



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

JÄTEVESIVERKOSTON VIRTAAMAN MALLINTAMINEN – OULUN KOEKOHDDE

Roosa Rajala

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö
Huhtikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Jätevesiverkoston virtaaman mallintaminen – Oulun koekohde

Roosa Rajala

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö, 2025, 66 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: TkT Jani Tomperi, TkT, nuorempi apulaisprofessori Pekka Rossi

Jätevesiverkostot sekä sen kaivot ja pumppaamot ovat oleellinen osa vesihuoltoa. Jätevesiverkoston seuranta on kuitenkin hankalaa jäteveden vaihtelevan koostumuksen sekä vuotovesien takia. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, voiko pinnanmittausanturin avulla mallintaa jäteveden virtaamaa. Työn kirjallisuusosiossa perehdyttiin jätevesiverkoston toimintaan, vuotovesiin sekä virtausmittausmenetelmiin. Lisäksi perehdyttiin laskennallisiin menetelmiin kuten erilaisiin mallinnusmenetelmiin.

Työn tutkimuskohteena toimi Oulun alueen neljä jätevesikaivoa, joihin asennettiin pinnanmittausanturit mittaamaan jäteveden pinnan etäisyyttä. Kaivoilla tehtiin virtausmittauksia kannettavalla virtausmittarilla. Mallinnus perustui virtausmittauksiin ja pinnanmittausanturin mittauksiin. Mallin avulla voidaan arvioida jäteveden virtaamaa pelkän pinnanmittausanturin mittauksen avulla. Tutkimuksen tulokseksi saatiin tietoa jäteveden käyttäytymisestä ja kehitettyjen mallien avulla saatiin verkoston virtaamatietaa. Tärkeänä tuloksena saatiin tietoa pinnanmittausanturin toiminnasta jätevesiverkostossa sekä mallintamisessa, minkä perusteella tehtiin huomioita virhelähteistä sekä niiden vaikutuksista mallinnuksen tulokseen. Mallinnuksen tulokseen vaikuttivat myös muut kaivojen virhelähteet. Kaivon 1 ominaisuudet olivat tutkimukseen parhaimmat sekä kaivon 1 mallinnus onnistui parhaiten verrattuna muihin kaivoihin.

Tuloksia voidaan pitää luotettavina, koska samankaltaisia tuloksia on saatu myös muista tutkimuksista. Lisäksi täytyy huomioida, että jätevesiverkoston liittyy aina hallitsemattomia muuttujia. Kaikki tutkimuksessa luodut mallit ovat käyttökelpoisia, jonka perusteella voidaan todeta tutkimuksen onnistuneen.

Asiasanat: jätevesiverkosto, ultraäänimittari, lineaarinen regressio

ABSTRACT

The modeling of wastewater network – Oulu test site

Roosa Rajala

University of Oulu, Degree Program of Environmental Engineering

Master's thesis, 2025, 66 p.

Supervisors at the university: D.Sc. (Tech.) Jani Tomperi, Ph.D. (Tech.), assistant professor Pekka Rossi

Sewer networks, including manholes and pumping stations, are key to water management. Monitoring these networks is difficult due to varying wastewater composition and infiltration water. This study explored if a surface level sensor could model wastewater flow. The literature review covered sewer network operation, infiltration water, and flow measurement methods, as well as computational modeling techniques.

The study focused on four manholes in the Oulu area, where surface level sensors measured the distance to the wastewater surface. Flow measurements were also taken using a portable flow meter. The model was based on these flow and sensor data, allowing estimation of flow using only the surface sensor measurements.

The study results provided insights into the behavior of wastewater, and the developed models enabled the extraction of flow data for the network. A significant outcome was obtaining information on the performance of surface level sensors in the sewer network and their use in modeling. Based on this, observations were made about sources of error and their impacts on the modeling results. The modeling outcomes were also influenced by other sources of error present at the wells. The characteristics of well 1 were found to be the most suitable for the study, and its modeling performed the best compared to the other wells.

The results are reliable, as similar findings have been reported in other studies. It's also important to note that sewer networks always have uncontrolled variables. All models created in the study are usable, showing the research was successful.

Keywords: linear regression, ultrasonic meter, wastewater network

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Oulun Vesi -liikelaitokselle syksyn 2024 ja kevään 2025 aikana. Työn tavoitteena on tutkia, voiko jätevesiverkoston virtaamaa mallintaa pinnanmittausanturin avulla.

Haluan kiittää Oulun Vesi -liikelaitosta sekä sen henkilökuntaa tämän diplomityön mahdollistamisesta. Erityisen kiitoksen haluan osoittaa vesihuoltoasentajille, jotka osallistuivat kokeellisen osuuden toteuttamiseen. Työn ohjaajina ovat toimineet Jani Tomperi ja Pekka Rossi Oulun yliopistosta, ja heitä haluan kiittää asiantuntevasta sekä aktiivisesta ohjaamisesta.

Kiitos avopuolisolleni Ilarille tuesta diplomityön aikana. Kiitos myös parhaalle opiskelukaverilleni, jonka kanssa olemme yhdessä tehnyt ja kokenut paljon opiskelujemme aikana.

Oulussa, 19.3.2025

Roosa Rajala

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	8
2	VIEMÄRIVERKOSTO	9
2.1	Sekaviemäröinti	10
2.2	Erillisviemäröinti	10
2.3	Viemärityytit	11
2.3.1	Paineviemäri	11
2.3.2	Viettoviemäri	11
2.4	Vuotovedet	13
2.5	Jätevesiverkoston virtausmittaukset	15
2.5.1	Tilavuusmittaus pumppuasemilla	15
2.5.2	Kiinteät mittauslaitteet	16
2.5.3	Laskennalliset menetelmät	19
3	TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOHDDE	23
3.1	Tutkimuskohde	23
3.2	Mittaukset	24
3.3	Datan esikäsittely	30
3.4	Lineaarinen mallinnus ja metriikat	31
4	TULOKSET	34
4.1	Kaivo 1	34
4.2	Kaivo 2	38
4.3	Kaivo 3	42
4.4	Kaivo 4	46
5	TULOSTEN TARKASTELU	50
5.1	Pinnanmittausanturit	50
5.2	Virtausmittaukset ja mallinnukset	54

6	JOHTOPÄÄTÖKSET	58
7	YHTEENVETO	60
LÄHDELUETTELO		

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A_1	Pinta-ala [m^2]
A_2	Poikkileikkauksen pinta-ala [m^2]
h	Segmentin korkeus [m]
Q	Virtaama [m^3/s]
X	Pinnankorkeus (mallinnus) [m]
Y	Virtaama (mallinnus) [m^3/s]
a	Regressiokerroin
b	Leikkauspiste
n	Etäisyys kaivon pohjaan [m]
p	Pinnankorkeus [m]
r	Säde [m]
t	Etäisyys jäteveden pintaan [m]
v	Veden keskimääräinen nopeus [m/s]

1 JOHDANTO

Työn aiheena oli jätevesiverkoston virtaaman mallintaminen pinnanmittausanturin avulla. Työ toteutettiin Oulun Vedelle, jonka jätevesiverkosta työ aihe koskee. Työhön valitut tutkimuskaiivot määriteltiin Oulun Veden toimesta heidän tarpeidensa pohjalta. Jätevesiverkoston mittaukset ovat haastavia toteuttaa, mutta tarvetta jätevesiverkoston tarkemmalle seuraamiselle on. Kosketukseton pinnanmittausanturi tarjoaa vaihtoehtoisen tavan seurata jätevesiverkoston toimintaa jatkuvatoimisen mittauksen avulla.

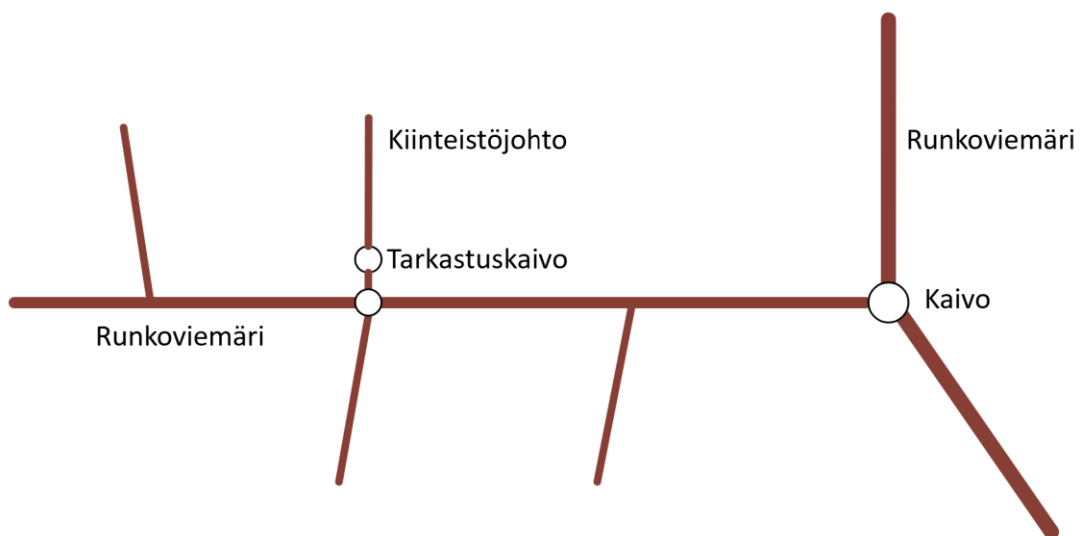
Työn tavoitteena oli tutkia, voiko pinnanmittausantureilta kerättyä mittausdataa hyödyntämällä mallintaa jätevesiverkoston virtaamaa. Tavoitteeseen pääseminen vaati perehtymistä jätevesiverkostoon sekä käytössä oleviin jätevesiverkoston virtausmittauksiin. Virtausmittauksia tehdään myös muille sovelluksille, mutta tässä työssä keskityttiin menetelmiin, joiden toteuttaminen on mahdollista jätevesiympäristössä. Jotta virtaamaa voitiin mallintaa pinnanmittausanturin avulla, täytyi luoda malli. Mallin luominen tapahtui jätevesiverkostossa suoritetta vien virtausmittauksien avulla. Datapohjainen mallinnus perustui mittausdataan hyödyntämiseen, jolloin muita verkostoon liittyviä tietoja ei tarvittu. Virtausmittaukset suoritettiin kannettavalla virtausmittarilla, jolla mitattiin kaivoilta lyhyitä ajanjaksoja useampia kertoja.

Työn kannalta tärkeimmät tutkimuskysymykset olivat, onnistuuko jätevesiverkoston mallintaminen pinnanmittausanturin avulla, onko se luotettavaa, sekä mitä vaatimuksia mallintamisen onnistumisella on. Työhön valittiin neljä jätevesiverkoston kaivoa, joihin työn kokeellinen osuus keskittyi. Työssä pyrittiin tuomaan esille erityisesti Oulun alueen jätevesiverkoston luonteeseen sopivia näkökulmia.

2 VIEMÄRIVERKOSTO

Vesihuoltolaitosten verkostot koostuvat vesijohtoverkostosta, jätevesiverkostosta ja hulevesiverkostosta. Lisäksi verkostoihin kuuluvat niihin liittyvät pumppaamot sekä kaivot. Vesilaitokselta lähtevä puhdas talousvesi kuljetetaan vesijohtoverkostossa kiinteistöille ja muille käyttäjille. Hulevesiverkostossa kulkee hulevesiä kaduilta ja pihoilta, katoilta valuvia sulamis- ja sadevesiä sekä kuivatusvedet kiinteistöiltä. Hulevedet johdetaan yleensä suoraan vesistöön ilman puhdistuskäsittelyä. Jätevesiverkostossa kulkee jätevettä, joka kuljetetaan viemäriputkistoa pitkin jätevedenpuhdistamolle. (Vesilaitosyhdistys 2024)

Jätevesi tulee kiinteistöiltä kiinteistöjohtoa pitkin, mikä liitetään runkoviemäriin (Vihannin Vesi 2024). Runkoviemäri voi kulkea esimerkiksi kadun autotien alla ja kaikki kadun kiinteistöt ovat liitettynä siihen kiinteistöjohtoilla muodostaen kiinteistöhaaroja. Runkoviemäri kuljettaa koko kadun jätevedet seuraavaan haaraan, jossa runkoviemäri voi esimerkiksi liittyä suurempaan runkoviemäriin putkeen. Riippuen rakennustavasta, kiinteistöjohto voidaan liittää joko suoraan runkoviemäriin tai runkoviemäriin kaivoon. Runkoviemäreiden liitoskohtiin rakennetaan usein jätevesikaivo. Kaivot mahdollistavat jätevesiverkostoon pääsyn, mikä mahdollistaa korjaamis- sekä huoltotoimenpiteet. Kuvassa 1 on havainnollistettu jätevesiverkoston rakennetta.



Kuva 1. Havainnekuva jätevesiverkostosta (mukaiillen Trimble 2025).

2.1 Sekaviemäröinti

Sekaviemäröinti tarkoittaa, että hulevedet ja jätevedet kulkevat samassa viemäriverkostossa. Sekaviemäreitä löytyy usein vanhemmista verkosto-osista, mutta sekaviemäreiden määrää pyritään vähentämään esimerkiksi viemärisaneerauksien yhteydessä. Nykyään rakennettavat viemäriverkostot pyritään toteuttamaan erillisviemäröinnillä, mikäli se vain on mahdollista esimerkiksi maankäytön puolesta. Sekaviemäreistä halutaan eroon, koska ne kasvattavat jätevedenpuhdistamoiden ja ympäristön kuormitusta. Hulevedet eivät yksinään tarvitse samanlaista käsittelyä kuin jätevedet, joten hulevedet kulkevat jätevedenpuhdistamon prosessin läpi turhaan. Lisäksi esimerkiksi sateet lisäävät sekaviemärissä kulkevan jäteveden määrää, mikä voi aiheuttaa haasteita jätevedenpuhdistamon kapasiteetille. Suurempi määrä puhdistettavaa jätevettä tarkoittaa suurempaa kapasiteetin- ja energiantarvetta. Hulevedet vaikuttavat jäteveden puhdistamoiden prosesseihin myös viilentämällä ja laimentamalla tavallista jätevettä. (Lehto 2015)

2.2 Erillisviemäröinti

Erillisviemäröinnissä hulevedet ja kuivatusvedet kuljetetaan omassa verkostossa erillään jätevedestä, joka kulkee jätevesiverkostossa. Erillisviemäröinti mahdollistaa kuivatus- ja hulevesien johtamisen sellaisenaan vesistöihin. Tällöin jätevesiverkosto kuljettaa jätevedenpuhdistamolle vain jäteveden, joka täytyy puhdistaa. Tämä helpottaa jätevedenpuhdistamon toimintaa, koska saapuva jätevesi on määrällisesti ja laadullisesti tasaisempaa ja helpommin ennakoitavissa. (Kuntaliitto 2012)

Erillisviemäröinti tuo paljon mahdollisuuksia hulevesien osalta. Se mahdollistaa erilaisten, uusien ja kehittyvien hulevesijärjestelmien hyödyntämisen. Monipuoliset hulevesiratkaisut ovat yksi tulvien hallintakeino. Ilmastonmuutoksen odotetaan lisäävän sademääriä, mikä lisää tulvariskiä. Erillisviemäröinti mahdollistaa hulevesiverkoston toiminnan erillään jätevesiverkostosta. Tämä mahdollistaa tarvittavien muutoksien ja parannustöiden tekemisen hulevesiverkostoon vain sen tarpeiden mukaisesti. Erillisviemäröinnillä suuret sademäärät saadaan poistettua jätevesilinjoista ja jätevedenpuhdistamolta, mikä luo kestävyyttä niiden toimintaan. (Kuntaliitto 2012)

2.3 Viemäryypit

Viemäriverkosto koostuu useista eri osista, joita ovat putkisto, erilaiset kaivot sekä pumppaamot. Verkoston putkisto koostuu useista pienemmistä osuksista, jotka johtavat lopulta jätevedenpuhdistamolle. Osuudet ovat joko viettoviemäriä tai paineviemäriä riippuen maanpinnan korkeudesta ja muita sen ominaisuuksista. Osuuksien määrät viemäriverkoston putkistossa ovat täysin tapauskohtaisia.

2.3.1 Paineviemäri

Paineviemärissä jätevettä kuljetetaan pumpuilla painovoiman sijasta. Jätevesi kuljetetaan viettoviemärillä pumppaamon säiliöön, jossa se jauhetaan ennen sen siirtämistä pumpulla paineviemärin putkeen. Putki kuljettaa jäteveden seuraavaan kohtaan, jossa viemärinti muuttuu takaisin viettoviemäröinniksi. Putki voi esimerkiksi työntää jäteveden mäen ylös, josta se jatkaa kulkuaan painovoiman avulla. Paineviemärin nimen mukainen paine muodostuu, kun pumppu työntää jäteveden massaa eteenpäin putkessa. (Strauffer ja Spuhler 2024)

Paineviemäriä käytetään ratkaisuna, kun viettoviemärin rakentaminen osoittautuu haastavaksi. Paineviemäri voidaan rakentaa pienillä putkilla ja matalilla kaivannoilla, minkä vuoksi kivisille, mäkisille, tasaisille ja tiheästi asutuille alueille, se on käytännöllinen ratkaisu. Paineviemäreiden selkeä eroavaisuus viettoviemäriin on, että pumppaamot tarvitsevat pysyvän energialähteen. Tämä tekee paineviemäröinnistä alttiimman häiriöille erityisesti, jos pumppujen määrä on suuri. (Strauffer ja Spuhler 2024)

2.3.2 Viettoviemäri

Perinteiseksi painovoimaviemäriksikin kutsuttu viettoviemäri on yleensä ensisijainen käytössä oleva viemäryyppi. Viettoviemärissä jätevesi liikkuu putkessa painovoiman avulla. Viettoviemäri asennetaan pieneen alamäkeen, jotta jätevesi pääsee virtaamaan alaspäin. Viettoviemäreitä huolletaan ja tarkastellaan runkokaivoista ja tarkastuskaivoista. Runkokaivot jakavat ja haaroittavat runkoviemärin vietto-osuuksia.

Kiinteistö voi liittyä viettoviemärillä runkoon joko suoraan putkeen tai runkokaivoon. Tarkastuskaivo sijaitsee kiinteistönhaaralla. (Florian ja Spuhler 2024)

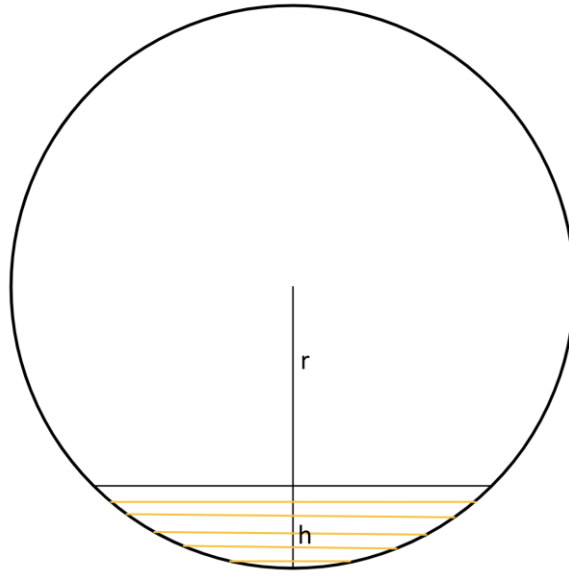
Viettoviemärin kulma valitaan niin, että putkessa pysyisi vähimmäisnopeus 0,6–0,7 m/s. Alamäkikaltevuuden on pysyttävä koko viettoviemärin pituudelta. Tämän vuoksi viettoviemäreiden rakentaminen vaatii syviä kaivauksia, mikä vaikeuttaa niiden rakentamista. Viemärit rakennetaan yleensä 1,5–3 metrin syvyyteen teiden alle, jotta liikenteen kuormituksesta aiheutuvat vahingot saadaan minimoitua. Lisäksi rakentamissyvyys on tärkeä tekijä yhdessä jatkuvan virtauksen kanssa, jotta viettoviemäri ei jäädy kylmässä ilmastossa. (Florian ja Spuhler 2024)

Jätevesiverkostossa kulkevan veden oletetaan olevan kokoonpuristumatonta. Tämä tarkoittaa, että jatkuvuus on voimassa, ellei vesimäärä muutu. Yhtälössä 1 on esitetty virtaaman laskukaava perustuen jatkuvuuden yhtälöön (Karttunen ja Tuhkanen 2003, s. 139–140):

$$Q = A_1 \cdot v, \tag{1}$$

missä Q on virtaama [m^3/s],
 A_1 on poikkileikkauksen pinta-ala [m^2] ja
 v on veden keskimääräinen nopeus, [m/s].

Virtaaman laskemiseen tarvittava poikkileikkauksen pinta-ala saadaan laskettua, kun tiedetään viemäriputken halkaisija sekä jäteveden pinnankorkeus. Muodostunutta aluetta kutsutaan segmentiksi, joka näkyy kuvassa 2 ympyrän alareunassa.



Kuva 2. Segmentti vajaassa putkessa.

Segmentin pinta-ala saadaan laskettua yhtälön 2 mukaan, joka perustuu ympyrän pinta-alan laskukaavoihin. Virtaaman laskemiseen tarvittava veden keskimääräinen nopeus saadaan esimerkiksi virtausmittarilla:

$$A_2 = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{2rh - h^2}, \quad (2)$$

missä A_2 on pinta-ala [m²],
 r on säde [m] ja
 h on segmentin korkeus [m].

