., Han, J., Li, Y., Zhang, F., Zhou, X., & Yang, C. (2022). Optimal sensor placement method for wastewater treatment plants based on discrete multi-objective state transition algorithm. *Journal of Environmental Management*, 307, 114491. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114491>
- Newhart, K. B., Holloway, R. W., Hering, A. S., & Cath, T. Y. (2019). Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: A review. *Water Research*, 157, 498–513. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.030>
- Olsson, G. (2014). Instrumentation, control and automation in wastewater – from London 1973 to Narbonne 2013. *Water Science & Technology*. https://www.academia.edu/76104435/Instrumentation_control_and_automation_in_wastewater_from_London_1973_to_Narbonne_2013
- Omega. (2005). <https://www.omega.ca/En/>. <https://www.omega.ca/en/resources/dif-between-doppler-transit-time-ultrasonic-flow-meters>
- Ragessi, I. M., García, C. M., Damian, S. M., Tarrab, L., Patalano, A., & Rodriguez, A. (2022). Detailed experimental and numerical analysis of hydrodynamics in the outflow measurement channel of a sewage treatment plant. *Journal of Hydroinformatics*, 24(4), 798–817. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.168>
- Rani, A., & Chang, C.-T. (2021). Chapter 15—Modeling and optimization of wastewater treatment processes. Teoksessa S. Kumar, R. Kumar, & A. Pandey (Toim.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (ss. 373–396). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821009-3.00006-3>
- Rieger, L., Takács, I., Villez, K., Siegrist, H., Lessard, P., Vanrolleghem, P., & Comeau, Y. (2010). Data Reconciliation for Wastewater Treatment Plant Simulation Studies—Planning for High-Quality Data and Typical Sources of Errors. *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation*, 82, 426–433. <https://doi.org/10.2307/25679798>
- Serdarevic, A., & Dzubur, A. (2016). Wastewater process modeling. *Coupled systems mechanics*, 5, 21–39. <https://doi.org/10.12989/csm.2016.5.1.021>
- SMD Fluid Controls. (2016, tammikuuta 15). *SMD Fluid Controls*. <https://www.fluidswitch.com/2016/01/15/how-do-ultrasonic-liquid-level-sensors-work/>

Sousek, N. (2023, kesäkuuta 7). CHOOSING THE BEST TYPE OF FLOW METER FOR YOUR APPLICATION. *Dultmeier Sales Blog*. <https://www.dultmeier.com/blog/industrial/choosing-the-best-type-of-flow-meter-for-your-application/>

Stamatelatou, K., & Tsagarakis, K. P. (Toim.). (2015). *Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency*. IWA Publishing. <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/26423>

Sun, B., Chen, S., Liu, Q., Lu, Y., Zhang, C., & Fang, H. (2021). Review of sewage flow measuring instruments. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2089–2098. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.031>

Vesilaitosyhdistys. (2020, maaliskuuta 11). *Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen*. <https://www.vvy.fi/ohjeet-ja-julkaisut/vesihuoltopooli/kemiallisen-saostuksen-huoltovarmuuden-parantaminen/>

Yoder & Morley. (2015). *The Tao of Measurement: A Philosophical View of Flow and Sensors*. International Society of Automation.

LIITTEET

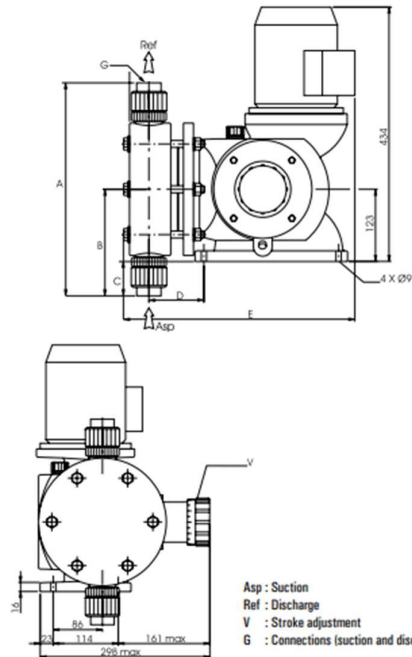
Liite 1. Pumpun teknisen esitteen sivu 2

Performances

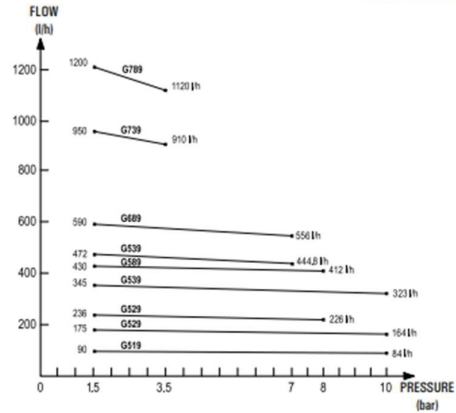
Type	Flow max. (l/h) ⁽¹⁾	Pressure max. (bar)	Stroke length (mm)	Stroke speed (spm) ⁽²⁾	Motor speed (rpm) ⁽²⁾	Motor power (W) ⁽³⁾ - 3 ph
G51	90	10	12	36	1500	0.37
G52	175	10	12	72	1500	0.37
G53	236	8	12	72	1500	0.37
G58	345	10	12	144	1500	0.55
G58	430	8	12	180 ⁽⁴⁾	1500	0.55
G68	472	7	12	144	1500	0.55
G68	590	7	12	180 ⁽⁴⁾	1500	0.55
G73	950	3.5	12	144	1500	0.55
G78	1200	3.5	12	180 ⁽⁴⁾	1500	0.55

- ⁽¹⁾ Maximum flow at 1.5 bar
- ⁽²⁾ Values with motor at 50 Hz (multiply by 1.2 for 60 Hz)
- ⁽³⁾ Power supply at 50 Hz or 60 Hz with three-phase motor
- ⁽⁴⁾ Do not use with 60 Hz motor

Dimensions and connections



Dosing pump GTMB DOSAPRO



Dimensions (mm)				
Type		PP	PVDF	316L S.S.
G51	A	254	262	262
	B	127	131	131
	C	4	8	8
	D	65	65	65
	E	357	356	357
G52	G (tube)	DN15	F1/2" G	F1/2" G
	A	286	296	334
	B	143	148	167
	C	20	25	44
	D	76	76	81
G53	E	372	372	372
	G (tube)	DN25	F1" G	M1" G
	A	362	372	414
	B	181	186	207
	C	58	63	84
G58	D	93	93	98
	E	392	391	392
	G (tube)	DN25	F1" G	F1" G

Weight and packing

	Net weight ⁽¹⁾ (kg)	Gross weight ⁽¹⁾ (kg)	Packing ⁽²⁾ (L x W x H - mm)
Minimum (plastic liquid end)	32	40	515 x 465 x 720
Maximum (S. Steel liquid end)	60	68	790 x 390 x 740

⁽¹⁾ Approximately - ⁽²⁾ Standard cardboard packing