

Tero Ojanen

# FLOKKIKUVANTAMISEN ANALYYSIN AUTOMATISOINTI PINTAVESIEN PRO- SESSOINNISSA

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Biotuotetekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Tero Ojanen
Työn nimi	Flokkikuvantamisen analyysin automatisointi pintavesien prosessoinnissa
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Kuitulaboratorio, HUVA-hanke
Vuosi	2021
Sivut	54 sivua
Työn ohjaajat	Timo Riikilä, Yrjö Hiltunen

## TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli kehittää Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratorion HUVA-hankkeen käyttöön automaatio- ja analyysisovellus, jolla pystytään suorittamaan flokkianalyysiä reaaliaikaisesti pintaveden puhdistusprosessissa. Reaaliaikaisesti suoritettava sovellus antaa mahdollisuuden suodattaa kuvadatasta pois linssin likaantumisen aiheuttamat vääristymät, minkä myötä on mahdollista saada entistä tarkempaa analyysidataa.

Sovellus toteutettiin Matlab-ohjelmistolla, jonka sisältämät kuvankäsittely- ja analyysifunktiot mahdollistavat analysoinnin automatisoinnin. Matlab-ohjelmistolla on mahdollista kääntää sovellus itsenäisesti ajettavaksi. Sovelluksen analyysiosan toiminnan perustana on binarisointifunktio, jolla kuvadatasta erotellaan alueet herkkyysparametrin avulla.

Sovelluskehityksen osana oli sovelluksen stressitesti, jossa testattiin sovelluksen vakautta ja analyysiosan toimivuutta. Vertailemalla aikaisempaan eriaikaiseen analyysiin voitiin havaita uuden sovelluksen kuvien parempi laatu. Myöskin prosessointiaikaa säästyy sovelluksen tuottaessa analyysidataa reaaliaikaisesti.

Automaatiosovellus tekee otetuista kuvasarjoista varmuuskopiot, jotka on kuitenkin mahdollista analysoida jälkikäteen eriaikaisella sovelluksella ja testata erilaisten parametrien vaikutusta analyysiin.

Sovelluksen keräämästä datasta voitiin päätellä, että syklisesti toimivassa floottaatioprosessissa flokkaantumismieli ei ole stabiili johtuen prosessin ylös- ja alasajosta. Myös herkkyysparametrin valinnalla voidaan vaikuttaa virheellisesti flokeiksi tunnistuvien alueiden määrään, kuitenkin liian pieni herkkyysarvo aiheuttaa myös hajonneiden flokkien tunnistamattomuutta ja flokeiksi tunnistuvien alueiden pinta-alan pienentymistä.

**Asiasanat:** flokkulaatio, kuva-analyysi, automaatio

Degree	Bachelor of Engineering
Author	Tero Ojanen
Thesis title	Flocculation imaging analysis automation in surface water purification process
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences, Fiberlaboratory, HUVA project
Time	May 2021
Pages	54 pages
Supervisors	Timo Riikilä, Yrjö Hiltunen

## ABSTRACT

The purpose of this thesis was to develop an automation and analysis application to be used by the HUVA project. The main goal was to carry out a flock analysis in an online state in the surface water purification process. The application gives an option to filter out the distortions from the picture data, which are caused by the fouling of the lens, which makes it possible to get more accurate analysis data than before.

The application was programmed with Matlab software which contains image processing and analysis functions, that make the automation of the analysis possible. It is possible to compile the application to be run independently from the Matlab software. The basic function of the analysis part of the software is the binarize function, that allows to separate the areas from the picture data by utilizing a sensitivity parameter for the filtering.

A part of the development was a stress test of the application in which the stability of the application and the quality of the analysis function were tested. The application made possible to acquire better quality pictures compared to the earlier macro method and offline analysis. Also, processing time is saved compared to the earlier offline analysis. The automation application makes back-up copies of the series of pictures, allowing them to be analyzed afterwards with the offline application and test out the effect of different parameters.

From the data collected by the application one can conclude that the flocculation phenomenon of the cyclically operating flotation process is not stable due to the constant starts and shutdowns of the purification process. The data also shows, that the choice of sensitivity parameter affects the amount of the areas incorrectly recognized as flocks. However, too small a sensitivity discards partial flocks from the analysis and reduces the area of the recognized flocks.

**Keywords:** flocculation, image analysis, automation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	FLOKKULAATIO PINTAVESIPROSESSISSA .....	7
3	MATLAB-OHJELMOINTI.....	9
4	MITTALAITTEISTON RAKENNE JA TOIMINTA .....	11
5	AUTOMAATIOSOVELLUS .....	17
5.1	Sovelluksen ulkopuoliset makrot ja ohjauslogiikan koodit.....	19
5.2	Initialisointi .....	20
5.3	Silmukan aloitus.....	20
5.4	Ensimmäinen pesu .....	21
5.5	Taustakuvat .....	21
5.6	Näytteenotto .....	22
5.7	Kuvaus.....	22
5.8	Pumpun huuhtelu.....	22
5.9	Toinen pesu .....	23
5.10	Kuvien varmuuskopiointi.....	23
5.11	Analyysi .....	23
5.11.1	Kuvien komposiitti ja komposiitin tallennus .....	23
5.11.2	Analyysi ja analyysin tallennus .....	24
5.12	Odotus .....	24
5.13	Silmukan päättäminen ja paluu silmukan alkuun .....	25
5.14	Automaatiosovelluksen pysäyttäminen .....	25
6	KOESUUNNITELMA .....	25
7	TAUSTAKUVALLA TEHTÄVÄN SUODATUKSEN VAIKUTUS ANALYYSIIN .....	26
7.1	Raakakuva.....	27
7.2	Suodatettu kuva.....	28
7.3	Analyysin toimivuus .....	30
8	ANALYYSIN HERKKYYSARVON VALINTA .....	34

9	FLOKKIEN PEITTÄMÄT PINTA-ALAT KOKOALUEELLA 0,01–0,1 MM <sup>2</sup> .....	37
10	VERTAILU SAMEUSMITTARIN DATAAN.....	42
10.1	Kokoalueen 0,01–0,1 mm <sup>2</sup> vertailu sameusmittarin NTU-arvoihin .....	42
10.2	Kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm <sup>2</sup> vertailu sameusmittarin NTU- arvoihin.....	45
10.3	Kaikkien flokkien peittämän alueen vertailu sameusmittarin NTU-arvoihin .....	47
11	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	49
	LÄHTEET.....	52
	KUVALUETTELO .....	53

## 1 JOHDANTO

Puhtaan juomaveden valmistusprosessi on elintärkeä osa yhteiskuntaa, ja tämän prosessin tehokkuuden tarkkailu tarvitsee luotettavia analyysimenetelmiä. Tätä prosessia on tutkittu Suomessa vain vähän, keskittyen lähinnä laboratorioissa tehtäviin kemiallisiin analyysihin. Varsinaisesta prosessin toiminnasta ei ole ollut saatavilla tarkkoja mittaustuloksia. Suomessa valmistetaan juomavettä myös pintavedestä johtuen järviveden helposta saatavuudesta. Tämä prosessi on kuitenkin erityisen herkkä vedessä olevan kasvipohjaisen materiaalin, mikrobien, eliöstön sekä ihmisen aiheuttaman saastumisen vaikutuksille. Humuksen poisto pintavedestä on prosessin ensimmäisiä vaiheita, ja tämä tapahtuu kemiallisten ja mekaanisten menetelmien yhdistelmällä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää automaatiosovellus, jonka tehtävänä on hoitaa flokkimittauslaitteiston ohjaus ja suorittaa reaaliaikainen analyysi prosessiympäristössä. Flokkimittausten kohteena on Savonlinnan veden pintaveden puhdistukseen käyttämän flotaatioprosessin sekoitusallas. Vedenpuhdistamo ei ole jatkuvatoiminen, vaan se toimii ainoastaan kello 8–16. Puhdistamo on kuitenkin toiminnassa myös viikonloppuisin ja pyhäpäivinä.

Flokkianalyysin kehityksen tarkoituksena on tuottaa dataa, jota voidaan hyödyntää pintaveden puhdistusprosessin kehittämiseksi ja optimoinnissa. Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratorion HUVA-hanke on yhteistyössä Savonlinnan ja Kuopion vesilaitosten kanssa kehittänyt automaattista jatkuvatoimista mittalaitteistoa, jota hyödynnettiin tässä opinnäytetyössä. Flokkien koko ja muoto ovat osatekijöinä puhdistusprosessin onnistumisessa ja tätä dataa ei perinteisillä mittauksilla ole voinut tuottaa, ainoa mahdollisuus reaaliaikaiselle datalle on automatisoitu näytteenotto-, kuvaus- ja analyysijärjestelmä. Tulevaisuudessa automaattisen laitteisto- ja sovelluskombinaation tuottamaa dataa voidaan hyödyntää tuotetun juomaveden laadun parantamisessa ja käytettävän flokkaukemikaalin määrän sekä kemiallisen ja mekaanisen prosessin optimoimisessa. Näin ollen voidaan mahdollistaa entistä puhtaamman juomaveden tuottaminen aikaisempaa pienemmillä kustannuksilla.

Automaatiosovellus täytyy kehittää laitteiston jo ollessa vedenpuhdistamolla toiminnassa, mikä aiheuttaa haasteita sovelluksen toimintavarmuudelle ja stabiiliudelle. Tästä syystä on tarpeen siirtää aikaisempi kuvausmenetelmä suoraan suoritettavaksi uudella sovelluksella, sillä laitteiston suora ohjaaminen sovelluksella vaatisi testausta laboratorio-olosuhteissa. Testausprosessi aiheuttaa kuitenkin myös katkoja mittausdatan keräämiseen.

Automaatiosovellusta on tarkoitus testata ensin lyhyemmillä koejaksoilla ja tämän jälkeen suorittaa stressitesti, joka kestää noin viikon. Stressitestin aikana tarkoituksena on antaa sovelluksen toimia mahdollisimman pitkään keskeytyksettä ja minimoida mahdollisesti tehtävät muutokset. Sovelluksen jatkokehitys tapahtuu HUVA-hankkeen osana. Stressitestin aikana kerätystä analyysistä on tarkoitus muodostaa päätelmiä sovelluksen toimivuudesta ja vertailla saatuja tuloksia perinteisellä sameusmittauksella saatuihin tuloksiin. Stressitestin perusteella on tarkoitus kartoittaa sovelluksen jatkokehityksen tarpeet.

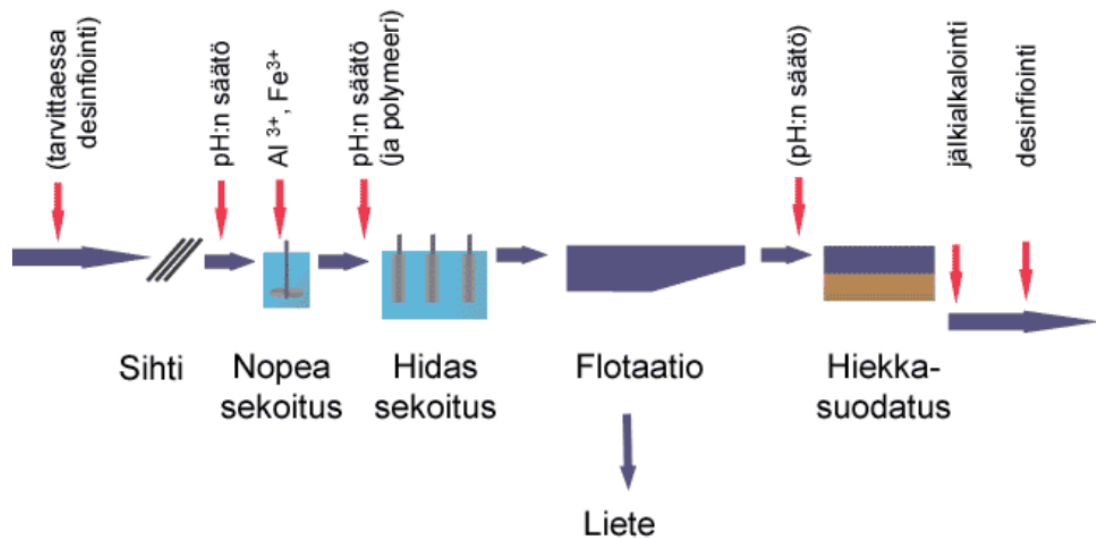
## **2 FLOKKULAATIO PINTAVESIPROSESSISSA**

Pintaveden puhdistaminen juomavedeksi on prosessina herkkä, sillä pintaveden fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset ominaisuudet ovat herkkiä ympäristössä tapahtuville muutoksille. Suomessa on kuitenkin käytettävissä huomattavia määriä pintavettä, joten suurempien asutuskeskusten on myös turvaututtava pintaveden puhdistamiseen juomakelpoiseksi vedeksi. Veden puhdistus tapahtuu kemiallisesti ja mekaanisesti. (Ojanen & Hiltunen 2021; Juntunen ym. 2014, 2–12.)

Flokkulaatiossa pintaveteen lisätään kemikaalia, jotta pintaveden sisältämät humuspartikkelit muodostavat kimppuja eli flokkeja. Flokkulaatio tapahtuu sekoitusaltaassa, jossa vettä sekoitetaan ja siihen lisätään saostuskemikaalia. Flokkien muodostumiseen vaikuttavat kemikaalin lisäksi veden pH, lämpötila, vuodenaika, sekoitusprosessi sekä humuspitoisuus. Flokkulaation jälkeen kimput poistetaan vedestä flotaatiolla tai laskeutuksella. (Huoltovarmuuskeskus 2020 8–20; Juntunen ym. 2014, 2–12.)

Flotaatiossa eli vaahdottamisessa humuksen muodostamat kimput nousevat altaan pintaan ilmakuplien avulla, josta ne poistetaan mekaanisesti. Flotaatio-prosessissa olennaista on flokkien optimaalinen koko, muoto ja massa, joten näiden ominaisuuksien optimoimiseksi tarvitaan flokkulaatiovaiheen kuvantamista ja mallinnusta. (Huoltovarmuuskeskus 2020, 8–20.)

## Kemiallisesti puhdistetun veden valmistus



Kuva 1. Kemiallisesti puhdistetun veden valmistus (Knowpulp 2021)

Kuvassa 1 on esitetty kemiallisesti puhdistetun veden flotaatioprosessi. Flokkauskemikaalit lisätään sekoitusaltaissa, jonka jälkeen vesi johdetaan flotaatioaltaisiin. Yleensä flotaation jälkeen vesi vielä puhdistetaan mekaanisesti hiekkasuodatuksen avulla. Yleisimpiä käytettyjä flokkauskemikaaleja ovat alumiinisulfaatti, ferrikloridi, ferrisulfaatti ja ferrosulfaatti. (Juntunen ym. 2014, 2–12; Knowpulp 2021.)

Flokkulaatio on fyysisesti ja kemiallisesti heterogeeninen prosessi. Flokkien muodostumiseen vaikuttavat partikkelien sähkökemialliset ominaisuudet, jotka ovat riippuvaisia raakaveden pH-arvosta. Myös epäorgaaniset yhdisteet kuten silikonioksidi-ionit ( $\text{SiO}_2^-$ ), hydroksidi-ionit ( $\text{OH}^-$ ), fluori-ionit ( $\text{F}^-$ ), fosfaatti-ionit ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) ja sulfaatti-ionit ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) vaikuttavat flokkaantumiseen, kuten myös fulvo- ja humushapot. Olennaista on partikkeleiden varauksen neutralointi, joka mahdollistaa kimppujen muodostumisen. Optimaalinen pH-arvo ei ole



tarkkaan määriteltävissä, sillä tämä muuttuja on riippuvainen raakaveden laadusta. Flokkien muodostumiseen myös vaikuttavat veden hydrauliset ilmiöt, kuten esimerkiksi sekoittimien nopeus ja veden virtausnopeus. (Juntunen ym. 2014, 2–12; Knowpulp 2021.)

Flokkien ominaisuuksien selvittäminen on perinteisesti ollut ongelmallista vedenpuhdistuksessa, johtuen prosessin dynamiikasta, vuodenaikojen aiheuttamasta vaihtelusta ja kemiallisten reaktioiden monimutkaisuudesta. Veden zeta-potentiaalin ja pH:n mittaaminen ovat olleet vaihtoehtoina flokkaantumislmiön tarkkailuun vedenpuhdistusprosessin aikana. Kemiallisten reaktioiden mekanismit ovat myöskin osittain tuntemattomia. Flokkien kuvantaminen on hyvä keino tutkia flokkaantumislmiön toimintaa. Flokeista voidaan selvittää koko ja muoto, joihin vaikuttavat veden pH, flokkien kappalemäärä, veden lähde ja veden laatu, sekä flokkien väri. Flokkien väriin vaikuttaa veden lähde, sillä esimerkiksi pohjaveden rautapitoisuus on suurempi kuin pintaveden. (Juntunen ym. 2014, 3–10.)

### 3 MATLAB-OHJELMOINTI

Matlab on data-analyysiin, algoritmien kehitykseen, rinnakkaiseen laskentaan ja sovellusten kehitykseen tarkoitettu ohjelmisto. Matlabilla on mahdollista kääntää koodista ajettavia sovelluksia, jotka eivät ole riippuvaisia siitä, onko varsinainen kehitystyökalu asennettu koneelle. Matlabilla on mahdollista visualisoida numeerista dataa, mahdollisuus kuvien visuaaliseen esittämiseen ja myöskin näiden rinnakkaiseen vertailuun. (Mathworks Inc 2021.)

Automaatiosovelluksen analyysiosassa on hyödynnetty Matlabin kuvantunnistuksen, kuvankäsittelyn sekä kuva-analyysin työkaluja. Ohjelmistolla on mahdollista toteuttaa myös rinnakkaisesti, toisistaan riippumattomasti toimivia toimintoja, joita on hyödynnetty analyysiosion ajamisen nopeuttamisessa ja tehostamisessa. (Mathworks Inc 2021.)

```
BW = imbinarize(I,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.4);
```

Yllä esitetyn ohjelmakoodin toimintona on muuntaa harmaasävykuva binaariseen muotoon, jossa käytettävät värit ovat ainoastaan valkoinen tai musta.

Tähän muotoon muunnetuista kuvista on mahdollista laskea partikkelit ohjelmallisesti. Ohjelmakoodin esimerkissä muuttuja BW on binarisoidun kuvan tallentamiseen käytetty muuttuja, muuttuja I on alkuperäinen harmaasävykuva, parametri 'adaptive' määrittelee funktion toimimaan adaptiivisessa tilassa, tämä on tarpeen kuvissa, jotka eivät ole tasalaatuisia vaan niissä on esimerkiksi linssin likaantumisen aiheuttavaa vääristymää. Tässä adaptiivisessa tilassa funktio vertailee kuvaa pienemmältä alueelta ja määrittelee tälle alueelle erillisen raja-arvon alueen ensimmäisen asteen statistiikalla muodostetun histogrammin perusteella. Tällöin pikselin lähialueen muista pikseleistä muodostetaan tilasto niiden harmaasävyjen arvoista suhteessa kappalemääriin. Arvolla 0 pikseli on täysin valkoinen ja arvolla 255 pikseli on täysin musta. Tästä intensiteettien tilastosta otetaan keskiarvo, johon tulkittavana olevaa pikseliä verrataan. Pikselin arvon ollessa keskiarvoa suurempi, määritellään pikseli mustaksi ja pikselin arvon ollessa keskiarvoa pienempi, määritellään pikseli valkoiseksi. Termit 'ForegroundPolarity' 'dark' määrittelevät linssin etualan tummemmaksi kuin taustan, tämä täytyy asettaa taustavalollisten kuvien analysointia varten. Termit 'Sensitivity' ja 0.4 määrittelevät partikkeleiden tunnistamiseen käytetyn herkkyyden. Liian pieni herkkyydsarvo aiheuttaa partikkeleiden tunnistamattomuutta, kun taas liian suurella herkkyydsarvolla tunnistuu kuvassa olevia häiriöitä partikkeleiksi, lopulta aiheuttaen koko kuvausalueen tunnistamisen yhdeksi partikkeliksi. (Mathworks Inc 2021.)

```
Stats = regionprops('table',BW,'Area','Eccentricity');
```

