

**Tekniikan kandidaatintyö**

**Viherlipeäsuodattimen kankaan pesun vaikutus  
suodatukseen**

Lappeenranta 2021

Mira Kärkkäinen

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

*Mira Kärkkäinen*

**Viherlipeäsuodattimen kankaan pesun vaikutus suodatukseen**

**Kandidaatintyö**

**2021**

Ohjaaja: Teemu Kinnarinen

Pvm. 5.4.2021

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
School of Engineering Science  
Kemiantekniikan koulutusohjelma

*Mira Kärkkäinen*

### **Viherlipeäsuodattimen kankaan pesun vaikutus suodatukseen**

Kandidaatintyö

Kevät 2021

35 sivua, 13 kuvaa, 2 taulukkoa, 1 liite

Työn ohjaaja: Teemu Kinnarinen

Hakusanat: viherlipeä, ristivirtaussuodatus, suodatinkangas, suodattimen likaantuminen

Sulfaattiselutehtaan prosessiin kertyy vierasaineita, jotka aiheuttavat ongelmia eri osissa prosessia. Viherlipeän suodatus on yksi tärkeimmistä keinoista hallita vierasaineita sellutehtaan talteenotto-prosessissa, eli niin sanotusti ”munuainen”. X-filtteri on viherlipeäsuodatin, jonka toiminta perustuu pystysuoran suodatinkankaan pinnalla valuvaan viherlipeään, joka estää suodatinkakun muodostumisen. Paine-eron vaikutuksesta osa viherlipeästä suotautuu kankaan läpi, ja virtausta säädetään paine-eron avulla.

X-filtterissä kankaan läpäisyn heikentyminen johtuu yksinomaan kankaiden likaantumisesta. Sitä estetään pesemällä suodatinkankaita säännöllisesti kuumalla vedellä. Pesun aikana on mahdollisuus käyttää kahta erilaista pesutapaa: pesusuodatusta ja paineentasausta. Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko pesusuodatus- ja paineentasausaikoja muuttamalla nähdä eroja kankaanpesun tehokkuudessa. Menetelminä käytettiin suodatinten paine-eron online-mittauksen seuranta, sekä näyttöönnottoja ja analyyssejä.

Näytteistä havaittiin, että suodattimessa kiertävän pesuveden kiintoainepitoisuus pysyi likimain samana, mutta suodoksen kiintoainepitoisuus laski pesuajan pidentyessä. Natriumin pitoisuus laski sekä kiertolinjassa että suodoksessa pesuajan kuluessa. Suurin osa kiintoaineesta ja natriumista pysyi kuitenkin kiertolinjassa. Kun tuloksista laskettiin, paljonko kiintoainetta ja natriumia saadaan poistettua pesuveden mukana, tuli ilmi, että kiintoaineen poistamiselle pitkä pesuaika on optimaalinen. Natriumille puolestaan saatiin tulos, jonka mukaan natriumia saataisiin poistettua eniten mahdollisimman lyhyellä pesuajalla, mikä ei ole uskottava tulos. Tutkittiin myös, suotautuuko viherlipeäsakkaa kankaan läpi kankaan pesun jälkeisen suodatusjakson alussa. Tästä ilmiöstä nähtiin viitteitä, mutta sakan määrän arviointi osoittautui kuitenkin vaikeaksi.