2.4 Vuotovedet

Vuotovesillä tarkoitetaan ei toivottuja pinta- ja pohjavesiä, jotka kulkeutuvat jätevesiverkostoon tai poistuvat vesiverkostosta. Vuotovedet pääsevät verkostoon putkissa ja kaivoissa olevien halkeamien, rakojen, huonojen liitosten ja viallisten kohtien kautta. Vuotovesien määrät vaihtelevat laitoksien ja verkosto-osien välillä. Vuotovesimääriä pyritään pienentämään esimerkiksi verkostoon kohdistuvilla saneerauksilla. Vaikka jätevesiviemärointi olisi toteutettu erillisviemärointinä, käytännössä myös erillisviemäroinnissä esiintyy vuotovesiä. Sen vuoksi verkostojen

mitoituksia tehdessä täytyy huomioida myös vuotovedet. (Karttunen ja Heikkinen 2010, s. 47–48)

Jätevesiverkoston vuotovesiin vaikuttavat verkoston ikä ja kunto sekä rakennustekniset asiat, kuten putkien ja putkiliitosten materiaalit, tyypit sekä rakennustavat. Oleellisia tekijöinä jätevesiverkoston vuotovesissä on pohjaveden pinnankorkeus sekä sateet. Pohjavesi voi paikoitellen nousta viemäriin yläpuolelle, jolloin vuotovesien määrä on yleensä tavallista suurempi. Pohjaveden korkeus on suurimmillaan kevätsulamisien aikana huhti- ja toukokuussa. Loppukesästä pohjaveden pinnat ovat tavallisesti syvemmillä, jolloin vuotovesimäärät jätevesiverkostossa ovat pienemmät. Kaikista pienimmillään pohjavesien aiheuttamat vuotovedet ovat pakkasjaksojen aikana. Näiden tekijöiden lisäksi sadevedet vaikuttavat pohjaveden korkeuteen kulkeutuessaan maaperään. Sadevedet vaikuttavat vuotovesiin joko suoraan pintavesivuotoina tai pohjavesivuotojen välityksellä. (Moilanen 2020; Karttunen ja Heikkinen 2010, s. 47–48)

Vuonna 2022 tehdyssä vuotovesitutkimuksessa on kerätty vuotovesimääriä vesilaitosten kokojen mukaan. Laitoskoot on määritelty laskutetun vesimäärän mukaan. Suuret laitokset laskuttivat yli 1 000 000 m³/vuosi, pienet laitokset laskuttivat alle 250 000 m³/vuosi ja keskisuuret laitokset näiden arvojen välistä. Tutkimuksessa vuotovesiprosentilla tarkoitettiin muun kuin vesilaitoksen laskuttaman jäteveden määrää verkostossa. Pienissä vesilaitoksissa vuotoprosentti oli minimissään vajaa 20 prosenttia, maksimissaan 70,7 prosenttia ja keskimäärin 49 prosenttia. Keskisuurissa vesilaitoksissa vuotoprosentti oli minimissään 0,6 prosenttia, maksimissaan noin 63 prosenttia ja keskimäärin noin 34 prosenttia. Suurissa vesilaitoksissa vuotoprosentti oli minimissään noin 15 prosenttia, maksimissaan noin 61 prosenttia ja keskimäärin noin 36 prosenttia. Tutkimukseen ei osallistunut kaikki Suomen vesilaitokset, joten luvut ovat suuntaa antavia Suomen tasolla. Lisäksi tulokseen vaikuttavat vesilaitosten erot esimerkiksi viemärintyyteissä sekä sademäärissä. Sekaviemärinti nostaa vuotovesiprosenttia selkeästi verrattuna erillisviemärintiin. (Suomen Vesilaitos ry 2023)

Kuten vuotovesitutkimuksesta selvisi, vuotovesimäärät ovat merkittäviä. Vuotovesillä on negatiivisia vaikutuksia niin verkostossa kuin jätevedenpuhdistamolla. Vuotovedet aiheuttavat turhaa kuormitusta verkostolle sekä jätevedenpuhdistamolle. Vuotovedet

syövät jätevesiverkoston kapasiteettia ja edistävät korroosiota. Lisääntynyt vesimäärä nostaa pumppaamoiden energiankulutusta sekä voi haastaa pumppaamoiden kapasiteettia. Yleisesti ottaen verkosto vaatii enemmän huoltoa ja saneerausta, mitä enemmän vettä siellä kulkee. Jätevedenpuhdistamolla erityisesti vuotovesien lisäämä laadullinen vaihtelu vaikeuttaa puhdistusprosesseja. Puhdistusprosessien toiminta vaikeutuu, kun saapuvan jäteveden vesipitoisuus, määrä ja lämpötila vaihtelevat. Vuotovesien puhdistaminen lisää myös jätevedenpuhdistamon komponenttien ja energian tarvetta. Lisäksi taloudellista haittaa aiheutuu lisääntyneen energiankulutuksen ja materiaalien käytön vuoksi. Pitkällä aikavälillä myös lisääntynyt saneeraus- ja huoltotarve aiheuttavat omat kustannuksensa. (Moilanen 2020; Suomen Vesilaitos ry 2023)

2.5 Jätevesiverkoston virtausmittaukset

Jätevesiverkoston mittaukset ovat haastavia toteuttaa. Tämä johtuu jäteveden vaihtelevasta ja haastavasta koostumuksesta. Likaantuminen ja tukkeutuminen ovat merkittäviä rajoittavia tekijöitä, kun mietitään erilaisia mittausvaihtoehtoja. Jätevesiverkoston yksittäisiä ja lyhyitä mittauksia pystytään toteuttamaan, mutta jatkuvatoimisissa mittauksissa on usein rajoitteita.

Jätevesiverkoston mittaukset ovat yleensä joko laadullisia tai määrällisiä. Laadullisilla mittauksilla tarkoitetaan jonkun kemiallisen arvon mittaamista ja määrällisillä jonkun fysikaalisen arvon mittaamista. Tässä työssä on keskitytty fysikaalisiin arvoihin, erityisesti virtaukseen liittyviin muuttujiin.

2.5.1 Tilavuusmittaus pumppuasemilla

Pumppuasemalla tarkoitetaan asemaa, jonka yhtenä osana itse jäteveden pumppaamo toimii. Erilaisia pumppuasemia ja pumppaamoita on paljon erilaisia, koska ne suunnitellaan tarpeiden pohjalta. Osa pumppuasemista sisältää pelkästään jäteveden pumppaamon eikä mitään sen laajempia ominaisuuksia. Osa pumppuasemista voi olla suuria, koska samaan rakennelmaan on yhdistetty useita toimintoja. Pumppuasemalla voi olla pätkä jätevesiverkoston putkea, johon on voitu esimerkiksi asentaa haluttuja

mittareita. Tällöin verkoston mittarin huoltaminen ja asentaminen onnistuu vaivatta, eikä sitä varten tarvitse rakentaa omia tiloja. Verkoston käyttöön suunniteltuja mittareita voidaan siis käyttää myös osana pumppuasemaa. Pelkästään erilisille mittareille tarkoitettua verkostoon tehtyä rakennelmaa kutsutaan mittauskaivoksi.

Jätevesiverkoston pumppaamoissa virtauksen mittaamiseen ei tarvita erillistä virtausmittaria. Virtaus voidaan laskea tilavuusmenetelmällä, koska pumppaamon säiliön pinta-ala on tiedossa. Tilavuusmenetelmässä mitataan pumppaamon säiliön pinnan muutoksia ajan suhteen (Scribd 2024). Menetelmällä voidaan laskea saapuvan tai pumpatun jäteveden määrä. Pumppaamon pumput käynnistyvät, kun pinnankorkeus saavuttaa pumppujen käynnistystason (Pumppaamot.fi 2024). Tämä tarkoittaa, että pumppaamoissa on pinnanmittaus esimerkiksi uimurikytkimellä tai ultraäänipinnanmittauksella. Seuraamalla pinnankorkeuden muutoksia, voidaan esimerkiksi laskea, paljonko jätevettä on virrannut pumppaamoon yhden tunnin aikana.

2.5.2 Kiinteät mittauslaitteet

Kiinteillä mittauslaitteilla tarkoitetaan laitteita, jotka asennetaan kaivoon pitkän ajan mittaista varten. Mittauslaite asennetaan kaivoon tukevasti ilman, että olisi tarvetta käydä siirtämässä tai poistamassa laitetta lähitulevaisuudessa.

Ultraäänimittaria käytetään pinnankorkeuden mittaamiseen. Ultraäänimittari sijoitetaan mitattavan aineen päälle, jolloin mikään osa mittarista ei osu aineeseen. Täten mittaria voidaan käyttää esimerkiksi jätevesiverkostossa. Ultraäänimittaria käytetään mittaamaan etäisyys veden pintaan, josta voidaan laskea vedenpinnan korkeus pohjasta. Mittari lähettää ultraäänisignaalin veden pintaan, josta se heijastuu takaisin mittarille. Mittari laskee signaalin käyttämän ajan ja käytetyn ultraäänisignaalin nopeus tiedetään. Näiden muuttujien perusteella voidaan laskea etäisyys veden pintaan. Kun mittauskohdasta on tiedossa etäisyys pohjaan asti, voidaan pohjan etäisyydestä vähentää etäisyys pintaan, jolloin saadaan vedenpinnan korkeus. (Karttunen ja Tuhkanen 2003, s. 169)

Ultraääniteknoologiaa käytetään jätevesiverkoston virtausmittauksissa sekä pinnanmittauksissa. Sen asentaminen onnistuu käyttötarkoituksen mukaan joko ilman

kontaktia tai minimaalisella kontaktilla jäteveeten. Teknologiasta on tehty erilaisia variaatioita, jotta pystytään saamaan mahdollisimman todellinen mittaustulos. Variaatioissa otetaan huomioon muun muassa rakenteiden erilaiset muodot, täyttöasteen muutokset sekä jäteveden vaihteleva koostumus. (Labkotec 2024b)

Virtausmittareissa ultraäänitekniikat perustuvat doppler-ilmiöön. Virtausmittareiden toiminta perustuu ääniaaltoihin, jotka heijastuvat virtauksessa kulkevista kiinteistä epäpuhtauksista. Lähetetyn ja heijastuneen signaalin välille muodostuu doppler-ilmiön mukainen taajuusero. Taajuusero on verrannollinen virtausnopeuteen. Doppler-mittareita käytetään yleensä homogeeniseen ja muuttumattomaan virtaamaan, koska mittarilla ei pystytä huomioimaan virtausprofiilien muutoksia. Vaikka virtaus ei itsessään olisi muuttunut, virtausprofiilin muutosta aiheuttaa myös sedimentin kertyminen putkeen. Mittari kalibroidaan yhdelle virtausprofiilille. Virtausprofiilin muuttuessa virtausmittari täytyy kalibroida uudelleen. (Labkotec 2024a; Nivus 2010)

Nivus on kehittänyt muuttuvaan virtausprofiiliin sopivan ultraäänivirtausmittarin, joka toimii ristikorrelaatiomenetelmällä. Ristikorrelaatiomittauksessa ultraäänipulssi lähetetään virtaavaan nesteeseen, josta se heijastuu takaisin nesteen hiukkasista ja kaasukuplista. Virtausmittari mittaa virtausnopeutta 16 eri korkeudesta, joten se tunnistaa erilaiset virtausprofiilit ja pystyy mallintamaan todellisen virtauksen sekä reagoimaan virtausprofiilin muutoksiin. Virtausmittari mittaa heijastuskaikuja 2000 kertaa sekunnissa. Tulokseksi saadaan kolmiulotteinen virtausprofiili. Ristikorrelaatiomenetelmä soveltuu kiintoaineita sisältäville nesteille, kuten jätevedelle. Nivuksen ristikorrelaatio virtausmittari käyttää virtaaman laskemiseen mitattua virtausnopeutta ja pinta-alaa. Mittari laskee pinta-alan pinnankorkeuden perusteella. Mittausolosuhteista ja käytetystä laitetypistä riippuen tarvittava pinnanmittaus voidaan suorittaa muutamilla variaatioilla. Virtausmittari tunnistaa veden ja ilman rajapinnan, jolloin voidaan mitata pinnankorkeus esimerkiksi vajaan putken tilanteessa. Pinnankorkeus voidaan mitata myös hydrostaattisella mittauksella tai paineanturilla, jos virtaava aine absorboi vahvasti ultraääntä. Kiinteää virtausmittaria käyttäessä pinnanmittaus voidaan suorittaa myös ylhäältä päin. Tällöin mittaustuloksessa voi näkyä virheitä, mikäli nesteen pinnalla on kelluvia aineita tai vaahtoa. (Nivus 2010; Labkotec 2024a; Labkotec 2024b)

Ristikorrelaatioon perustuvia virtausmittareita käytetään erilaisissa kohteissa. Jätevedenpuhdistamolla kiinteä virtausmittari voidaan yhdistää puhdistamon automaatioon (Labkotec 2024c). Lisäksi jätevedenpuhdistamon virtausmittauksen avulla voidaan seurata vuotovesiä, jolloin mitataan puhdistamolle saapuvaa jätevettä. Vuotovesien seuranta tapahtuu vähentämällä puhdistamon läpi kulkeneen jäteveden määrän lasketun jäteveden määrästä. Virtausmittaria käytetään myös täyden putken virtaukselle. Jätevesiverkostossa täyden putken mittausta voidaan hyödyntää esimerkiksi siirtoputkessa. (Labkotec 2019; Labkotec 2009)

Ultraäänellä toimivaa pinnanmittausta voidaan käyttää esimerkiksi mittapadoissa. Mittapadossa mitattava neste virtaa levyn yli. Levyn mittapato on yleensä suorakulmion tai kolmion muotoinen. Mittapadon kohdalta mitataan pinnankorkeus, jonka perusteella lasketaan virtaama. Matemaattinen kaava perustuu siihen, että tietyllä pinnankorkeudella virtaa aina sama määrä vettä. Mittapatoa käytetään yleensä kohteisiin, jossa pinnankorkeuden vaihtelu on pientä. (Labkotec 2024a)

Ultraääniteknologiaan perustuvia virtausmittauksia on käytetty myös selvityksissä ja tutkimuksissa. Kajaanin Vedellä toteutettiin keväällä 2008 Labkotecin toteuttama jätevesiverkoston virtaus selvitys. Heillä oli ollut ongelmana jätevesiverkoston kapasiteetin riittämättömyys. Selvityksen tavoitteena oli löytää verkoston riittämättömyyden syy, koska ongelmat olivat pahimmillaan lumen sulassa sekä rankkasateiden aikana. Virtaus selvityksessä asennettiin viisi kannettavaa virtausmittaria runkoviemäreiden kattoon. Kajaanin Vedellä on normaalisti verkostoissa kiinteästi asennettuja ultraäänimittauslaitteita ja magneettis-induktiivisia mittauslaitteita. (Labkotec 2024d)

Espanjan Barcelonassa toteutetussa jätevesitutkimuksessa seurattiin jätevesiä reaaliaikaisesti kolmelta erilaiselta asuinalueelta, jotka jaoteltiin tulotasojen perusteella korkea-, keski- ja matalatuloisiin naapurustoihin. Tutkimuksen tavoitteena oli ymmärtää eroavaisuuksia alueiden jätevesiprofiileissa esimerkiksi kellonaikojen suhteen. Tutkimus sisälsi niin laadullisia kuin määrällisiä muuttujia, joista yksi oli virtaus. Mittaukset suoritettiin kolmessa seurantapaikassa. Tutkimusasemat asennettiin katutasolle viemäriin viereen ja jätevettä nostettiin jätevesilinjasta pumpulla tutkimuslaitteistoon. Jokaisella

mittausasemalla oli oma virtausmittari. Ensimmäisellä asemalla virtausmittari oli ultraääniyhdistelmäanturi, toisen asemalla yhdistettiin kontaktiton tutkapohjainen nopeusanturi sekä kosketukseton ultraäänianturi pinnanmittaamiseen ja kolmannella asemalla käytettiin kontaktittomia nopeus- ja tasoantureita. Virtausmittareiden toiminta tarkistettiin säännöllisesti huoltotoimenpiteiden aikana tehdyillä manuaalisilla mittauksilla. Esimerkiksi pinnanmittauksessa hyväksyty poikkeama oli alle 25 % virtausmittarin ja käsimittauksen erossa. Tuloksissa löydettiin eroavaisuuksia useissa tutkitussa muuttujissa. Yksi niistä oli virtausdynamiikka, josta löydettiin eroa arkipäivien, viikonloppujen, lomien ja eri vuodenaikojen välillä. (Corominas ym. 2024)

2.5.3 Laskennalliset menetelmät

Digitalisaatio on yksi tämän päivän ilmiöistä, joka vaikuttaa myös vesilaitoksien toimintaympäristöön. Vesilaitoksilla digitalisaatioita hidastavia tekijöitä ovat resurssien, osaamisen sekä tavoitteiden puute. Yleisesti digitaalisia ratkaisuita pidetään hyödyllisinä ratkaisuinä vesihuollossa, mutta kehittämiskohtana nähdään digitaalisten ohjelmien resurssitehokkuus. Esimerkiksi tekoälyn ja lisätyn todellisuuden nähdään hyödyntävä n tulevaisuudessa jätevesiverkoston hallintaa. Digitaalisia ratkaisuja on jo käytössä jäteveden yhteydessä. Jätevedenpumppaamoilla on käytössä datankorjaustyökalu, jota käytetään virtaaman mittauksessa. Se poistaa virheellisiä arvoja ja korvaa ne estimoiduilla arvoilla. Estimoidut arvot lasketaan pumppujen käyntiajasta, sähkönkulutuksesta ja muiden pumppujen virtaamista. Saatavaa dataa voidaan hyödyntää esimerkiksi visuaalisiin tarkasteluihin sekä automatisointiin poikkeamien havainnoinnissa. Lisäksi sadantatietoja voidaan hyödyntää jätevesiverkoston vuotojen hallintaan. Sadantatietoja seurataan jätevesipumppaamokohtaisesti, jolloin järjestelmä analysoi sadetietoja sekä pumppaamotietoja. Tietojen perusteella voidaan arvioida sateesta johtuvan vuotoveden määrää jätevesiverkostossa. Lisäksi saatujen arvojen perusteella voidaan esimerkiksi mallintaa pumppaamovirtaamia. Käytössä on myös muita digitaalisia ratkaisuja kuten erilaiset data-alustat. Alustoiden ideana on tuoda erillisiä järjestelmiä samalle alustalle, jotta järjestelmät pystyisivät kommunikoimaan keskenään. (Hietala 2022; Hietala ym. 2021)

Älykkyys ja älyllistäminen nähdään yhtenä ratkaisuna tulevaisuuden ongelmiin kuten kaupungistumiseen. Älykkäät ratkaisut ovat kuitenkin varsin tuoretta kaupunki-

infrastruktuurissa, joten toteutukset kärsivät vielä kenttäpalautteen puutteesta. Pohjois-Ranskassa Lillen yliopistossa on toteutettu älykkään kaupungin demonstraatio kampusalueen viemärijärjestelmään, joka on toteutettu erillisviemärintinä. Järjestelmä on rakennettu alustalle, johon on koottu hyödyllisiä tietoja, kuten kampusalueen ominaisuuksia, käyttäjätietoja ja sää tietoja. Älykäs seuranta toteutettiin asentamalla viemäriverkostoon vedenkorkeus- ja nopeusanturit sekä sameusanturi. Sameusanturin toiminta todettiin nopeasti vaikeaksi, koska anturit likaantuivat liian nopeasti. Sameusanturista saadut tiedot jätettiin käsittelemättä kokonaan ja todettiin, että sameusantureiden käyttö viemäriverkostossa vaatii vielä kehittämistä. (Abbas ym. 2017)

Projektin mittaustuloksien perusteella tehtiin mallinnus. Numeerisessa mallinnuksessa oletettiin, että kampusalueen rakennusten mitattu juomavedenkulutus olisi yhtä suuri kuin poistettu jätevesi. Saatujen tuloksien perusteella havaittiin hyvä korrelaatio vedenkulutuksen ja jäteveden muodostumisen välillä. Mallissa syntyneen jäteveden määrä oli keskimäärin vähän suurempi kuin käytetty juomavesi. Eroa perusteltiin mittaustiheyden eroavaisuutena, koska jäteveden määrää mitattiin joka minuutti ja juomaveden kulutusta joka tunti. Sadetapahtuman aikaiselle virtaamalle luotiin oma malli. Sadetapahtuman mallinnuksessa huomioitiin jätevesiverkoston ja hulevesiverkoston välinen yhteys, mistä laskettiin sadekerroin, jonka perusteella malli huomioi sadejaksot. Sadetapahtumassa ensimmäistä yhdeksää minuuttia ei otettu huomioon, koska se laskettiin sateen imeytymisajaksi maaperään. Kun myrsky tapahtuman aikainen kuormitus esitettiin verkostossa, todettiin verkoston olevan ylikuormittunut. Verkoston ylikuormittuminen johtui sateen aiheuttamista vuotovesistä. Näiden lopputuloksien perusteella voitiin sanoa, että älykäs jätevesijärjestelmä mahdollistaa vuotovesien havaitsemisen tässä järjestelmässä. (Abbas ym. 2017)

Jätevesiverkoston laajalla hydraulisella mallintamisella ja tuntemisella voidaan parantaa jätevesijärjestelmän suorituskykyä, nopeuttaa reagointikykyä sekä lisätä ennakoitavuutta. Hydrauliseen malliin voidaan lisäksi integroida tunnettuja ihmisen ja luonnon vuorovaikutustekijöitä. Suorituskyvyn optimoinnilla voidaan parantaa jätevesiverkoston toimintaa ja samalla nostaa sen käyttöikä. Reagointikyvyn nopeutuminen nostaa kykyä vastata ongelmiin ja poikkeustilanteisiin. Mallintamisen ansiosta tunnistetaan syntyvät riskit ja mahdollisuudet sekä pystytään tekemään tarvittavia toimenpiteitä heti, eikä

tarvitse odottaa ongelman laajenemista sen suuremmaksi. Ennustemallilla voidaan mallintaa jotakin muuttuvaa tilannetta sekä seurata sen vaikutuksia verkostossa. Ennustemallien avulla voidaan parantaa reagointikykyä, mutta myös ennakoida tulevia haasteita. Esimerkiksi poikkeuksellisen suuren sademäärän ennakoiminen mahdollistaa toimenpiteiden tekemisen etukäteen, jolloin voidaan säästyä ongelmilta ennakkotoimenpiteiden ansiosta. (Boulos ja Walker 2015)

Aikaisemmin vesijärjestelmien hallinnassa on huomioitu komponentit hajallisesti toisista riippumattomina. Nykyään ymmärretään ottaa huomioon komponenttien rajallisuus, epälineaarisuus sekä aikaviiveet. Nykyaikaista hallintatapaa kutsutaan integroiduksi lähestymistavaksi, jossa pyritään ottamaan huomioon kaikki komponentit, erilaiset vaikutustavat sekä yhteydet muihin ympäristön kiertokulkuihin. Integroitujen mallien epävarmuutena nähdään mallin tarkkuus. Integroitu lähestymistapa on sen verran uusi menetelmä, että kaikkia epävarmuustekijöitä pystytään vielä ymmärtämään ja luonnehtimaan. Tunnistettu epävarmuuden aiheuttaja on yliparametrisointi, jolloin mallissa käytetään liikaa epävarmoja muuttujia. Tällä tarkoitetaan sitä, että kaikkia muuttujia ei pystytään kalibroimaan tai validoimaan riittävän tarkalla tasolla, jolloin malliin syntyy epävarmuutta. Epävarmuutta voidaan pienentää vähentämällä muuttujia ja mallin yksinkertaistamisella, mutta se ei aina ole mahdollista. Lisäksi mallin yksinkertaistaminen voi lieventää tätä ongelmaa, mutta samalla luoda uuden ongelman, jolloin mallinnus ei täysin vastaa haluttuja tavoitteita. (Bach ym. 2014)