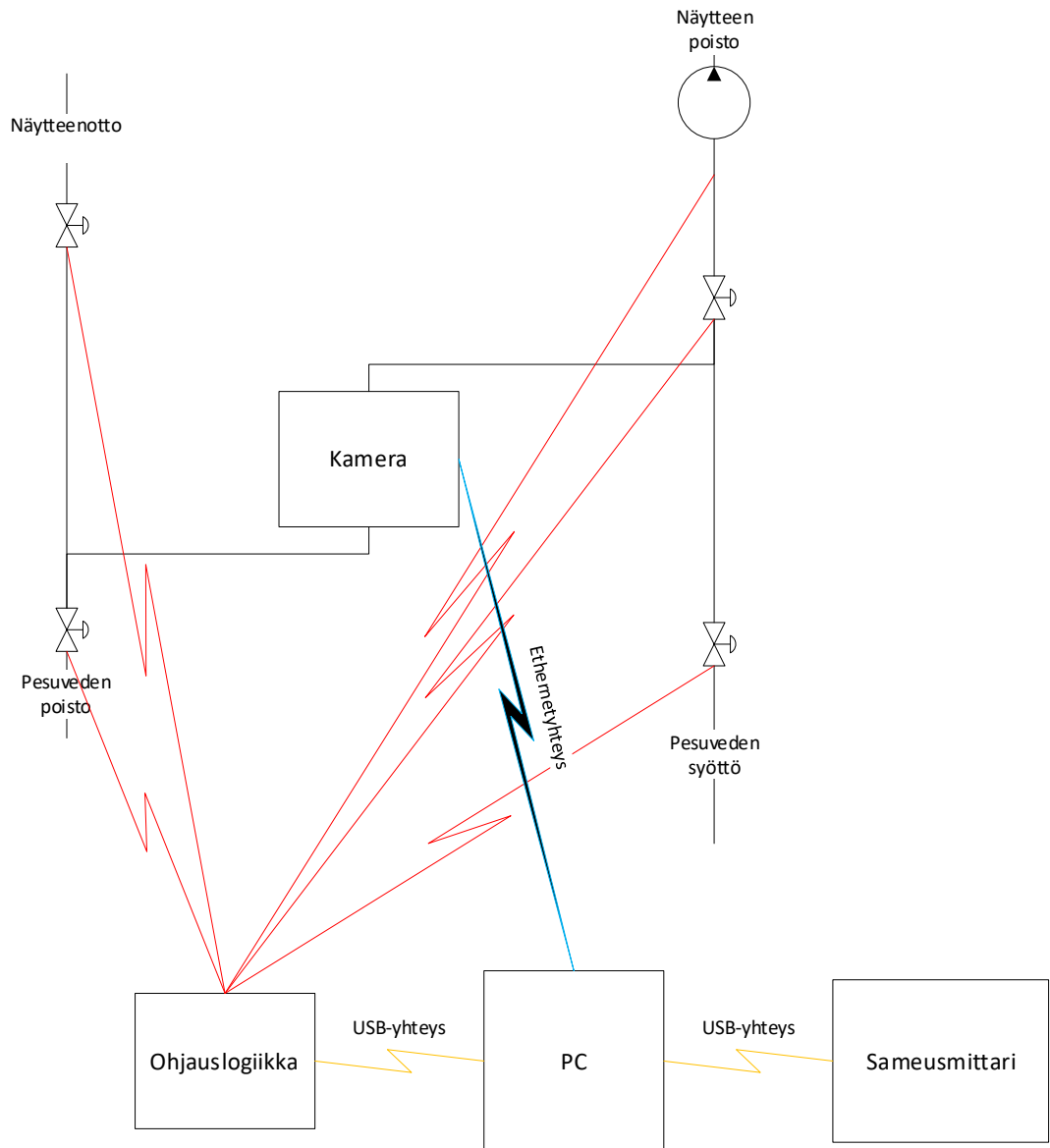
Yllä esitettyssä funktiossa stats-muuttujaan tallennetaan regionprops-funktion antamat tiedot. Termi 'table' määrittelee funktion tallentamaan tiedot taulukkomuodossa, muuttuja BW on analysoitava kuva, joka on täytynyt binarisoida aikaisemmin ja termit 'Area' ja 'Eccentricity' käskivät tallentamaan taulukkoon yksittäisten alueiden pinta-alan pikseleinä sekä eksentrisyyden. Eksentrisyyden arvolla 1 mitattava partikkeli on ainoastaan viiva ja arvolla 0 partikkeli on täydellinen ympyrä. (Mathworks Inc 2021.)

```
parfor loopVar = initVal:endVal;
statements;
end
```

Parfor-funktiolla on mahdollista ajaa silmukoita rinnakkaisesti ja epädeterministisesti. Rinnakkaisilla silmukoilla jokainen instanssi toimii itsenäisesti riippumatta toisistaan ja näiden silmukoiden instansseilla ei ole mahdollista vaihtaa tietoja toistensa välillä, joten kaikkien instanssien tarvitsemat tiedot täytyy ladata muistiin ennen silmukoiden käynnistämistä. Jokainen instanssi hyödyntää yhtä tietokoneen prosessorin ydintä, joka mahdollistaa moniytimisissä järjestelmissä laitteiston resurssien tehokkaamman käytön ja analyysin nopeutumisen. Nämä instanssit eivät kuitenkaan tue hypersäikeistämistekniikalla (HT) tuotettuja ylimääräisiä loogisia ytimiä, ainoastaan fyysisten ytimien hyödyntäminen on mahdollista. HT-tekniikalla aikaansaatuja loogisia ytimiä on kuitenkin mahdollista hyödyntää muiden ohjelmistojen toiminnassa ja ne ovat käyttöjärjestelmän käytössä. Käytännön testauksissa neliytimisellä järjestelmällä parfor-silmukan käyttämä prosessointiaika oli noin 30 % yhtä ydintä käyttävään perinteiseen for-silmukkaan verrattuna. Parfor-silmukan käyttäminen kuitenkin yleensä vaatii käytännön testausta, sillä osassa tapauksia yksinkertainen for-silmukka saattaa olla tehokkaampi. For-silmukan muuntaminen parfor-silmukaksi saattaa vaatia muutoksia koodiin. (Mathworks Inc 2021.)

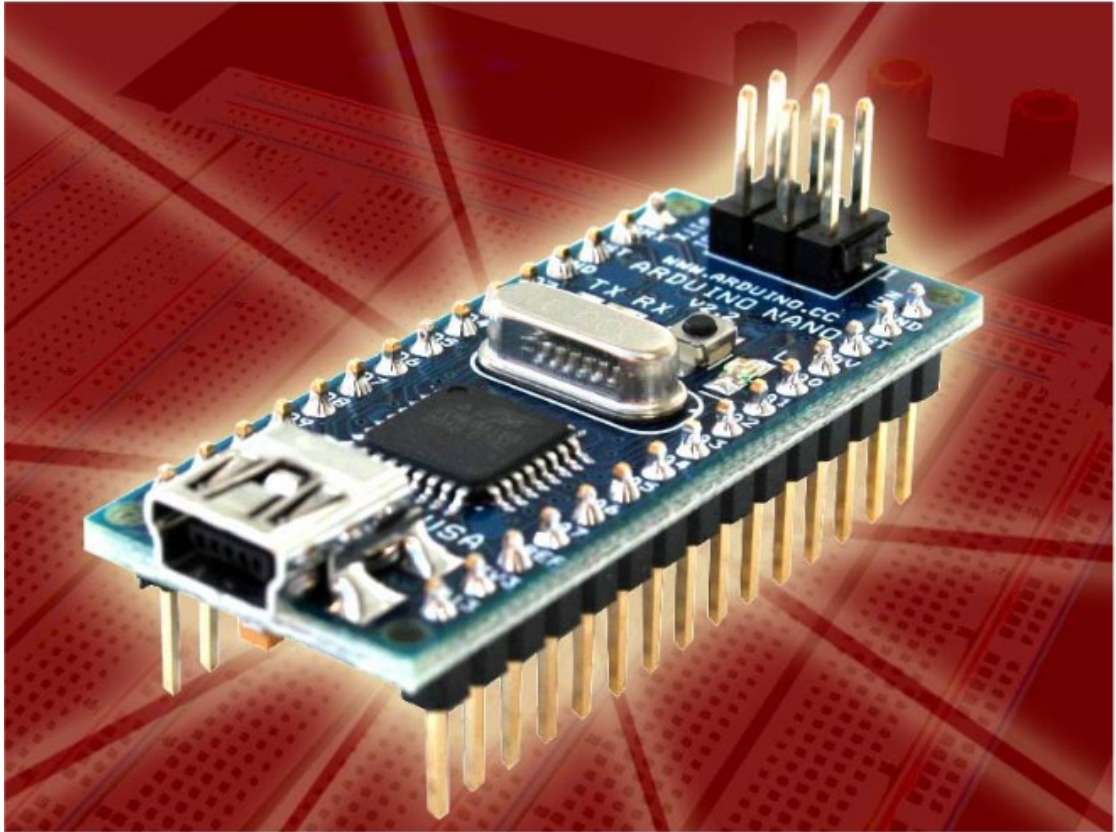
#### **4 MITTALAITTEISTON RAKENNE JA TOIMINTA**

Sovelluksen kehittämisen kannalta oleellista oli mittalaitteiston rakenteen selvittäminen. Laitteistona on käytetty Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratorion ”HUVA – Humuspitoiset pintavedet juomaveden valmistuksessa” –hankkeen Valmet Automationsilta lainassa olevan Basler scA1400-30gm -kameran ympärille toteutettua laitteistoa. Kamera ottaa kuvat harmaasävyisinä, joten laitteistolla ei ole mahdollisuutta analysoida flokkien väriä, ainoastaan kokoa, kappalemäärää ja muotoa. Kameran resoluutio on 1392 x 1040 pikseliä ja pikselin koko on 3,3 x 3,3 mikrometriä. Kuvausalueen pinta-ala on 15,7 mm<sup>2</sup>. Kamera on koteloitu ja kohdistettu kyvetiin, jonka läpi näyte virtaa. (Kauppi ym. 2020, 238–240.)



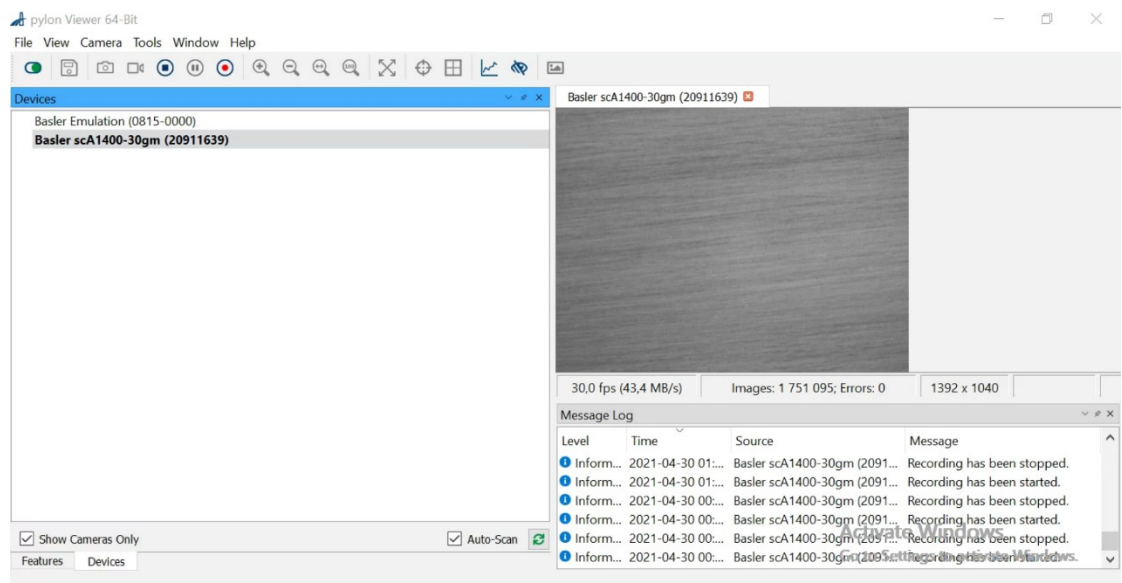
Kuva 2. Mittalaitteiston rakenne

Kuvassa 2 on esitetty laitteiston rakenne. Laitteistoon kuuluvat venttiilit näytteenottoa, pumppausta ja pesuveden kiertoa varten, letkupumppu, näiden ohjaukseen tarvittava elektroniikka sekä Arduino Nano -logiikkapiiri, joka toimii automaation ohjauspiirinä. (Kauppi ym. 2020, 238–240.)



Kuva 3. Arduino Nano-logiikkapiiri (Arduino Nano user manual 2008)

Kuvassa 3 on esitetty Arduino Nano -logiikkapiiri. Laitteistoa ohjataan kannettavalla tietokoneella, johon on yhdistetty ethernet-yhteydellä kamera ja USB-väyliin sameusmittari ja ohjauslogiikka. Kameraa ohjataan Baslerin Pylon Viewer -ohjelmistolla. (Kauppi ym. 2020, 238–240.)



Kuva 4 Basler Pylon Viewer -ohjelmisto

Kuvassa 4 on esitetty kuvausohjelmiston käyttöliittymä. Kuvauksen ohjaaminen tapahtuu työkalurivillä olevista painikkeista. Ohjelmistolla on mahdollista ottaa yksittäisiä kuvia, asettaa kamera reaaliaikaiseen tilaan, jolloin oikealla olevassa ikkunassa näkyy kameran kuva, sekä mahdollisuus käynnistää ennalta määrätyn mittaisen kuvasarjan tallennus. Tämä kuvasarja on mahdollista tallentaa yksittäisinä kuvatiedostoina tai videotiedostona.

Laitteistoon on toteutettu etäyhteys mobiilireitittimen kautta, joka mahdollistaa laitteiston hallinnan, ylläpidon, sovelluskehityksen sekä kuvien siirron. Reitittimen ja ohjaustietokoneen välinen yhteys on täytynyt muodostaa WLAN-yhteydellä, sillä laitteiston ainoa ethernet-portti on varattuna kameran käyttöön. Laitteistossa on neljän teratavun ulkoinen kiintolevy, jolle kuvat varmuuskopioidaan. Kuvista on tehty myös varmuuskopiot HUVA-projektin Teams-alustalle sekä verkkolevyille. Mittalaitteisto rakennettiin Kuitulaboratoriolla keväällä 2020 ja sitä testattiin Savonia AMK:n pintaveden puhdistusprosessia simuloivalla pilottilaitteistolla touko- ja kesäkuussa 2020. Samanaikaisesti testattavana oli Pixact Ltd:n kaupallinen flokkianalysaattorilaitteisto, joka oli hankittu Kuitulaboratoriolle HUVA-hankkeen tiimoilta. (Kauppi ym. 2020, 238–240.)



Kuva 5. Mittalaitteisto (Kauppi 2020)

Kuvassa 5 on esitetty koteloimattoman laitteiston rakenne. Kameran läpivirtauksen varmistamiseksi kamera on kohotettuna noin 50 senttimetrin korkeuteen. Kuvassa vasemmalla on muovilaatikko, joka sisältää ohjauselektronikan ja ohjaustietokoneen. Laitteiston rakenteeseen on tehty muutoksia kuvan ottamisen jälkeen, jotta laitteisto mahtuisi koteloinnin sisälle. Samalla myös muutettiin pesuveden virtaus vastakkaiseksi näytteenottoon nähden, jotta likaantumista tapahtuisi mahdollisimman vähän.

Laitteiston aikaisempi toiminta perustui kameran makro-ohjaukseen, joka oli synkronoitu ohjauslogiikalle ladattavan ohjelmiston kanssa. Tämä käynnistäminen tapahtui manuaalisesti, ohjauslogiikan koodin latauduttua piti makro käynnistää oikeaan aikaan. Tästä oli mahdollista aiheutua synkronointiongelmia, jos makro käynnistettiin liian aikaisin tai liian myöhään. Synkronointiongelmiin välttämiseksi näytteenottoon käytetty aika oli suhteellisen pitkä, kolme minuuttia ja järjestelmä täytyi käynnistää uudelleen viikoittain hyvän synkronoinnin varmistamiseksi. Aikaisemmassa toiminnassa kuvasarjalle ei ollut vertailevaa taustakuvasarjaa ja analysointi täytyi suorittaa siirtämällä kuvat etäyhteydellä ja analysoida ne eriaikaisella sovelluksella. Etäyhteydellä tapahtuva siirto ja analyysin ajaminen manuaalisesti olivat aikaa vieviä operaatioita, joista aiheutui tarve kuvausprosessin automatisoinnille.

Kameran makro-ohjaus on ollut jossain määrin vikasietoinen, kuvauksen keskeytyminen ethernet-yhteyden ongelmien vuoksi on voinut kuitenkin aiheuttaa epätäydellisten kuvasarjojen tallentumisen. Erilaisten ulkoisten tekijöiden vaikutuksen minimoimiseksi laitteistolle suunniteltiin yksinkertainen kotelointi. Pääasiallisena tarkoituksena oli estää kameran vahingoittuminen kuljetuksen aikana.



Kuva 6. Mittalaitteisto koteloituna

Kuvassa 6 on esitetty laitteistolle myöhemmässä vaiheessa toteutettu kotelointiratkaisu. Koteloinnissa on läpiviennit letkuille ja johdoille, alustan alla on pyörät liikuttelun helpottamiseksi. Kuvan ottamisen jälkeen koteloon lisättiin vielä kahvat. Kuvassa oikealla ylhäällä näkyy sameusmittarin, virtajohdon ja mobiiliyhteyden antennin läpivienti. Kuvassa vasemmalla ylhäällä näkyy mobiiliyhteyden antenni. Pelkkä reitittimen sisäinen antenni ei riitä vakaaseen mobiiliyhteyden laitosympäristössä, joten ulkoinen antenni on magneettikiinnityksellä koteloinnin ulkopuolella kuuluvuuden maksimoimiseksi.

Laitteistoon kertyy pitkien, kuukausia kestävien kuvausjaksojen aikana likaa, joka aiheuttaa ongelmia linssin likaantumisen muodossa. Linssin puhdistaminen täytyy suorittaa manuaalisesti. Aikaisemman eriaikaisen analyysisovelluksen toiminnassa oli tämä huomioitu ja analyysissä vertailtiin kuvasarjan aikaisempia kuvia analysoitavaan kuvaan, jotta voitiin suodattaa kuvissa näkyvä staattinen likaantuminen. Johtuen kuvien konvertoinnissa tapahtuvasta keskiarvottamisesta ja binarisoinnista sekä valaistusolosuhteiden muutoksista ei



tämä toiminto kuitenkin antanut haluttuja lopputuloksia ja näin ollen analyysituloksiin kertyi vähitellen kohinaa, joka lopulta peitti mittaustulokset kokonaan.

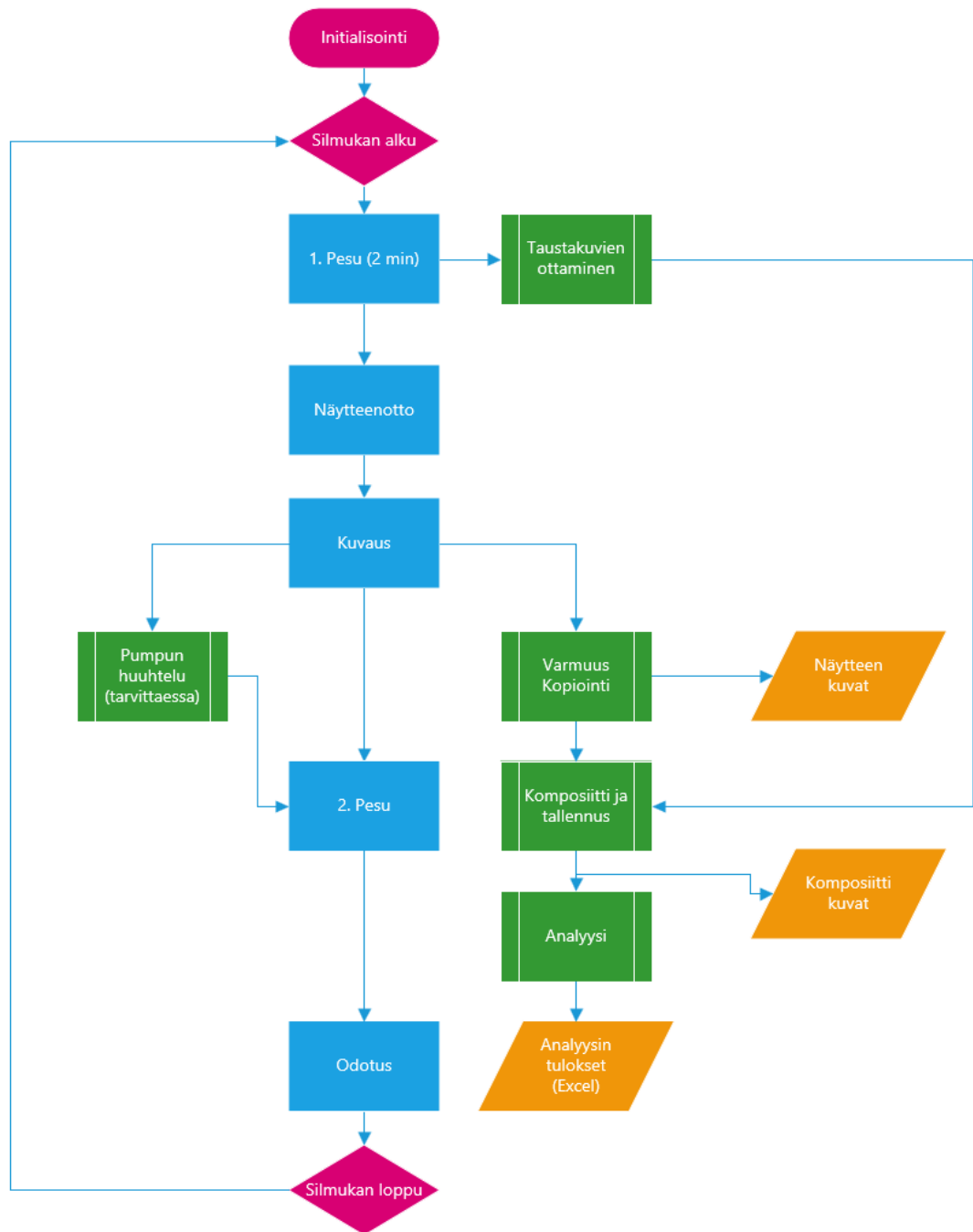
## 5 AUTOMAATIOSOVELLUS

Flokkulaation reaaliaikaiset monitorointijärjestelmät ovat suurimmaksi osaksi olleet kalliita ja vaatineet monimutkaisia ohjaussovelluksia. Pelkkä laitteisto ei ole riittävä täyttämään monitoroinnin vaatimuksia, analyysisovelluksen kehittäminen on jopa tärkeämmässä asemassa kuin varsinainen laitteisto. Matlab-ohjelmistolla tapahtuva järjestelmän kontrollointi ja samanaikaisesti tapahtuva analysointi on erittäin hyvä tapa tuottaa dataa kustannustehokkaasti. (Juntunen ym. 2014, 10–12.)

Automaatiosovelluksen kehitystyön ensimmäisenä vaiheena oli määritellä automaatiosovellukselle asetetut vaatimukset. Sovelluksen täytyy pystyä ohjaamaan laitteistokokonaisuutta ilman valvontaa, suoriutumaan kuvauksesta, suorittaa analyysi ja tallentaa tuotettu data. Sovelluksella täytyy olla vikasietoisuutta ja sen täytyy olla tarpeeksi stabiili pitkäaikaisiin ajoihin. Sovelluksen parametrien täytyy olla muutettavissa ilman sovelluksen uudelleenkäntämistä, tarvittaessa parametrien muuttamisen täytyy olla myös mahdollista sovelluksen ollessa jo käynnissä.

Sovelluksen kehitystyö tapahtui sovelluksen modulaarisen rakenteen ehdoilla. Sovellukselle asetetut vaatimukset jaettiin jokainen omaan ohjelmistomoduliin. Jokaista toimintoa kehitettiin erikseen, joka vaati käytännön testausta eriaikaisessa ympäristössä simuloituna, sekä testausta varsinaisella mittalaitteistolla. Sovelluskehityksen loppuvaiheessa erilliset moduulit yhdistettiin sovelluksen päärunkoon.