Paine-eroa vertailtiin samalla suodattimella koeajoajanjaksolla ja vertailuajanjaksolla, sekä rinnakkaisilla suodattimilla koeajoajanjaksolla. Paine-eron online-mittauksen seurannassa ei saatu näkyviin merkittäviä eroja kahden ajomallin välillä. Erojen saamiseksi näkyviin tarvittaisiin todennäköisesti pidempi seuranta-ajanjakso tai keskenään erilaisemmat ajomallit.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>KIRJALLISUUSOSA</b> .....	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>4</b>
<b>2 TALTEENOTTOPROSESSI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Sulan liuotus ja viherlipeän käsittely.....	5
2.2 Kaustisointi.....	7
2.3 Meesauuni.....	8
<b>3 VIERASAINHEET JA NIIDEN HALLINTA</b> .....	<b>8</b>
3.1 Viherlipeän vierasaineet ja niiden hallinta .....	9
3.2 Vierasaineiden vaikutukset kalkkikierrossa .....	10
<b>4 RISTIVIRTAUSSUODATIN</b> .....	<b>10</b>
4.1 Toimintaperiaate.....	11
4.2 Sekvenssit.....	12
<b>4 SUODATINKANKAIDEN LIKAANTUMINEN JA PESU</b> .....	<b>13</b>
5.1 Suodatinkankaiden pesu .....	15
<b>TUTKIMUSOSA</b> .....	<b>16</b>
<b>6 TYÖN TAUSTA</b> .....	<b>16</b>
<b>7 KOEAJOJEN SUORITUS</b> .....	<b>18</b>
7.1 Ensimmäinen koeajo.....	18
7.2 Toinen koeajo .....	18
7.3 Analyysit.....	19
<b>8 LASKENTA</b> .....	<b>20</b>
<b>9 TULOKSET</b> .....	<b>22</b>
9.1 Kiintoaine .....	22
9.2 Natrium.....	24
9.3 Online-mittaukset .....	26
9.4 Hienoaineen läpäisy suodatusjakson alussa .....	29
<b>10 JATKOTOIMENPITEET</b> .....	<b>31</b>
<b>11 YHTEENVETO</b> .....	<b>31</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>33</b>
<b>LIITE I Kokeellisen osan mittaus- ja välitulokset</b> .....	<b>35</b>

## KIRJALLISUUSOSA

### 1 JOHDANTO

Sulfaattisellutehtaan kemikaali- ja vesikierrot pyritään pitämään mahdollisimman suljettuina, mikä asettaa prosessiin kuulumattomien eli vierasaineiden (engl. non-process element, NPE) poistamisen erittäin tärkeään asemaan. Vierasaineisiin lukeutuu sekä liuenneita että liukenemattomia aineita. Ne aiheuttavat prosessissa monenlaisia ongelmia, esimerkiksi prosessilaitteiden korroosiota, tuotantotehokkuuden laskua tai pahimmassa tapauksessa tuotannon pysäytyksen. Esimerkiksi kalkkikierrossa inertit kiinteät vierasaineet, kuten magnesium- ja rikkiyhdisteet, jäävät kiertämään prosessiin, ja laskevat meesauunin ja kaustisoinnin tuotantotehokkuutta. Ne voivat myös saada aikaan uunin tukkeutumisen. Kalkkikierron kannalta tärkein keino vierasaineiden poistoon on kaustisointiin tulevan viherlipeän suodattaminen tai selkeyttäminen, jolloin runsaasti kiinteitä vierasaineita sisältävä viherlipeäsaakka poistetaan prosessista. Ek, Gellerstedt ja Henriksson (2009, 338) kuvailevat tätä vaihetta prosessin ”munuaiseksi”.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään viherlipeäsuodatinta, joka on tyypiltään laskevan kalvon ristivirtaussuodatin. Suodatin toimii jaksoittain, ja suodatusjaksojen välissä sen suodatinkankaita pestään säännöllisesti kuumalla vedellä, jotta ne eivät pääse tukkeutumaan. Viherlipeän ristivirtaussuodattimessa ei muodostu suodinkakkua, joten kankaiden likaantuminen ja tukkeutuminen ovat pääasialliset syyt suodattimen läpäisykyvyn heikentymiseen. Kankaanpesu koostuu kuuman veden suodattamisesta kankaan läpi, sekä paineentasauksesta, jonka aikana vesi valuu alaspäin pystysuoran suodatinkankaan pinnalla ilman, että se suotautuu kankaan läpi. Pesusuodatuksen ja paineentasauksen vaiheita voi olla yksi tai useampi, ja niiden kestot vaihtelevat.