Vesihuollossa käytetään matemaattisiin malleihin perustuvia virtuaaliantureita. Menetelmässä muodostetaan matemaattinen malli anturin mittaaman muuttujan ja mallinnettavan muuttujan välille. Antureita käytetään mittaamaan esimerkiksi lämpötilaa, virtausnopeutta, sameutta sekä pitoisuuksia. (Moretti ym. 2024)

Mallinnusmenetelmistä koneoppimistekniikat kuten keinotekoiset neuroverkot ovat vakiintuneet. Keinotekoisia neuroverkkoja käytetään muun muassa jätevesiverkoston suorituskyvyn ennustamiseen. Koneoppimistekniikat hyödyntävät ja mallintavat eri muuttujia. Koneoppimisen lisäksi mallintamisessa käytetään aikasarjaennusteita. Näitä ovat esimerkiksi lineaariset mallit, tila-avaruusmallit sekä polynomimallit, joilla on suhteellisen yksinkertainen matemaattinen rakenne. Esimerkiksi polynomimalli voi

hyödyntää liukuvan keskiarvon malleja kuvaamaan aikasarjoja ja ennustamaan jätevesien virtauksia. Mallinnusmenetelmän valitsemiseen vaikuttaa mallinnettava kohde sekä saatavissa oleva data. (Giberti ym. 2024)

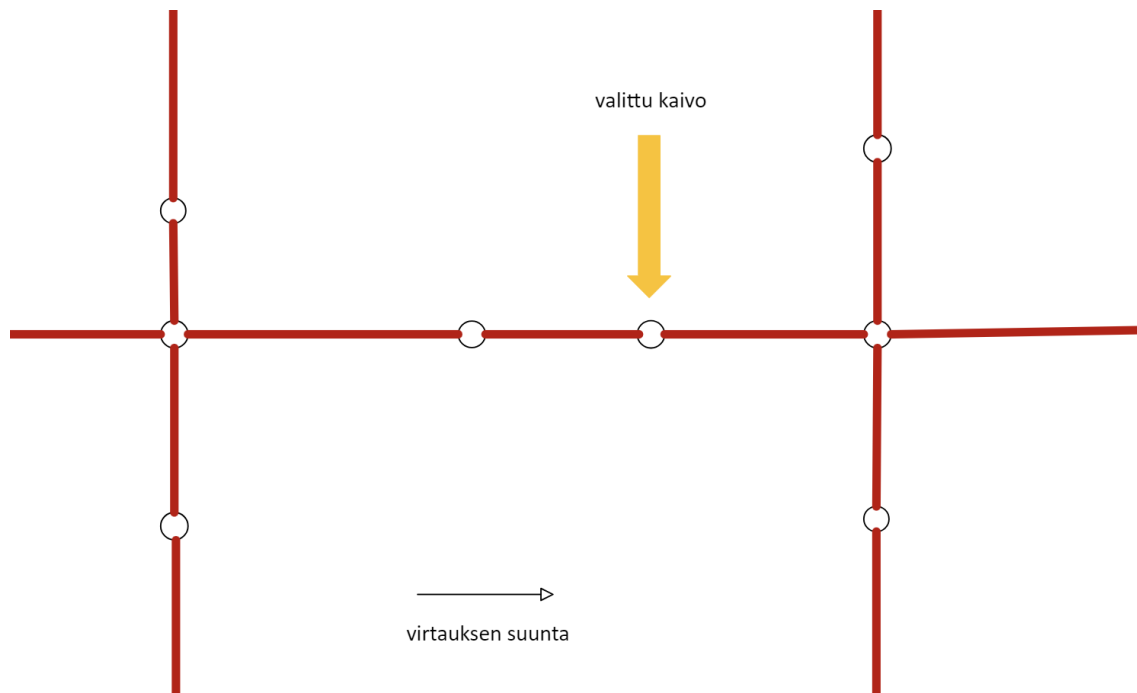
Mallinnusta käytetään esimerkiksi ennustamaan jätevedenpuhdistamolle saapuvia virtoja sekä niiden laatua. Ennustemallien avulla voidaan parantaa jätevedenpuhdistamon prosessien suorituskykyä. Jätevesiverkoston virtaukset noudattavat yleisesti säännöllisiä kaavoja erityisesti kotitalouksien, teollisuuden ja kauppojen osalta. Virtauksen ennustamiseen liittyy kuitenkin paljon muuttujia, joiden ennustaminen on haastavampaa. Putkien ja maaperän ominaisuudet sekä valuma-alueet vaikuttavat virtaukseen merkittävästi, mutta tiedot niistä ei ole aina saatavilla. Laajan tietomäärään kerääminen voi myös osoittautua haastavaksi. (Giberti ym. 2024)

Tehdyssä tutkimuksessa yritettiin luoda paras ennustemalli jätevedenpuhdistamolle. Tutkimuksessa vertailtiin eri lineaarisia polynomimalleja sekä keinotekoisia neuroverkkoja ja yritettiin hahmottaa niiden etuja ja haittoja tässä käyttötarkoituksessa. Mallinnusmenetelmillä mallinnettavia arvot olivat tulovirtaus, ammoniakkin määrä sekä kemiallisen hapenkulutuksen (COD) -arvo. Tulokset osoittivat, että kaikilla testatuilla mallinnusmenetelmillä saadaan tulos aikaiseksi, mutta parhaimmaksi menetelmäksi todetaan aikaviiveellinen neuroverkko. Tähän päädytään vertailemalla keskimääräistä regressiokerrointa ja keskimääräistä neliövirhettä. (Giberti ym. 2024)

3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOHDE

3.1 Tutkimuskohde

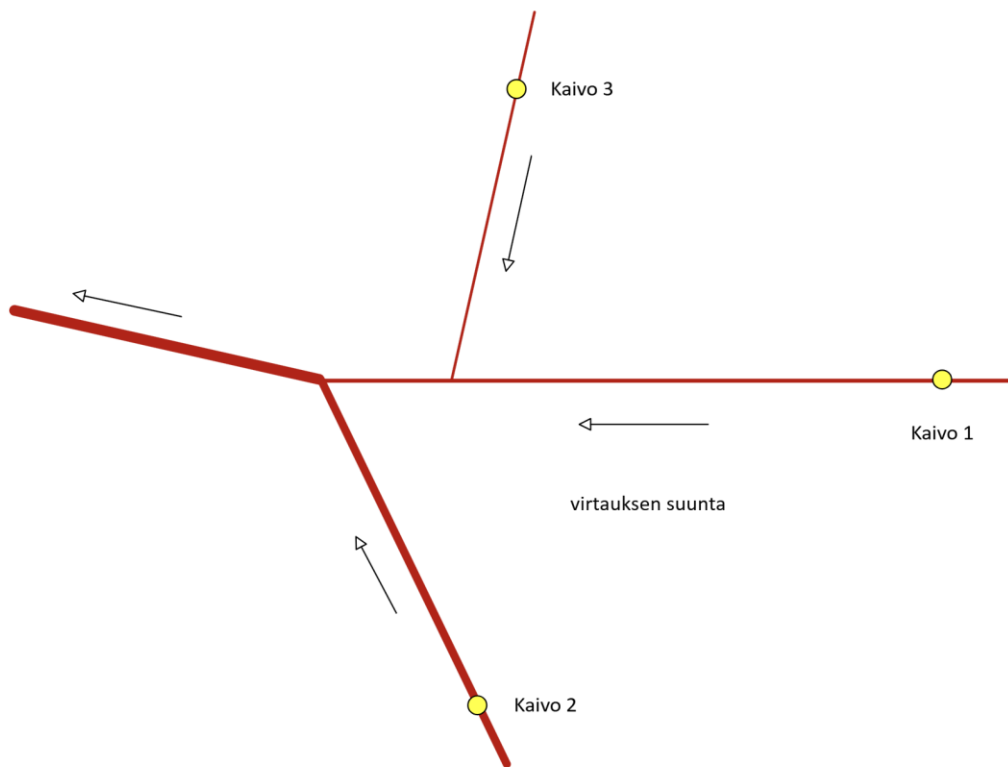
Tutkimuskohteena toimi Oulun alueen jätevesiverkosto, tarkemmin neljä jätevesiverkoston kaivoa. Jätevesiverkoston kaivot olivat keskenään hieman erilaisia. Kaivojen muotoon vaikuttavat muun muassa kaivon rakenteen materiaalit, rakennusvuosi ja rakennustekniset ominaisuudet sekä liittyvien putkien materiaali, koko ja asennusvuosi. Kaivojen toimintaperiaate on kuitenkin sama. Kaivojen sijainnit määriteltiin Oulun Veden toimesta ja linjoista valittiin kaivot siten, että putken virtaus olisi mahdollisimman tasainen. Tärkeimpänä tekijänä valinnassa oli, että kaivo ei ole risteyskaivo. Kuvassa 3 on havainnollistettu kaivojen valintaa. Kuvassa näkyvät mustat pallot ovat jätevesiverkoston kaivoja ja punainen viiva kuvaa jätevesiverkoston putkia.



Kuva 3. Valitun kaivon havainnollistaminen verkostossa (mukailten Trimble 2025).

Kolme kaivoista sijaitsee lähempänä toisiaan ja yksi kaivoista on selkeästi erillään muista. Kuvassa 4 on havainnollistettu kolmen kaivon sijainteja toisiinsa nähden. Kuvassa punainen viiva kuvaa jätevesiverkoston putkia ja keltaiset pallot valittuja kaivoja. Linjoissa sijaitsee myös muita kaivoja, joita ei ole merkattu kuvaan erikseen. Virtauksen

suunta on nuolen suuntaan vasemmalle. Kuvassa näkyvät jätevesiverkoston putket ovat eri kokoisia, mikä näkyy punaisen viivan paksuudessa.



Kuva 4. Valitut kaivot kartalla pääviemäreissä (mukaiillen Trimble 2025).

3.2 Mittaukset

Tutkimuksessa mitattiin jäteveden pinnankorkeutta sekä virtaamaa. Mittauslaitteina toimivat pinnanmittausanturit sekä kuljetettava virtausmittari. Pinnanmittausanturi on ultraäänimittari ja se toimii aikaisemmin työssä esitetyn ultraäänellä toimivan pinnanmittarin mukaisesti. Kuvassa 5 näkyvä pinnanmittausanturi on akkukäyttöinen, joten se ei tarvitse ulkoista energialähdettä. Kuvassa näkyy lisäksi yksi asennustelineistä, joka ei kuulunut pinnanmittausanturiin valmiina. Pinnanmittausanturit asennettiin kaivojen kansiin asennustelineillä. Pinnanmittausanturi mittaa pinnanetäisyyden lisäksi myös lämpötilaa. Lämpötilan mittaus sijaistaa laitteessa, joten saatu lämpötila on kaivonkannen lähetyvillä oleva lämpötila.

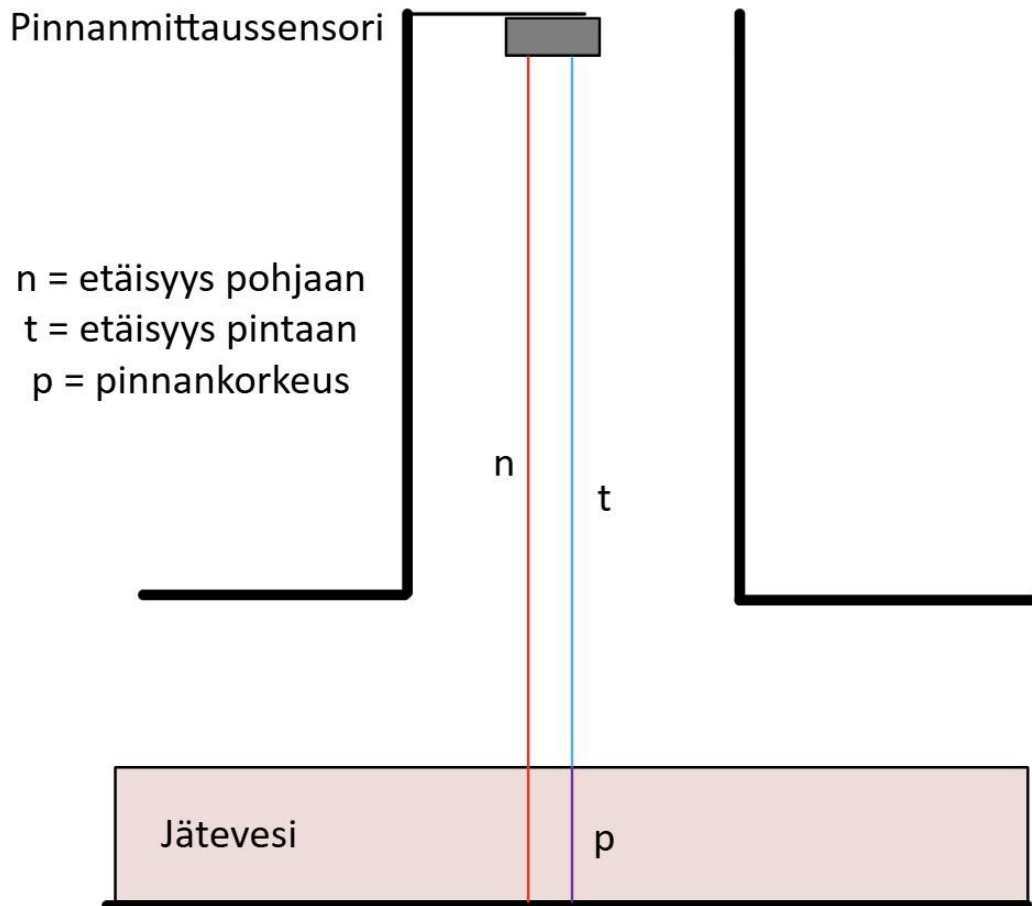
Pinnanmittausanturin mittausarvojen luenta tapahtuu laitevalmistajan pilvipalvelun kautta. Anturi käyttää datan lähettämiseen NB-IoT-teknologiaa, jolla data lähetetään

pilvipalveluun (Eeronheimo 2022). Pinnanmittausanturin mittausvälinä oli 10 minuuttia. Pilvipalvelun kautta voidaan muuttaa laitteen asetuksia kuten mittaustiheyttä sekä seurata ja analysoida saatuja mittaustietoja.



Kuva 5. Asennettava pinnanmittausanturi.

Vaikka kaivot ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, ne toimivat samalla periaatteella. Kuvassa 6 on havainnollistettu kaivojen rakennetta sekä havainnollistettu pinnanmittausanturin asentamista sekä mittausta. Lisäksi kuvassa näkyvät työssä hyödynnettävät etäisyydet.



Kuva 6. Jätevesikaivon poikkileikkaus sekä pinnanmittausanturin asennuspaikka.

Kaikki pinnanmittausanturit asennettiin kaivoihin kesäkuun 2024 lopussa. Kuitenkin kesän ja syksyn aikana kolmessa pinnanmittausanturissa tuli häiriöitä, joten ne jouduttiin korvaamaan uusilla. Vaihdoista aiheutui datan puuttumista pidemmiltäkin ajoilta. Kuvassa 7 näkyy kaivo 1 kokonaisuudessaan sekä pinnanmittausanturi asennettuna.



Kuva 7. Kaivo 1 kokonaisuudessaan sekä pinnanmittausanturi asennettuna.

Kuvassa 8 vasemmalla puolella on kaivo 2 kokonaisuudessaan. Oikealla puolella näkyy kaivon pinnanmittausanturi asennettuna.



Kuva 8. Kaivo 2 kokonaisuudessaan sekä pinnanmittausanturi asennettuna.

Kuvassa 9 vasemmalla puolella näkyy kaivo 3 kokonaisuudessaan. Kuvan oikeassa reunassa näkyy kaivon pinnanmittausanturi asennettuna.



Kuva 9. Kaivo 3 kokonaisuudessaan sekä pinnanmittausanturi asennettuna.

Kuvan 10 vasemmassa reunassa näkyy kaivo 4 virtausmittauksien aikana. Kuvan oikeassa reunassa näkyy kaivon pinnanmittausanturi asennettuna.



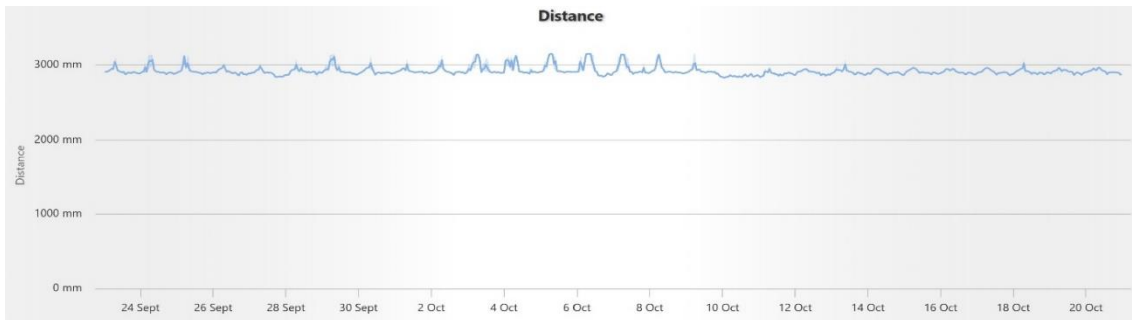
Kuva 10. Kaivo 4 kokonaisuudessaan virtausmittauksen aikana sekä pinnanmittausanturi asennettuna.

Virtausmittarina tutkimuksessa käytettiin NivuFlow Mobile 750 -virtausmittaria. Virtausmittari on kannettava malli, joka on suunniteltu virtausmittaukseen täysissä ja osittain täysissä kanavissa. Mittarin toiminta perustuu ultraääniristikorrelaatioteknologiaan, joka on esitelty työssä aikaisemmin. Virtausmittari mittaa pinnankorkeuden paineen avulla (Labkotec, 2024e). Mittarin käyttö tapahtuu selaimen kautta esimerkiksi älypuhelimella tai tabletilla. Virtalähteenä virtausmittarissa toimii ladattavat akut. (Nivus, 2024)

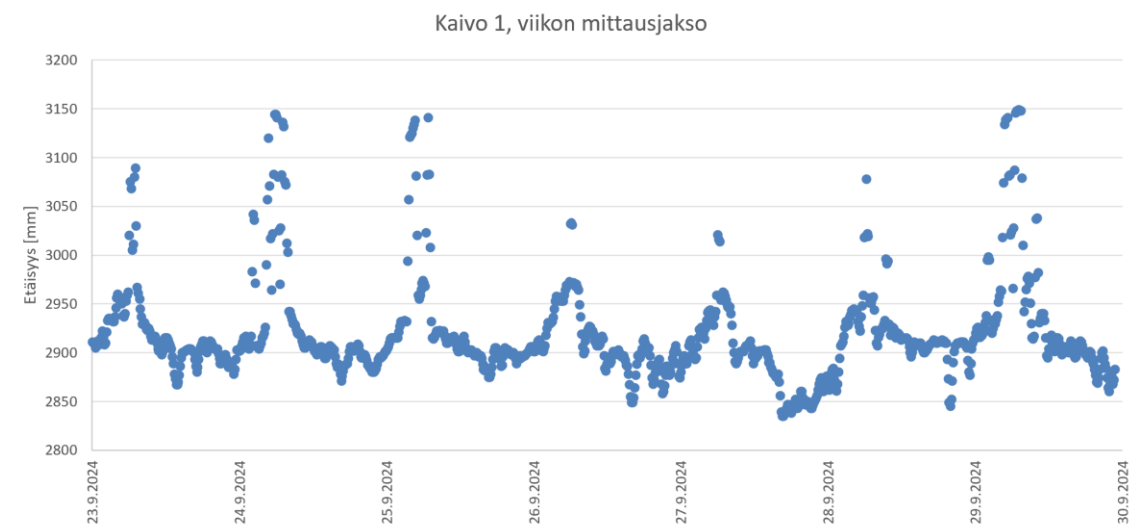
Virtausmittauksesta saatavia arvoja ovat virtaama, pinnankorkeus, veden lämpötila sekä virtausnopeus. Tässä työssä hyödynnetään virtaamaa ja pinnankorkeutta. Virtausmittarin data kerätään virtausmittauksen jälkeen muistitikulle, josta se siirretään tietokoneelle. Suoritetuilla virtausmittauksilla pyrittiin saamaan virtaustietoja eri pinnankorkeuksilta. Virtausmittauksien aikana on tärkeää, että pinnanmittausanturi on toiminnassa. Virtausmittarin mittausväliksi on asetettu 30 sekuntia, joten mittaustuloksia saadaan puolen minuutin välein. Aluksi suoritettiin pidempiä mittauksia asentamalla virtausmittari kaivon telineellä. Virtausmittariin kertyvä kiintoainekeskinä kuitenkin häiritsi mittaustuloksia sekä vaikeutti asennusta, minkä vuoksi päädyttiin tekemään lyhyempiä mittauksia. Lyhyemmät mittauksien aikana virtausmittaria pidettiin paikallaan kaivossa ja varmistettiin, että pinnanmittausanturin mittaus ei häiriintynyt. Pinnanmittausanturi mittaa pintaa 10 minuutin välein. Jotta mallintaminen onnistuu, on tärkeää saada riittävästi yhteneviä mittausaikoja. Tämä onnistuu helpoiten tekemällä ainakin 10 minuutin virtausmittauksia kerrallaan.

Mittausaikojen suunnittelemiseen käytettiin tutkimuksen alussa kerättyä pinnanmittausdataa. Kaikkien kaivojen mittaussuunnitelma noudatti samaa periaatetta. Kuvassa 11 on esitetty kaivon 1 pinnanmittausanturin lähettämä data kuukauden ajalta, josta huomataan selkeää säännöllisyyttä pinnankorkeuksissa. Jotta kuvaajan lukeminen olisi helpompaa, tutkitaan vain viikon ajanjaksoa. Kuvassa 12 näkyy kaivon 1 pinnankorkeuden kuvaaja viikon ajalta. Kuvasta 12 voidaan tunnistaa pinnankorkeuden minimien ja maksimien kellonajat, jolloin suoritetaan virtausmittaukset. Koska minimien ja maksimien kellonajat voivat heitellä muutamalla tunnilla päivien välillä, virtausmittauksia jouduttiin tekemään useamman kerran. Minimien ja maksimien lisäksi tehtiin muutamia virtausmittauksia näiden arvojen väliltä, minkä perusteella voidaan todeta, onko kyseessä lineaarinen yhteys virtaaman ja pinnankorkeuden suhteen.

Pinnanmittausantureiden mittauksista muodostettuja kuvaajia luettaessa täytyy huomioda, että pinnanmittausanturit mittaavat etäisyyttä jäteveden pintaan. Tämä tarkoittaa, että kuvaajissa suurempi etäisyys tarkoittaa pienempää jäteveden korkeutta ja pienempi etäisyys suurempaa jäteveden korkeutta. Kuvaajissa tämä tarkoittaa, että pinnankorkeuden minimi on kuvaajan ylimpiä pisteitä ja pinnankorkeuden maksimi on alimpia pisteitä.