Analyysisovelluksen perusrakenteena on while-silmukka, joka on määritetty päättymättömäksi. Käynnistyessään sovellus suorittaa alkutoimenpiteet eli initialisoinnin. Tiettyjä sovelluksen käyttämiä asetuksia ja muuttujia on koodattu sovellukseen kiinteästi, pääasiassa erilaisia viiveaikoja ja funktioiden asetuksia, joiden muuttaminen ei ole toiminnan kannalta hyödyllistä.



Kuva 7. Automaatiosovelluksen toiminnan lohkokaavio

Kuvassa 7 on esitetty automaatiosovelluksen toimintaperiaate, josta voidaan nähdä osan toiminnoista tapahtuvan rinnakkain, sovelluksen perustoiminnan ollessa kuitenkin lineaarista.

Osa sovelluksen pääsilmukan toiminnoista on ulkoistettu ajettaviin makro- ja komentorivitiedostoihin, sillä automaatiologiikan ja kameran suora ohjaus olisi vaatinut testausta laboratorio-olosuhteissa. Näin ollen, toimintavarmuuden maksimoimiseksi, aikaisemmin käytössä olleet rakenteet oli virhetilanteiden välttämiseksi käynnistettävä automaatiosovelluksen sisältä.

Koska kuvaus suoritetaan ulkoisella ohjelmistolla, on ohjelmiston asetusten oltava asetettuna valmiiksi oikein etukäteen. Kuvausohjelmistossa on määriteltävä tallennuskansioksi automaation käyttämä kuvauskansio, otettavien kuvien kappalemäärä ja kuvien ottamisen välillä oleva aika. Oletuksena kuvien välillä oleva aika on ollut 0,75 sekuntia. Liian nopealla kuvien välillä olisi mahdollista, että samat flokit näkyvät edelleenkin kuvissa. Tämä kuvien väliin jäävä aika on riippuvainen pumpun imutehosta. Kuitenkin linssin likaantumisen välttämiseksi on näytteenottoaika syytä pitää mahdollisimman lyhyenä.

Tämä osio kuvaa automaatiosovelluksen viimeisimmän version toimintaa. Sovelluksen kehityksen aikana havaitut puutteet ja toiminnallisuudet on lisätty sovellukseen tarvittaessa. Automaatiosovelluksen toiminnan kannalta on oleellista asentaa kohdekoneelle Matlabin runtime-kirjasto, joka mahdollistaa applikaatioiden ajamisen. Sovellus käännetään ajettavaksi sovellukseksi, joka kutsuu tarvittaessa kirjastosta tarvittavia funktioita. Sovelluksen uusien versioiden asentamiseen riittää uuden ajettavan tiedoston siirtäminen etäyhteyden välityksellä. Sovelluksen ensimmäisen asennuksen aikana täytyy manuaalisesti luoda sovelluksen tarvitsema kansiorakenne ja siirtää automaation kansioon sovelluksen tarvitsemat ulkoiset makrot ja komentorivi-tiedostot, sekä konfiguraatiotiedosto.

Sovelluksen ollessa käynnissä on sen tilaa mahdollista seurata sovelluksen avaamasta komentorivi-ikkunasta, jossa näkyy tekstipohjaisina ilmoituksina kyseisenä hetkenä menossa oleva sekvenssin vaihe.

## **5.1 Sovelluksen ulkopuoliset makrot ja ohjauslogiikan koodit**

Aikaisemmin käytetty kuvausmakro on konvertoitu itsenäisesti ajettavaksi tiedostoksi, joka voidaan käynnistää automaatiosovelluksesta. Makro ohjaa kuvausohjelmistoa graafisen käyttöliittymän yli, sekvenssi pakottaa mahdollisesti sammuneen yhteyden kameraan päälle, käynnistää reaaliaikaisen tarkkailukuvan ja käynnistää kuvasarjan tallennuksen. Toimintojen suorittamisten välille on asetettu manuaalisesti viiveajat, jotta vältetään kuvausohjelmiston virhetilanteilta. Koska kuvausmakro ohjaa järjestelmää graafisen käyttöliittymän yli,

on ohjelmiston toiminnan seuranta oleellista, jos käyttäjä on samalla etäyhteydessä koneeseen. Käyttäjän on syytä pitää komentorivi-ikkuna avoimena ja seurata menossa olevia sekvenssin vaiheita. Graafisen käyttöliittymän yli tapahtuvat komennot ovat nopeita, muutamissa millisekunneissa tapahtuvia, mutta esimerkiksi kuvausohjelmiston valikoiden avaaminen voi aiheuttaa ongelmatilanteita.

Sovellus ajaa Arduino IDE-sovelluksella komentoriviltä logiikkapiirille sovelluksen kunkin vaiheen tarvitseman automaatiokoodin, joka ohjaa laitteiston pesua, pumppausta ja odotusta. Matlabilla toteutetulla sovelluksella olisi mahdollista ohjata logiikkapiiriä suoraan, mutta tämä vaatisi sovelluksen testausta laboratorio-olosuhteissa vika- ja virhetilanteiden välttämiseksi, sillä väärässä järjestyksessä avatut venttiilit voivat aiheuttaa letkurikkoja, sillä esimerkiksi letkupumpun puolella on käytettävä silikoniletkua, joka ei kestä pidempiaikaista painerasitusta.

## **5.2 Initialisointi**

Initialisoinnissa ohjelmisto lataa konfiguraatitiedoston, jossa on määritelty ohjelmiston toiminnan asetuksia, joita on mahdollista muuttaa ohjelman jo ollessa käynnistettynä. Konfiguraatitiedosto on tekstimuotoinen, ja sitä on mahdollista editoida kaikilla tavallisilla tekstieditoreilla. Tiedoston alussa on määritelty erilaisten muuttujien nimet ja toisella rivillä on määritelty muuttujien arvot. Oleellisimpia muuttujia ovat erilaiset tallennuskansiot, viiveajat, silmukan kokonaiskesto ja analyysifunktion herkkyysarvo. Sovellus lataa päivämäärämuuttujaan sen hetkisen päivämäärän, jota käytetään silmukan aikana varmuuskopiokansion nimeämiseen ja analyysidatan tallentamiseen.

## **5.3 Silmukan aloitus**

Sovelluksen tarkoituksena on suorittaa toistuvasti sama sekvenssi. Sekvenssin pituudeksi on valittu 15 minuuttia, sillä vertailumittarina toimivan sameusmittarin mittausintervalli on saman pituinen. Jokaisen silmukan alussa sovellus tarkistaa, onko konfiguraatitiedostoon tehty muutoksia ja onko päivämäärä vaihtunut. Jos päivämäärä on vaihtunut, ohjelmisto käyttää uutta päivämäärää seuraavassa analyysin tallennuksessa ja kuvien varmuuskopiointissa. Jos

konfiguraatitiedostoon on tehty muutoksia, lataa sovellus konfiguraation uudelleen jokaisen silmukan alussa ja käyttää jatkossa näitä päivitettyjä asetuksia.

#### **5.4 Ensimmäinen pesu**

Ensimmäisen pesun tarkoituksena on tyhjentää järjestelmä sinne mahdollisesti kerääntyneestä ilmasta ja poistaa mahdolliset ylimääräiset partikkelit, jotka ovat voineet laskeutua järjestelmän pohjalle. Pesun oletuskestona on 120 sekuntia ja pesun aikana sovellus ottaa myös taustakuvan. Pesu käynnistetään lataamalla logiikalle pesukoodi, joka varmistaa, että pumppu ja näytteenottoventtiilit ovat suljettuja ja avaa ensin pesuveden poistovennttiin ja tämän jälkeen pesuveden syöttöventtiin. Sekvenssin järjestys on oleellinen, jotta vältetään järjestelmään kerääntyvä paine letkurikkojen ja vuotojen estämiseksi.

#### **5.5 Taustakuvat**

Ensimmäisen pesusekvenssin odotusaikana sovellus käynnistää kuvausmakron, joka ohjaa Basler Pylon Viewer -kuvausohjelmistoa graafisesti. Sovellus odottaa siihen asti, kunnes 40 kuvaa on tallentunut kuvauskansioon ja muodostaa kuvista yhden komposiittikuvan, joka on kuvasarjan keskiarvo. Tämän tarkoituksena on minimoida mahdollisesti yksittäisissä kuvissa näkyvät kuplat ja likapartikkelit, jotka kulkeutuvat pesuveden mukana. Sovellus säilyttää taustakuvan komposiittia työmuistissa ja poistaa otetun taustakuvasarjan. Tämän jälkeen sovellus jää odottamaan pesusekvenssin päättymistä.

Kuvassekvenssin silmukassa on tarkistus, että 90:n sekunnin aikana kuvat tallentuvat kuvauskansioon. Jos kameran ethernet-yhteydessä on häiriö ja kuvausohjelmisto pysähtyy, tarkistuksen jälkeen sovellus käynnistää uudelleen kuvaussekvenssin ja palaa odottamaan jälleen kuvien tallentumista. Näin ollen sovelluksessa on vikasietoisuutta myös kuvausohjelmiston häiriöiden varalta. Taustakuvien ottamisen jälkeen sekvenssi odottaa täydet 120 sekuntia oletusarvoisesti ja siirtyy tämän jälkeen seuraavaan vaiheeseen.

## 5.6 Näytteenotto

Näytteenotto käynnistyy ensimmäisen pesusekvenssin 120:n sekunnin keston jälkeen. Näytteenotossa logiikalle ladataan uusi koodi, joka sulkee ensin pesuveden syötön ja tämän jälkeen pesuveden poiston. Tämä järjestys on oleellista, jotta vältetään järjestelmään muodostuvalta ylimääräiseltä paineelta. Seuraavaksi logiikan koodi avaa näytteenotto- ja näytteenpoistovenkkiit ja käynnistää pumpun. Sovellus odottaa 90 sekuntia siitä, kun logiikalle tapahtuva koodin lataus käynnistyy. Tämän tarkoituksena on poistaa näytteenotto- puolelle jääneet ilmakuplat ja varmistaa, että altaasta saadaan tuoretta ja katavaa näytettä, sekä minimoida näytteenottoletkusta mahdollisesti irtoavien partikkeleiden määrä.

## 5.7 Kuvaus

Sovelluksen kuvaussekvenssin toiminta on käytännössä samanlainen kuin vastaava sekvenssi taustakuvan ottamisen aikana. Sovelluksen käynnistämä kuvausmakro on identtinen aikaisemman makron kanssa ja sovellus odottaa 40:n kuvan sarjan tallentumista ennen kuin jatkaa seuraavaan vaiheeseen. Myös tässä sekvenssissä on tarkistus kameran ethernet-yhteyden häiriöiden varalta. Kuvauksen jälkeen tapahtuvat sekvenssin osat ovat osittain limittäisiä. Näytteenoton pumppauksen on tarkoitus loppua mahdollisimman nopeasti kuvasarjan ottamisen jälkeen, jotta linssin likaantumista voidaan minimoida.

## 5.8 Pumpun huuhtelu

Pumpun huuhtelun sekvenssi käynnistetään aina neljän tunnin välein. Sovellus tarkistaa edellisen huuhtelun ajankohdan ja käynnistää sekvenssin tarvittaessa. Huuhtelun tarkoituksena on poistaa pumpun syöttöventtiilin jälkeen kertynyt ilma, joka haittaa pumpun toimintaa. Sekvenssissä pumpulle syötetään pesuvettä sekunnin ajan kaksi kertaa. Samanaikaisesti pesuveden poistovenkkiili on auki, jotta syöttöpaine ei muodostu liian suureksi. Pesuveden syöttöventtiili avautuu sekvenssin aikana aina viimeisenä ja sulkeutuu ensimmäisenä, sillä pumpun syöttöventtiilin jälkeen olevaan letkuun ei voi jäädä painetta, koska tämä paine voisi aiheuttaa letkurikkoja. Pesuveden poistovenkkiili sulkeutuu sekvenssissä viimeisenä, jotta järjestelmään ei jää painetta kaikkien venttiilien ollessa suljettuna.

## **5.9 Toinen pesu**

Toisen pesusekvenssin käynnistys on identtinen ensimmäisen pesusekvenssin kanssa. Pesusekvenssin tarkoituksena on puhdistaa järjestelmä perusteellisesti sinne kertyvästä liasta. Käytännön testauksella on havaittu, että noin 10 minuuttia kestävä pesusekvenssi on välttämätöntä järjestelmän huolto- ja puhdistusvälin pitämiseksi mahdollisimman pitkänä.

## **5.10 Kuvien varmuuskopiointi**

Näytteestä otettujen kuvien varmuuskopiointi tapahtuu samanaikaisesti toisen pesusekvenssin käynnistymisen kanssa. Sovellus tarkistaa, onko varmuuskopiointia varten luotu tallennuskansio ja tarvittaessa luo tallennuskansion. Sovellus kopioi näytteestä otetut kuvat ulkoiselle kiintolevylle ja poistaa automaation kuvauskansioon tallennetut tiedostot.

## **5.11 Analyysi**

Toisen pesusekvenssin käynnistyttyä ja mahdollisen huuhtelun jälkeen sovellus käynnistää toisen silmukan, jonka tarkoituksena on suorittaa analyysi ja joka on toteutettu parfor-rakenteella. Parfor-rakenteessa sovellus käynnistää itsenäiset instanssit ohjaustietokoneen jokaiselle ytimelle, jotka suorittavat analyysin jokaisesta kuvasta itsenäisesti. Parfor-rakenteen etuna on kaiken ohjaustietokoneen laskentakapasiteetin tehokas hyödyntäminen. Silmukka tekee 40 iteraatiota, yhden jokaista otettua näytekuvaa kohden.

### **5.11.1 Kuvien komposiitti ja komposiitin tallennus**

Ensimmäisenä vaiheena analyysisilmukka lataa vuorossa olevan näytekuvan työmuistiin ja muodostaa komposiittikuvan taustakuvan negatiivin kanssa. Tämän tarkoituksena on minimoida linssiin tarttuneen lian vaikutus. Komposiittikuvassa staattiset elementit minimoituvat ja jäljelle jää ainoastaan näytekuvassa olevat flokit ja partikkelit. Muodostettu komposiittikuva tallennetaan mahdollista myöhempää analysointia varten. Komposiittikuva nimetään vastaavan näytekuvan mukaisesti, jotta kuvien visuaalinen vertailu toisiinsa on

mahdollista myöhemmin. Sovellus tarkistaa, onko varmuuskopiota varten luotu tallennuskansio ja tarvittaessa luo uuden varmuuskopiokansion.

### 5.11.2 Analyysi ja analyysin tallennus

Analyysiä varten näytekuvasta ja taustakuvan negatiivista muodostettu komposiittikuva normalisoidaan, muutetaan binaarimuotoon ja kuva muutetaan negatiiviksi. Tällöin kuvan taustasta tulee musta ja flokit sekä partikkelit jäävät valkoisiksi. Sovelluksen partikkelien tunnistamiseen käyttämä funktio pystyy tunnistamaan alueita ainoastaan kaksivärisistä kuvista. Partikkeleihin mahdollisesti jäävät reiät myös poistetaan kuvasta laskennan helpottamiseksi. Analyysifunktio laskee partikkeleiden kappalemäärän ja keskimääräisen pinta-alan kategorioissa alle  $0,0001 \text{ mm}^2$ ,  $0,0001\text{--}0,001 \text{ mm}^2$ ,  $0,001\text{--}0,01 \text{ mm}^2$ ,  $0,01\text{--}0,1 \text{ mm}^2$  ja yli  $0,1 \text{ mm}^2$ . Tiedot tallennetaan Excel-tiedostoon erikseen jokaiselta vuorokaudelta.

Analyysissä hyödynnetään kappaleiden eksentrisyyttä, jolla on mahdollista suodattaa analysoitavista kohteista kaikista pyöreimmät alueet pois. Tämän tarkoituksena on poistaa analyysidatasta kuvissa mahdollisesti näkyvät kuplat, jotka ovat huomattavasti pyöreämpiä kuin flokit.

Kuvasarjan analysointi kestää noin 2 minuuttia, riippuen kuitenkin sillä hetkellä käytettävissä olevasta laskentakapasiteetista. Rinnakkaisilla instansseilla tapahtuva analyysi kuitenkin aiheuttaa laskentaresurssien tarpeelle piikin, joka voi aiheuttaa ongelmatilanteita etäyhteyden käytettävyydessä.

### 5.12 Odotus

Pesuprosessin suorittamisen jälkeen sovellus asettuu odotustilaan ja ajaa logiikkapiirille odotuskoodin, jolla pesusekvenssi pysäytetään, kaikki venttiilit laitetaan kiinni sekä varmistetaan, että pumppu on pysähtynyt. Tämän sekvenssin tarkoituksena on vähentää pesuveden kulutusta. Odotusaikaa on mahdollista säätää konfiguraatitiedostosta, sillä likaantuminen on myöskin riippuvaista pesuveden syöttöpaineesta ja raakaveden laadusta.



### **5.13 Silmukan päättäminen ja paluu silmukan alkuun**

Silmukan oletuskestona on 15 minuuttia ja kun tämä aika on kulunut, palautuu suoritus silmukan ensimmäiseen kohtaan. Kestoksi on määritelty tämä aika, jotta mittapisteiden väli olisi synkronoitu sameusmittarin mittausten kanssa. Konfiguraatitiedoston asetusta muuttamalla on mahdollista muuttaa silmukan pituutta sovelluksen ollessa jo toiminnassa.

### **5.14 Automaatiosovelluksen pysäyttäminen**

Automaatiosovelluksen voi pysäyttää sulkemalla ohjelma normaalin Windows-ohjelman tapaan. Ohjelman pysäyttäminen on kuitenkin syytä tehdä pesusekvenssin ollessa käynnissä, tämän voi tarkistaa automaatiosovelluksen komentorivi-ikkunasta. Sovelluksen pysäyttämisen jälkeen täytyy ohjauslogiikalle ajaa manuaalisesti pysäytyskoodi, muutoin ohjauslogiikalle viimeiseksi ladattu koodi jää pyörimään silmukkana. Jos pysäyttäminen on täytynyt tehdä kuvauksen ollessa käynnissä, täytyy kuvauskansiossa oleva keskeneräinen kuva-  
vasarja myös poistaa manuaalisesti.

## **6 KOESUUNNITELMA**

Kun sovelluksesta oli käytössä stabiili versio, joka pystyi tallentamaan näyte-  
kuvat, suodatetut kuvat ja analyysin, sekä oli ominaisuuksiltaan vikasietoinen, suoritettiin sovellukselle stressitesti 2.4.-8.4.2021, jonka aikana kerättyä dataa verrataan sameusmittarin keräämään dataan sekä näytekuviin eriaikaiseen analyysiin.

Koejakson pituudeksi valikoitui seitsemän vuorokautta, sillä aikaisemmin laitteiston toimintavarmuuden ylläpitämiseksi laitteisto käynnistettiin uudelleen kerran viikossa. Aikaisemmassa toiminnassa kuvausmakrot ja kuvausohjelmisto täytyi myös synkronoida uudestaan 1–3:n vuorokauden välein.

Analyysisovelluksen herkkyysparametrinä käytettiin oletusarvoa 0,50 ja automaattisen analyysin lisäksi taustakuvan komposiitilla suodatetut kuvat tallennettiin erikseen jälkikäteen tapahtuvaa analysointia varten. Varsinaista taustakuvaa ei tallennettu erikseen.

Koejakson ajankohdalle oli oleellista vasta tämän jälkeen tapahtuva pintavesien lämpeneminen, jonka tarkkailua varten automaatiosovellus oli tärkeää saada toimintavalmiuteen. Hankkeen tavoitteena oli saada tarkempaa tietoa pintaveden lämpötilan vaikutuksesta flokkaantumisprosessiin, joten kevään ajankohta on hankkeella korkean prioriteetin mittausjakso, joten järjestelmän toimintavarmuus täytyy olla korkealla tasolla ja mahdollisuuksia analyysisovelluksen testauksesta aiheutuville puutteellisille mittausjaksoille ei ole.

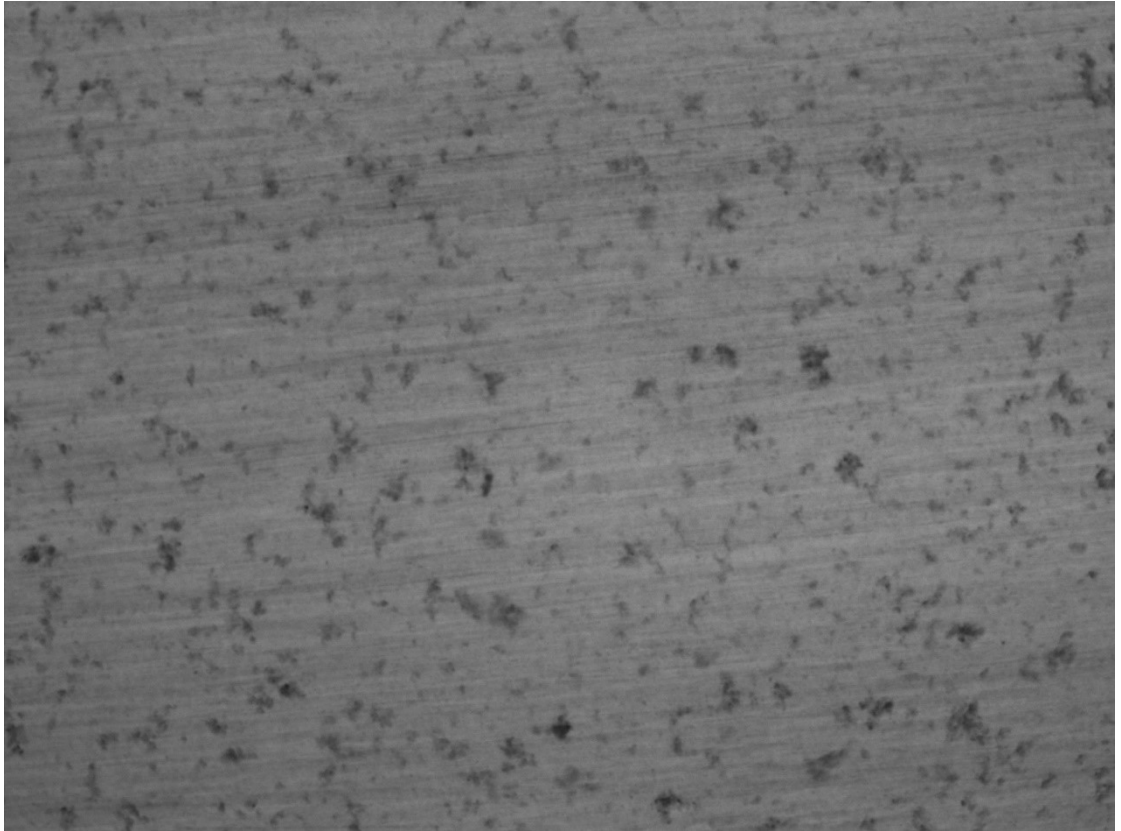
Koejaksoa ennen täytyi laitteistolle suorittaa huoltotoimenpiteitä. Linssin puhdistus oli tärkeää mahdollisimman hyvälaatuisten kuvien hankkimiseksi koejaksolta. Koejaksoa ennen laitteiston ohjaustietokoneelta katkesi sähkönsyöttö, joka aiheutti myös pumppaus- ja venttiilinohjauksohjauksongelmia, jotka täytyi ratkaista ennen koejakson aloittamista. Venttiilien ohjauksessa käytettävässä relekortissa oli kontaktiongelma, jonka johdosta kortti ei saanut signaalia logiikalta. Johtuen venttiilien ohjauksen ongelmista pumpun imuteho laski ja tästä syystä oli tärkeää vaihtaa myöskin pumpun letkut uusiin. Koejakson onnistumisen kannalta oli pumpun huuhtelusekvenssin lisääminen sovellukseen tärkeää, jotta pumpun letkuihin kerääntyvän ilman määrä saatiin minimoitua ja pumpun imuteho pidettyä tyydyttävällä tasolla.