Mikäli kankaiden vesipesun tehokkuutta saadaan nostettua, kankaiden tukkeutuminen vähenee ja suodatinten kapasiteetti nousee. Toisaalta pesun tehostuessa siihen kuluva kokonaisaika voidaan mahdollisesti lyhentää, jolloin viherlipeän suodatukseen käytettävissä oleva aika pitenee ja kapasiteetti nousee. Tutkimuksen kohteena oleva tehdas

hyötyisi kapasiteetin nostosta, sillä viherlipeäsuodattimet rajoittavat aika ajoin koko tehtaan ajovauhtia. Lisäksi pesun tehostamisella voi olla mahdollista parantaa natriumin talteenottoa, sillä natriumia liukenee pesun aikana kiintoaineesta veteen. Natrium on sulfaattiselluloseprosessissa keskeinen talteenotettava prosessikemikaali.

Työn teoriaosassa käsitellään sellutehtaan talteenoton prosessi suolasulan liuotuksesta kaustisointiin ja meesauunille. Teoriaosassa selvitetään myös ristivirtaussuodattimen toimintaa ja kankaiden likaantumista. Kokeellisen osan tavoitteena on tuottaa tietoa kankaiden pesusta, sekä vertailla keskenään kahta erilaista ajomallia. Kokeellinen osa lähtee liikkeelle siitä, miten kiintoaine- ja natriumpitoisuudet muuttuvat pesun aikana. Sen jälkeen vertaillaan kahta eri kankaan pesun ajomallia, jossa paineentasauksen ja pesusuodatuksen kestot ovat erilaiset. Viherlipeän ominaisuuksien vaihtelevuuden takia absoluuttisia arvoja pesusekvenssille ei ole olemassa, mutta kokeilla pyritään tuottamaan tietoa, joka tukee ajoparametrien valintaa. Menetelminä käytetään koeajon aikana kerättyjen näytteiden analyysejä sekä online-mittauksien seuranta. Tutkimus toteutetaan UPM Kymmene Oyj:n Kaukaan sellutehtaalle, ja työssä käsitellään erityisesti Kaukaan viherlipeäsuodattimien ajomalleja.

## **2 TALTEENOTTOPROSESSI**

Sulfaattisellutehtaan talteenoton prosessi koostuu haihduttamosta, soodakattilasta, kaustisoinnista ja meesauunista. Kaustisointi ja meesauuni muodostavat kalkkikierron. Kemikaalien talteenotossa tavoitteena on ottaa talteen natriumyhdisteet kuitulinjan keittämöltä saatavasta mustalipeästä, ja tuottaa siitä natriumhydroksidia sisältävää, kuumaa ja puhdasta valkolipeää, joka voidaan käyttää uudestaan keitossa. Tässä työssä käsitellään tarkemmin prosessi soodakattilan sulan liuotuksesta kaustisointiin ja meesauunille.

### **2.1 Sulan liuotus ja viherlipeän käsittely**

Soodakattilaan syötetään haihdutettu mustalipeä, joka sisältää puusta liuenneita aineita, sekä keittokemikaaleja ja vettä. Kattilassa orgaaniset aineet palavat tuottaen energiaa, ja kattilan pohjalta saadaan ulos kuuma suolasula, joka sisältää mustalipeän epäorgaanisia ainesosia,

eli pääasiassa natriumkarbonaattia ja natriumsulfidia. Suolasula valuu soodakattilan tulipesästä sulakouruja pitkin liettosäiliöön, jossa se sekoitetaan laihavalkoliipeään. Syntynyt raakaviherlipeä pumpataan tasaussäiliöön. Laihavalkolipeä on pääasiassa pesuvettä kalkkilietteen ja viherlipeäsakan pesusta. Sulan liuotussäiliössä on voimakas sekoitus saostumien estämiseksi, sekä hönkäjärjestelmä, joka poistaa ja pesee säiliössä syntyvän höngän. (KnowPulp 2021)

Sulan ominaisuudet, kuten tiheys ja alkalipitoisuus vaihtelevat, joten laihavalkoliipeän virtausta liettosäiliöön ja tasaussäiliöön säädetään, jotta viherlipeän ominaisuudet pysyvät mahdollisimman vakiona. Tästä huolimatta viherlipeän ominaisuudet voivat vaihdella paljonkin lyhyessä ajassa, sillä kattilalta tulevan sulan koostumus vaihtelee.