Kuva 11. Kaivon 1 pinnanmittaustulokset kuukauden ajalta.



Kuva 12. Kaivon 1 pinnanmittaustiedot viikon ajalta.

3.3 Datan esikäsittely

Virtausmittauksen dataa kerättiin yhteen Excel taulukkoon kaivokohtaisesti. Koska virtauksen oletetaan olevan lineaarinen, virtaama kasvaa lineaarisesti suhteessa pinnankorkeuteen. Kun virtausmittauksia kertyi eri pinnankorkeuksilta, voitiin niiden laatua arvioida toisiinsa nähden. Arviointi tapahtui syöttämällä virtausmittauksen tulokset

kuvaajaan ja katsomalla, asettuvatko arvot lineaarisesti toisiinsa nähden. Tällöin arvot, jotka poikkesivat suoralta huomattavasti, voitiin poistaa virheellisinä mittauksina.

Dataa kertyi kaivoista eri määriä, koska kaivoissa tarvittiin eri määrä virtausmittauskertoja, jotta saatiin riittävän laadukas suora. Kaivolla 3 riitti vähemmän virtausmittauksia, koska tulokset osuivat heti suoralle. Kaivolla 1 tarvittiin taas enemmän mittauskertoja, koska suoran muodostaminen oli hankalampaa. Kaivolla 1 virtaus ei tasaantunut yhtä hyvin kuin muilla kaivoilla. Lopullisia virtausmittauksen mittapisteitä kertyi 189 kappaletta kaivolle 1, 143 kappaletta kaivolle 2, 114 kappaletta kaivolle 3 ja 165 kappaletta kaivolle 4. Nämä sisälsivät useampia mittauskertoja, jolloin mittapisteitä on syntynyt 30 sekunnin välein. Lisäksi näistä määristä on vähennetty virheelliset arvot kuten mittausten ensimmäiset tai viimeiset arvot, jos ne ovat osuneet virtausmittarin liikuttamisen yhteyteen sekä suoraa muodostaessa huomattavat virheelliset mittaukset. Jäljelle jää mallinnuksessa hyödynnettävät arvot.

3.4 Lineaarinen mallinnus ja metriikat

Esikäsitelty data jaettiin kahteen osaan, joita käytettiin mallintamisen opetusvaiheessa sekä testausvaiheessa. Testausosaan poimittiin ne kellonajat, jolloin pinnanmittausanturin mittausaika täsmää virtausmittauksen kellonajan kanssa. Loput datapisteet jäivät opetusvaiheeseen. Kaivon 1 opetusvaiheeseen käytettiin 663 mittauspistettä ja testausvaiheeseen yhdeksää mittauspistettä. Kaivon opetusvaiheen käytettiin 579 mittauspistettä ja testausvaiheeseen kahdeksaa mittauspistettä. Kaivon 3 opetusvaiheeseen käytettiin 546 mittauspistettä ja testausvaiheeseen neljää mittauspistettä. Kaivon 4 opetusvaiheeseen käytettiin 701 mittauspistettä ja testausvaiheeseen yhdeksää mittauspistettä. Opetusvaiheessa käytettiin virtausmittauksien virtaama-arvoa sekä pinnankorkeutta ja syötettiin ne Excelin regressioanalyysityökaluun.

Regressioanalyysissä tutkitaan muuttujan tai muuttujien yhteyttä selitettävään muuttujaan. Analyysi kertoo, mikä on muuttujien yhteys selitettävään muuttujaan. Regressioanalyysistä saadaan tulokseksi regressiosuora. Regressiomallin tuloksen luotettavuutta voidaan arvioida selitysasteen sekä estimaattisen keskivirheen avulla. Regressioanalyysissä on tärkeää tunnistaa, että tulos kertoo muuttujien välisistä

yhteyksistä. Tuloksella ei voida päätellä syy-seuraussuhteita. Tuloksista päätelty syy-seuraussuhteet eivät ole analyysimenetelmän tuloksia vaan perustuvat taustalla olevaan tutkimusasetelmaan. (Tietoarkisto 2024a)

Lineaarinen regressiomalli on yksi regressioanalyysin muodoista. Lineaarisen regressiomallin käyttämiseen on muutamia ehtoja, joiden on täytyttävä lineaarista mallia käyttääkseen. Linearisessa regressioanalyysissä oletetaan, että mallinnettavat yhteydet ovat luonteeltaan lineaarisia. Tällöin muuttujien välinen yhteys on kuvattavissa lineaarisen yhtälön eli suoran avulla. Esimerkiksi yhteyden ollessa eksponentiaalinen, lineaarinen regressioanalyysi ei anna realistista tulosta. (Tietoarkisto 2024a)

Regressiotyökaluun syötetään opetusvaiheeseen valitut pisteet. Regressioanalyysityökalun avulla saadaan muodostettua yhtälön 3 mukainen suoran yhtälö. Arvot a ja b saadaan regressioanalyysin kertoimista. Y on selitettävä muuttuja ja X selittävä muuttuja:

$$Y = b + a \cdot X, \quad (3)$$

missä Y on virtaama [m^3/s],
 X on pinnankorkeus [m],
 b on leikkauspiste ja
 a on regressiokerroin.

Suoranyhtälön muodostamisen jälkeen siirrytään testausvaiheeseen, jossa hyödynnetään pinnanmittausantureiden mittauksia. Ensiksi täytyy selvittää etäisyys pinnanmittausanturista kaivon pohjaan. Se tapahtuu summaamalla pinnanmittausanturin etäisyys ja virtausmittarin pinnankorkeus kellonajoilta, jotka osuvat kohdilleen. Koska arvoja on useita, lasketaan kaikkien saatujen mittojen keskiarvo. Testausvaiheessa tutkitaan rinnakkain pinnanmittausanturin tuloksia sekä virtausmittarin tuloksia ja tarkastellaan opetusvaiheessa muodostetun yhtälön toimivuutta.

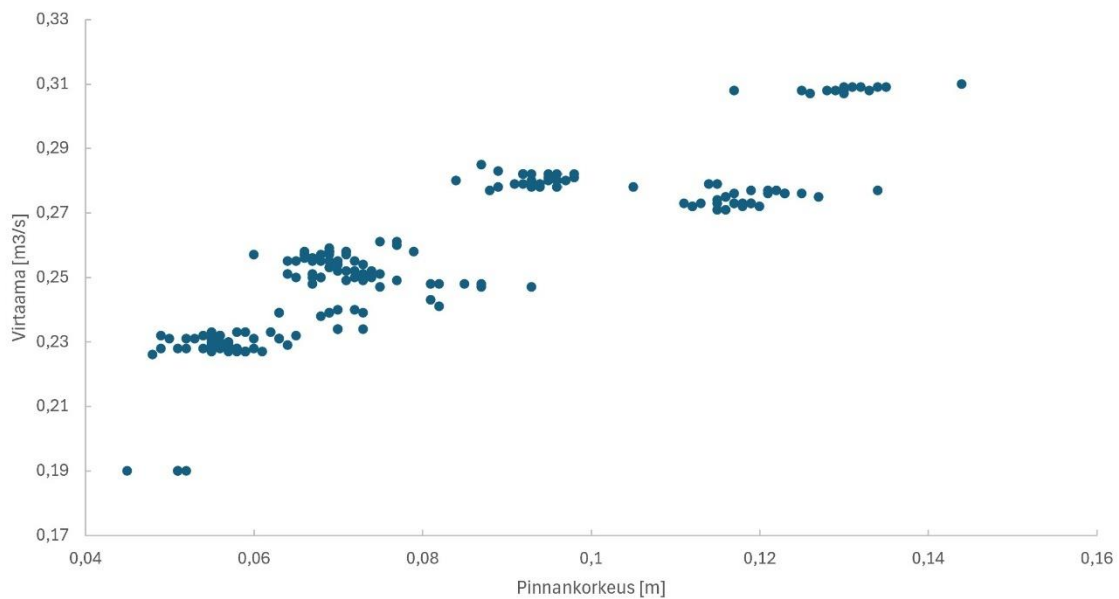
Exceliin kerätään pinnanmittausanturin mittaustulokset päiviltä, jolloin virtausmittaus on osunut pinnanmittauksen kanssa samalla ajan hetkelle. Esimerkiksi kaivon 1 kohdalla yhdeksän virtausmittausta osuu täsmällisesti pinnanmittauksen kellonaikaan. Osa kuitenkin osuu samoille päiville, joten kerätään pinnanmittausanturin data tarvittavalta viideltä päivältä. Koska mallintamisessa käytetään jäteveden pinnankorkeutta, täytyy pinnanmittauksen etäisyys muuttua pinnankorkeudeksi. Tämä tapahtuu vähentämällä pinnanmittausanturin mitaama etäisyys aikaisemmin lasketusta pohjan etäisyydestä. Kun jokainen arvo on muutettu pinnankorkeudeksi, löytyy kaikkia tarvittavat lukemat testausvaihetta varten.

Seuraavaksi lasketaan virtaama jokaiselle kellonajalle opetusvaiheen kaavalla käyttämällä edellisessä vaiheessa laskettua pinnankorkeutta. Rinnalle lasketaan samalla opetusmallin virtaaman kaavalla testausvaiheeseen jätettyjen virtausmittauksien virtaamat käyttäen virtausmittauksien pinnankorkeuksia. Näin on laskettu opetusmallin virtaaman kaavalla tulokset viiden eri vuorokauden pinnanmittausanturin etäisyyksille sekä virtausmittauksien pinnankorkeuksille. Kun nämä tulokset piirretään kuvaajalle, voidaan visuaalisesti tulkita, osuuko malli kohdilleen vai tarvitaanko esimerkiksi korjauskerrointa.

Opetus- ja testausvaiheen laatua arvioidaan viimeiseksi sirontakuvioiden avulla. Sirontakuviota käytetään kahden muuttujan välisen korrelaation tarkasteluun (Tietoarkisto 2024b). Sirontakuviossa muuttujina ovat mitattu virtaama sekä mallinnettu virtaama. Opetusvaiheen sirontakuvioiden käytetään samoja mitattuja virtaamia kuin mallin luomiseen. Mallinnettu virtaama-arvot saadaan opetusvaiheessa suoritettua regressioanalyysistä. Testausvaiheen sirontakuvioiden käytetään samoja mitattuja virtaamia kuin testausvaiheessa. Mallinnetut virtaama-arvot saadaan testausvaiheessa mallinnetuista arvoista, joita valitaan yhtenevät ajat mitattujen virtaamien kanssa. Testausvaiheen sirontakuviossa on selkeästi vähemmän pisteitä kuin opetusvaiheen kuviossa, sillä testausvaiheessa käytettyjä ajaltaan yhteneviä arvoja on alle kymmenen kappaletta kaikilla kaivoilla.

4 TULOKSET

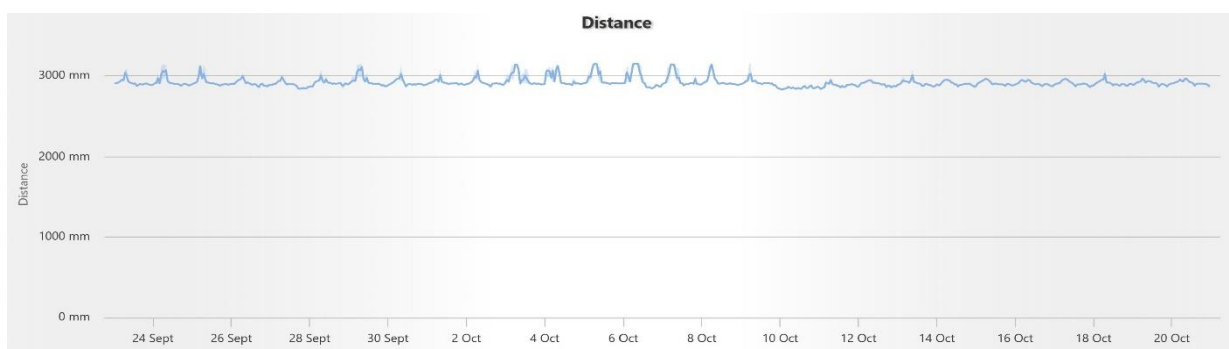
Virtausmittauksia tehdessä eri pinnankorkeuksien virtaama-arvoja tarkasteltiin pinnankorkeusmittausten kanssa, josta arvioitiin mittapisteiden laatua. Arvioinnissa katsottiin, asettuvatko arvot lineaarisesti toisiinsa nähden. Kuvassa 13 on esimerkki kaivon 1 virtausmittauksien virtaaman arvoista suhteessa pinnankorkeuksiin. Sama menetelmä toistettiin muiden kaivojen mittauksien kohdalla.



Kuva 13. Kaivon 1 mitatut virtaamat suhteessa pinnankorkeuksiin.

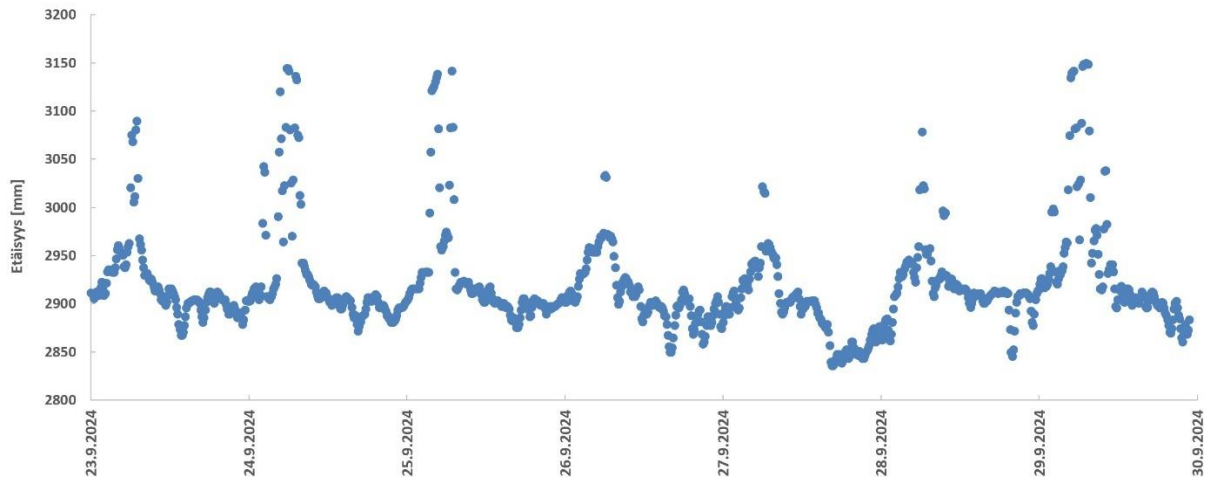
4.1 Kaivo 1

Kuvassa 14 näkyy kaivon 1 pinnanmittausanturin lähettämä data kuukauden ajalta. Kuvassa näkyvät tulokset ovat päiviltä 23.9. – 20.10.2024.



Kuva 14. Kaivon 1 pinnankorkeuden mittaukset kuukauden ajalta.

Jotta tuloksien lukeminen oli tarkempaa, poimitaan kuukauden mittaustuloksista yhden viikon tulokset ja siirretään ne Excelliin. Kuvassa 15 näkyvät yhden viikon (23.9.-29.9.2024) mittaustulokset.



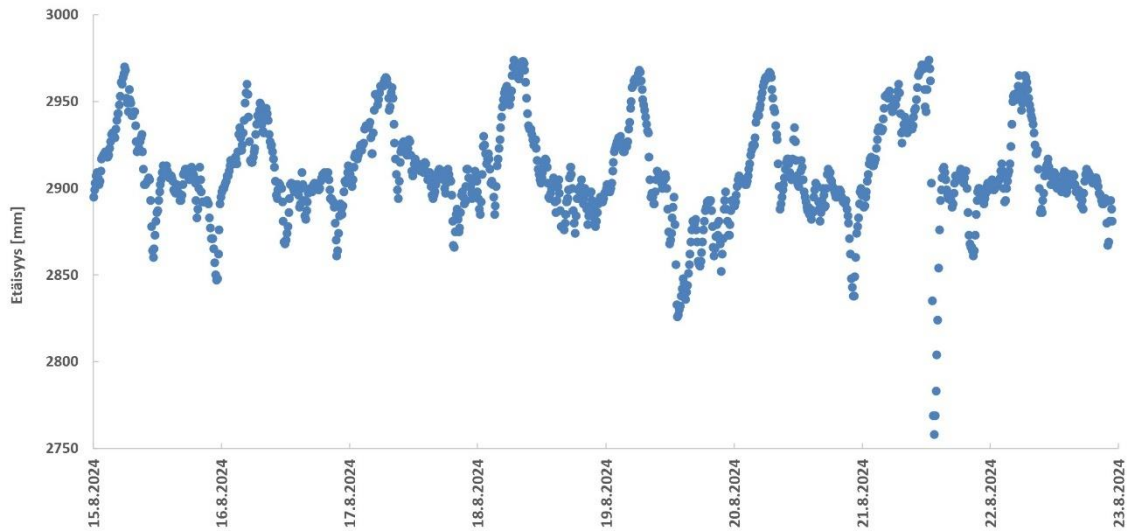
Kuva 15. Kaivon 1 pinnanmittaus viikon ajalta.

Viikon kuvaajasta on poimittu kuvaajan huippujen tarkempia tietoja. Taulukossa 1 on koottu päiväkohtaisesti pinnanmittausanturin kuvaajan huippujen kellonajat sekä etäisyyksien arvot.

Taulukko 1. Kaivon 1 viikon mittausjakson minimi- ja maksimi-arvot taulukoituna.

	MA	TI	KE	TO	PE	LA	SU
	23.9.2024	24.9.2024	25.9.2024	26.9.2024	27.9.2024	28.9.2024	29.9.2024
MAX.							
etäisyys							
[mm]	3089	3144	3141	3033	3021	3078	3249
aika	7:05	5:58	6:50	6:12	6:05	6:17	7:10
MIN.							
etäisyys							
[mm]	2867	2871	2875	2849	2835	2845	2869
aika	13:56	16:39	16:51	16:13	16:46	19:59	20:01
	2880	2880		2858	2838	2877	2860
	17:06	21:39		21:04	18:06	23:09	21:51
	2878				2843		
	23:07				21:26		

Kun tutkitaan kaikkea tähän mennessä saatua pinnanmittausdataa, voidaan löytää poikkeava mittaustulos. Kuvassa 16 näkyy pinnamittauksessa 21.8.2024 näkyvä pinnankorkeuden poikkeava nouseminen.

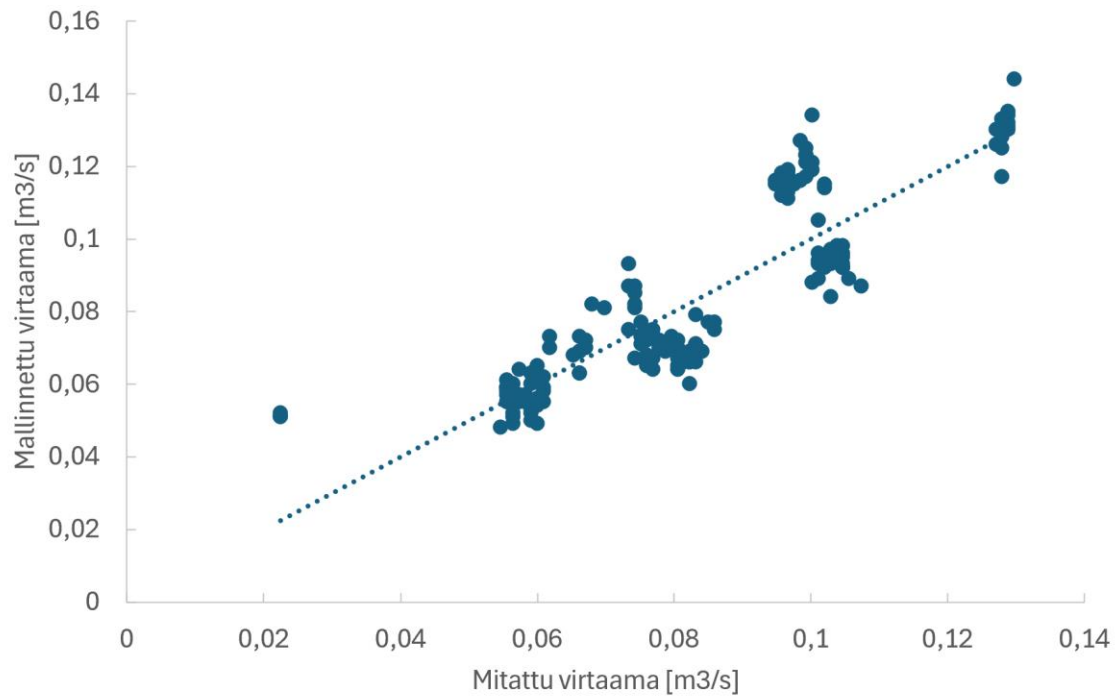


Kuva 16. Poikkeava pinnankorkeuden nousu elokuussa 2024.

Kaivon 1 mallinnuksen opetusvaiheessa muodostetuksi yhtälöksi saadaan:

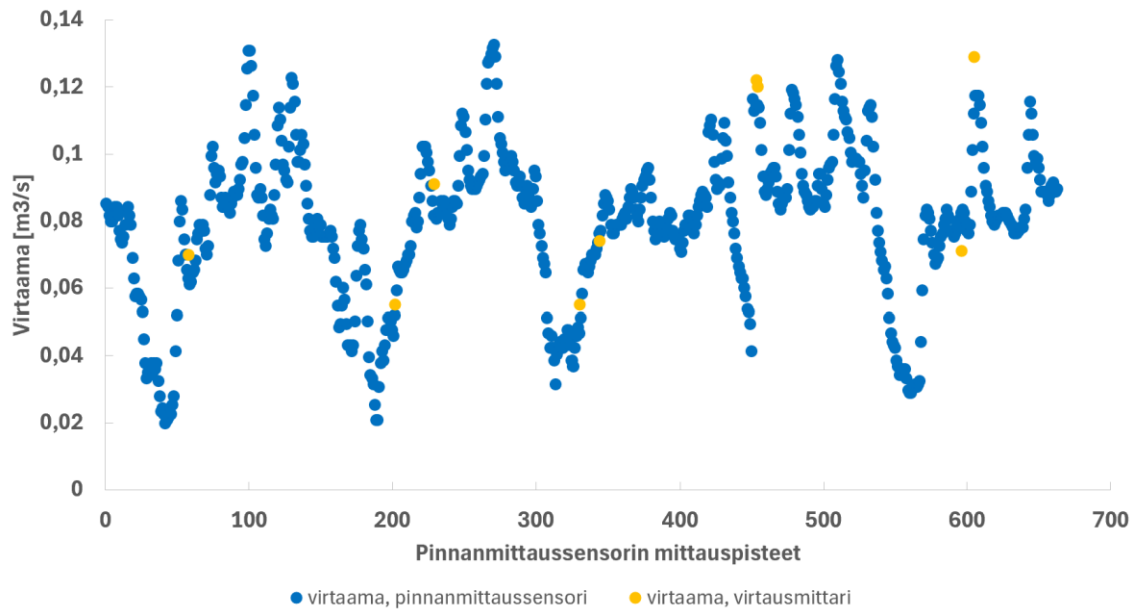
$$Y = -0,147417668 + 0,894270157 \cdot X$$

Opetusvaiheen mitatuista ja mallinetuista virtaamista muodostetaan kuvassa 17 näkyvä sirontakuviio, joka kuvaa virtaamien suhdetta toisiinsa. Kuvaajasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,77, selitysaste on 0,60 ja keskivirhe on 0,012.