## **7 TAUSTAKUVALLA TEHTÄVÄN SUODATUKSEN VAIKUTUS ANALYYSIIN**

Taustakuvalla tehtävän suodatuksen periaatteena on ottaa ennen näytteenottoa kuvasarja pesuvedestä, jossa ei ole flokkeja ja muodostaa kuvasarjasta keskiarvotettu komposiittikuva. Komposiittikuvan negatiivi sulautetaan yhteen näytekuviin kanssa, jolloin näytekuvasarjassa näkyvä lika vaalenee, kuvan taustasta tulee tasaisemman värinen ja tummina alueina näkyvät pelkät flokit. Seuraavaksi esitettyjen kuvien analysoinnissa on käytetty vanhempaa eriaikaista analyysisovellusta ja sen parametrejä. Eroavaisuutena vanhemmalle ja uudelle analyysisovellukselle on se, että vanhemmalla sovelluksella oli toimintona muuttumattomina pysyvien flokeiksi tunnistuneiden alueiden suodatus. Tämä toiminto ei kuitenkaan antanut haluttuja lopputuloksia, sillä johtuen analyysisovelluksen adaptiivisesta luonteesta eivät virheellisesti tunnistuneet alueet kuitenkaan pysyneet kuvissa staattisina.

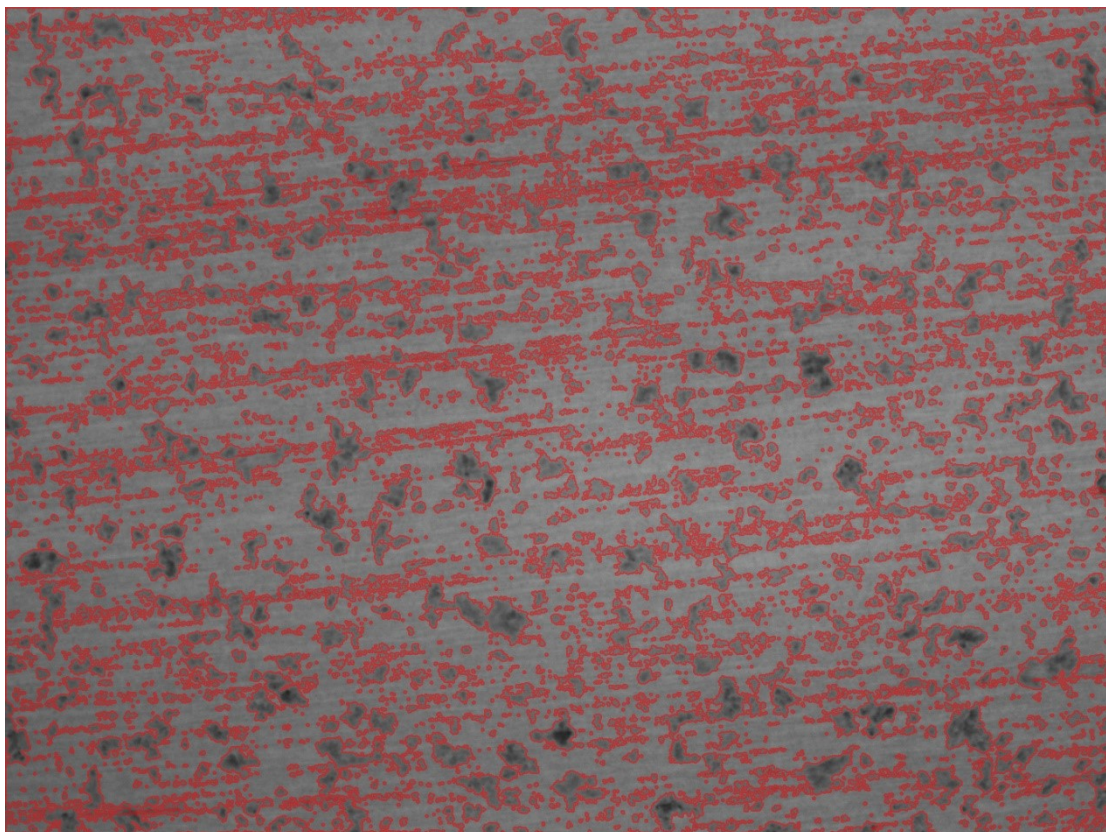
## 7.1 Raakakuva

Raakakuva on näytteestä otettu alkuperäinen käsittelemätön kuva, johon ovat vaikuttaneet ainoastaan kuvausohjelmiston parametrit.



Kuva 8. Raakakuva

Kuvassa 8 on nähtävissä raaka näytekuva, josta on havaittavissa likaantumisen aiheuttamat tummentumat ja vääristymät. Likaantuminen kumuloituu noin kuukauden puhdistusväleillä. Likaantuminen on mahdollista puhdistaa mekaanisesti harjaamalla, mutta tämä puhdistusmenetelmä kuitenkin jättää linssiin likaa viivamaisesti. Koska linssi ei ole koskaan täysin puhdas, alkaa likaantuminen nopeammin mekaanisen puhdistuksen jälkeen kuin kemiallisen sitruunahapolla tehtävän puhdistuksen jälkeen. Tummentumisen vuoksi kameran valaistusarvoa säädetään tasaisin väliajoin. Aikaisemmin kuvausohjelmisto oli säädetty säilyttämään valaistusarvo histogrammiin verrattuna stabiilina, uuden analyysisovelluksen toiminnalle on kuitenkin tarpeellista, että taustakuvan ja näytekuvan valaistusarvot ovat toisiaan vastaavat.

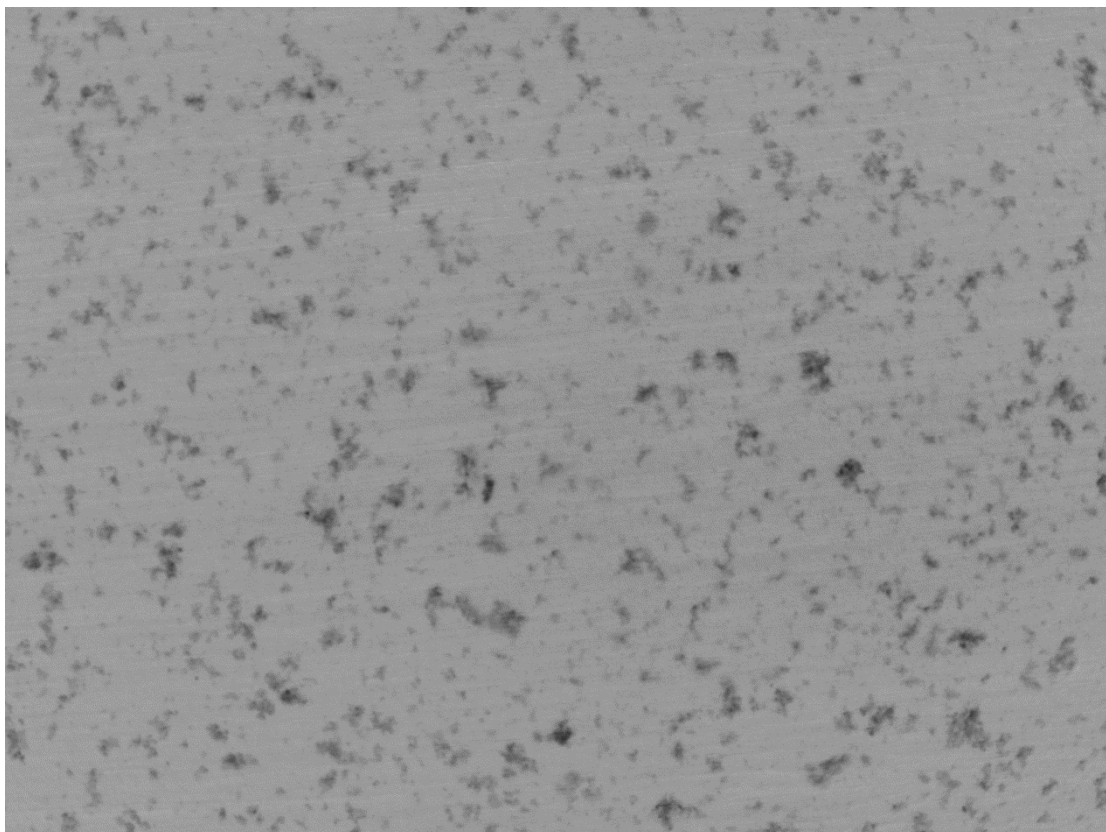


Kuva 9. Raakakuva vanhalla analyysillä

Kuvasta 9 on havaittavissa aikaisemmalla eriaikaisella analyysillä punaisella värjätynä analyysisovelluksen flokeiksi tunnistamat alueet. Kuvia 8 ja 9 vertailemalla huomataan, että analyysiohjelmisto tunnistaa flokeiksi myös likaantumisen aiheuttamat tummentumat. Tummentumat ovat viivamaisia ja tunnistuneista alueista on havaittavissa viivamaisia muotoja. Kuitenkin analyysi tunnistaa erillisinä flokkeina suuremmat alueet, mutta pienemmät flokit häviävät tummentumien aiheuttamien vääristymien joukkoon. Virheellisesti tunnistuneet alueet aiheuttavat tilastollisia virheitä erityisesti pienempien kappaleiden tilastoinnissa ja tämä oli merkittävänä tekijänä paremman virheiden suodatuksen kehittämiseksi kuvadatalle.

## 7.2 Suodatettu kuva

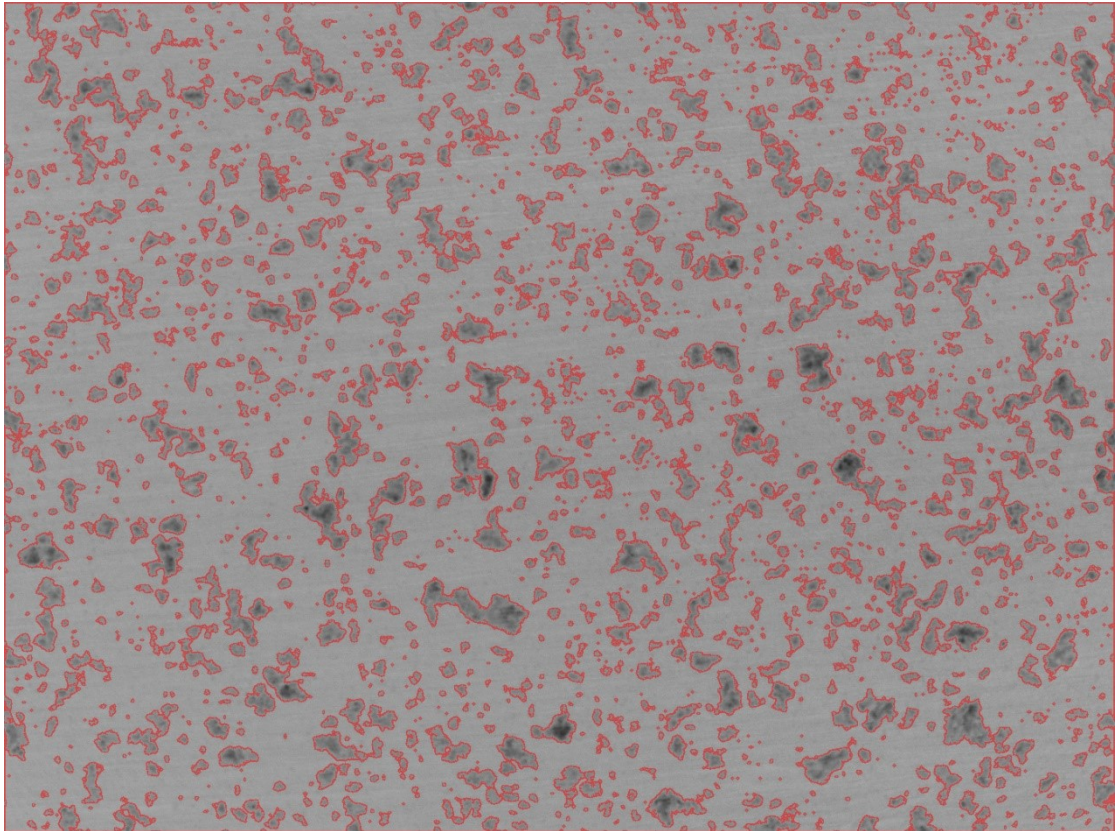
Kuvassa 8 esitetty raakakuva on suodatettu kuvausta edeltäneen pesujakson taustakuvalla ja tallennettu erillään raakakuvasta.



Kuva 10. Taustakuvan komposiitilla suodatettu kuva

Kuvassa 10 on esitetty suodatettu näytekuva. Kuvia 8 ja 10 vertailemalla voidaan havaita, että näytekuva on muodostunut tasaisen vaaleaksi, likaantumisen aiheuttamat tummentumat ovat tasoittuneet ja erilliset flokit näkyvät vaaleaa taustaa vasten korostetummin. Kuitenkin lähemmällä tarkastelulla on edelleenkin mahdollista havaita likaantumisen aiheuttamia vääristymiä kuvasta.

Taustakuvalla suodattaminen kuitenkin vaalentaa myös flokeiksi määriteltäviä alueita, näin ollen optimaalisin tilanne olisi pitää linssi jatkuvasti mahdollisimman puhtaana. Yhtenä mahdollisuutena laitteiston jatkokehitykselle olisi rakentaa sitruunahappopesulle oma kierto pesujärjestelmän yhteyteen, tämä ei kuitenkaan korvaisi pidemmällä aikavälillä tapahtuvaa mekaanista pesua. Laitteiston ollessa käytössä pidempiä jaksoa likaantumista tapahtuu kauttaaltaan myös järjestelmän muissa osissa, joka kasvattaa likapartikkeleiden irtoamisen mahdollisuutta näytteenoton aikana. Tämä vuorostaan voi aiheuttaa tilastollisia virheitä tuloksia tarkasteltaessa, sillä osa kuvissa näkyvistä partikkeleista voi olla järjestelmästä irronnutta likaa.

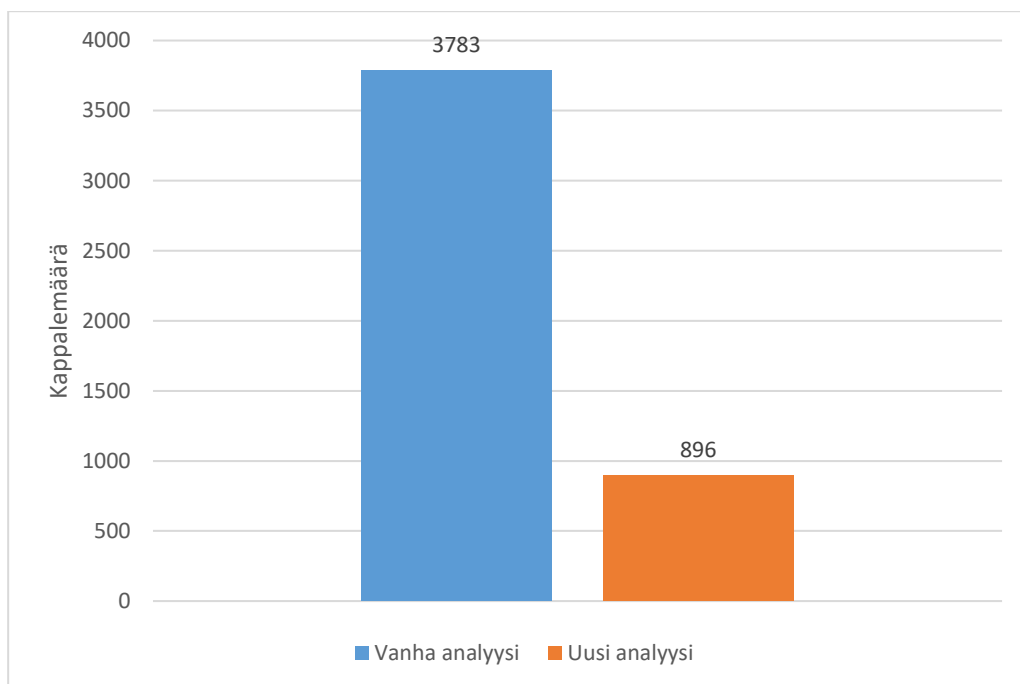


Kuva 11. Analysoitu komposiittikuva

Kuvassa 11 on esitetty vanhalla analyysisovelluksella analysoitu komposiittikuva, jossa punaisella värillä on korostettu tunnistuneet flokit. Tunnistuneet flokit eivät muodosta säännömukaisia viivamaisia kuvioita, sen sijaan kuvasta ei ole havaittavissa säännömukaisuutta. Kuvan lähemmällä visuaalisella tarkastelulla voidaan havaita myös pienempien flokeiksi tunnistuneiden alueiden olevan tummempia, mikä viittaa siihen, että nämä alueet ovat myös humuspartikkeleita ja näin ollen mahdollisia hajonneita flokkeja.

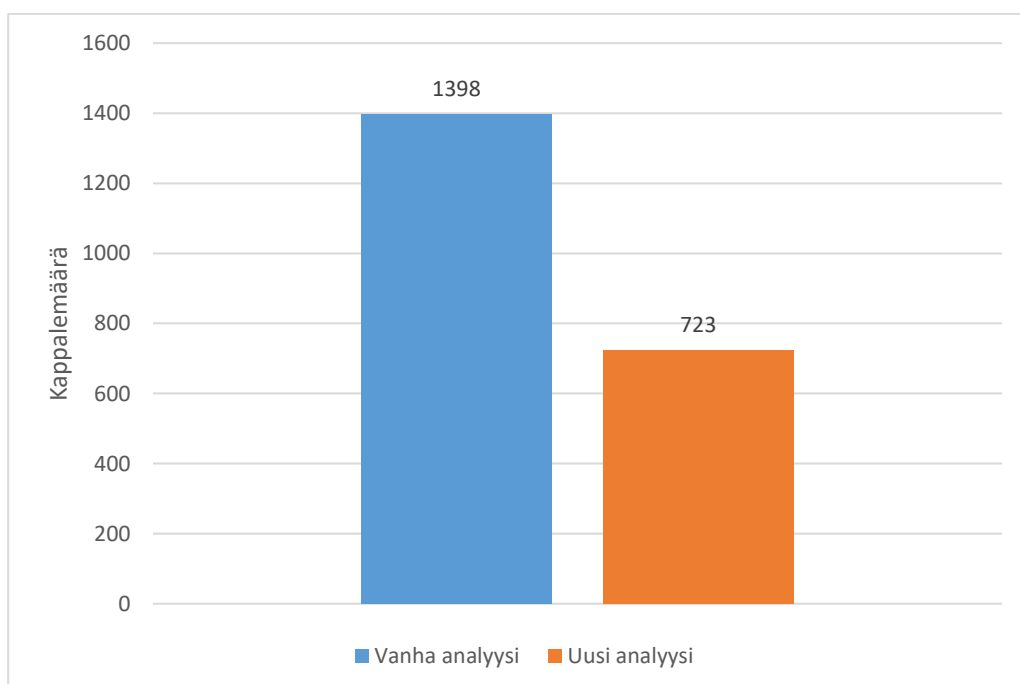
### 7.3 Analyysin toimivuus

Esimerkkinä toimineesta kuvasta oli käytössä myös analysointidata, jonka vertailun pohjalta on mahdollista tehdä päätelmiä kummankin analyysin toimivuudesta. Automaatiosovelluksen analyysiosan toiminta varmistettiin analyysiosan eriaikaisella versiolla tapahtuneella analyysillä, jonka tulokset olivat vastaavat kuin reaaliaikaisella sovelluksella saadut tulokset. Koejakson tulosten käsittelyssä oli oleellista vertailla sovelluksen toimintaa reaaliaikaisissa ja eriaikaisissa tiloissa, jotta sovelluksen toimintavarmuudesta saatiin selkeää informaatiota.