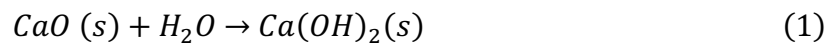
Raakaviherlipeä ja siihen suspendoitunut viherlipeäsakka erotetaan toisistaan suodattamalla tai selkeyttämällä eli laskeuttamalla. Suodatuksen etu laskeutukseen verrattuna on parempi erotustehokkuus, sekä se, että viherlipeän tiheysvaihtelut eivät vaikuta tehokkuuteen (Ek et al. 2009, 339).

Viherlipeän selkeytin on sylinterinmuotoinen säiliö, jossa sakka laskeutuu pohjalle, ja se kerätään talteen. Suodatin voi puolestaan olla ristivirtaus-, kasetti- tai rumpusuodin. Sakan erotuksen jälkeen se pestään ja kuivataan imurumpusuotimella tai sentrifugilla. Imurumpusuotimen tai muun kakkusuodatuksen tapauksessa voidaan käyttää precoatia eli yleensä meesalietettä suodatuskakun pohjana. Precoat parantaa viherlipeäsakan suodatettavuutta, mutta lisää kiinteän jätteen määrää merkittävästi. (KnowPulp 2021). Viherlipeäsakka loppusijoitetaan useimmiten kaatopaikalle, sillä sen uudelleenkäyttö on haastavaa.

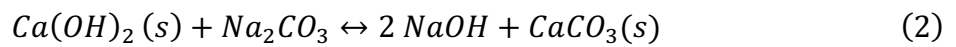
Suodatettu viherlipeä jatkaa jäähtymiseen, mikä estää viherlipeän kiehumisen kaustisoinnissa. Jäähtytys tapahtuu alipaineessa toimivassa paisunta-astiassa, koska perinteisillä lämmönvaihtimilla viherlipeän jäähtytys on lähes mahdotonta tukkeumien muodostumisen takia (Tikka 2008, 146).

## 2.2 Kaustisointi

Suodatusta seuraava vaihe on kaustisointi, jonka tarkoitus on muuttaa viherlipeän natriumkarbonaatti natriumhydroksidiksi kalsiumoksidin avulla. Kaustisoinnin ensimmäinen vaihe on kalkin sammutus, jossa kalkki eli kalsiumoksidi ja vesi reagoivat kalsiumhydroksidiksi reaktion 1 mukaisesti. Reaktio on vahvasti eksoterminen ja kestää usein vain muutamia minuutteja 100 celsiusasteen lämpötilassa. (Ek et al. 2009, 343-344)



Kalkinsammutin, jossa reaktio tapahtuu, koostuu sekoitussäiliöstä sekä lajittimesta, joka poistaa suspensiosta hiekan ja sammuttamattoman kalkin (KnowPulp 2021). Sitä mukaa kun kalsiumhydroksidia muodostuu kalkinsammuttimessa, myös reversiibeli kaustisointireaktio aktivoituu. Kaustisointireaktiossa viherlipeän natriumkarbonaatti reagoi kalsiumhydroksidin kanssa, jolloin reaktion 2 mukaisesti syntyy natriumhydroksidia ja kalsiumkarbonaattia eli meesaa (Ek et al. s. 343). Kaustisointireaktio on sammutusreaktiota huomattavasti hitaampi, joten sitä jatketaan kalkinsammuttimen jälkeen sarjaan kytketyissä kaustisointisäiliöissä, joiden viipymäaika on noin 2-3 tuntia (KnowPulp 2021).