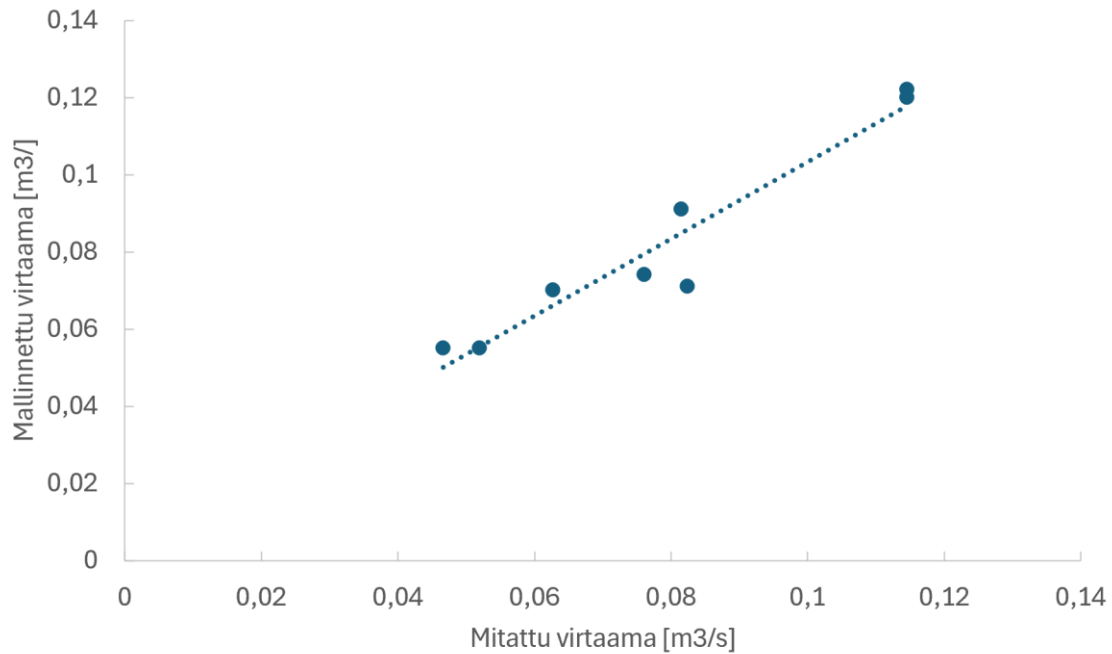
Kuva 17. Kaivon 1 opetusvaiheen sirontakuvio.

Testausvaiheessa käytettäviä virtausmittauksen kellonaikoja on yhdeksän, jotka sijoittuvat viidelle eri päivälle. Testausvaiheessa muodostetaan kuvaaja, joka visualisoi mallin omistumista. Kuvassa 18 näkyy muodostettu kuvaaja.



Kuva 18. Kaivon 1 mallinnettu ja mitattu virtaama (testausvaihe).

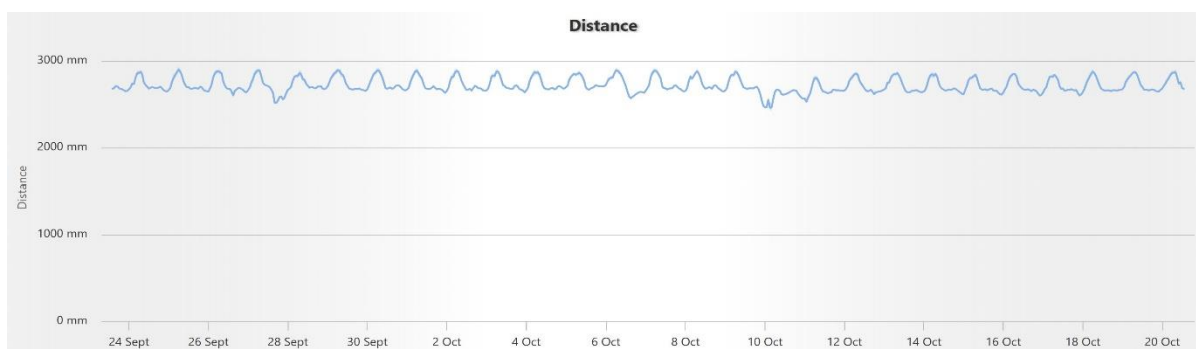
Testausvaiheen mitatuista ja mallinnetuista virtaamista muodostetaan kuvan 19 mukainen lineaarinen regressiomalli. Kuvaajasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,93, selitysaste on 0,86 ja keskivirhe on 0,008.



Kuva 19. Kaivon 1 mallinnetun virtaaman testausvaiheen sirontakuvio.

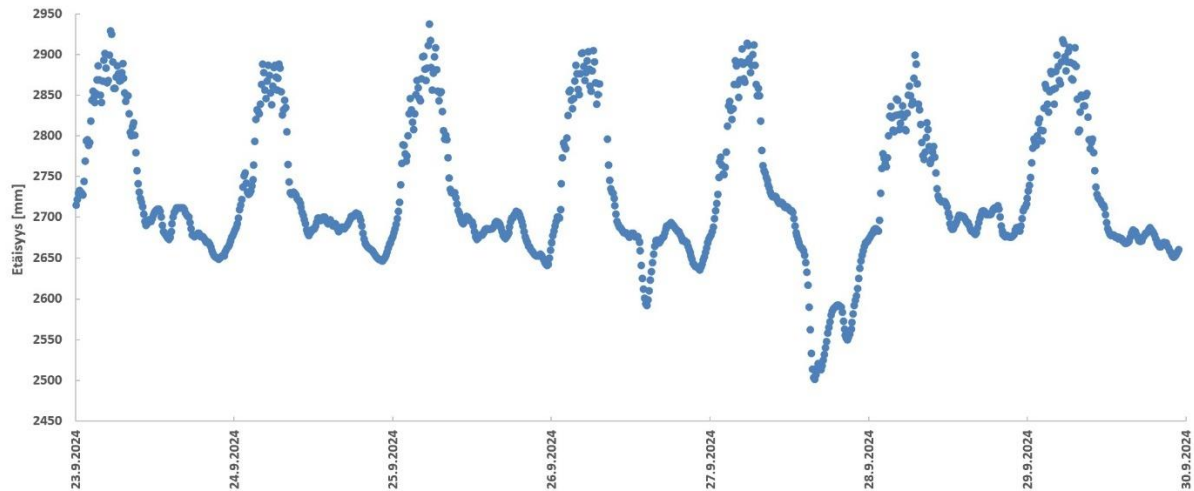
4.2 Kaivo 2

Kuvassa 20 näkyy kaivon 2 pinnanmittausanturin lähettämä data kuukauden ajalta. Kuvassa näkyvät tulokset ovat päiviltä 23.9. – 20.10.2024.



Kuva 20. Kaivon 2 pinnankorkeuden mittaukset kuukauden ajalta.

Jotta tuloksien lukeminen oli tarkempaa, poimitaan kuukauden mittaustuloksista yhden viikon tulokset Exceliin. Kuvassa 21 näkyvät yhden viikon mittaustulokset, jonka päivämäärät ovat 23.9. – 29.9.2024



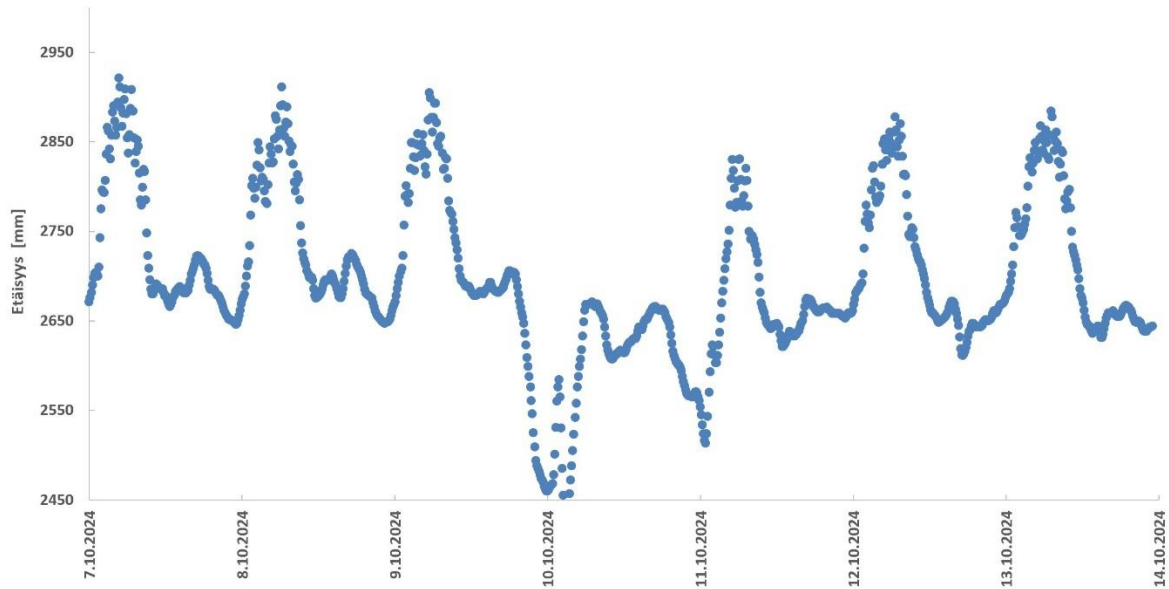
Kuva 21. Kaivon 2 pinnanmittaus viikon ajalta.

Viikon kuvaajasta on poimittu kuvaajan huippujen tarkempia tietoja. Taulukossa 2 on koottu päiväkohtaisesti pinnanmittausanturin kuvaajan huippujen kellonajat sekä etäisyyksien arvot.

Taulukko 2. Kaivon 2 viikon mittausjakson minimi- ja maksimiarvot taulukoituna.

	MA	TI	KE	TO	PE	LA	SU
	23.9.2024	24.9.2024	25.9.2024	26.9.2024	27.9.2024	28.9.2024	29.9.2024
MAX.							
etäisyys							
[mm]	2929	2888	2937	2905	2912	2899	2918
aika	5:18	4:20/6:50	5:32	6:25	6:37	6:59	5:22
MIN.							
etäisyys							
[mm]	2629	2647	2641	2592	2501	2675	2652
aika	21:39	22:32	23:24	14:25	15:48	21:31	22:03
				2636	2550		
				22:26	20:48		

Tutkiessa kaikkea tähän mennessä saatua pinnanmittausdataa, voidaan löytää poikkeava mittaustulos. Kuvassa 22 näkyy pinnamittauksessa 10.10.2024 näkyvä pinnankorkeuden poikkeava nouseminen.

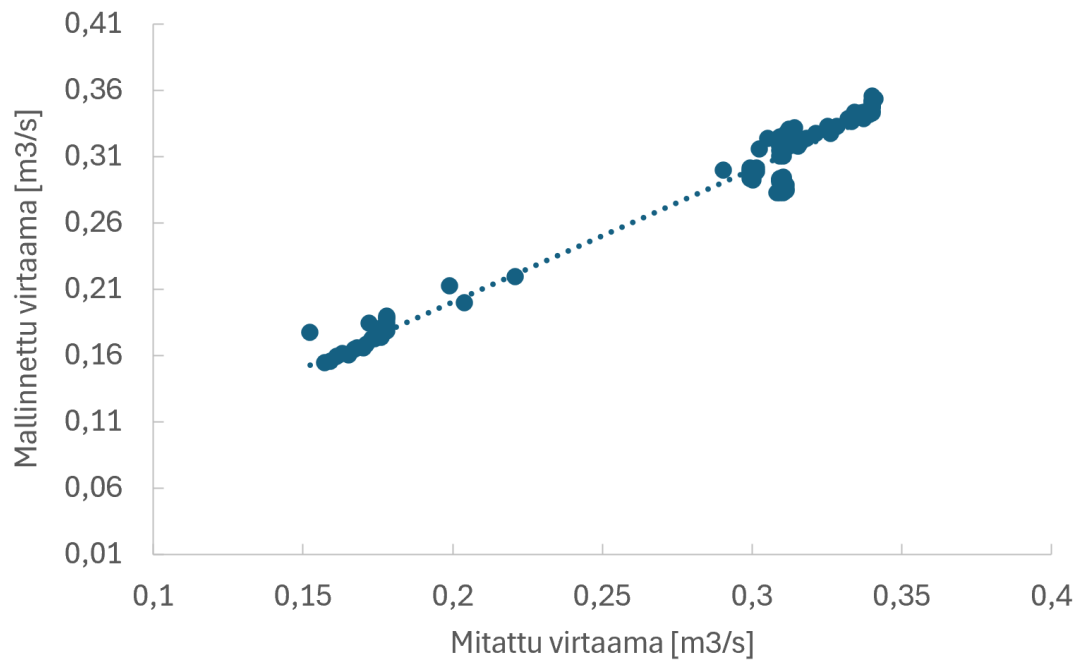


Kuva 22. Poikkeava pinnankorkeuden nousu lokakuussa 2024.

Kaivon 2 mallinnuksen opetusvaiheessa muodostetuksi yhtälöksi saadaan

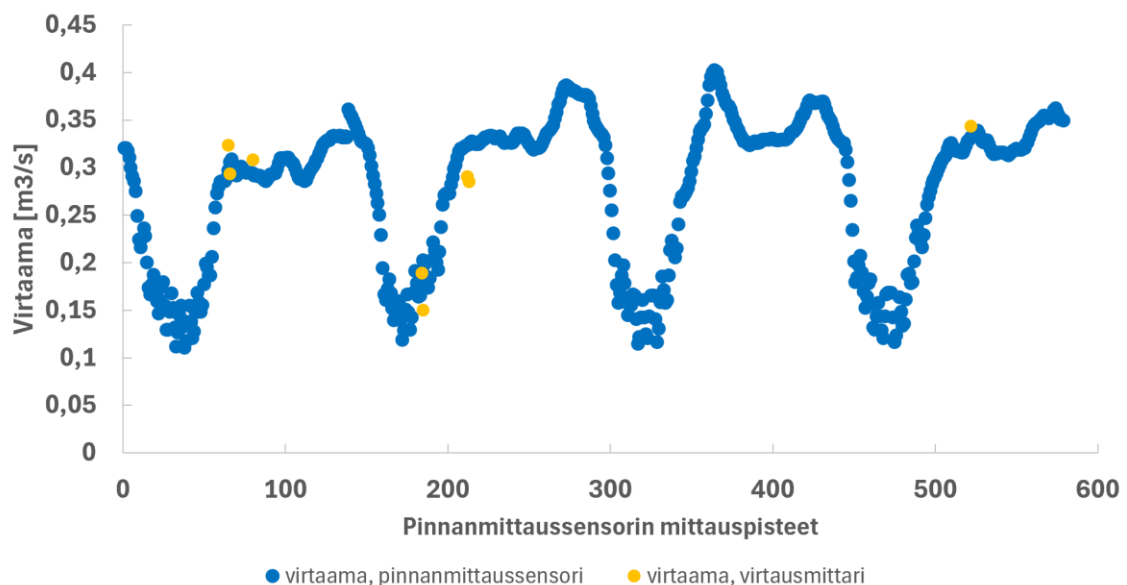
$$Y = -0,272266697 + 0,994554529 \cdot X$$

Opetusvaiheen mitatuista ja mallinetuista virtaamista muodostetaan kuvassa 23 näkyvä sirontakuvio, joka kuvaa virtaamien suhdetta toisiinsa. Kuvaajasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,95, selitysaste on 0,91 ja keskivirhe on 0,12.



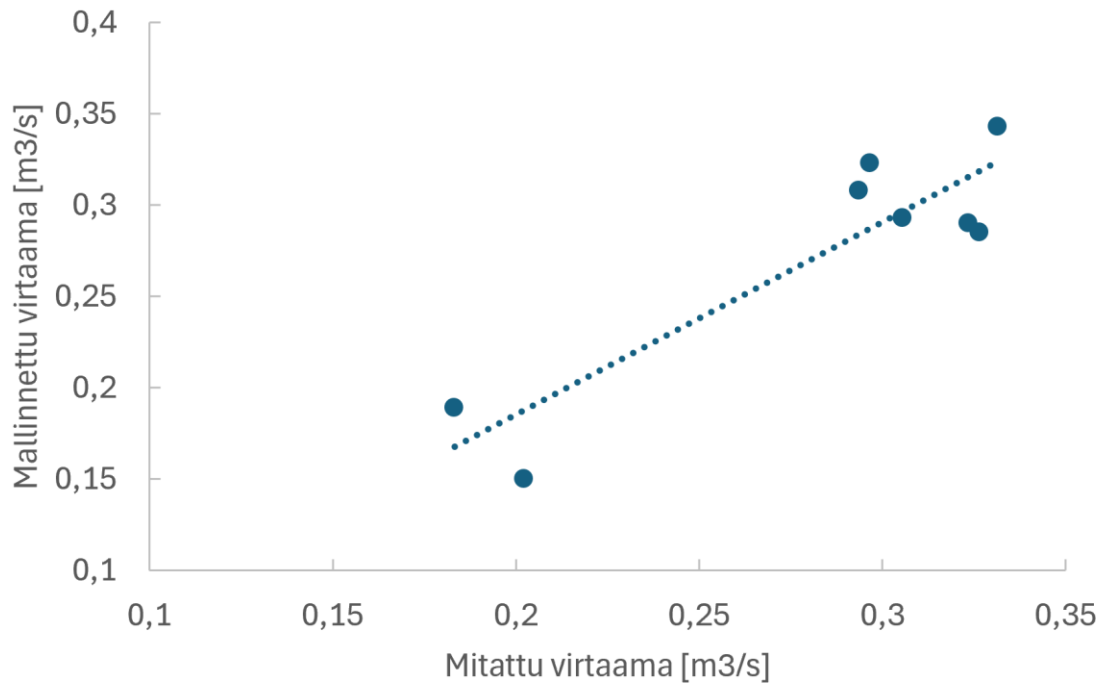
Kuva 23. Kaivon 2 opetusvaiheen sirontakuvio.

Testausvaiheessa käytettäviä virtausmittauksen kellonaikoja on kahdeksan, jotka sijoittuvat kolmelle eri päivälle. Pisteistä kaksi osuu niin lähekkäin, että ne näkyvät kuvassa päällekkäin. Testausvaiheessa muodostetaan kuvaaja, joka visualisoi mallin onnistumista. Kuvassa 24 näkyy muodostettu kuvaaja. Kaivon 2 tapauksessa täytyi käyttää korjauskerrointa mallissa. Alkuperäisellä menetelmällä virtausmittarin virtaamat osuvat kuvaajalla poikkeuksetta liian korkealla eli virtaaman arvot ovat liian suuria. Korjauskertoimen avulla mallia saadaan korjattua paremmaksi.



Kuva 24. Mallin mallinnettu ja mitattu virtaama (testausvaihe).

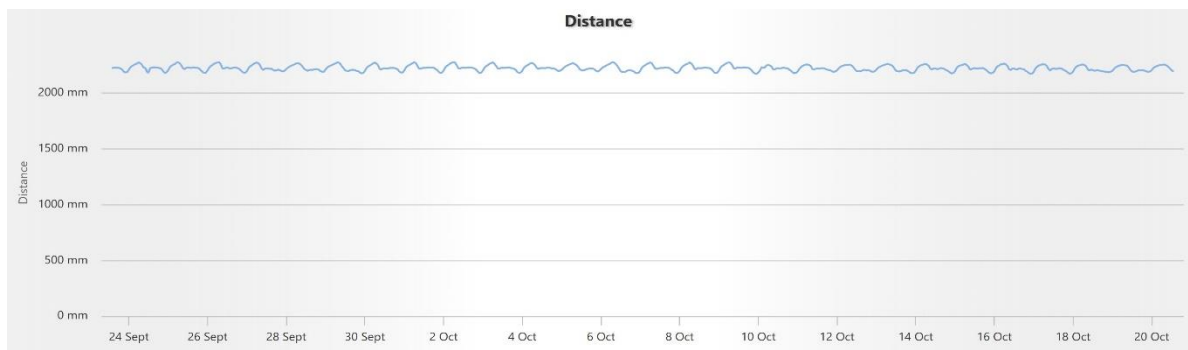
Testausvaiheen mitatuista ja mallinnetuista virtaamista muodostetaan kuvan 25 mukainen lineaarinen regressiomalli. Kuvasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,81, selitysaste on 0,66 ja keskivirhe on 0,027.



Kuva 25. Kaivon 2 mallinnetun virtaaman testausvaiheen sirontakuvio.

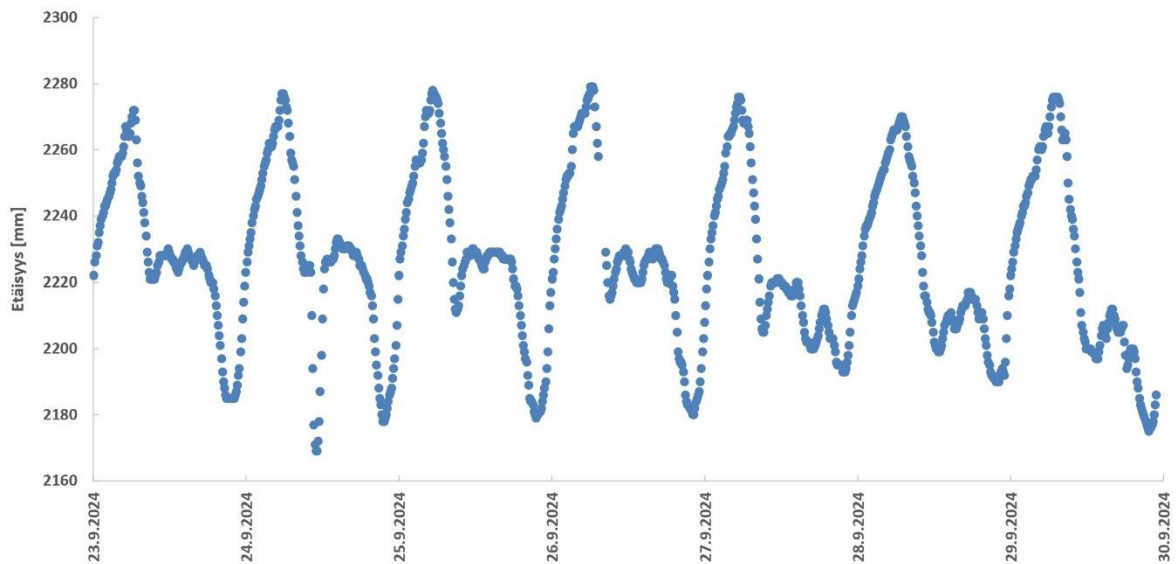
4.3 Kaivo 3

Kuvassa 26 näkyy kaivon 3 pinnanmittausanturin lähettämä data kuukauden ajalta. Kuvassa näkyvät tulokset ovat päiviltä 23.9. – 20.10.2024.