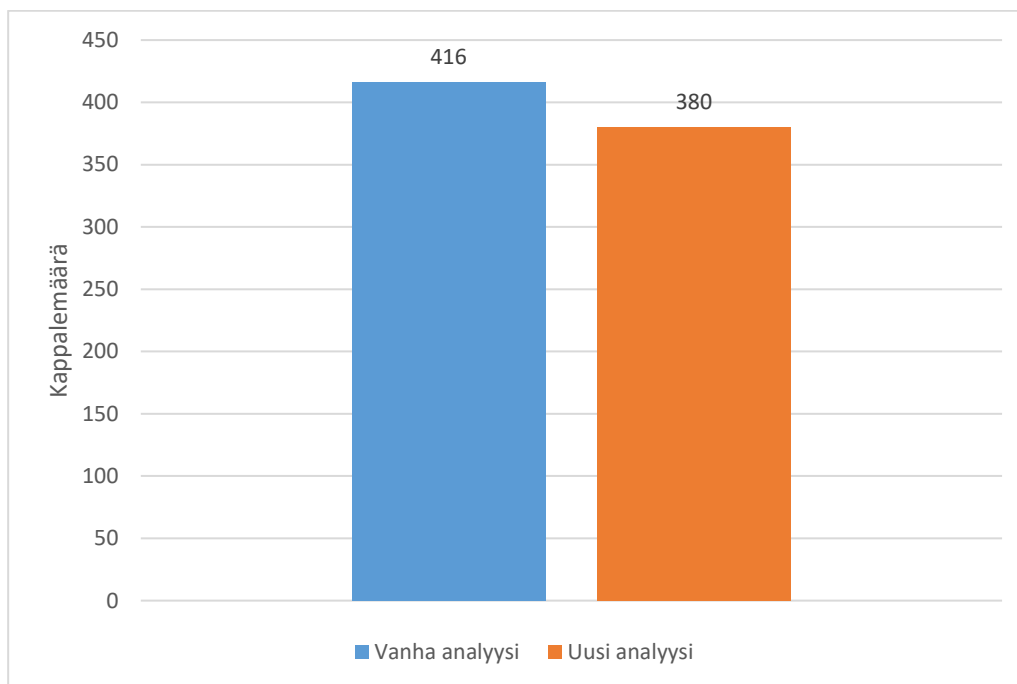
Kuva 12. Alle 0,0001 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät

Kuvassa 12 on esitetty komposiittikuvan ja raakakuvan flokkien kappalemäärät kokoalueella alle 0,0001 mm<sup>2</sup>. Jakaumat ovat kuvissa 9 ja 11 esitettyjen tunnistuneiden alueiden mukaiset. Kuvien analyysin erona voidaan havaita, että raakakuvasta sovellus tunnisti 2887 kappaletta enemmän pienikokoisia flokkeja. Vertailemalla kuvia visuaalisesti voidaan päätellä, että erotus johtuu suodattamattomassa näytekuvasa näkyvästä linssin likaantumisesta, joka aiheuttaa virheellisiä tunnistumisia.



Kuva 13. 0,0001–0,001mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät

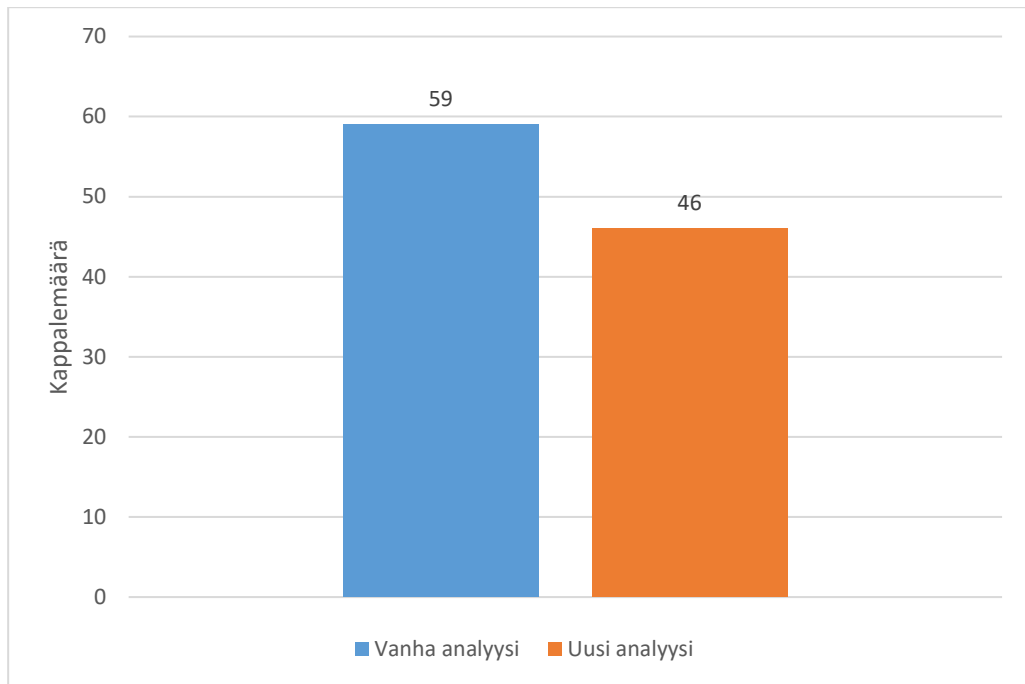
Kuvassa 13 on vastaavasti esitetty kokoalueella 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> olevien flokkien jakauma suodatetussa ja suodattamattomassa kuvassa. Kappalemäärien erotus on 675 kappaletta. Visuaaliseen tarkasteluun vertailemalla voidaan päätellä, että tällä kokoalueella suodattamattomassa näytekuvasa tapahtuu huomattavaa virheellistä tunnistumista flokeiksi.



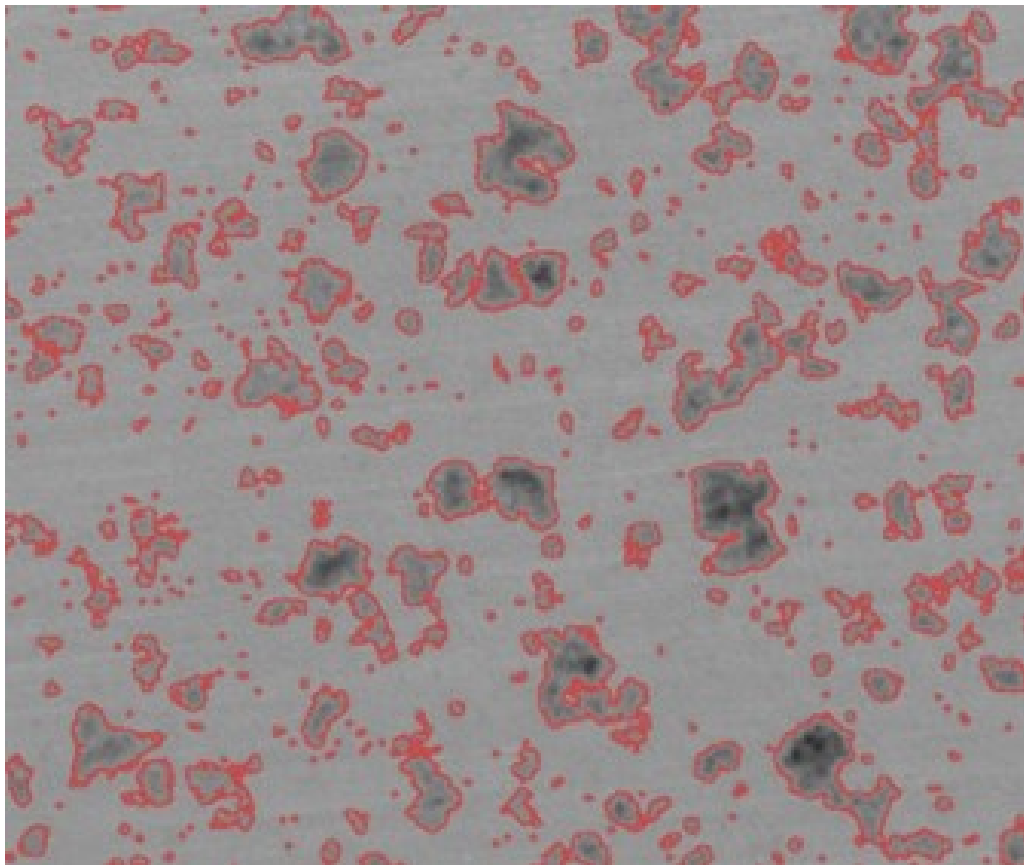
Kuva 14. 0,001–0,01 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät

Kuvassa 14 on esitetty kokoalueen 0,001–0,01 mm<sup>2</sup> jakaumat. Tällä kokoalueella kappalemäärien ero on pieni, mutta edelleenkin suhteessa suodatettuun kuvaan tapahtuu virheellistä tunnistumista. Kokoalueella on jonkin verran flokeiksi määriteltäviä alueita, mutta suurin osa kokoalueen partikkeleista on kuitenkin joko hajoaneiden flokkien kappaleita tai neutraloitumattomia humuspartikkeleita. Flokkien hajoamiseen vaikuttaa myöskin pumppauksen virtausnopeus.





Kuva 15. 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät



Kuva 16. Suurennos tunnistuneista flokeista

Kuvassa 15 on esitetty kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät komposiittikuvasta ja raakakuvasta. Tällä kokoalueella voidaan havaita suurempi suhteellinen ero kappalemäärissä, joka on suurempi kuin kuvan 14 kokoalueella, mutta silti pienempi kuin pienempien flokkien kokoalueilla.

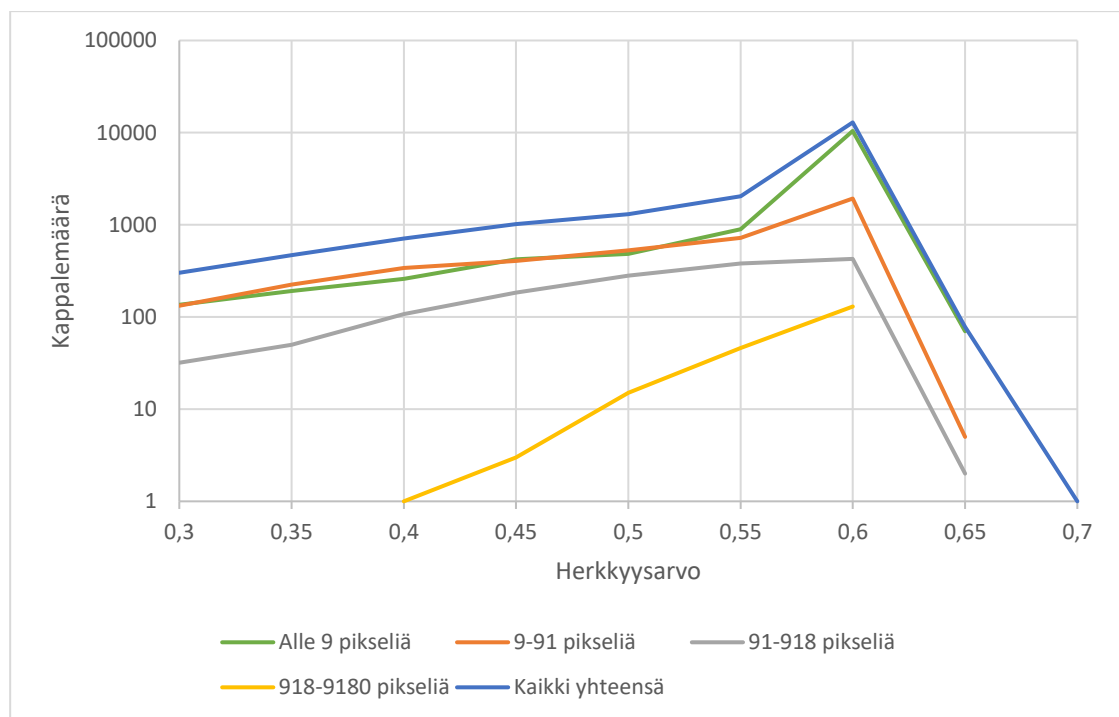
Kuvien visuaalisella tarkastelulla voidaan havaita, että kokoalueella 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> esiintyvät flokit ovat kokonaisia flokkeja eivätkä pelkästään mahdollisia flokkien kappaleita. Kuvassa 16 esitetystä suurennoksesta voidaan havaita, että suuremmissa tunnistuneissa alueissa esiintyy tummempia ja vaaleampia alueita ja osassa voidaan havaita selkeää flokkaantumista, jossa pienempiä partikkeleita on kiinnittynyt toisiinsa. Suuremmat tunnistuneet alueet ovat hyvin epäsäännöllisen muotoisia, ja tämä viittaa myös alueiden olevan flokkeja. Tästä voimme päätellä kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> edustavan flokkaantuneita partikkeleita.

## **8 ANALYYSIN HERKKYYSARVON VALINTA**

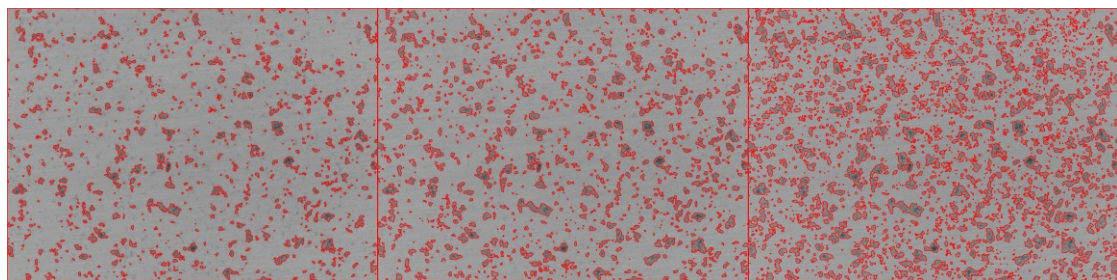
Analyysin kannalta oleellista on oikean herkkyysarvon valinta tunnistusalgoritmille. Herkkyysarvon valinta vaatii kuvien visuaalista tarkastelua flokkien määrittelemiseksi ja likaisuuden aiheuttamien vääristymien erottamiseksi flokkeista. Johtuen taustakuvan tummuuden vaihteluista ja näytekuviin valaistuksessa tapahtuvista muutoksista analyysissä on oleellista käyttää adaptiivista moodia, joka kuitenkin asettaa suurempia rajoituksia herkkyysarvolle, sillä liian suurella herkkyysarvolla adaptiivinen metodi tunnistaa pienempiä poikkeamia flokeiksi, kun taas liian pieni herkkyysarvo jättää epätarkempia flokkeja pois tunnistuksesta.

Taulukko 1. Esimerkkikuvan flokkijakaumat erilaisilla herkkyysarvoilla

Her- kkyys- arvo	Alle 9 pikseliä		9–91 pikseliä		91–918 pikse- liä		918–9180 pik- seliä		9180> pikseliä		Kaikki yhteensä	
	kpl	Koon kes- kiarvo pikse- leinä	kpl	Koon kes- kiarvo pikse- leinä	kpl	Koon kes- kiarvo pikse- leinä	kpl	Koon kes- kiarvo pikse- leinä	kpl	Koon kes- kiarvo pikse- leinä	kpl	Koon keskiarvo pikseleinä
0,30	136	3,85	133	25,78	32	188,25	0	0,00	0	0,00	301	33,15
0,35	192	4,27	225	30,69	50	228,04	0	0,00	0	0,00	467	40,96
0,40	259	3,81	340	31,54	108	215,47	1	1043,00	0	0,00	708	50,88
0,45	422	3,94	407	34,61	184	251,02	3	1393,33	0	0,00	1016	65,07
0,50	484	3,68	528	32,91	280	278,58	15	1262,80	0	0,00	1307	88,83
0,55	896	3,44	723	32,58	380	289,24	46	1330,65	0	0,00	2045	96,70
0,60	10432	3,19	1928	24,24	427	293,28	130	2129,38	0	0,00	12917	37,32
0,65	70	3,19	5	15,40	2	519,50	0	0,00	1	1439895,00	78	18477,36
0,70	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	1447657,00	1	1447657,00



Kuva 17. Herkkyy sarvon vaikutus tunnistuneiden flokkien määrään



Kuva 18. Analysoitu kuva herkkyysarvoilla 0,45 (vasemmalla), 0,50 (keskellä) ja 0,55 (oikealla)

Kuvissa 17 ja 18 sekä taulukossa 2 on vertailtu erilaisten herkkyysarvojen vaikutusta analyysin toimintaan. Herkkyysarvon kasvaessa flokkien määrä kasvaa jokaisessa kategoriassa pääasiassa logaritmisesti, kunnes lopulta herkkyysarvolla 0,70 koko kuva tunnistuu yhdeksi alueeksi. Herkkyysarvolla 0,60 on havaittavissa kahden pienimmän kategorian kappalemäärissä huomattava nousu. Tällä herkkyysarvolla kuvissa olevien pienten häiriöiden vaikutus kasvaa ja nämä häiriöt alkavat tunnistua virheellisesti flokkeiksi. Herkkyysarvo vaikuttaa myös flokiksi tunnistuneen alueen kokoon, pienemmällä herkkyysarvolla alue on pienempi, kun taas suuremmilla herkkyysarvoilla alueen rajat ovat suuremmat.

Herkkyysarvon kasvattaminen lisää myös kuvassa olevan kohinan tunnistamista flokkeiksi. Flokkialueiden koon kasvaessa flokkeja alkaa siirtyä pienemmistä kokoluokista seuraaviin kategorioihin, samalla pienimpään kokoluokkaan tulee lisää tunnistuneita alueita.

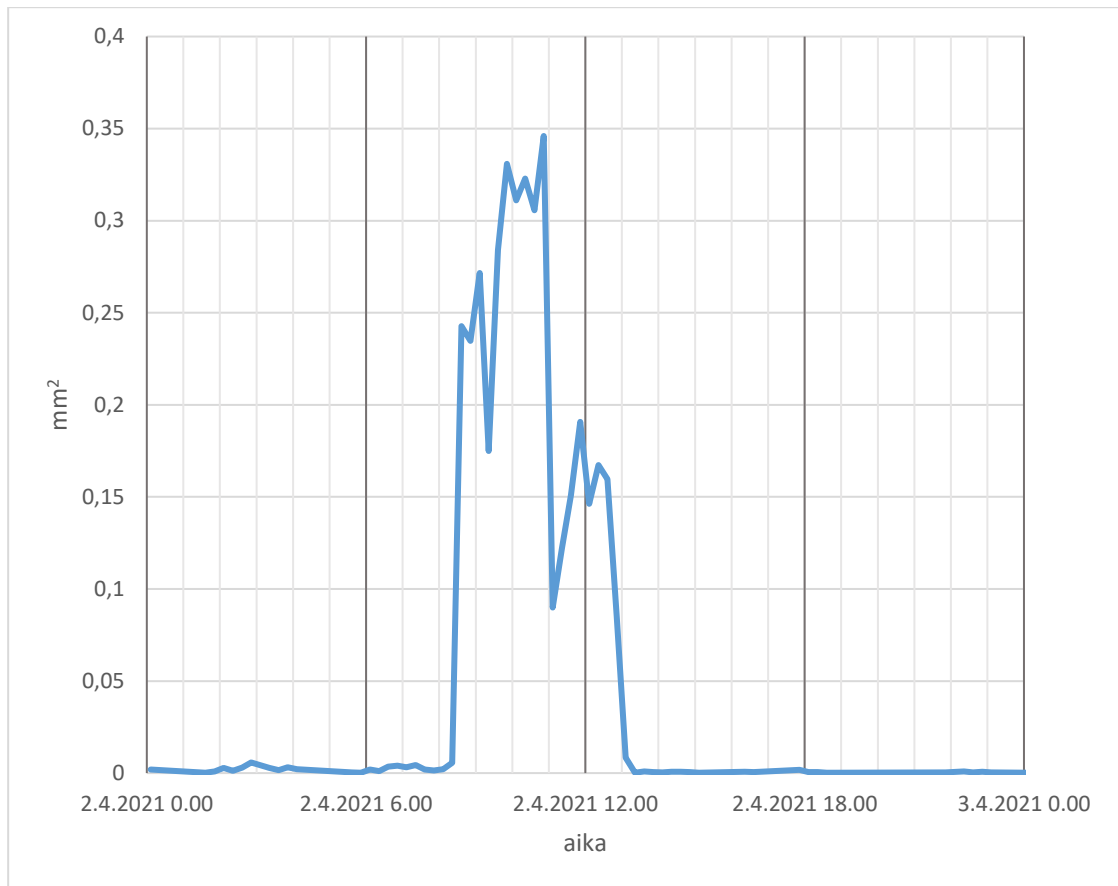
Oikean herkkyysarvon valinta vaatii tilastollista analyysiä suuresta määrästä kuvia erilaisilla herkkyysarvoilla, sekä kuvien visuaalista tarkastelua ja flokkien määrittelyä tällä metodilla. Flokin epämääräisen ja fraktaalisen muodon vuoksi on flokin määrittely enemmän riippuvaista määrittelijästä ja näin ollen täysin sopivaa herkkyysarvoa on mahdotonta määrittellä. Tästä syystä tässä vaiheessa on perusteltua käyttää vakiintunutta herkkyysarvoa, joka on määriteltävisuaalisen arvion perusteella. Näin voidaan kerätä tilastollisesti vertailukelpoista dataa, joka kuvastaa todellista tilannetta, vaikkei data olekaan absoluuttisen tarkkaa. Tästä datasta on mahdollista havaita prosessissa tapahtuvia muutoksia ja vertailla niitä esimerkiksi perinteisen sameusmittarin tuottamaan dataan.

Jatkokehityksenä olisi mahdollista käyttää neuroverkkoja sekä tekoälysovelluksia flokkien määrittelyyn, jonka perusteella voitaisiin käyttää sellaista herkkyysarvoa, joka ei olisi aistinvaraisen visuaalisen määrittelyn varassa. Flokkien analysointi vaatii monien muuttujien tilastoinnin, joka on haasteellista perinteisillä menetelmillä. Tämä mahdollistaisi tilastoinnin, joka olisi lähempänä todellisuutta. (Juntunen ym. 2014, 3–4.)