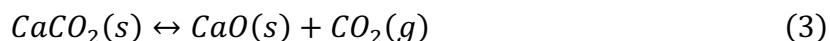


Kaustisoinnin tuotteena saadaan valkolipeän ja meesan seos. Valkolipeä erotetaan meesalietteestä suodattamalla tai selkeyttämällä, jotta se voidaan pumpata varastosäiliön kautta keittämölle. Suodatus on nykyään yleisempi menetelmä (Ek et al. 2009, 351). Valkolipeäsuodatin voi olla esimerkiksi paineistettu kiekkosuodatin tai pystysuora painesuodatin. Suodatettu meesaliete sisältää yleensä vielä paljon valkolipeää (Ek et al. 2009, 353), joten se pestään imurumpu- tai kiekkosuotimella, ja pesuvedet ohjataan laihavalkolipeäsäiliöön.



### 2.3 Meesauuni

Meesauunin tehtävä on muuttaa kaustisoinnissa käytetty meesa takaisin kalkiksi, jotta se voidaan käyttää uudelleen kaustisoinnissa. Meesa kuivataan ennen uuniin syöttöä savukaasujen avulla lähes 100% kuiva-aineeseen. Meesakuivurissa kostea meesa syötetään kuumien savukaasujen joukkoon ja erotetaan sen jälkeen kuivana syklonissa. Tämän jälkeen meesa poltetaan meesauunissa, joka on pitkän sylinterin muotoinen, vaakatasossa hieman kallellaan oleva, hitaasti pyörivä uuni. Polttoaineena voidaan käyttää monia erilaisia fossiilisia tai biopolttoaineita. Unissa syntyvät savukaasut ja meesa kulkevat vastakkaisiin suuntiin, jolloin savukaasut esilämmittävät meesaa ennen polttoa. Noin 800 celsiusasteen lämpötilassa meesa eli kalsiumkarbonaatti alkaa reagoida kalkiksi muodostaen hiilidioksidia reaktion 3 mukaisesti. Kalsinointireaktio on endoterminen. (KnowPulp 2021)



Polton jälkeen kalkki jäähdytetään uunin polttimelle menevän palamisilman avulla sektorijäähdyttimessä. Se sisältää myös jakopellin, jonka kautta hienojakoinen kalkki putoaa kuljettimelle ja liian karkea kalkki kiertää murskaimen kautta kuljettimelle. Meesanpoltossa syntyvät savukaasut ohjataan sähkösuotimille, jossa niistä erotetaan meesa- ja tuhkapitoinen pöly. Erotettu pöly syötetään takaisin meesauuniin tai kuljetetaan pois tehtaalta. (KnowPulp 2021)

## 3 VIERASAINHEET JA NIIDEN HALLINTA

Vierasaineiksi luetaan aineet, jotka eivät osallistu varsinaiseen sellunvalmistusprosessiin. Ne käyttäytyvät prosessissa eri tavoilla; esimerkiksi niiden liukoisuus ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat eri tavoilla eri osissa prosessia. Vierasaineet ovat peräisin muun muassa puuraaka-aineesta, kuitulinjan kemikaaleista, prosessivedestä (Tikka 2008, 187) ja meesauunin polttoaineesta (Mertakorpi 2021). Vierasaineiden aiheuttamia ongelmia ovat muun muassa prosessilaitteiden korroosio, tukkeutuminen, sekä tuotannon haasteet erityisesti kalkkikierrossa, jonne vierasaineet kertyvät helposti. Kalkkikierron

vierasainetasetta hallitaan erityisesti viherlipeän suodatuksella, mutta myös poistamalla kalkkia ja meesaa eri osista prosessia.