Kuva 26. Kaivon 3 pinnankorkeuden mittaukset kuukauden ajalta.

Jotta tuloksien lukeminen oli tarkempaa, poimitaan kuukauden mittaustuloksista yhden viikon tulokset Exceliin. Kuvassa 27 näkyvät yhden viikon mittaustulokset, jonka päivämäärät ovat 23.9. – 29.9.2024.



Kuva 27. Kaivon 3 pinnanmittaus viikon ajalta.

Viikon kuvaajasta on poimittu kuvaajan huippujen tarkempia tietoja. Taulukossa 3 on koottu päiväkohtaisesti pinnanmittausanturin viikon kuvaajan huippujen kellonajat sekä etäisyyksien arvot.

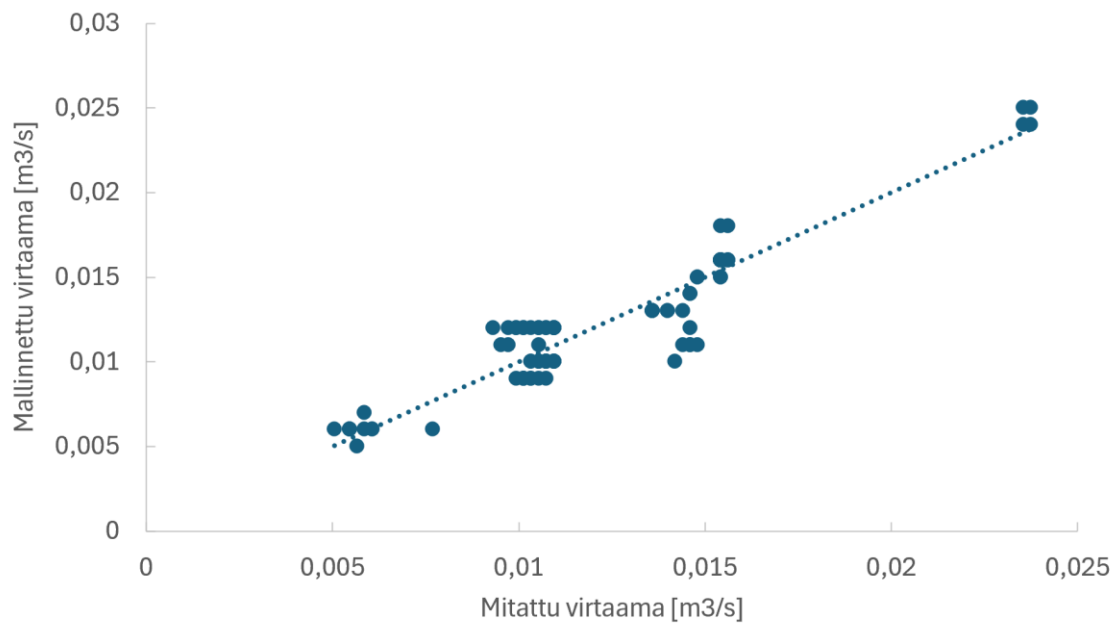
Taulukko 3. Kaivon 3 viikon mittausjakson minimi- ja maksimiarvot taulukoituna.

	MA	TI	KE	TO	PE	LA	SU
	23.9.2024	24.9.2024	25.9.2024	26.9.2024	27.9.2024	28.9.2024	29.9.2024
MAX.							
etäisyys							
[mm]	2272	2277	2278	2279	2276	2270	2276
aika	6:25	5:47	5:19	6:22	5:24	6:56	6:49/7:19
MIN.							
etäisyys							
[mm]	2285	2169	2179	2180	2193	2190	2175
aika	21:26/22:06	11:07	21:31	22:13	21:56	22:08	21:40
		2178					
		21:38					

Kaivon 3 mallinnuksen opetusvaiheessa muodostetuksi yhtälöksi saadaan

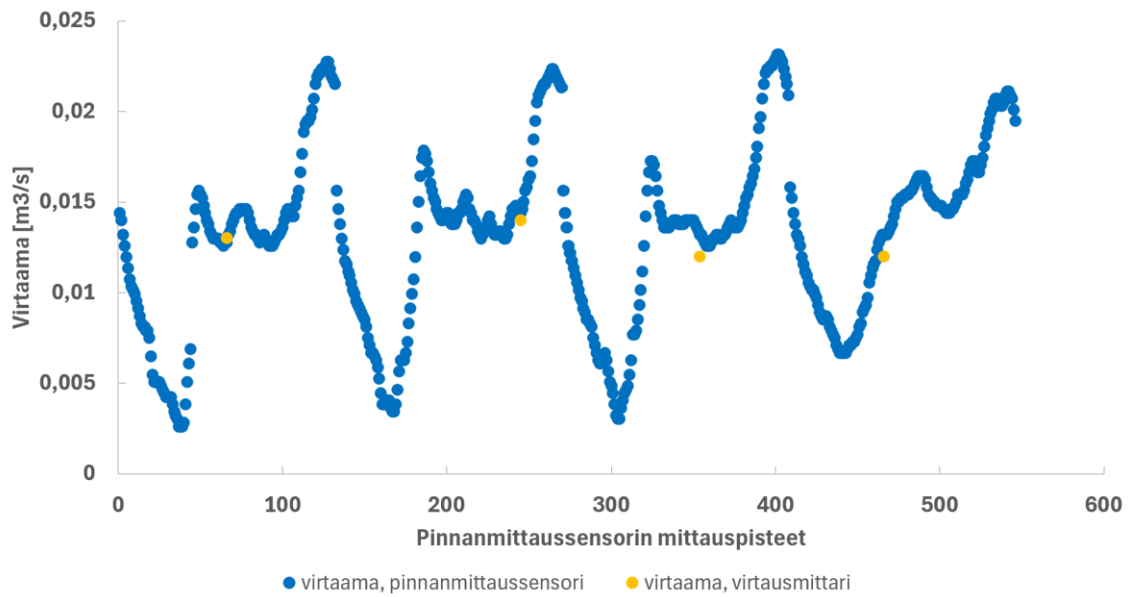
$$Y = -0,015876366 + 0,203233539 \cdot X$$

Opetusvaiheen mitatuista ja mallinetuista virtaamista muodostetaan kuvassa 28 näkyvä sirontakuvio, joka kuvaa virtaamien suhdetta toisiinsa. Kuvaajasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,89, selitysaste on 0,80 ja keskivirhe on 0,0013.



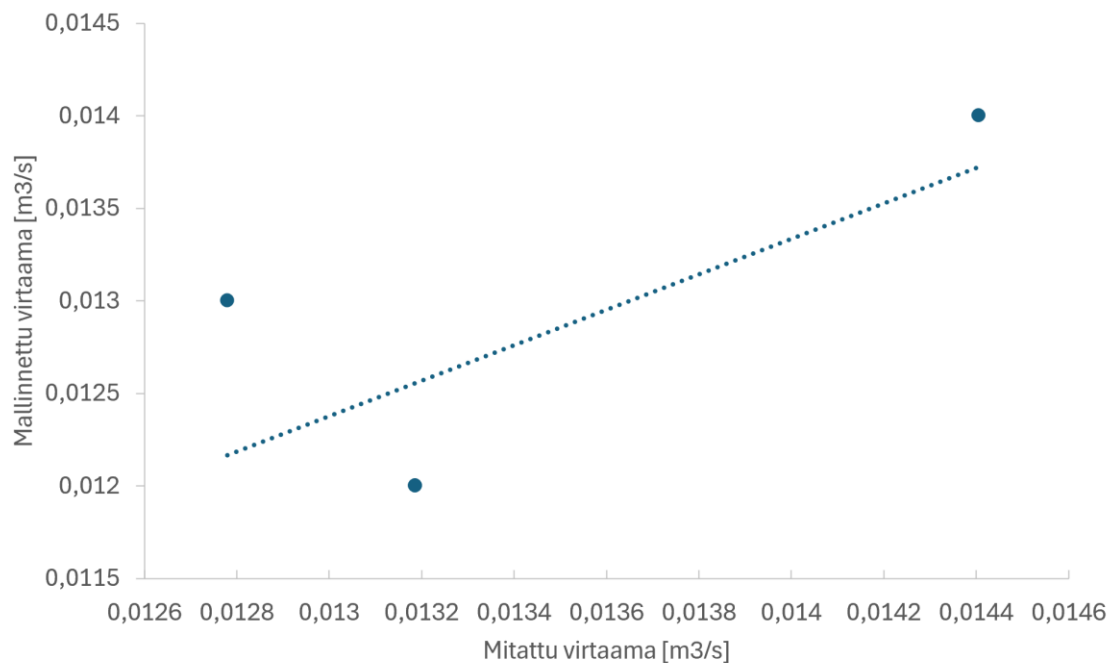
Kuva 28. Kaivon 3 opetusvaiheen sirontakuvio.

Testausvaiheessa käytettäviä virtausmittauksen kellonaikoja on viisi, jotka sijoittuvat neljälle eri päivälle. Testausvaiheessa muodostetaan kuvaaja, joka visualisoi mallin onnistumista. Kuvassa 29 näkyy muodostettu kuvaaja.



Kuva 29. Mallin mallinnettu ja mitattu virtaama (testausvaihe).

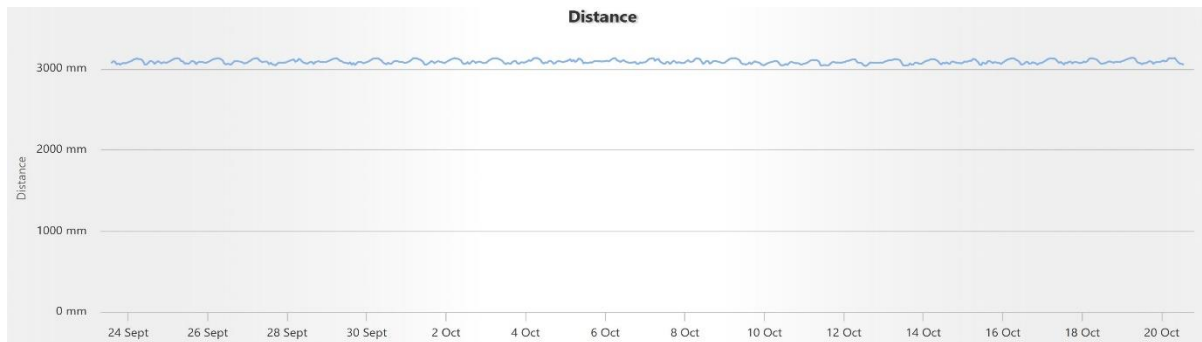
Testausvaiheen mitatuista ja mallinnetuista virtaamista muodostetaan kuvan 30 mukainen lineaarinen regressiomalli, minkä korrelaatiokerroin on 0,49, selitysaste on 0,25 ja keskivirhe on 0,0006. Regressiomallissa on käytetty kaikkia neljää testausvaiheen arvoa. Kaksi arvoparia ovat kuitenkin täysin samat, joten sirontakuvion pisteet ovat päällekkäin.



Kuva 30. Kaivon 3 mallinnetun virtaaman testausvaiheen sirontakuvio.

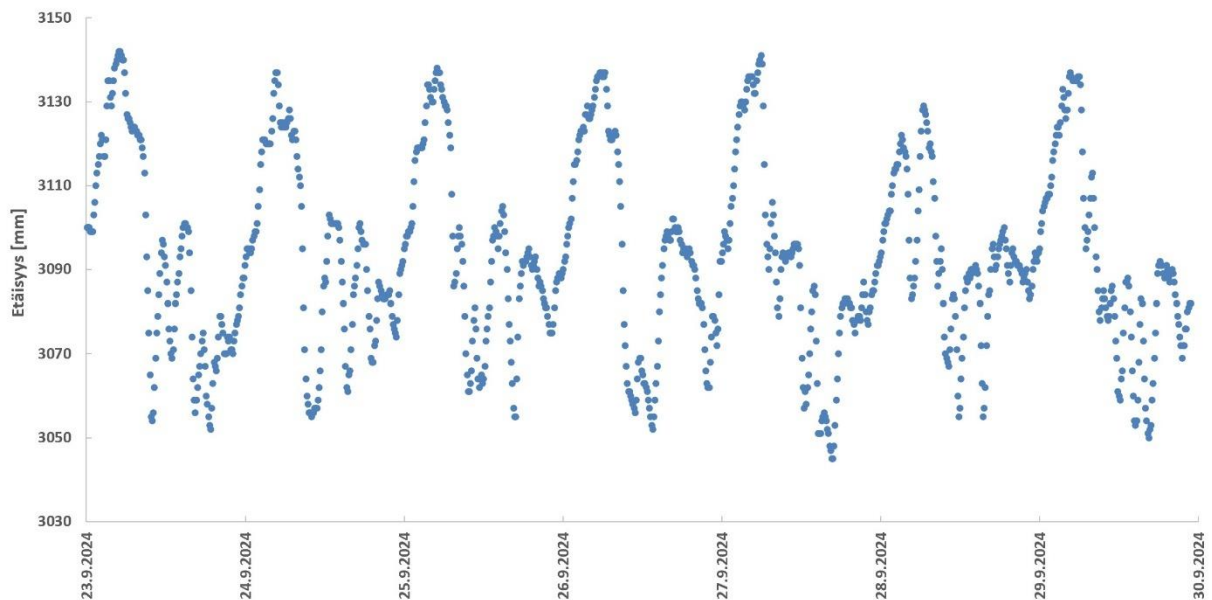
4.4 Kaivo 4

Kuvassa 31 näkyy kaivon 4 pinnanmittausanturin lähettämä data kuukauden ajalta. Kuvan tulokset ovat päiviltä 23.9. – 20.10.2024.



Kuva 31. Kaivon pinnankorkeuden mittaukset kuukauden ajalta.

Jotta tuloksien lukeminen oli tarkempaa, poimitaan kuukauden mittaustuloksista yhden viikon tulokset Excelissä. Kuvassa 32 näkyvät yhden viikon mittaustulokset, jonka päivämäärät ovat 23.9. – 29.9.2024



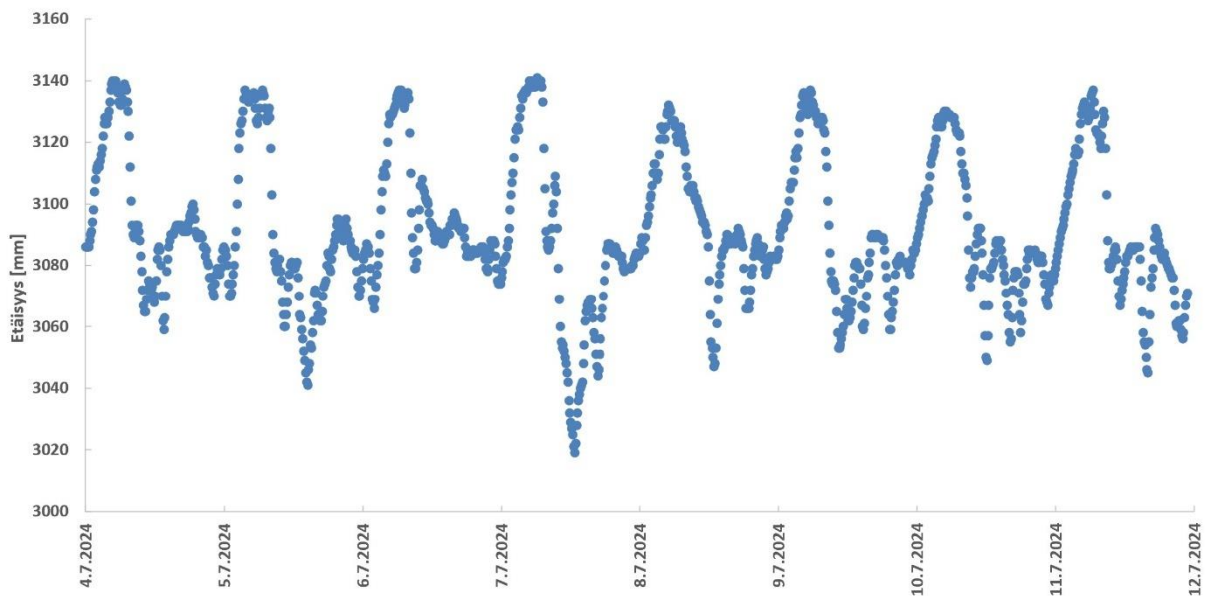
Kuva 32. Kaivon 4 pinnanmittaus viikon ajalta.

Taulukossa 4 on koottu päiväkohtaisesti pinnanmittausanturin viikon kuvaajan huippujen kellonajat sekä etäisyyksien arvot. Minimiarvoista on taulukoitu vain päivän pienin arvo.

Taulukko 4. Kaivon 4 viikon mittausjakson minimi- ja maksimiarvot taulukoituna.

	MA	TI	KE	TO	PE	LA	SU
	23.9.2024	24.9.2024	25.9.2024	26.9.2024	27.9.2024	28.9.2024	29.9.2024
MAX. etäisyys [mm]	3142	3137	3138	3137	3141	3129	3137
aika	5:06	4:48	5:01	5:33/6:23	5:56	6:28	4:40
MIN. etäisyys [mm]	3052	3055	3055	3052	3045	3055	3050
aika	18:47	9:59	16:52	13:34	16:47	11:49/15:29	16:31

Tutkiessa kaikkea tähän mennessä saatua pinnanmittausdataa, voidaan löytää poikkeava mittaustulos. Kuvassa 33 näkyy pinnanmittauksessa 7.7.2024 näkyvä pinnankorkeuden nouseminen.

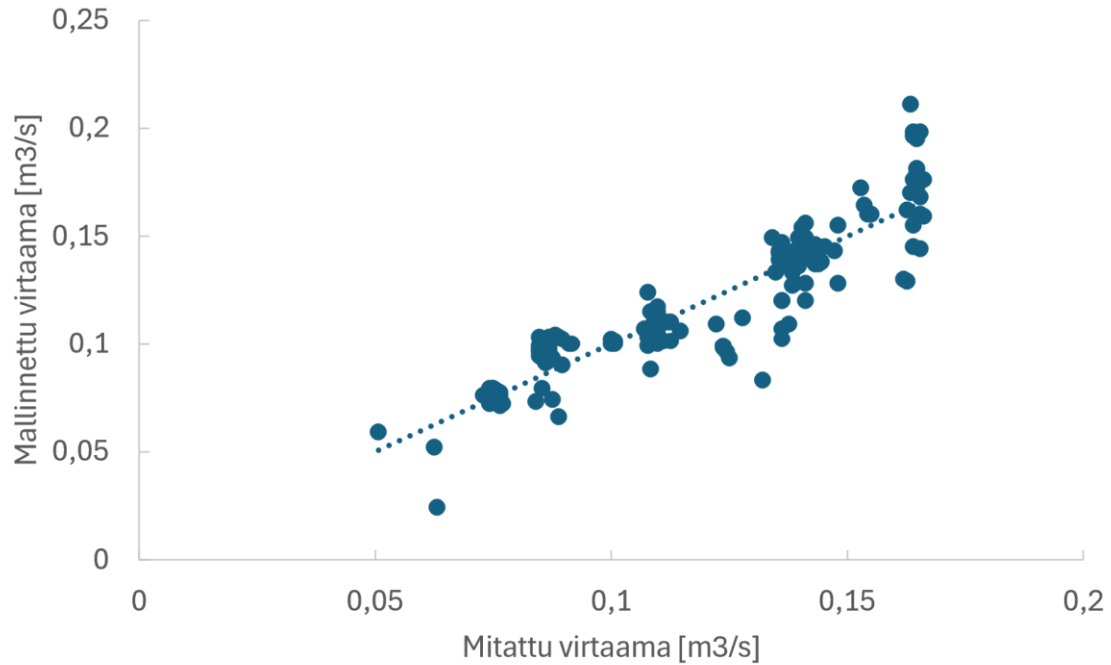


Kuva 33. Poikkeava pinnankorkeuden nousu heinäkuussa 2024.

Kaivon 4 mallinnuksen opetusvaiheessa muodostetuksi yhtälöksi saadaan

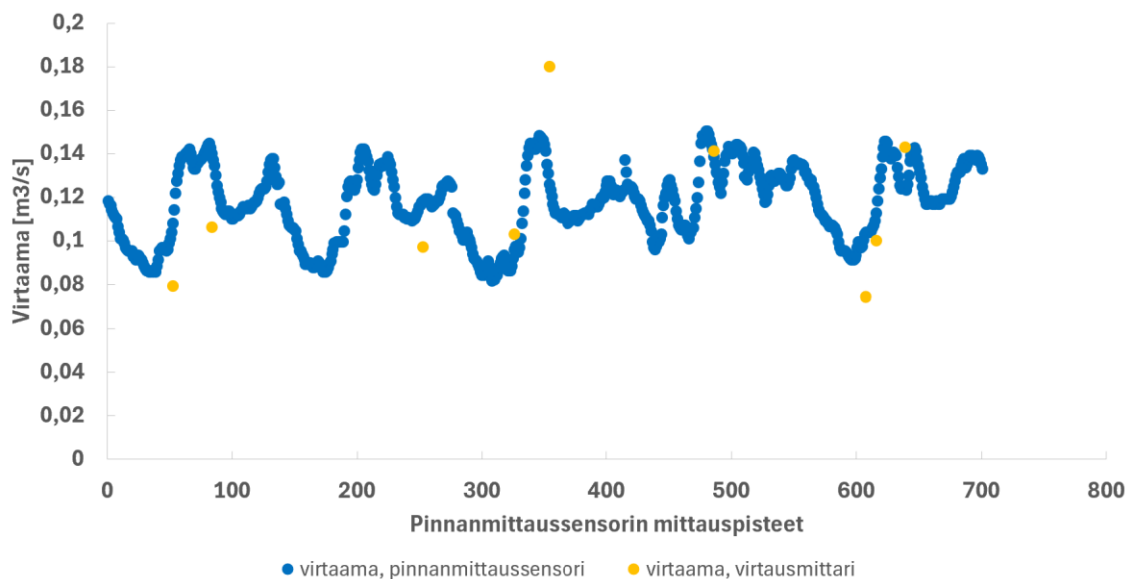
$$Y = -0,055690846 + 0,695735888 \cdot X$$

Opetusvaiheen mitatuista ja mallinnetuista virtaamista muodostetaan kuvassa 28 näkyvä sirontakuvio, joka kuvaa virtaamien suhdetta toisiinsa. Kuvaajasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,82, selitysaste on 0,68 ja keskivirhe on 0,014.