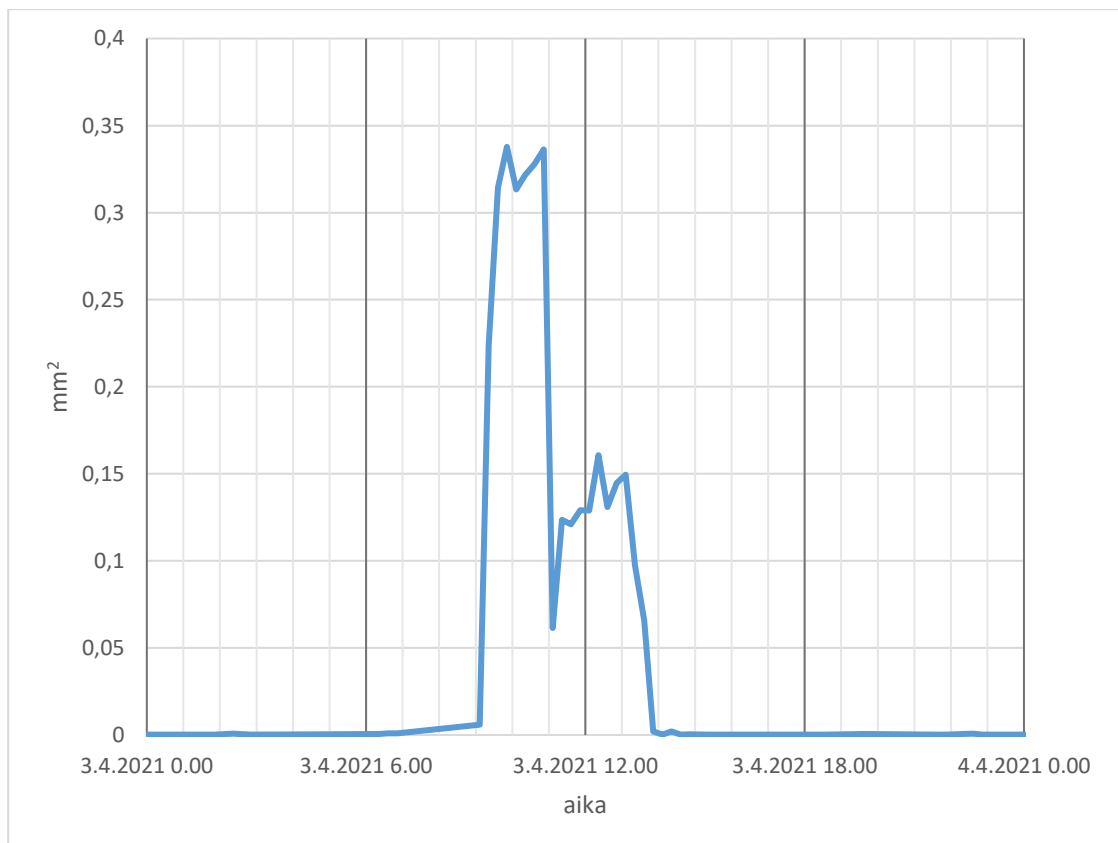
## 9 FLOKKIEN PEITTÄMÄT PINTA-ALAT KOKOALUEELLA 0,01–0,1 MM<sup>2</sup>

Otsikon mukainen kokoalue kuvastaa aluetta, jolla visuaalisen tarkastelun perusteella on havaittu tapahtuvan flokkaantumista. Koska analysoitavia kuvia on yhdessä mittapisteessä 40 kappaletta, on perusteltua ottaa tästä kuvasarjasta flokkien keskimääräinen pinta-ala analysoinnin helpottamiseksi. Analyysidatana on käytetty alkuperäistä sovelluksen tuottamaa Excel-tiedostoon tallennettua dataa, jossa on käytetty herkkyysarvon oletusparametriä 0,50. Savonlinnan veden Vääräsaaren puhdistuslaitos on toiminnassa ainoastaan kello 8–16 ja toiminta-aika riippuu tarvittavan veden määrästä, joten prosessi ajetaan ylös ja alas jokaisena vuorokautena. Näin ollen prosessimuutokset ovat nopeampia kuin jatkuvatoimisissa prosesseissa, joissa prosessia ajetaan pidempiä aikoja pienemmillä parametrimuutoksilla. Tällaisista prosesseista olisi helpompi havaita veden laadun muuttujien vaikutusta prosessiin.

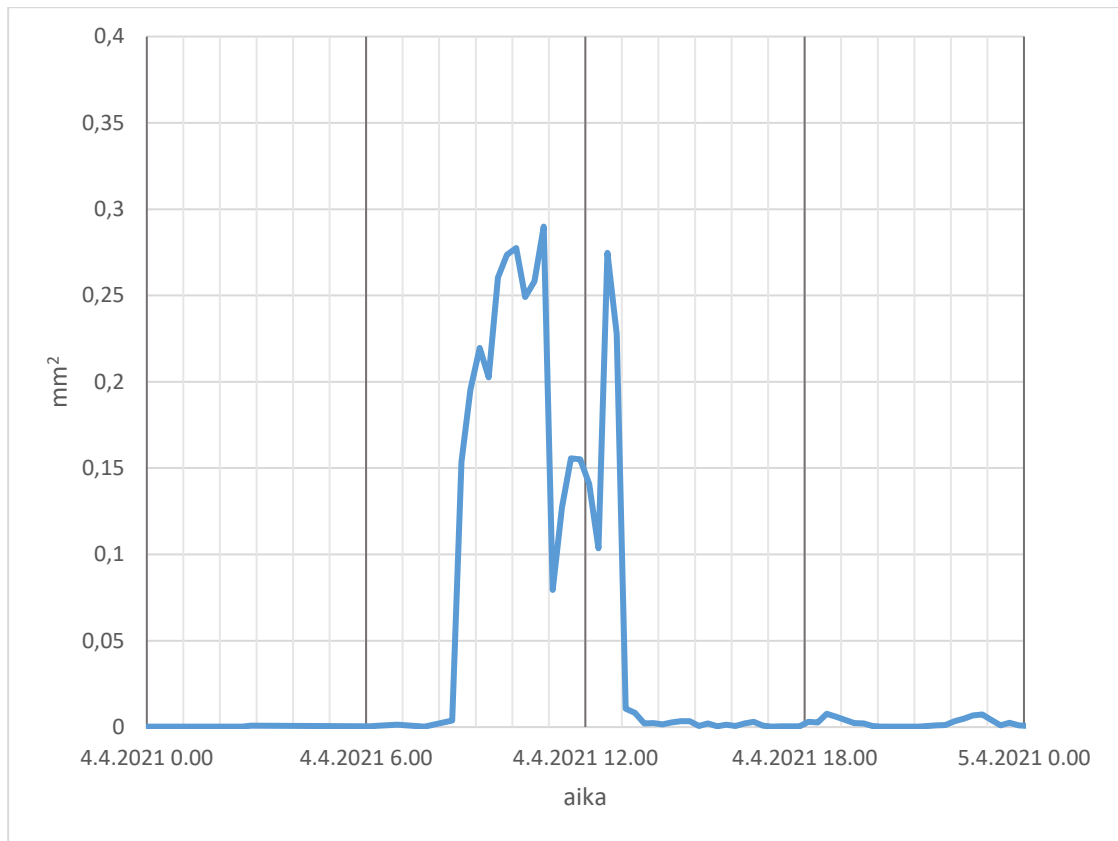
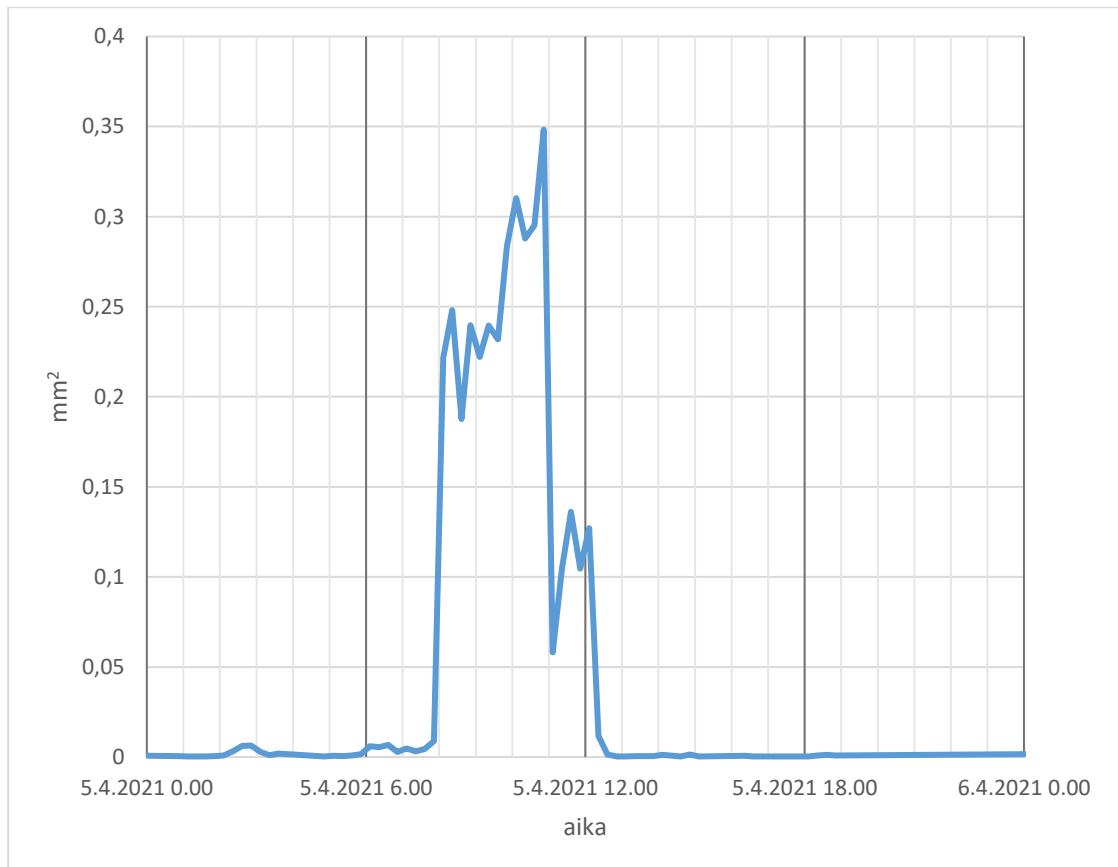
Seuraavissa kuvissa on esitetty 40:n kuvan kuvasarja kokoalueella 0,01–0,1 neliömillimetriä olevien flokkien pinta-alojen summien keskiarvo. Summa on saatu kertomalla kuvassa olevien flokkien kappalemäärä kuvan flokkien pinta-alojen keskiarvolla. Koska kuvien visuaalisen tarkastelun perusteella tämä mitta-alue kuvastaa todennäköisimmin flokkaantumista ja pelkän kappalemäärän tai yksittäisen kuvan flokkien pinta-alan tarkastelu ei tuo selkeää informaatiota flokkaantumisen tehosta, on helpoin tapa seurata kyseisen mitta-alueen flokkien konsentraatiota laskemalla niiden pinta-alojen summa. Tämä arvo kuvastaa konsentraatiota kuitenkin vain osittain, flokkien dimensioista ei ole mahdollista saada tietoa kaksiulotteisista kuvista sekä flokkien todellinen tilavuus vaatisi yksittäisten flokkien histogrammin tarkastelua suhteessa taustan histogrammiin, jotta olisi mahdollista saada tietoa todellisesta tiheydestä. Tämän tiedon paikkaansapitävyyden varmistaminen vaatisi kuitenkin flokkien analysointia laboratorio-olosuhteissa.

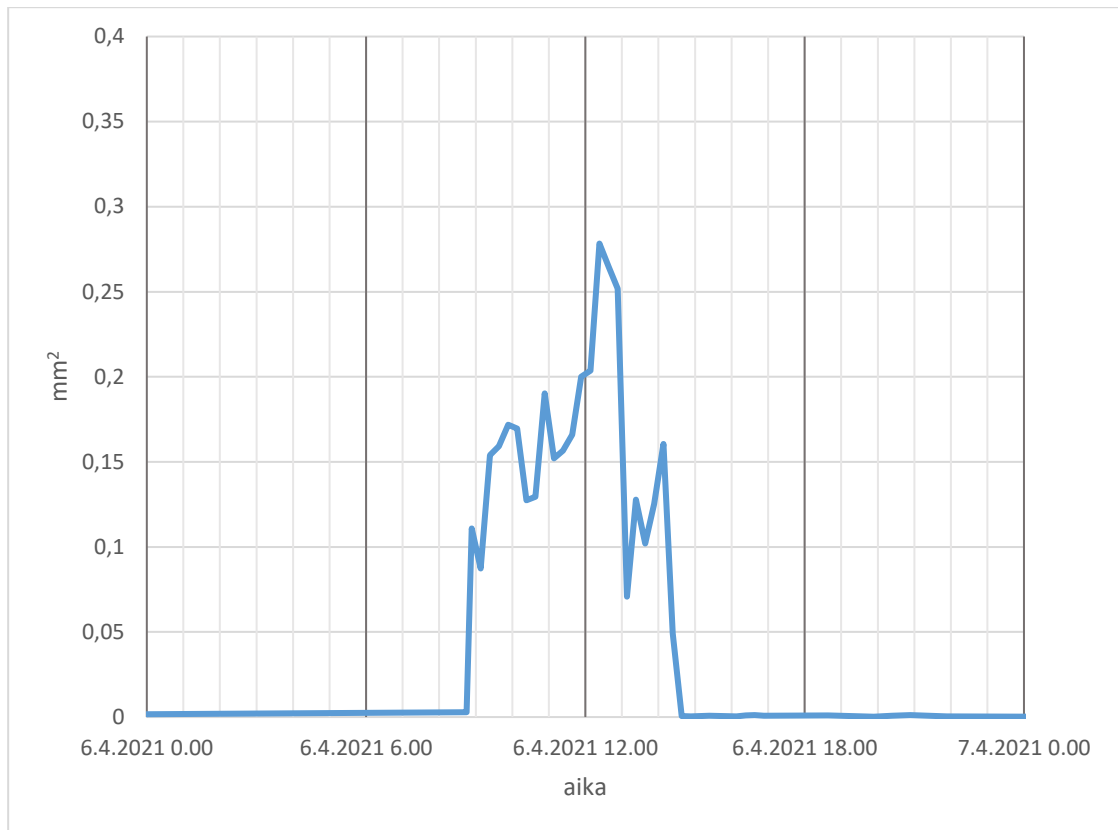


Kuva 19. Kokoalueen 0,01–0,1  $\text{mm}^2$  flokkien yhteenlasketut pinta-alat perjantaina 2.4.2021

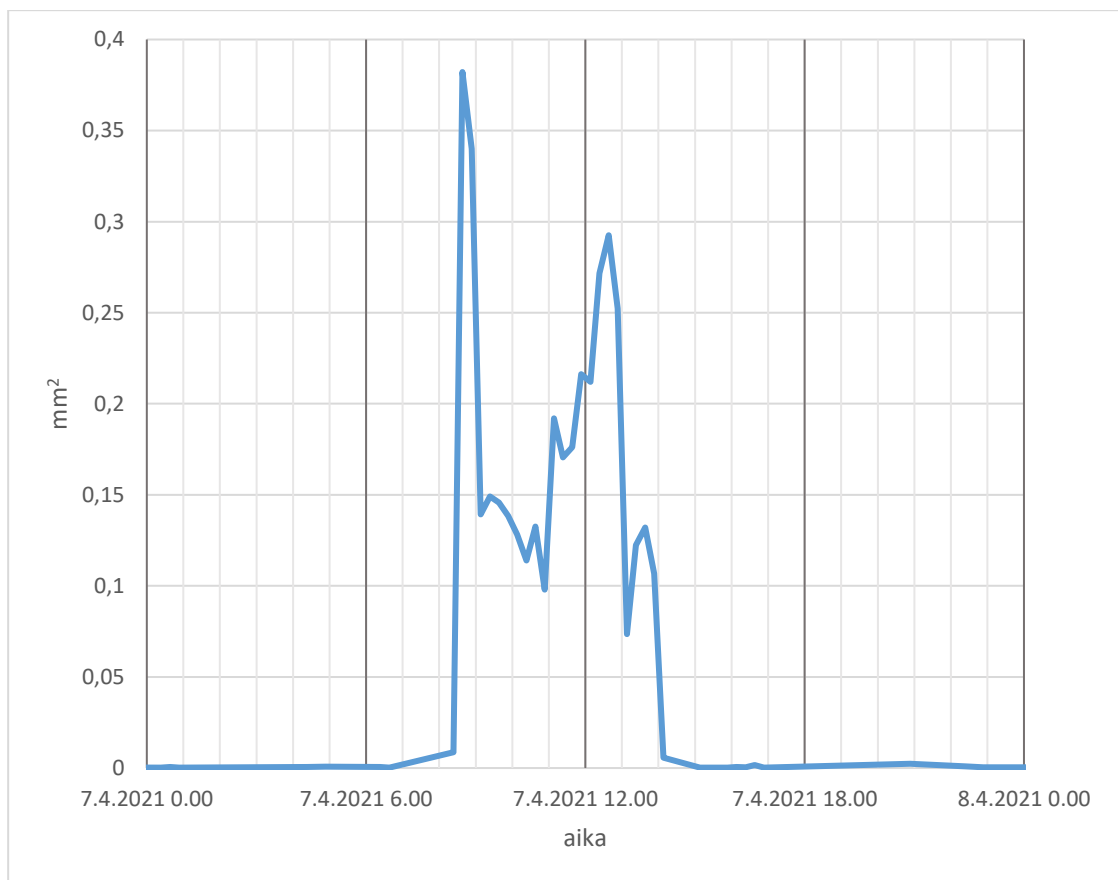


Kuva 20. Kokoalueen 0,01–0,1  $\text{mm}^2$  flokkien yhteenlasketut pinta-alat lauantaina 3.4.2021

Kuva 21. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat 4.4.2021Kuva 22. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat 5.4.2021

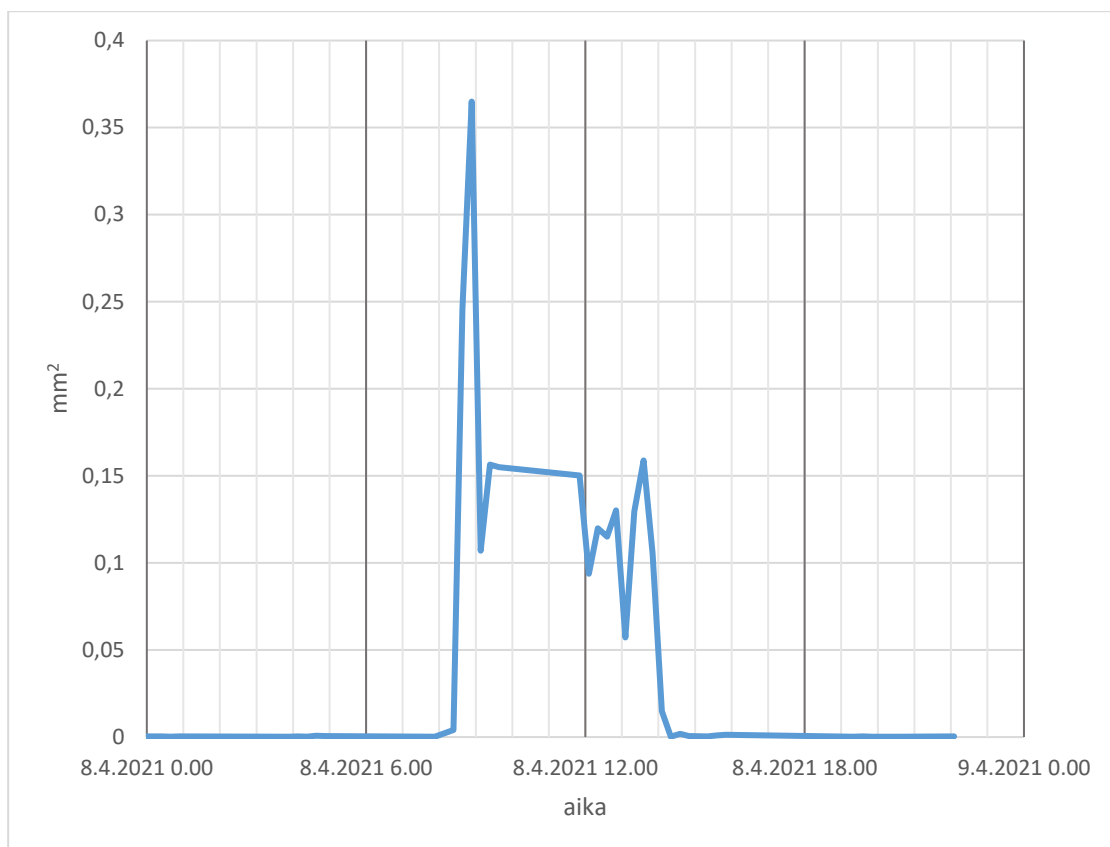


Kuva 23. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat tiistaina 6.4.2021



Kuva 24. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat keskiviikkona 7.4.2021





Kuva 25. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat torstaina 8.4.2021

Kuvissa 19–25 on esitetty koejaksona olleen viikon mittaustulokset. Koejaksonalla ylös- ja alasajot eivät tapahtuneet vakiintuneina kellonaikoina, pääsääntöisesti alasajo on tapahtunut noin kello 14. Laitoksen ollessa alasajettuna flokkaantumista ei tapahdu analyysin perusteella ja kuvien satunnaisen visuaalisen tarkastelun perusteella tämä mittaustuloksista tehty päätelmä pitää paikkansa. Kuvien 19–25 perusteella kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien peittävä pinta-ala on pääasiassa suurimmillaan laitoksen käynnistyessä ja alkaa laskemaan noin kello 12 tienoilla. Tämä viittaa flokkaantumisilmiön olevan voimakkaimmillaan laitoksen toiminnan alkuvaiheessa. Flokkauskemikaalien ja sekoituksen vaikutusta ilmiöön ei voida tietää ilman tietoa näistä parametreista. Pintaveden lämpötilan vaikutusta flokkaantumiseen ei voida päätellä tältä ajanjaksolta, sillä pintaveden lämpötilan tilastointi alkaa vasta tämän mittausjakson jälkeen. Oletuksena voidaan pitää, että pintaveden lämpötila on ollut tällä jaksolla vakiintunutta, joten tämä muuttuja ei ole todennäköisesti vaikuttanut flokkaantumiseen.

## 10 VERTAILU SAMEUSMITTARIN DATAAN

Mittauslaitteistoon on USB-yhteydellä kytkettynä sameusmittari, joka tuottaa yhden mittapisteen viidentoista minuutin välein. Johtuen mittapisteiden vähyydestä ja mittauksissa esiintyvistä virheellisistä arvoista, on tämä data kuitenkin resoluutioltaan huomattavasti pienempää kuin kuvantamisella tuotettu data. Perinteisesti sameusmittaria on käytetty jo puhdistusprosessin läpikäyneen veden laadun mittaamiseen.