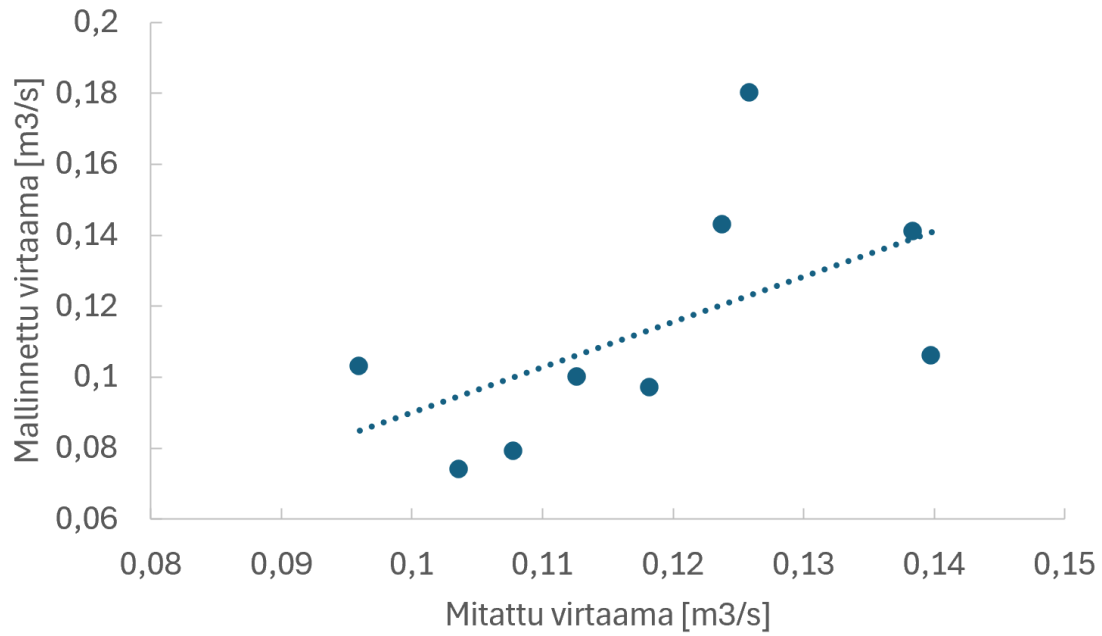
Kuva 34. Kaivon 4 opetusvaiheen sirontakuvio.

Testausvaiheessa käytettäviä virtausmittauksen kellonaikoja on 9, jotka sijoittuvat viidelle eri päivälle. Testausvaiheessa muodostetaan kuvaaja, joka visualisoi mallin onnistumista. Kuvassa 35 näkyy muodostettu kuvaaja.



Kuva 35. Mallin mallinnettu ja mitattu virtaama (testausvaihe).

Testausvaiheen mitatuista ja mallinnetuista virtaamista muodostetaan kuvan 36 mukainen lineaarinen regressiomalli. Kuvasta laskettu korrelaatiokerroin on 0,31, selitysaste on 0,01 ja keskivirhe on 0,013.



Kuva 36. Kaivon 4 mallinnetun virtaaman testausvaiheen sirontakuvio.

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Pinnanmittausanturit

Kaikista neljästä kaivoista on saatu osakseen yhteneviä pinnanmittaustuloksia. Pinnanmittausantureiden kuukauden kuvaajat näyttävät keskenään erilaisilta, mutta kaikista voidaan tunnistaa selkeä säännöllisyys pinnankorkeuden kuvaajassa. Kun kuukauden mittausjaksosta poimitaan yhden viikon mittausjakso, voidaan kuvaajissa huomata enemmän eroavaisuuksia sekä yhteneväisyyksiä kaivojen välillä. Viikon mittausjaksoista voidaan tunnistaa, että pinnankorkeuden vaihtelut etenevät vuorokauden ajanjaksoissa. Lisäksi huomataan, että pinnankorkeuden vaihteluväli pysyy suunnilleen vakiona. Tämä tarkoittaa sitä, että normaalissa tilanteessa jätevesikaivojen pinnankorkeuden vaihtelussa on säännöllinen jaksotus niin kellonaikojen kuin pinnankorkeuden puolesta. Suurimpana eroavaisuutena on selkeästi nähtävissä, miten pinnankorkeudet elävät minimi- ja maksimipisteiden välillä.

Etäisyyden mittaukseen voi aiheutua virheitä jäteveden epätasaisen koostumuksen vuoksi. Virtauksen pinnalla kelluva vaahto tai kiinteät partikkelit voivat osua etäisyyden mittaukseen, jolloin kelluvat partikkelit voivat lyhentää etäisyyttä hieman. Toinen virheiden lähde on pinnanmittausantureiden asennustelineet. Kaivojen kannet ovat lähtökohtaisesti vaakatasossa ja verkoston putket ovat viettoviemäreissä pienessä kaadossa. Pinnanmittareiden asennuksessa pyrittiin saamaan 90 asteen mittauskulma jäteveden pintaan. Koska viettoviemärin kaatoa ei määritelty erikseen sekä asennustelineet asennettiin silmämääräisesti, voi pienistä kulmien muutoksista tulla virhettä etäisyyksien mittoihin. Etäisyyden muutokset ovat kuitenkin verrattavissa toisiinsa jokaisen kaivon kohdalla, koska pinnanmittausanturit pysyvät paikoillaan telineissään.

Kaivon 1 viikon kuvaajan mittauspisteiden sijainteja tarkastellessa voidaan todeta, että melkein kaikki päivän aikaisista mittauspisteistä sijaitsevat lähellä etäisyyden minimiarvoja. Mittauspisteiden väli on 10 minuuttia, joten etäisyyden maksimiarvoissa ei viivytä kovin pitkään. Tämä tarkoittaa, päivän aikana pinnanmittausanturin etäisyys pysyy pääosin lähempänä minimiarvoja. Mittausjakson kuvaajasta voidaan tunnistaa, että vuorokauden sisällä pinnanmittausanturin etäisyyden maksimiarvoja on yksi kappale ja

etäisyyden minimiarvoja on useita kappaleita. Toisin muotoiltuna tämä tarkoittaa sitä, että jäteveden pinnankorkeuden minimiarvoja on selkeästi yksi kappale, mutta jäteveden pinnankorkeuden maksimiarvoja saavutetaan useammankin kerran päivän aikana. Taulukosta 1 huomataan, että viikon mittausjakson etäisyyden maksimiarvot vaihtelevat välillä 3249–3021 mm. Kellonaikojen puolesta vaihteluväli pysyy melkein tunnin sisällä, kello 6–7 välillä aamulla. Etäisyyden minimiarvojen kohdalla vaihtelua on enemmän, koska minimiarvojen määrä vaihtelee päivien välillä. Jos jokaiselta päivältä valitaan pienin etäisyys, vaihteluväli päivien välillä on 2835–2875 mm välillä. Kellonaikojen puolesta vaihtelu on selkeästi suurempaa.

Kaivolta 1 on viikon mittausjakson lisäksi saatu poikkeava pinnanetäisyyden arvo, joka näkyy kuvassa 16. Poikkeava etäisyyden arvo on saatu 21.8.2024 kello 13.28. Etäisyyden arvo poikkeamassa on 2758 mm, jonka huomataan olevan pienempi kuin normaalissa tilanteessa saatu etäisyyden minimiarvo. Tämä tarkoittaa sitä, että jäteveden pinnankorkeus on ollut kaivossa normaalia tilaa korkeampi.

Kaivon 2 viikon mittausjakson kuvaajan mittauspisteiden sijainteja tarkastellessa huomataan, että pisteiden sijoittuminen kuvaajaan on tasaisempaa verrattuna kaivon 1 pisteisiin. Mittauspisteitä sijaitsee enemmän minimiarvojen lähellä, mutta myös maksimiarvot erottuvat kuvaajasta useiden mittapisteiden vuoksi. Kuvaajasta voidaan tunnistaa, että vuorokauden sisällä pinnanmittausanturin etäisyyden maksimiarvot saadaan yhden kuvaajan huipun aikana. Etäisyyden minimiarvoja saavutetaan muutamana päivänä kahdesti, mutta kuvaajan muoto lähellä minimiarvoja vaihtelee päivien välillä. Taulukosta 2 huomataan, että viikon mittausjakson etäisyyden maksimiarvot vaihtelevat välillä 2937–2888 mm. Kellonaikojen puolesta vaihteluväli on 4:20–6:59 välillä, sillä tiistaina etäisyyden maksimi saavutettiin kahtena kellonaikana. Etäisyyden minimiarvojen kohdalla vaihtelua on enemmän, koska minimiarvojen määrä vaihtelee päivien välillä. Minimiarvojen vaihteluväli päivien välillä on 2675–2501 mm välillä. Minimietäisyyksien kellonajat painottuvat noin kello 21–23 välille.

Kaivolta 2 on viikon mittausjakson lisäksi saatu poikkeava pinnanetäisyyden arvo, joka näkyy kuvassa 20. Poikkeava etäisyyden arvo on saatu 10.10.2024 kello 2.28. Etäisyyden arvo poikkeamassa on 2455 mm, joka on pienempi kuin normaalissa tilanteessa saatu etäisyyden minimiarvo. Tällöin jäteveden pinnankorkeus on ollut kaivossa normaalia tilaa korkeampi.

Kaivon 3 viikon mittausjakson kuvaajan mittauspisteiden sijainteja tarkastellessa huomataan, että pisteiden sijoittuminen kuvaajaan on hyvinkin tasaista. Mittapisteitä sijaitsee tasaisesti minimi- ja maksimiarvojen välillä. Suurinta mittauspisteiden kasautumista on puolessa välillä huippujen välillä. Kuvaajasta voidaan tunnistaa, että vuorokauden sisällä pinnanmittausanturin etäisyyden maksimiarvot saadaan yhden kuvaajan huipun aikana. Etäisyyden minimiarvo saavutetaan vain yhtenä päivänä kahdesti, muuten kerran. Kuvaaja on malliltaan hyvinkin selkää ja tasainen, joten kuvaajan huippujen lukeminen on selkää tämän kaivon kohdalla. Taulukosta 3 huomataan, että viikon mittausjakson etäisyyden maksimiarvot vaihtelevat välillä 2270–2279 mm. Kellonaikojen puolesta vaihteluväli on 5:19-7:19 välillä. Minimiarvojen vaihteluväli päivien välillä on 2285–2169 mm välillä. Etäisyyden minimiarvoissa voidaan huomata selkeä painottuminen iltoihin, poikkeuksena tiistaina päivällä saavutettu minimiarvo. Minimietäisyyksien kellonajat painottuvat noin kello 21:30–22 välille.

Kaivon 4 viikon mittausjakson kuvaajan mittauspisteiden sijainteja tarkastellessa huomataan, että pisteiden sijoittuminen kuvaajaan on hyvinkin tasaista. Mittapisteitä sijaitsee tasaisesti minimi- ja maksimiarvojen välillä. Kuvaajassa on kuitenkin selkeästi enemmän piikkejä minimietäisyyksien puolesta. Kuvaajasta voidaan tunnistaa, että vuorokauden sisällä pinnanmittausanturin etäisyyden maksimiarvot saavutetaan yhden kuvaajan huipun aikana. Etäisyyden minimiarvo saavutetaan useasti päivässä, mutta näissä kohdissa kuvaaja on vaikealukuista. Tällä kaivolla etäisyyden muutokset eivät ole yhtä säännöllisiä kuin muilla kaivoilla. Taulukosta 4 huomataan, että viikon mittausjakson etäisyyden maksimiarvot vaihtelevat hyvin vähän etäisyyksien 3129–3142 mm välillä. Kellonaikojen puolesta vaihteluväli on 4:40-6:28 välillä. Minimiarvojen vaihteluväli päivien välillä on 3045–3055 mm. Etäisyyden minimiarvoissa voidaan huomata hyvin vaihtelevia kellonaikoja, mutta lähellä minimiarvoja käydään usean kerran päivässä.

Kaivolta 4 on viikon mittausjakson lisäksi saatu poikkeava pinnanetäisyyden arvo, joka näkyy kuvassa 27. Poikkeava etäisyyden arvo on saatu 7.7.2024 kello 12.41. Etäisyyden arvo poikkeamassa on 3019 mm, joka on pienempi kuin normaalissa tilanteessa saatu etäisyyden minimiarvo. Tämä tarkoittaa sitä, että jäteveden pinnankorkeus on ollut kaivossa normaalia tilaa korkeampi.

Kuten työssä tulee esille, jäteveden pinnankorkeus on verrannollinen jäteveden virtaamaan. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä korkeampi pinnankorkeus, sitä suurempi virtaama. Kaivojen kohdalla tämä tarkoittaa että, pinnanetäisyyden maksimiarvon eli jäteveden pinnankorkeuden minimiarvon kohdalla saavutetaan samalla virtaaman minimiarvo. Samalla pinnanetäisyyden minimiarvon eli jäteveden pinnankorkeuden maksimiarvon kohdalla saavutetaan myös virtaaman maksimiarvo. Jäteveden pinnankorkeuden ja virtaaman väliset suhteet ovat kaivokohtaiset tarkoittaen, että kaikilla kaivoilla virtaama ei kasva tai pienene samassa suhteessa kuin pinnankorkeus muuttuu.

Kaikkien kaivojen etäisyysmittauksia voidaan pitää luotettavina, koska kaikissa kuvaajissa on keskenään samankaltaisia ominaisuuksia sekä ilmiöiden säännöllisyys on kaikkia kuvaajia yhdistävä tekijä. Kaikissa kaivoissa etäisyyden maksimi eli pinnankorkeuden minimi ajoittuu aamuun ja etäisyyden minimi eli pinnankorkeuden maksimi ajoittuu iltana. Tämä rytmitys on suoraa riippuvainen jäteveden tuottajien vuorokausirytmistä. Jätevettä syntyy vähiten yöllä, minkä vuoksi pinnankorkeus verkostossa laskee kohti aamuyötä. Jätevettä syntyy eniten illalla esimerkiksi pesulla käymisen seurauksena, minkä vuoksi pinnankorkeus verkostossa nousee. Suurimpana eroavaisuutena etäisyyden kuvaajissa on etäisyyden muutoksien laajuus sekä sen rytmitys. Esimerkiksi kaivon 4 kuvaaja on epätasaisempi kuin kaivon 3, mutta epätasaisuus toistuu kaivon 4 kohdalla joka päivä. Tämän vuoksi epätasaisuuden voidaan todeta olevan kaivon ominaisuus.

Kaivolta 1,2 ja 4 on löydetty poikkeava pinnanetäisyyden muutos. Poikkeamien aikana kaivossa olevan jäteveden korkeus on ollut normaalia tilannetta korkeammalla. Poikkeavan arvon aikana jätevesiverkostossa on kulkenut normaalia enemmän jätevettä. Vuotovesien, kuten sateiden, on tunnistettu lisäävän jätevesiverkoston veden määrää. Näissä poikkeustilanteissa voisi siis olettaa, että pinnankorkeuden nousu on seurausta vuotovesistä.

Samankaltaisia tuloksia on löydetty Lillen yliopiston virtaustutkimuksessa, jota käsiteltiin työssä aikaisemmin. Virtaustutkimuksen tuloksissa virtaaman muutoksia käsiteltiin suhteessa kellonaikoihin. Koska virtaaman arvo lasketaan käyttäen pinnankorkeutta, voidaan virtaaman arvon ja pinnankorkeuden arvojen muutoksia verrata toisiinsa. Tutkimuksessa saatiin tulokseksi kaksi erilaista kuvaajaa. Kuvaajat ovat muodoltaan hyvinkin saman näköisiä, kuin tässä tutkimuksessa saadut viikon

mittausjakson kuvaajat sekä poikkeavan etäisyyden kuvaajat. Viikon mittausjaksosta on tunnistettu viikon aikainen säännöllinen virtaaman vaihtelu eri kellonaikojen mukaan, mikä pätee myös tämän tutkimuksen tuloksiin. Poikkeavan virtaamaa ennen Lillen kampuksen sääasema tallensi myrsky tapahtuman, jolloin on satanut merkittävä määrä vettä. Koska jäteveden määrän kasvu korreloi sadetapahtuman kanssa, voidaan olettaa jätevesiverkostolla ja hulevesiverkostolla olevan yhteys. Tämän vuoksi samanlaista korrelaatioita voidaan odottaa tapahtuvan myös tässä tutkimuksessa. (Abbas ym. 2017)

Myös Kajaanin Vedellä toteutetussa jätevesiverkoston virtaus selvityksessä on saatu samankaltaisia tuloksia. Selvityksen tavoitteena oli löytää jätevesiverkoston riittämättömyyden syy, koska ongelmat olivat pahimmillaan lumen sulassa sekä rankkasateiden aikana. Virtaus selvityksessä asennettiin 5 kannettavaa virtausmittaria runkoviemäreiden kattoon. Tuloksena saatiin kahden viikon virtauskuvaajat, joista nähtiin, että suurin virtaus jätevesiverkostossa ajoittui noin kello 20–21 aikoihin ja pienin virtaus noin kello 04–05 aikoihin. Tuloksista nähtiin lisäksi, mistä viidestä mittausalueelta tulee eniten vuotovesiä. Kuivana kautena jätevedenpuhdistamoon tulevat virtausmäärät ovat 8000–11000 kuutiometriä, mutta kesään sulamisvesien aikana määrä kasvaa jopa 28000 kuutiometriin. (Labkotec 2024b)

5.2 Virtausmittaukset ja mallinnukset

Mallien testauskuvaajissa on visuaalistettu muodostetun virtaamamallin toiminta. Kuvaajien pisteet ovat pääosin virtaaman arvoja, jotka on muodostettu käyttäen pinnanmittausanturin mittaamaa pinnankorkeutta. Kuvaajien yksittäiset pisteet ovat virtaaman arvoja, jotka on muodostettu käyttäen virtausmittarin mittaamaa pinnankorkeutta. Kaivojen kuvaajissa on keskenään erimäärä mallinnettuja pisteitä, koska virtausmittauksia on erimäärät.

Kaivon 1 kuvaajassa 663 pistettä pinnanmittausanturin mukaan sekä yhdeksän pistettä virtausmittarin mukaan. Kuvaajasta nähdään, että virtausmittauksien mukaan syötetyt pisteet osuvat pääosin pinnanmittausanturin mukaan mallinnettuihin pisteisiin. Kaivon 1 malli on onnistunut hyvin. Kuvaajasta voidaan arvioida lisäksi päivittäisiä virtaamatarvoja, koska kuvaajassa on pinnanmittausanturin mittapisteitä kokopäivältä, jolta on ainakin yksi virtausmittauksen piste kuvaajassa. Virtaaman arvot ovat luotu mallin

perusteella, minkä vuoksi arvossa on mallista aiheutuva virhemahdollisuus. Kaivon 1 mallin testauskuvaajassa suurin virtaama-arvo on 0,13 m³/s ja pienin virtaama-arvo on 0,020 m³/s. Kuvaajan keskimääräinen virtaama on 0,080 m³/s.

Kaivon 2 kuvaajassa on 579 pistettä pinnanmittausanturin mukaan sekä kahdeksan pistettä virtausmittarin mukaan. Kuvaajasta nähdään, että virtausmittauksien mukaan syötetyt pisteet ovat lähellä, mutta eivät aivan osu pinnanmittausanturin mukaan mallinnettuihin pisteisiin. Pisteet osuvat kuitenkin tasaisesti kuvaajan ylä- ja alapuolelle, joten mallinnuksen virhe on maltillinen. Kuvaajasta voidaan arvioida päivittäisiä virtaama-arvoja, jotka on luotu muodostetun mallin perusteella. Kaivon 2 mallin testauskuvaajassa suurin virtaama on 0,40 m³/s, pienin virtaama on 0,11 m³/s ja virtaaman keskiarvo on 0,28 m³/s.

Kaivon 3 kuvaajassa on 546 pistettä pinnanmittausanturin mukaan sekä neljä pistettä virtausmittarin mukaan. Kuvaajasta nähdään, että virtausmittauksien mukaan syötetyistä pisteistä vain yksi osuu pinnanmittausanturin mukaan mallinnettuihin pisteisiin täysin. Muut pisteet osuvat hieman pisteiden alapuolelle, mutta virhe on maltillinen. Kuvaajasta voidaan arvioida päivittäisiä virtaama-arvoja, jotka on luotu muodostetun mallin perusteella. Kaivon 3 mallin testauskuvaajassa suurin virtaama on 0,023 m³/s, pienin virtaama on 0,003 m³/s ja virtaaman keskiarvo on 0,013 m³/s.

Kaivo 4 kuvaajassa on 701 pistettä pinnanmittausanturin mukaan sekä yhdeksän pistettä virtausmittarin mukaan. Kuvaajasta nähdään, että vain yksi virtausmittarin mukaan mallinnetuista pisteistä osuu pinnanmittausanturin mukaan mallinnettuihin pisteisiin. Muut kahdeksan pistettä osuvat kuvaajan ylä- ja alapuolelle, joista osan virheet ovat suuriakin. Kuvaajan perusteella tämä malli ei onnistunut yhtä hyvin kuin muut mallit. Kuvaajasta voidaan arvioida päivittäisiä virtaamia, jotka on luotu mallin perusteella. Kaivon 4 suurin virtaama on 0,15 m³/s, pienin virtaama on 0,081 m³/s ja virtaaman keskiarvo on 0,12 m³/s.

Kaivojen mallinnettuja virtaama-arvoja vertaillen voidaan huomata hyvinkin erilaisia suuruusluokkia sekä vaihteluvälejä. Selkeästi suurin virtaama on saatu kaivolta 2 ja selkeästi pienin virtaama on saatu kaivolta 3. Keskimääräisesti suurin virtaama on kaivolla 2 ja pienin virtaama kaivolla 3. Syynä on todennäköisesti linjakoot, koska kaivo 2 on halkaisijaltaan suurimmassa linjassa ja kaivo 3 on halkaisijaltaan pienimmässä

linjassa. Kaivot 1 ja 4 ovat keskenään yhtä suurissa linjoissa, mutta selkeä eroavaisuus on pienimmässä virtaaman arvossa. Kaivon 1 kaikkia arvot ovat pienempiä kuin kaivolla 4, mutta selkein eroavaisuus on pienimmän virtaaman arvossa.

Kuvaajissa on useita kohtia, joihin virheet voivat vaikuttaa. Työssä aikaisemmin mainitut pinnanmittausanturin mahdolliset virheet vaikuttavat suoraan myös mallinnuksen tuloksiin. Merkittävin virheiden lähde on kuitenkin virtausmittaukset. Kaivo 1 on erittäin hyvä kaivo virtausmittauksien tekemiseen. Kaivon sijainti ei ole lähellä risteyskaivoa, joten virtaus on varmasti tasaantunut. Kaivo on kooltaan suuri, minkä vuoksi virtausmittauksien tekemiseen oli hyvin tilaa kaivossa. Virtausmittauksien aikana kaivon virtaus oli hyvin maltillinen, joten virtausmittauksen aikana arvot tasoittuvat nopeasti, jolloin virtausmittauksen tuloksista saatiin tasaisia. Virtausmittauksen tuloksilla on suora yhteys mallin kuvaajaan, joten kuvaajan perusteella virtausmittaukset ovat onnistuneet hyvin.

Kaivo 2 sijaitsee tutkimuksen suurimmassa jätevesilinjassa, mutta kaivo on kooltaan pieni suhteessa linjan kokoon. Tämä vaikutti virtausmittauksien tekoon siten, että virtausmittarin asetteleminen kaivoon oli hankalaa. Kaivo ei sijaitse lähellä risteyskaivoa, joten virtaus on kaivossa tasainen. Virtausmittauksien aikana kaivossa liikkui paljon jätevettä suuren halkaisijan vuoksi. Tämä vaikeutti virtausmittauksen tekoa, koska virtauksen voima kohdistui voimakkaasti virtausmittariin. Virtausmittauksien aikana arvot tasaantuivat nopeammin pienemmillä virtauksilla kuin suuremmilla.

Kaivo 3 sijaitsee pitkässä linjassa, johon oli kertynyt sakkaa pohjalle noin 15 cm. Sakka on selkeä virheen lähde tämän kaivon kohdalla. Pinnankorkeus laski pienimmillään sakan alapuolelle, jolloin todellista pinnankorkeutta on vaikeaa määrittää sekä virtauksen profiili on poikkeava sakan vuoksi. Virtausmittauksien aikana arvot tasoittuivat heti sekä pysyivät liki samoina koko mittauksen ajan. Virtausmittari on suunniteltu asetettavaksi sakattoman putken pohjalle, joten kaivon kohdalla on vaikeaa määrittää, kuinka sakka vaikutti virtausmittarin tuloksiin. Mallinnuksen tulokseksi saadun kuvaajan perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tuloksien virhe on maltillinen.

Kaivo 4 sijaitse risteyskaivosta seuraavassa kaivossa. Virtausmittauksien aikana huomattiin, että putken virtaus ei ole ehtinyt tasaantua risteyskaivon jälkeen. Virtausmittauksia tehdessä arvot eivät tasaantuneet, vaikka pinnankorkeus pysyi kaivossa

samana. Pienemmillä virtauksilla arvojen heittäly oli maltillisempaa kuin suuremmilla virtauksilla. Mallinnuksen tulokseksi saadun kuvaajan perusteella voidaan huomata huonompi tulos verrattuna muihin kaivoihin. Arvot ovat kuitenkin tasaisesti liian suuria tai pieniä, joten tulosta pystytään hyödyntämään huomattu virhe huomioiden.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että jätevesiverkoston virtaaman mallintaminen onnistuu pinnanmittausanturilla kerättyä mittausdataa hyödyntäen. On kuitenkin tärkeää huomata, että jokainen asennettu pinnanmittausanturi vaatii oman mallinsa, jonka luomiseen tarvitaan virtausmittauksia. Jokainen kaivo on oma yksilönsä, joka täytyy ottaa huomioon kaikissa vaiheissa. Pinnanmittausanturin asennuksessa liian pieni kaivo voi tuottaa ongelmia, koska täytyy varmistaa esteetön etäisyys pinnanmittausanturin ja jäteveden välillä. Lisäksi virtausmittauksien aikana täytyisi varmistaa pinnanmittauksen onnistuminen ilman, että virtausmittari häiritsee pinnanmittausanturin etäisyyden mittausta. Virtausmittauksien laadun vuoksi on tärkeää valita kaivon sijainti oikein. Ensinnäkin virtausmittauksien tekoon tarvitsee turvallisen ympäristön, jossa kaivon kannen voi avata. Tämä pudottaa vilkkailla autoteillä sijaitsevat kaivot pois vaihtoehtoista. Lisäksi kaivot eivät saa olla risteyskaivoja. Tutkimuksen aikana kuitenkin todettiin, että virtaus ei aina ehdi tasaantua risteyskaivosta seuraavalle kaivolle. Tämän vuoksi risteyskaivoa lähestyessä kannattaa varmistaa, kuinka tasainen risteyskaivon virtaama on, sekä näyttääkö mahdollisen mittauskaivon virtaus tasaiselta.

Mallintamisen onnistumisen kannalta on tärkeää varmistaa datan riittävä määrä sekä laatu. Pinnanmittausantureiden kannalta tämä tarkoittaa, että anturien täytyy olla toiminnassa virtausmittauspäivinä. Virtausmittauksien kohdalla datan riittävä laatu ja määrä perustuu virtausmittauksien suoran muodostumiseen kuvan 13 mukaisesti. Kuvaajan muodostumiseen vaikuttaa virtausmittauksen arvojen tasoittuminen sekä virtausmittauspisteiden määrä. Mitä laadukkaampi suora, sitä parempia virtausmittaustulokset ovat. Tässä tutkimuksessa kaivojen virtausmittauksien määrät vaihtelivat kaivokohtaisesti, mutta kaikista onnistuttiin muodostamaan suora. Mallintamisen lopullinen onnistuminen kuitenkin selviää vasta mallin testauskuvaajan perusteella.

Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää luotettavina. Jätevesiverkostossa on paljon muuttujia, joita teoriassa tulee harvoin huomioitua. Kaikille tutkimuksen poikkeamille kuitenkin löydettiin käytännön syy, mistä poikkeamat todennäköisesti johtuivat. Lisäksi mallinnuksessa syntyneet poikkeavat ovat suuruusluokaltaan pieniä, joten arvoja voidaan

hyödyntää mahdolliset virheet tiedostaen. Johtopäätöksenä voidaan siis todeta tutkimuksen onnistuneen. Pinnanmittausanturia voidaan käyttää jätevesiverkoston virtaaman mallintamiseen. Nykyiset pinnanmittausanturit saavat jäädä paikoilleen, mikäli kyseisten jätevesilinjojen seuraamista halutaan jatkaa. Mikäli pinnanmittausantureihin kosketaan, on tärkeää huomioida mahdolliset etäisyyksien muutokset mallissa.

Ehdotuksena jatkotoimenpiteisiin on pinnanmittausantureiden hyödyntäminen tarkemmin määritellyillä virtausalueilla. Tähän tutkimukseen valittujen kaivojen takana on pinta-alaltaan suuria alueita, jolloin virtaamadata perusteella ei voida kertoa jäteveden syntypaikkaa. Sijoittamalla pinnanmittausanturit johonkin pienemmälle alueelle, voidaan esimerkiksi tarkkailla alueen vuotovesiä tai jäteveden virtaaman käyttäytymistä. Esimerkiksi saneerauskohteesta voitaisiin saada ennen ja jälkeen dataa, miten saneeraus on vaikuttanut vuotoprosentteihin. Samalla tavalla pinnanmittausantureita voitaisiin hyödyntää vuotovesien paikantamiseen esimerkiksi asuinalueelta. Pinnanmittausanturia voidaan hyödyntää joko pinnankorkeuden seuraamiseen tai virtaaman mallintamiseen, joka vaatii mallin luomisen. Pelkästään pinnankorkeutta seuraamalla voidaan tunnistaa myös tutkimuksessa havaittuja poikkeavia pinnankorkeuden nousuja. Asettamalla pinnanmittausanturi esimerkiksi asuinalueelle, voidaan pinnankorkeuden muutoksista kertoa, aiheutuiko sateesta tai lumensulamisesta vuotovesiä kyseisellä alueella.

7 YHTEENVETO

Jätevesiverkostot sekä siihen kuuluvat kaivot ja pumppaamot ovat oleellinen osa vesihuollon järjestelmää. Jätevesiverkostot ovat kaikkialla erilaisia riippuen esimerkiksi maaperän ominaisuuksista, mutta ne koostuvat samoista komponenteista eri suhteessa. Jätevesiverkostoja yhdistävät samat fysikaaliset ilmiöt sekä samat ongelmat liittyen jätevesiverkoston hallintaan. Vuotovedet ovat tunnettu ongelma jätevesiverkostoissa. Vuotovesien määrää pyritään pienentämään erilaisilla ratkaisuilla, koska vuotovesistä aiheutuu haittaa niin jätevesiverkostolle kuin jätevedenpuhdistamolle. Vuotovesien kohdalla on kuitenkin tärkeää tiedostaa, että kaikkea vuotovettä on mahdoton poistaa.

Jätevesiverkoston virtausmittaukset ovat yksi tapa parantaa hallintaa sekä lisätä verkoston seurattavuutta. Virtausmittauksia toteutetaan tilavuusmittauksilla pumppuasevilla, kiinteillä mittauslaitteilla sekä laskennallisilla menetelmillä. Ultraäänimittarit ovat kiinteitä mittauslaitteita, joita voidaan hyödyntää pinnankorkeuden ja virtaaman mittaamiseen. Laskennallisilla menetelmillä tarkoitetaan digitaalisia ratkaisuja kuten erilaisia mallintamiseen perustuvia menetelmiä.

Työn tutkimuskohteena toimi Oulun alueen neljä jätevesiverkoston kaivoa. Tutkimuksen mittaukset toteutettiin käyttäen ultraäänellä toimivaa pinnanmittausanturia ja ultraääniristikorrelaatioteknologialla toimivaa virtausmittaria. Pinnanmittausanturit asennettiin kaivoihin asennustelineellä ja virtausmittari oli kannettavaa mallia. Pinnanmittausanturin lähettämistä tiedoista hyödynnettiin pinnanetäisyyttä ja virtausmittauksen tuloksista hyödynnettiin virtaamaa sekä pinnankorkeutta. Pinnanmittausanturit oli asennettu kuukausia ennen virtausmittauksien aloittamista, jolloin pinnanetäisyys dataa oli kertynyt jo etukäteen. Lopulliset virtausmittauksien määrät vaihtelivat kaivojen välillä, koska osasta kaivoista saatiin nopeammin riittävä määrä dataa. Datan riittävä määrä ja laatu arvoitiin virtausmittauksista muodostetun kuvaajan perusteella.

Virtausmittauksien arvojen perusteella luotiin regressioanalyysityökalun avulla suoran yhtälö, joista saatiin jokaiselle kaivolle omat mallinsa. Mallin luomisen jälkeen siirryttiin testausvaiheeseen, jossa hyödynnettiin yhteneviä aikoja virtausmittauksien ja pinnanmittauksien väliltä. Testausvaiheessa laskettiin virtaaman arvot käyttäen muodostettua mallia ja verrattiin niitä toisiinsa. Ensin virtaama-arvot laskettiin

pinnanmittausanturille, jonka etäisyys oli muutettu jäteveden pinnankorkeudeksi. Toiset virtaama-arvot laskettiin virtausmittauksien pinnankorkeuden perusteella ajoilta, jotka osuivat yhteen pinnanmittauksien kanssa. Tulokseksi saatiin kuvaaja, jossa kulkee rinnakkain mallilla luotujen arvojen pisteet. Lisäksi tuloksia saatiin pinnanmittausantureista. Jokaiselta kaivolta kerättiin pinnanmittausdata kuukauden ja viikon ajalta. Kolmen kaivon datasta oli lisäksi löydetty poikkeava mittaustulos, jossa jäteveden pinnankorkeus oli ollut tavallista korkeammalla.

Pinnanmittausantureiden tuloksien kuvaajista voitiin tunnistaa selkeitä samakaltaisuuksia kaivojen välillä. Selkeimpänä yhtenäisyytenä oli pinnankorkeuden maksimien ajoittuminen iltaan sekä pinnankorkeuden minimien ajoittuminen aamuun, mikä toistui päivästä toiseen. Viikon aikaisista kuvaajista voitiin siis tunnistaa seitsemän päivää kuvaajan muodon perusteella. Suurimpana eroavaisuutena oli kaivojen yksilölliset piirteet kellonaikojen sekä pinnankorkeuden muutoksien suhteen. Kolmesta kaivosta löytyneisiin poikkeaviin pinnankorkeuden arvoihin nähtiin selityksenä vuotovedet, sillä samanlaisia poikkeamia oli tunnistettu myös muualla tehdyissä tutkimuksissa.

Mallien testauksesta luoduissa kuvaajissa tulokset vaihtelivat kaivokohtaisesti. Osassa kaivoista kuvaajan pisteet osuivat paremmin yksiin kuin toisissa. Selkeää eroavaisuutta tuova tekijä oli mittauspisteiden eriävät määrät kaivojen kesken. Muut eroavaisuudet johtuivat todennäköisesti erinäisistä virheiden lähteistä, joiden määrät ja roolit vaihtelivat kaivojen välillä. Mallinnuksen kuvaajien ja metriikan perusteella kaivon 1 mallinnus oli toteutunut parhaiten, joka voisi olla seurausta kaivon ominaisuuksista, jotka olivat mittauksien kannalta parhaimmat.

Tutkimuksen lopputulokseksi saatiin, että pinnanmittausanturia voidaan käyttää virtaaman mallintamisessa. Kaivokohtaiset virheet täytyy ottaa huomioon, mutta kokonaisuudessa virheiden määrä ei ole merkittävä. Jätevesiverkostossa on aina muuttujia, joita ei pystytä kontrolloimaan. Tämän vuoksi jokin määrä virheitä täytyy hyväksyä ja pyrkiä minimoimaan hallitsemattomien virheiden osuus.

LÄHDELUETTELO

Abbas, O., Abou Rjeily, Y., Sadek, M., Shahrour, I., 2017. A large-scale experimentation of smart sewage system. *Water and Environmental Journal* 31 (4), 515–521.

<https://doi.org/10.1111/wej.12273>

Bach, P., Rauch, W., Mikkelsen, P., McCarhy, D., Deletic, A., 2014. A critical review of integrated urban water modelling – Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling & Software*, 54, Pages 88–107. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.018>

Boulos, P. ja Walker, A., 2015. Fixing the Future of Wastewater Systems with Smart Water Network Modeling. *Journal - American Water Works Association*, 107, 72–80.

<https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0057>

Corominas, L., Zammit I., Badia S., Pueyo-Ros J., Maria Bosch M., Calle E., Martínez D., José Chesa M., Chincolla C., Martínez A., Llopart-Mascaró A., Javier Varela F., Domene E., Garcia-Sierra M., Garcia-Acosta X., Satorras M., Raich-Montiu J., Peris R., Horno R., Rubión E., Simón S., Ribalta M., Palacín I., 2024. Profiling wastewater characteristics in intra-urban catchments using online monitoring stations. *Water Sci Technol*, 89 (6), 1512–1525. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.069>

Eeronheimo O., 2022. NB-IoT ja sen soveltuvuus paikannuksessa. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. 35 s. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202205094569> (viitattu 7.11.2024)

Florian F., ja Spuhler D., 2024. Conventional Sewers (Combined Sewers). Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox – SSWM.info. Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology). Sveitsi: Seecon international gmbh. Saatavissa: [https://sswm.info/sswm-university-course/module-2-centralised-and-decentralised-systems-water-and-sanitation/further/conventional-sewers-\(combined-sewers\)](https://sswm.info/sswm-university-course/module-2-centralised-and-decentralised-systems-water-and-sanitation/further/conventional-sewers-(combined-sewers)) (viitattu 30.9.2024)

Giberti M., Kaan Dereli R., Bahramian M., Flynn D., Casey E., 2024. Forecasting wastewater flows and pollutant loads: A comparison of data-driven models within the urban water system framework. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12 (5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113478>

Hietala H., 2024. WWDData Vesilaitosten digitalisointia – Jätevesiverkoston datan hallinta ja innovatiiviset sovellukset: Tiedon mallintaminen; pilvipalvelut ja rajapinnat sekä avoin data (WP4) – Loppuraportti. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa: <https://www.wwdata.fi/tietoa/> (viitattu 2.12.2024)

Hietala H., Annanperä E., Rossi P., Tomperi J., Taskinen P., Liukkunen K., 2021. WWDData Vesilaitosten digitalisointia – Jätevesiverkoston datan hallinta ja innovatiiviset sovellukset: Nykykarttoitus ja vertailevien ratkaisujen etsiminen (WP2) - Väliraportti. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa: <https://www.wwdata.fi/tietoa/> (viitattu 2.12.2024)

Karttunen E., ja Heikkinen M., 2010. RIL 237-2-2010 Vesihuoltoverkostojen suunnittelu, mitoitus ja suunnittelu. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 162 s. ISBN 978-951-758-521-7

Karttunen E., ja Tuhkanen T., 2003. RIL 124-1 Vesihuolto I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 314 s. ISBN 951-758-431-8

Kuntaliitto, 2021. Hulevesiopas. Helsinki: Suomen Kuntaliitto. 297 s. Saatavissa: <https://www.kuntaliitto.fi/julkaisut/2012/1481-hulevesiopas> (viitattu 25.9.2024)

Labkotec, 2009. bullerin measure: NFP poisti jätevesimäärän mittausheitot. Pirkkala: Labkotec Oy. 1 s. Saatavissa: <https://labkotec.fi/fi/reference/muuramen-kunta/> (viitattu 25.11.2024)

Labkotec, 2019. bulletin measure: Jätevedenpuhdistamolla mittaustarkkuus on ympäristöteko. Pirkkala: Labkotec Oy. 1 s. Saatavissa: <https://labkotec.fi/fi/reference/kokemaen-jatevedenpuhdistamo/> (viitattu 25.11.2024)

Labkotec, 2024a. Virtausmittaus: Valintaopas 5.3 Virtausmittaukset. Pirkkala: Labkotec Oy. 4 s. Saatavissa: https://labkotec.fi/fi/product_group/virtausmittaus/ (viitattu 25.11.2024)

Labkotec, 2024b. Virtausmittaus: OCM Pro CF tuote-esittely ja tekniset tiedot [verkkodokumentti]. Kangasala: Labkotec Oy Saatavissa: https://labkotec.fi/fi/product_group/virtausmittaus/ (viitattu 26.11.2024)

Labkotec, 2024c. Virtausmittaus kulman takana. Pirkkala: Labkotec Oy. Saatavissa: <https://labkotec.fi/fi/reference/vaasan-vesi/> (viitattu 25.11.2024)

Labkotec, 2024d. Kajaanin Veden virtausmittausprojekti: Siirrettävillä virtausmittareilla tarkka kuva viemäriverkoston tilanteesta. Pirkkala: Labkotec Oy. 3 s. Saatavissa: <https://labkotec.fi/fi/reference/kajaanin-vesi/> (viitattu 25.11.2024)

Labkotec, 2024e. NFM750 kannettava virtausmittalaite. Pirkkala: Labkotec Oy. Saatavissa: <https://labkotec.fi/fi/product/nfm750-kannettava-virtausmittalaite/> (viitattu 26.11.2024)

Lehto K., 2015. Sekaviemäristä erillisviemäreiksi: Teknis-taloudellisia tarkasteluja. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu. 60 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/89841> (viitattu 24.9.2024)

Moilanen P., 2020. Vuotovesien vaikutukset erillisviemäriverkoston toiminnassa ja saneerauksessa. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202001131224> (viitattu 11.12.2024)

Moretti A., Lynn Ivan H., Skvaril J., 2024. A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible? *Journal of Water Process Engineering* 60.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105061>

Nivus GmbH, 2010. NIVUS flow measurement technology with cross correlation method [video]. Saksa: NIVUS GmbH Saatavissa:
<https://www.youtube.com/watch?v=SG7dDRFq3Cs> (viitattu 26.11.2024)

Nivus, 2024. Flow Meter, NivuFlow Mobile 750. Saksa: NIVUS GmbH. Saatavissa:
<https://www.nivus.com/en/products-solutions/measurement-systems/flow-measurement-for-liquids/flow-meters-part-filled/flow-meter/nivuflow-mobile-750> (viitattu 7.11.2024)

Pumppaamot.fi, 2024. Mikä on pumppaamo. Saatavissa: <http://www.pumppaamot.fi/>
(viitattu 27.11.2024)

Scribd, 2024. GRUNDFOS – Sewage Handbook – Low. 118 s. Saatavissa:
<https://www.scribd.com/document/28664745/GRUNDFOS-Sewage-Handbook-low>
(viitattu 27.11.2024)

Strauffer B., ja Spuhler D., 2024. Pressurised Sewers. Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox – SSWM.info. Sveitsi: seecon international gmbh. Saatavissa:
<https://sswm.info/sswm-university-course/module-2-centralised-and-decentralised-systems-water-and-sanitation/further/pressurised-sewers> (viitattu 30.9.2024)

Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2023. Vesihuoltolaitosten tunnuslukujärjestelmän raportti 2022. Helsinki: Vesilaitosyhdistyksen julkaisusarja nro 76. 91 s. Saatavissa:
<https://www.vvy.fi/verkkokauppa/tuotteet/tunnuslukuraportti-2022-pdf/> (viitattu 10.10.2024)

Tietoarkisto, 2024a. Regressioanalyysi [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen yliopisto. Saatavissa:

<https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/regressio/analyysi/> (viitattu 3.12.2024)

Tietoarkisto, 2024b. Korrelaatiodiagrammi – SPSS-harjoitus 1 [verkkodokumentti].

Tampere: Tampereen yliopisto. Saatavissa:

https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/kuviot/korrelaatio_harjoitus1/ (viitattu 4.4.2025)

Trimble, 2025. Paikkatietojärjestelmä. Oulu: Oulun Vesi (viitattu 14.1.2025)

Vesilaitosyhdistys, 2024. Ammattiasiaa verkostoista ja pumppaamoista. Helsinki:

Suomen Vesilaitosyhdistys Oy. Saatavissa: <https://www.vvy.fi/vesihuolto/verkotot-ja-pumppaamot-ammattiasiaa/> (viitattu 24.9.2024)

Vihannin Vesi Oy, 2024. Viemärijohdot. Vihanti: Vihannin Vesi. Saatavissa:

<https://www.vihanninvesi.fi/liittyminen/viemarijohdot> (viitattu 11.12.2024)