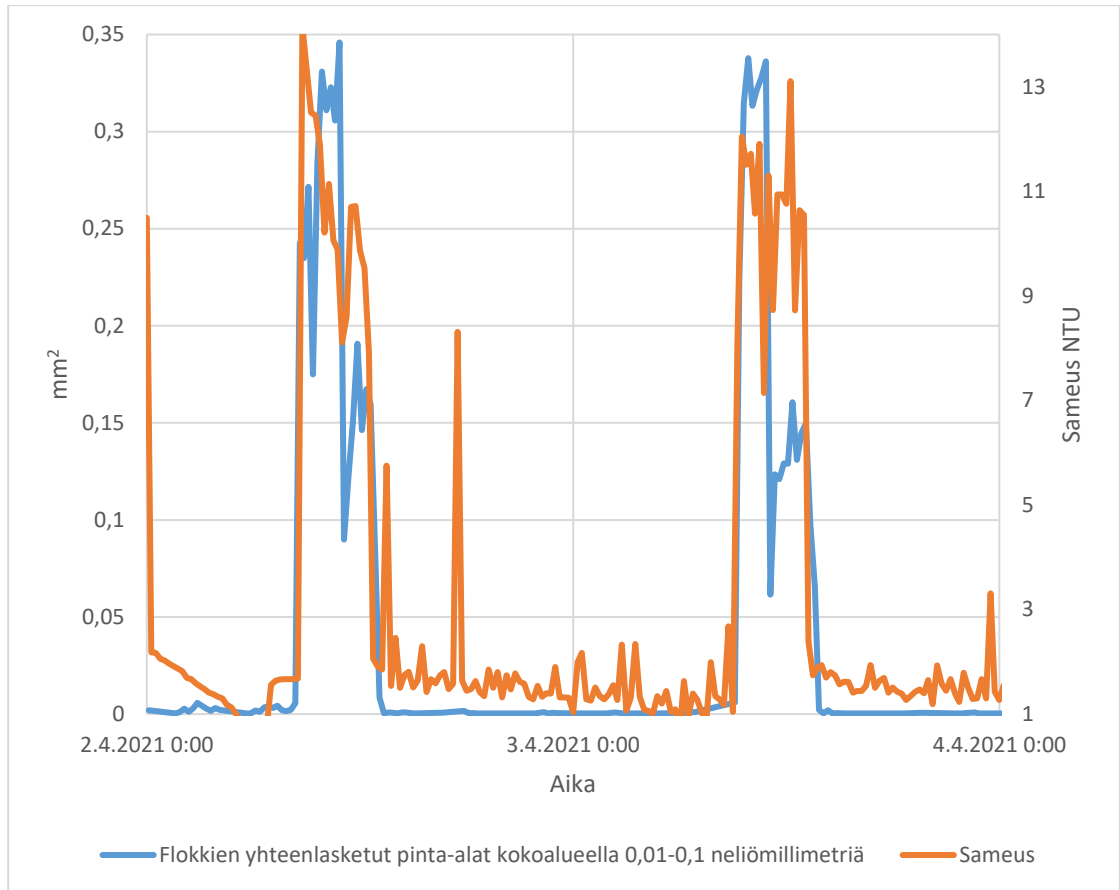
Sameusmittarin toiminta perustuu nefalometriseen määrittelyyn. Tämä määrittely mittaa veden valonläpäisevyyttä. Nefalometrinen määrittely riippuu veden sisältämien partikkeleiden kappalemäärästä, muodosta, koosta ja väristä. Laitteistoon liitetyn sameusmittarin mittayksikkö on NTU (Nephelometric turbidity unit). Puhtaan juomaveden NTU-arvo on alle 1, kuitenkin olematta täysin 0. Tämän pääasiassa aiheuttaa vedessä olevat pienet ilmakuplat. Välillä 1–5 olevaa sameutta ei voida vielä havaita aistinvaraisesti näytteestä. Vesi on erittäin sameaa NTU-arvon ollessa yli 100. Vesilaitoksen sekoitusaltaissa sekoituksen ollessa pysähdyksissä oli NTU-arvo noin 2. (Opetushallitus; Oravainen 1999, 8; Pure water gazette 2019.)

Vääräsaaren raakaveden NTU-arvoista ei ole HUVA-hankkeen sameusmittarin lisäksi saatavilla olevaa dataa. Vuonna 2019 Vääräsaaren puhdistamon lähtevän veden sameuden keskiarvo oli alle 0,20 NTU ja maksimiarvo 1,20 NTU. Verkoston sameuden keskiarvo oli 0,30 NTU ja maksimi 0,72 NTU. (Savonlinnan vesi 2019, 11.)

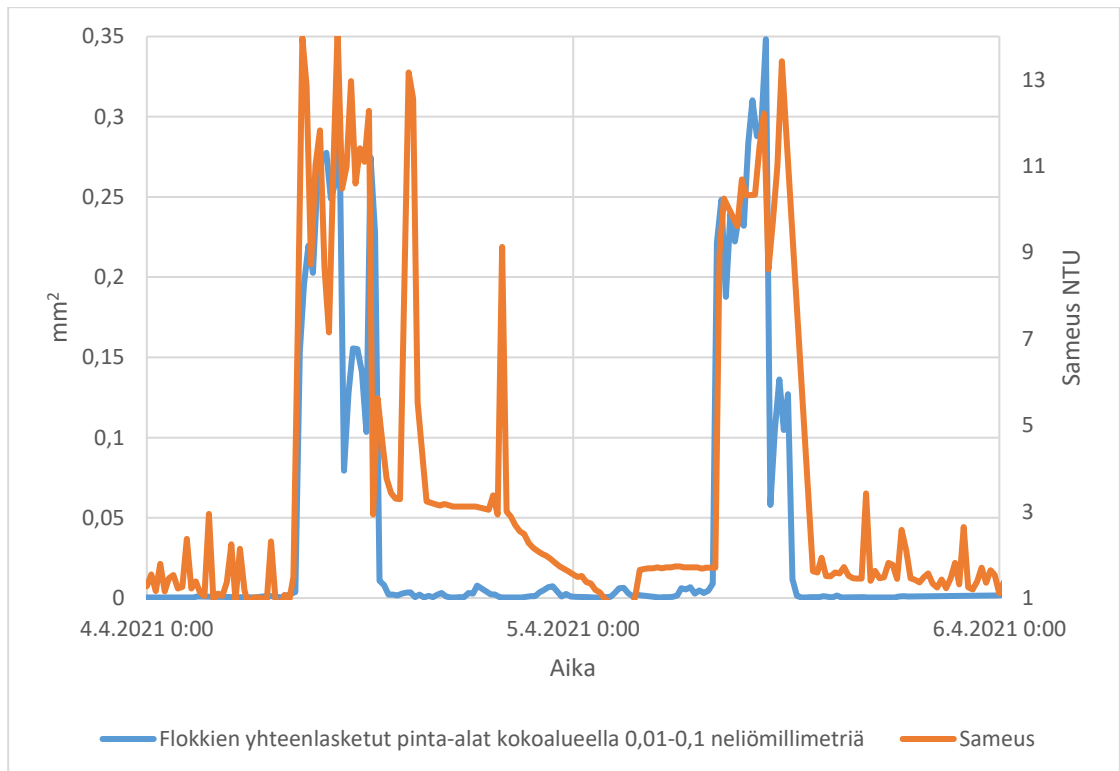
Mittauksissa on käytetty sovelluksen tuottamaa alkuperäistä Excel-tiedostoon tallennettua dataa. Herkkyyksiarvon parametrinä käytettiin oletusarvoa 0,50.

### 10.1 Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> vertailu sameusmittarin NTU-arvoihin

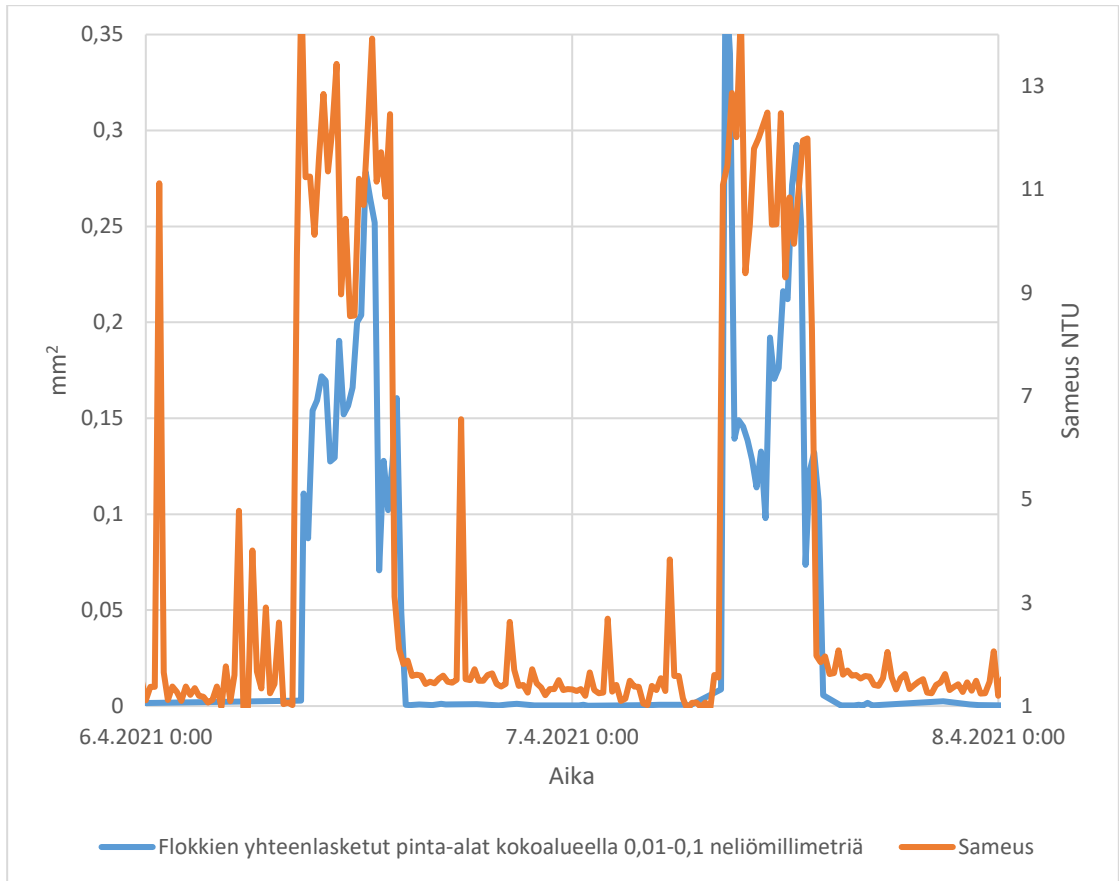
Kokoalue 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> on todennäköisin alue flokkaantumisilmiölle kuvantamisen perusteella. Tämän kokoalueen vertailu perinteiseen optiseen sameusmittaukseen kertoo, onko sameusmittarilla mahdollista havaita flokkaantumisilmiötä ja voidaan myös todeta vastaako laitoksen toimintasykli kuvantamisen avulla saatuja mittaustuloksia.



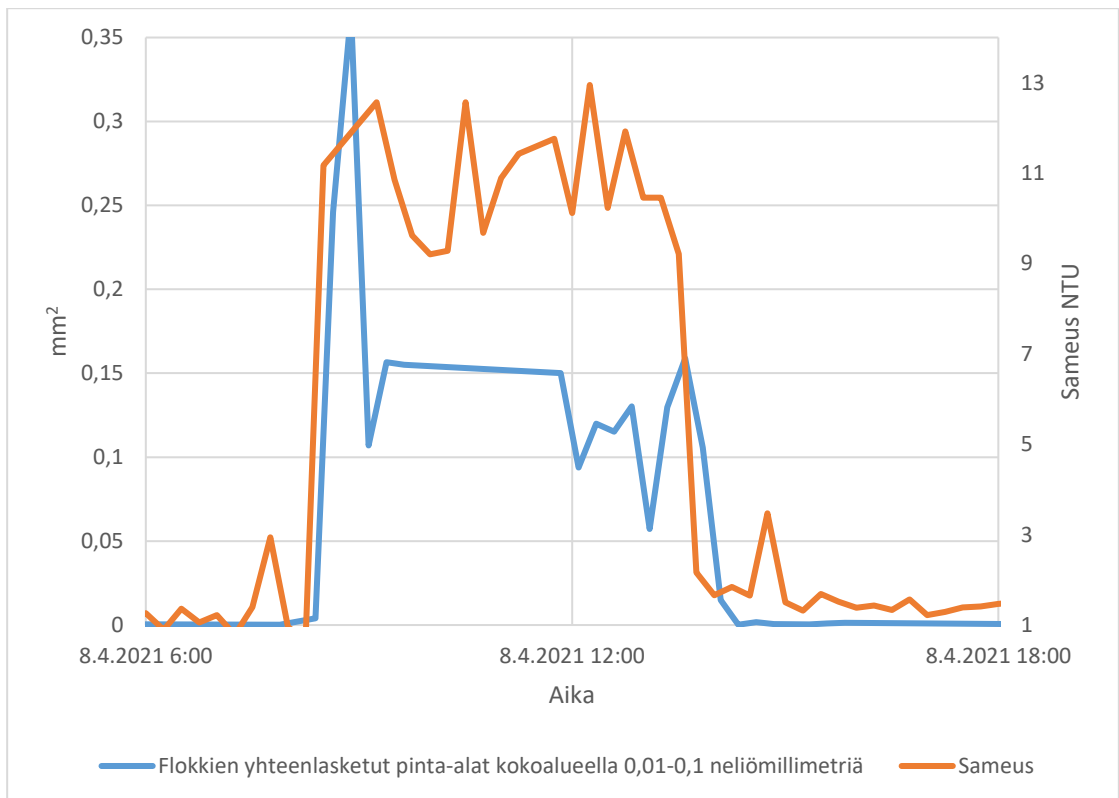
Kuva 26. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 2.4.-4.4.2021



Kuva 27. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 4.4.-6.4.2021



Kuva 28. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1  $\text{mm}^2$  flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 6.4.-8.4.2021



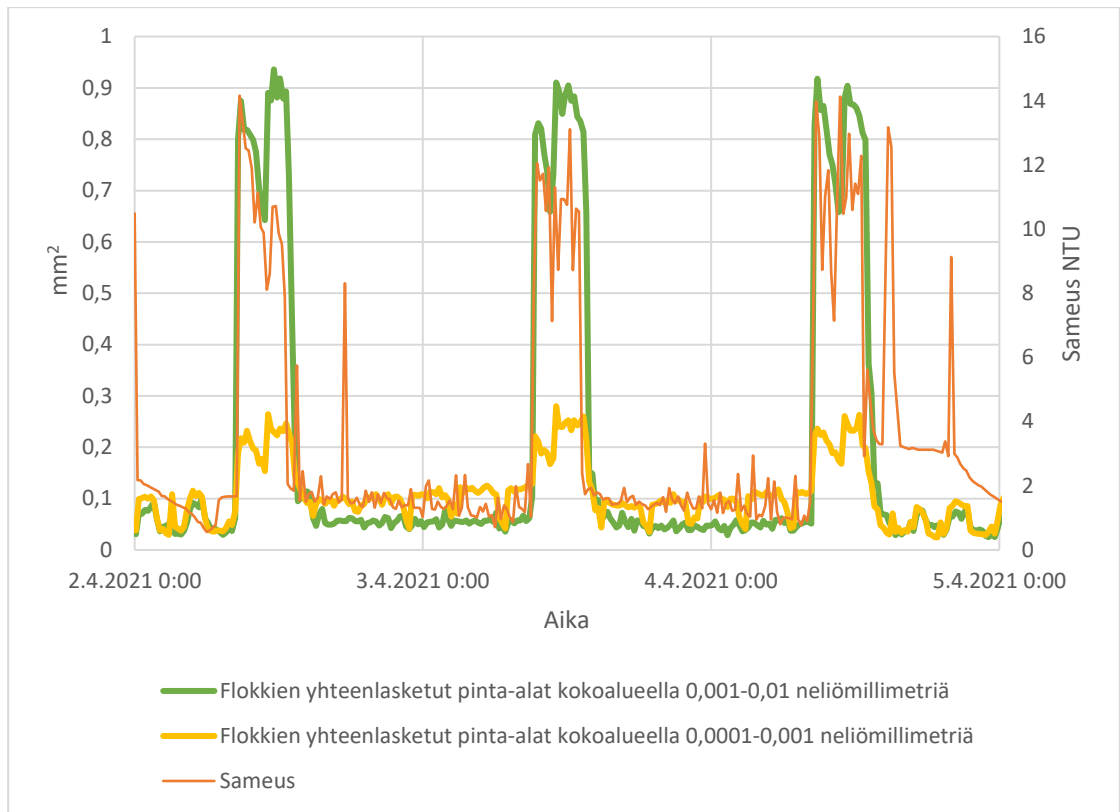
Kuva 29. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1  $\text{mm}^2$  flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 8.4.2021

Kuvissa 26–29 on esitetty kokoalueen 0,01–0,1 neliömillimetriä olevien flokkien pinta-alat vasemmanpuoleisella pystyakselilla ja sameuden NTU-arvo oikeanpuoleisella pystyakselilla, kuvaajissa pinta-alat on esitetty sinisellä kuvaajalla ja sameus oranssilla kuvaajalla. Sameusmittauksista on poistettu arvot, jotka ovat yli 20, nämä arvot ovat aikaisempien havaintojen perusteella virheellisiä. Kuvaajia tarkastelemalla voidaan havaita, että pelkkää sameusmittausta käyttämällä flokkaantumisen ei voida tehdä suoria päätelmiä, sillä sameusarvot eivät seuraa johdonmukaisesti flokkien peittämien pinta-alojen suuruutta. Sekoitusaltaan vesi alkaa sameutua aikaisemmin kuin varsinainen flokkaantuminen alkaa tapahtua. 4.4.2021 laitoksen toiminnan jo pysähtyttyä sameusarvo on jäänyt myös tavallista korkeammaksi, kuitenkin laskien ennen puolta yötä. Sykleittäin toimivilla laitoksilla pienen mittapisteiden ajallisen resoluution sameusmittaukset kertovat ainoastaan siitä, että laitos on toiminnassa, päätelmiä flokkaantumisen tehokkuudesta ei voida tehdä, sillä sameusmittaukseen vaikuttaa myös muidenkin kuin flokkaantuneiden partikkelien määrä.

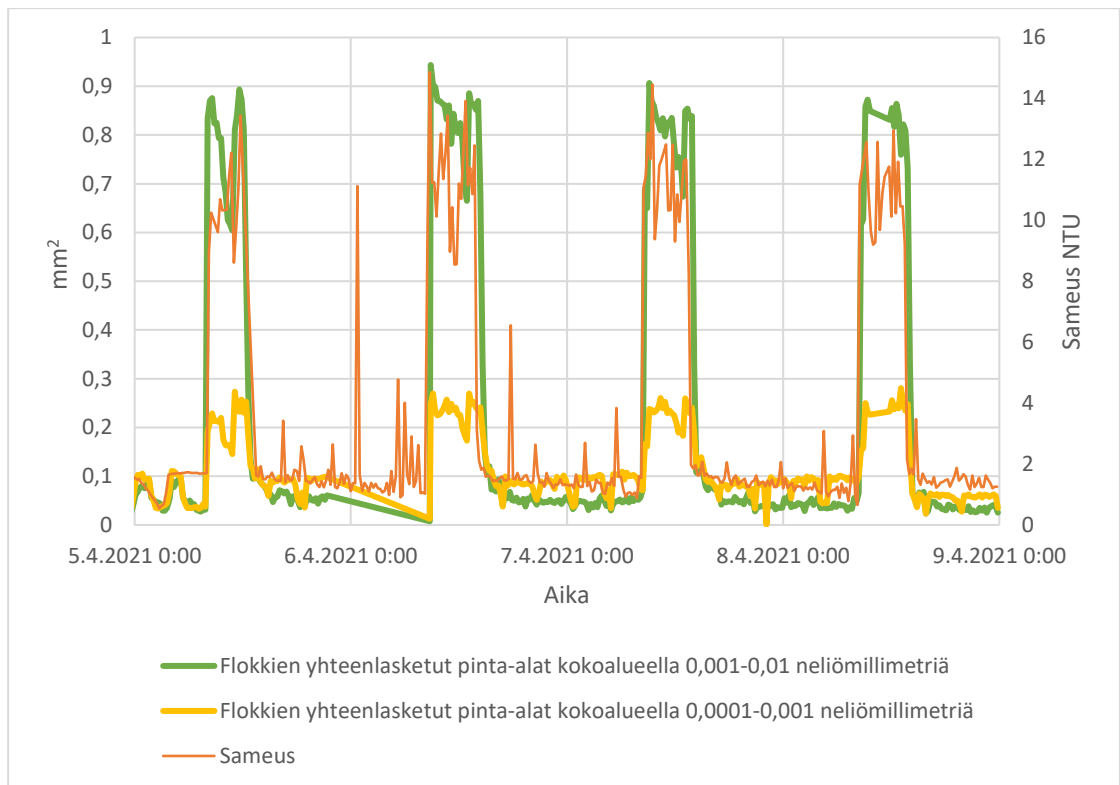
Sivuilla 38, 40 ja 41 esitetyistä kuvista 19, 20, 24 ja 25 voidaan havaita kyseisinä päivinä laitoksen käynnistymisen jälkeen tapahtuneen voimakasta flokkaantumista, joka on tämän jälkeen tasaantunut. Koejakson kaikilta päiviltä voidaan havaita, että laitoksen alasajo aloitetaan jo hieman ennen prosessin täyttää pysäyttämistä. Kun vastaavasti verrataan kuvista 26, 28 ja 29 vastaavia ajanjaksoja sameuden suhteen, voidaan havaita, että vaikka suurempien flokkien muodostuminen on pysähtynyt, on sameusarvo pysynyt tasaisena. Kuvia 26–29 vertailemalla voidaan päätellä, että sameusmittarin data kuvastaa sekoittimien toiminnan tehokkuutta, jolloin flokkien pinta-ala kuvastaa enemmän flokkaantumisen tehokkuutta.

## **10.2 Kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> vertailu sameusmittarin NTU-arvoihin**

Kokoalueilla 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> esiintyvät partikkelit ovat todennäköisimmin hajonneiden flokkien osia tai flokkaantumattomia humuspartikkeleita. Kokoalueen vertailu sameusmittarin dataan todentaa kuvantamisesta saadun analyysin vertailukelpoisuuden perinteiseen sameusmittaukseen.



Kuva 30. Sameuden ja kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasket-  
tujen pinta-alojen vertailu 2.4.-5.4.2021

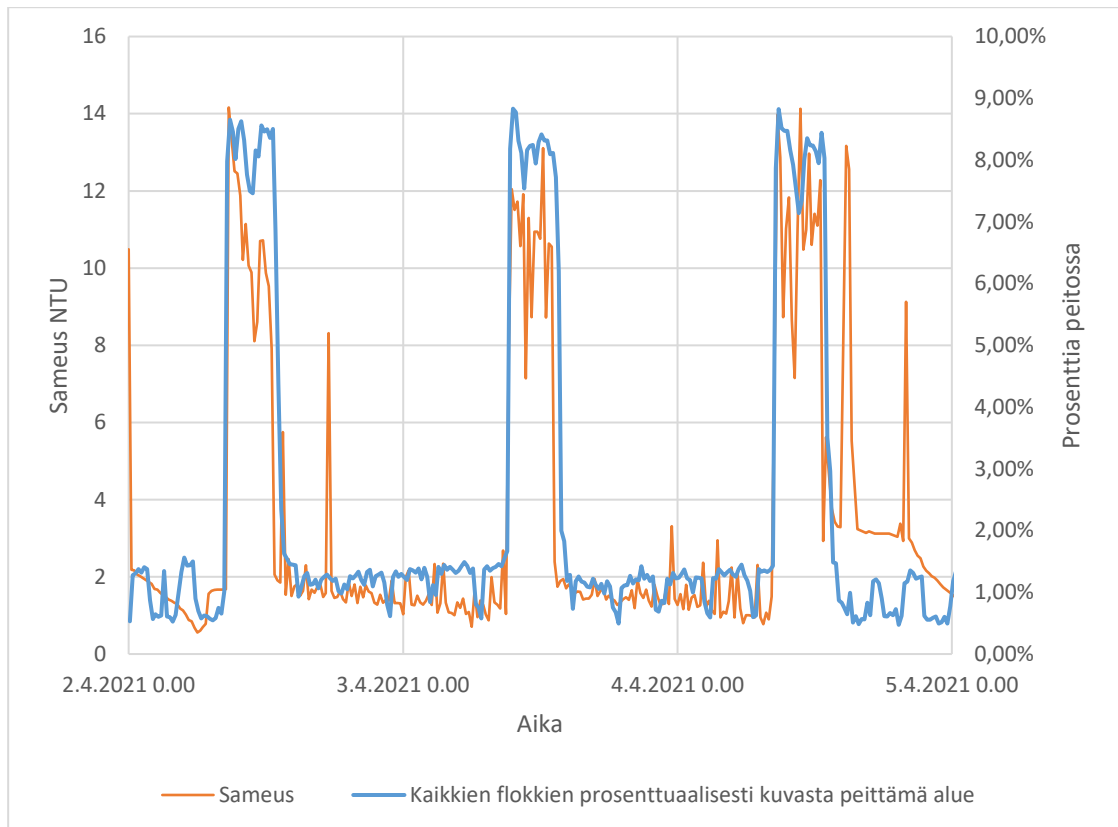


Kuva 31. Sameuden ja kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasket-  
tujen pinta-alojen vertailu 5.4.-8.4.2021

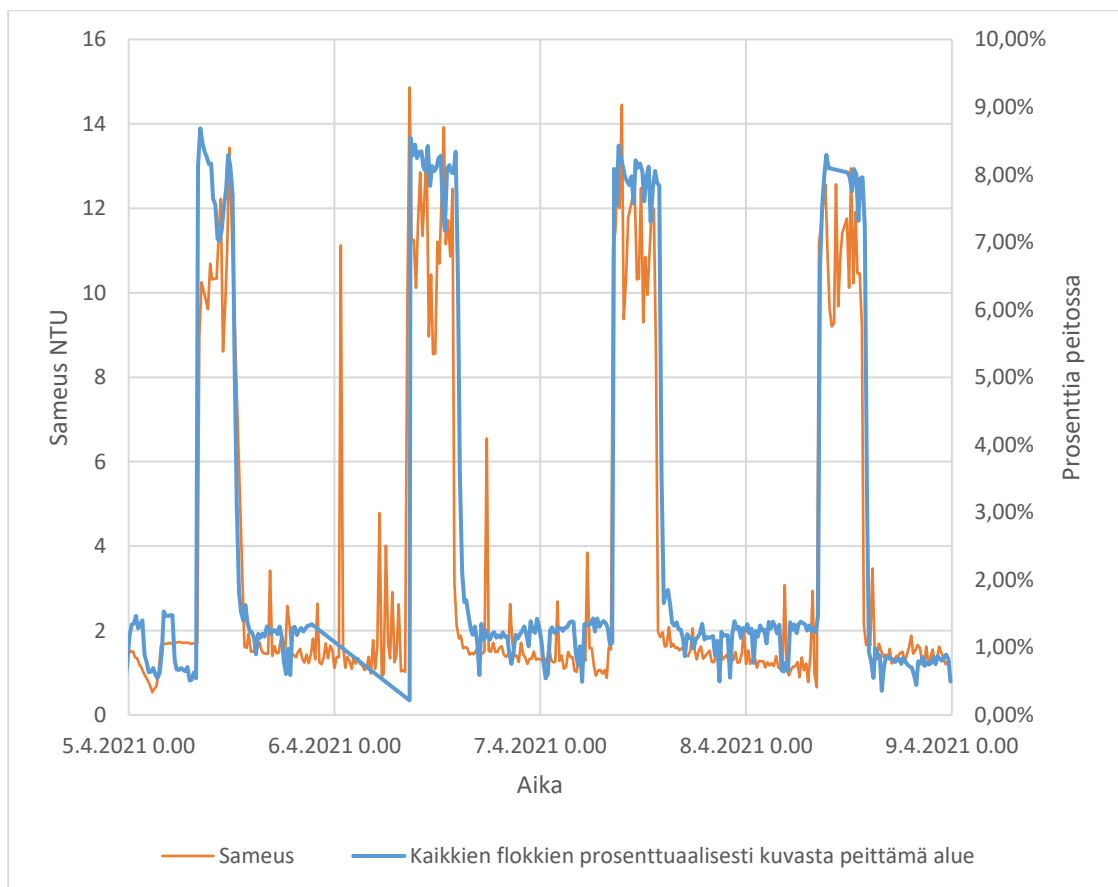
Kuvissa 30 ja 31 on vertailtu kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettuja pinta-aloja sameuden NTU-arvoihin. Kategorioiden pinta-alojen kuvaajat seuraavat toisiaan, pienemmän kategorian pinta-alat eivät kuitenkaan kasva samaan kokoluokkaan kuin isomman kategorian flokkien pinta-alat. Kummankin kategorian kuvaajissa on havaittavissa samankaltaisuutta sameusmittauksen kanssa. Sameusmittauksessa esiintyy kuitenkin enemmän variaatiota, sillä sameusmittauksen mittapiste on ainoastaan yksi arvo, kun taas flokkimittauksen arvo on 40:n kuvan keskiarvo. Kummankin kategorian flokkianalyysiä voi pitää vertailukelpoisena sameusmittauksen kanssa. 4.4.2021 prosessin jo pysähdyttä kohonneena pysynyt sameusarvo ei kuitenkaan näy mittauksissa, tämä voi viitata joko sameusmittarin virheeseen tai prosessissa olleeseen muuttujaan, joka ei kuitenkaan näkynyt kuvantamisessa.

### **10.3 Kaikkien flokkien peittämän alueen vertailu sameusmittarin NTU-arvoihin**

Koska nefalometrinen sameusmittaus perustuu valon läpäisevyyteen, voidaan olettaa, että kaikkien tunnistuneiden partikkelien kuvasta peittämä alue seuraisi johdonmukaisesti sameusmittarin antamia NTU-arvoja (Opetushallitus). Tämä oletus kuitenkin jättää huomiotta flokkien mahdolliset värin muutokset, joita ei ollut mahdollista havainnoida käytössä olleella ainoastaan harmaasävykuviin pystyvällä kameralla. Kuten aikaisemmin on todettu, kuvauksesta saatuja mittapisteitä on aina 40 viidentoista minuutin välein, kun taas sameusmittauksen mittapisteitä on ainoastaan yksi viidentoista minuutin välein. Näin ollen voidaan olettaa, että kuvauksella saatujen mittapisteiden tarkkuus on suurempi kuin pelkällä sameusmittauksella saatujen mittapisteiden tarkkuus.



Kuva 32. Sameuden ja kaikkien flokkien kuvasta peittämän alueen vertailu 2.4.-5.4.2021



Kuva 33. Sameuden ja kaikkien flokkien kuvasta peittämän alueen vertailu 5.4.-8.4.2021



Kuvissa 32 ja 33 on vertailtu sameusmittarin NTU-arvoja kuvantamisella saatuun kuvasta prosentuaalisesti peitossa olleen alueen keskiarvoon kyseisessä mittapisteessä. Kuvaajat eivät seuraa täysin toisiaan, sameusmittauksessa on havaittavissa enemmän piikkejä. 4.4.2021 prosessin jälkeen nähtävissä oleva sameusarvon kohollaan pysyminen ei näy myöskään kaikkien flokkien peittämän alueen kuvaajassa. Kuvaajat kuitenkin seuraavat toisiaan ja samankaltaista mitta-arvojen vaihtelua on havaittavissa kummastakin kuvaajasta.

## 11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Flokkien kuvantamisen automatisointi mahdollistaa tiedonkeruun yksinkertaistamisen ja hankkeen työvoiman kohdentamisen analyysien tulkintatyöhön ja jatkokehitysmahdollisuuksien selvittämiseen. Kuva-analyysillä tuotetusta tiedosta on mahdollista tehdä päätelmiä prosessin toimivuudesta ja vertailla tietoja muuhun saatavilla olevaan dataan. Kuvien suodatus taustakuvalla on helppointa toteuttaa reaaliaikaisessa järjestelmässä, jossa ennen jokaista mittapistettä otetaan kuvasarja, jota voidaan käyttää taustakuvana. Eriaikaisessa järjestelmässä tämä vaatisi kaksinkertaisen määrän kuvadataa, jotka täytyisi erottaa toisistaan. Makropohjaisella kuvauksella ei voida myöskään toteuttaa kuvauksen vikasietoisuutta, minkä takia epätäydelliset mittapisteet voivat aiheuttaa ongelmia kuvien puutteellisen määrän takia, jos makro-ohjauksella olisi myös toteutettu taustakuvalla tehtävä suodatus.

Automaatiosovelluksen etuna on myös järjestelmän monitoroinnin vaatiman ajan vähentyminen sekä kuvadatan siirtoon tarvittavan ajan vähentyminen. Automaatiosovelluksen tehdessä varmuuskopiot kuvadatasta jokaisen mittapisteen jälkeen säästytään kuvien manuaaliselta varmuuskopioinnilta. On kuitenkin huomattava, että tallennustilan vähentymisen monitorointi täytyy tehdä edelleenkin etäyhteyden yli.

Tässä muodossa sovellukselta puuttuu vielä graafinen käyttöliittymä, joka mahdollistaisi ohjausasetusten muuttamisen reaaliaikaisesti, ilman konfiguraatiotiedoston manuaalista muuttamista. Graafisella käyttöliittymällä olisi mahdollista toteuttaa mittausarvojen reaaliaikaista graafista seuranta, tällä hetkellä mittausdata täytyy manuaalisesti muuntaa graafiseen muotoon. Tallennetuista mittapisteistä ei tallenneta keskiarvotietoja, minkä takia mittausdatan

käsittely vaatii myös manuaalista työtä. Mittapisteiden keskiarvotietojen automaattinen tallentaminen helpottaisi graafisten kuvaajien tekemistä mittausdatasta.

Analyysiovelluksen käyttöönottoajankohta mahdollistaa tarkemman analyysin pintavesien lämpenemisestä aiheutuvista mahdollisista muutoksista flokkautumisprosessissa. Vertailemalla myös muihin saatavilla oleviin muuttujiin ja parametreihin on mahdollista saada tarkempaa tietoa prosessin optimoimisen kannalta tulevaisuudessa.

Sovelluksen jatkokehitystä on tarkoitus suorittaa hankkeen piirissä. Vaikka kyseessä on pilottilaitteisto ja –sovellus, on toimintavarmuus kuitenkin ollut korkealla tasolla. Herkkyysarvon kalibrointi kuitenkin vaatisi kattavampaa testausta laboratorio-olosuhteissa, jossa muuttujat ja parametrit olisivat kontrolloidumpia. Hankkeella on kuitenkin käytettävissään Savonia AMK:n kuvausjakson raakakuvat, joissa on tallennettuna myöskin mittapisteiden välillä olevat pesujaksot. Tätä dataa on mahdollista tulevaisuudessa hyödyntää herkkyysarvon kalibroinnissa, sillä tältä koejaksolta on saatavilla erilaisia prosessiparametrejä ja niiden muutosten vaikutuksia on mahdollista hyödyntää kalibroinnissa.

Oleellisimpana jatkossa tarvittavana ominaisuutena voidaan pitää tasaisin väliajoin tapahtuvaa valaistusarvon automaattista säätämistä, joka on mahdollista toteuttaa kuvausmakroa vastaavalla toiminnallisuudella. Basler Pylon Viewer -ohjelmistossa on mahdollisuus käyttää automaattisesti säätyvää valaistusarvoa, mutta tämän käyttäminen tekee kuvien tummuudesta epälineaarista, joten tämän toiminnon käyttäminen ei ollut järkevää. Oleellista on myös kehittää analyysisovellukselle mahdollisuus lähettää tilannetietoja sekä varoituksia etäyhteydellä, mitkä mahdollistaisivat vikatilanteiden havaitsemisen ajoissa. Mahdollisia vikatilanteita ovat esimerkiksi erilaiset letkurikot, ohjelmiston osien kaatuminen tai kuvien varmuuskopiotilan täyttyminen.

Koeajojakson tuloksista ei pysty tekemään selkeitä päätelmiä prosessin senhetkisestä toimivuudesta ilman, että käytettävissä on myös prosessidataa, jonka avulla mahdollisia prosessimuutoksia olisi mahdollista analysoida. Analyysillä oli kuitenkin mahdollista havaita prosessissa tapahtuvia muutoksia,

jotka voivat olla riippuvaisia joko veden laadusta tai flokkauskemikaaleissa tapahtuneista muutoksista. Kuvausdatan vertailu veden NTU-arvoihin osoitti, että kuvausdatasta on mahdollista havaita veden valonläpäisevyyttä vastaavia arvoja, flokkien kuvasta peittämän prosentuaalisen osuuden ollessa lähimpänä sameusmittauksesta saatuja arvoja. Kuvien visuaalisella tarkastelulla voitiin kuitenkin havaita flokkaantuneita partikkeleita ja näiden suurempien partikkeleiden analyysidata on todennäköisimmin flokkaantumisilmiötä kuvaavaa.

Kuvantamisteknologioiden kehitys kohti itsestään oppivia järjestelmiä tulee olemaan yksi merkittävä osatekijä teknologioiden hyödyntämisen kannalta. Neuroverkkopohjainen järjestelmä pystyisi nykyisiä järjestelmiä suurempaan autonomiaan ja sopeutuisi prosesseihin ilman jatkuvaa kalibroimista. Tällaisten järjestelmien kehitystyö vaatii suuria määriä alkuvaiheessa hyödynnettävää kuvadataa, jollaista HUVA-hankkeen myötä on tuotettu käytettäväksi tulevaisuudessa. Tämän työn aiheena ollutta automaatiosovellusta voidaan hyödyntää entistä paremman kuvadatan tuottamisessa ja edistää uusien teknologioiden kehitystyötä.

Globaalissa mittakaavassa puhtaan veden tarve tulee aina olemaan kriittistä. Tulevaisuudessa automaatiosovelluksen avulla tehty flokkianalyysi voi mahdollistaa entistä puhtaamman veden tuottamisen nykyistä pienemmillä kustannuksilla. Kestävän kehityksen ja kiertotalouden periaatteiden mukaisesti jokaisella biotuotealan sektorilla täytyy hyödyntää uuden teknologian tuomia mahdollisuuksia ympäristölle aiheutuvan kuormituksen pienentämiseksi. Kuvantamisjärjestelmien teknologian kehittyessä myös niiden hintataso tulee todennäköisesti halpenemaan, mikä luo järjestelmien käytölle uusia mahdollisuuksia globaalisti.

## LÄHTEET

Huoltovarmuuskeskus. 2020. Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen Suomen vesihuollossa. Helsinki: Huoltovarmuuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.vvy.fi/site/assets/files/3226/kemiallisen\\_saostuksen\\_huoltovarmuuden\\_parantaminen.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/3226/kemiallisen_saostuksen_huoltovarmuuden_parantaminen.pdf) [viitattu 25.4.2020].

Juntunen, P., Liukkonen, M., Lehtola, M. & Hiltunen, Y. 2014. Characterization of alum floc in water treatment by image analysis and modeling. *Cogent Engineering* 1. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23311916.2014.944767?needAccess=true> [viitattu 27.4.2021].

Kauppi, T., Ojanen, T. & Hiltunen, Y. 2020. Flokkien kuvaamisesta uusi online-monitorointimenetelmä juomaveden valmistusprosessiin pintavedestä. Teoksessa: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. Metsä, ympäristö ja energia: Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä vuosijulkaisu 2020. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 238–242. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/355599/URNISBN9789523442955.pdf> [viitattu 23.4.2021].

Knowpulp. 2021. Raakaveden käsittely. WWW-dokumentti. Päivitetty 2021. Saatavissa: [http://www.knowpulp.com/www/suomi/raw\\_materials/2\\_water/2\\_raw\\_water/frame.htm](http://www.knowpulp.com/www/suomi/raw_materials/2_water/2_raw_water/frame.htm) [viitattu 24.4.2021].

Mathworks Inc. 2021. Matlab documentation. WWW-dokumentti. Päivitetty 2021. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/matlab/> [viitattu 28.4.2021].

Ojanen, T. & Hiltunen, Y. 2021. Kameratekniikat auttavat tekemään parempaa juomavettä. Biogrowth news. Sähköinen uutiskirje. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Opetushallitus s.a. Veden sameuden nefelometrinen määrittäminen. WWW-dokumentti. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/ymparisto-analyysit/veden\\_sameuden\\_nefelometrinen\\_maaritys.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/ymparisto-analyysit/veden_sameuden_nefelometrinen_maaritys.html) [viitattu 30.4.2021].

Oravainen, R. 1999 Vesistötulosten opasvihkonen. Tampere: Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf> [viitattu 30.4.2021].

Pure Water Gazette. 2019. Measuring turbidity: NTU, FTU, FAU. WWW-dokumentti. Päivitetty 23.3.2019. Saatavissa: <http://www.purewatergazette.net/blog/measuring-turbidity-ntu-ftu-fau/> [viitattu 30.4.2021].

Savonlinnan vesi. 2019. Toimintakertomus 2019. Savonlinna: Savonlinnan kaupunki. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.savonlinna.fi/filebank/16601-Toimintakertomus\\_2019.pdf](https://www.savonlinna.fi/filebank/16601-Toimintakertomus_2019.pdf) [viitattu 30.4.2021].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Kemiallisesti puhdistetun veden valmistus. Knowpulp. 2021. Saatavissa: [http://www.knowpulp.com/www/suomi/raw\\_materials/2\\_water/2\\_raw\\_water/frame.htm](http://www.knowpulp.com/www/suomi/raw_materials/2_water/2_raw_water/frame.htm) [viitattu 24.4.2021].

Kuva 2. Mittalaitteiston rakenne. Ojanen, T. 1.3.2021.

Kuva 3. Arduino Nano -logiikkapiiri. Arduino Nano user manual. 2008. Saatavissa: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf> [viitattu 30.4.2021].

Kuva 4. Basler Pylon Viewer -ohjelmisto. Basler AG. 2021.

Kuva 5. Mittalaitteisto. Kauppi, T. 14.5.2020. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Kuva 6. Mittalaitteisto koteloituna. Ojanen, T. 25.9.2020.

Kuva 7. Automaatiosovelluksen toiminnan lohkokaavio. Ojanen, T. 7.4.2021.

Kuva 8. Raakakuva. Ojanen, T. 9.4.2021.

Kuva 9. Raakakuva vanhalla analyysillä. Ojanen, T. 9.4.2021.

Kuva 10. Taustakuvan komposiitilla suodatettu kuva. Ojanen, T. 9.4.2021.

Kuva 11. Analysoitu komposiittikuva. Ojanen, T. 9.4.2021.

Kuva 12. Alle 0,0001 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät. Ojanen, T. 10.4.2021.

Kuva 13. 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät. Ojanen, T. 10.4.2021.

Kuva 14. 0,001–0,01 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät. Ojanen, T. 10.4.2021.

Kuva 15. 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien kappalemäärät. Ojanen, T. 10.4.2021.

Kuva 16. Suurennos tunnistuneista flokeista. Ojanen, T. 9.4.2021.

Kuva 17. Herkkyyсарvon vaikutus tunnistuneiden flokkien määrään. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 18. Analysoitu kuva herkkyyсарvoilla 0,45 (vasemmalla), 0,50 (keskellä) ja 0,55 (oikealla). Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 19. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat perjantaina 2.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 20. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat lauantaina 3.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 21. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat sunnuntaina 4.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 22. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat maanantaina 5.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 23. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat tiistaina 6.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 24. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat keskiviikkona 7.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 25. Kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlasketut pinta-alat torstaina 8.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 26. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 2.-4.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 27. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 4.-6.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 28. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 6.-8.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 29. Sameuden ja kokoalueen 0,01–0,1 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 8.4.2021. Ojanen, T. 12.4.2021.

Kuva 30. Sameuden ja kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 2.4.-5.4.2021. Ojanen, T. 30.4.2021.

Kuva 31. Sameuden ja kokoalueiden 0,001–0,01 ja 0,0001–0,001 mm<sup>2</sup> flokkien yhteenlaskettujen pinta-alojen vertailu 5.4.-8.4.2021. Ojanen, T. 30.4.2021

Kuva 32. Sameuden ja kaikkien flokkien kuvasta peittämän alueen vertailu 2.4.-5.4.2021. Ojanen, T. 31.4.2021

Kuva 33. Sameuden ja kaikkien flokkien kuvasta peittämän alueen vertailu 5.4.-8.4.2021. Ojanen, T. 31.4.2021