### **3.1 Viherlipeän vierasaineet ja niiden hallinta**

Viherlipeä sisältää soodakattilalta peräisin olevia prosessille vieraita aineita, jotka ovat lipeässä sekä sakkana että liuenneina aineina. Viherlipeäsakka, eli kiinteät suspendoituneet partikkelit, on tärkein poistettava vierasaineita sisältävä jae. Alkalinen sakka sisältää sekä epäorgaanisia että orgaanisia aineita, mutta epäorgaanisten aineiden osuus on suuri (Ek et al. 2009, 338). Yleisin alkuaine on kalsium, mutta mukana on myös merkittäviä määriä muita vierasaineita, kuten magnesiumia, mangaania ja alumiinia. Sakka sisältää myös suhteellisen paljon natriumia ja rikkiä (Golmaei et al. 2017, 28), jotka eivät ole vierasaineita, vaan ne päinvastoin halutaan pitää kaustisoinnin prosessissa. Meesauunille joutuessaan ne puolestaan luetaan vierasaineiksi, jotka haittaavat uunin toimintaa. Suurin osa viherlipeäsakan sisältämisestä kalium- ja natriumsuoloista on hyvin liukoisia, kun taas magnesium- ja kalsiumsuolat eivät (Mahmoudkhani 2004, 231). Viherlipeäsakan koostumus ja vierasaineiden määrä on prosessikohtaista.

Viherlipeän suodatus poistaa tehokkaasti kiinteässä muodossa olevia vierasaineita, ja erityisesti magnesiumin, mangaanin ja alumiinin hallinnassa se on tärkeä osaprosessi (Mertakorpi 2021, 35-36). Viherlipeään liuenneita vierasaineita ei voida poistaa, mutta kaikista liukoisimmat aineet eivät edes aiheuta ongelmia tai kerry kalkkikiertoon. Joidenkin viherlipeään liuenneiden vierasaineiden, kuten pii- ja fosfaattiyhdisteiden, liukoisuus pienenee kaustisoinnissa, jolloin ne saostuvat valkolipeässä ja suotautuvat meesan mukaan (Tikka 2008, 187). Tämän takia niiden hallinta on vaikeaa, ja niiden poistamiseen pääasiallinen keino on kalkkikierron avaaminen. Mertakorpi (2021, 115) on kuitenkin diplomityössään havainnut, että Kaukaan tehtaalla tämä vaikutus on näkyvässä vain fosforilla, josta noin 25-30 % suotautuu meesan mukaan.

Viherlipeässä on myös alkaliin liukenevia vierasaineita, joita ei pysty lainkaan poistamaan kaustistamalla. Nämä aineet, kuten kalium ja kloori, kulkeutuvat valkolipeän mukana

keittämölle ja sieltä soodakattilalle, jossa ne rikastuvat lentotuhkaan. Tästä syystä lentotuhkaa täytyy poistaa kattilasta. (KnowPulp 2021)

### **3.2 Vierasaineiden vaikutukset kalkkikierrossa**

Ilman viherlipeän ja sakan erottamista, ainoa keino pitää kalkkikierto puhtaana olisi avata kalkkikiertoa eli korvata kierrossa olevaa kalkkia uudella puhtaalla ostokalkilla. Tällöin ostokalkkia tarvittaisiin jopa 30% kokonaiskalkin määrästä, kun taas viherlipeän puhdistuksen ollessa käytössä, sitä tarvitaan vain noin 3-5%. (Tikka 2008, 190) Kalkkia poistetaan kierrosta poistamalla meesapölyä sähkösuotimilta, jotka erottavat pölyn ja tuhkan meesauunin savukaasuista (KnowPulp 2021), sekä käyttämällä sitä sakkasuodattimella precoatina, jolloin se poistuu viherlipeäsakan mukana.

Kalkkikierron epäpuhtaudet laskevat merkittävästi meesauunilta lähtevän kalkin laatua. Epäpuhtauksien lisääntyessä inerttien aineiden osuus kalkista kasvaa, jolloin meesauunin polttoaineen kulutus kasvaa ja kaustisoinnin tehokkuus heikkenee. Esimerkiksi magnesium käyttäytyy kemiallisesti hyvin samalla tavalla kuin kalsium, mutta kasvattaa silti kalkin inerttiä osuutta. Magnesiumkarbonaatti reagoi magnesiumoksidiksi alhaisemmassa lämpötilassa kuin kalkki vastaavasti sammuu. Kaustisointireaktiota ei kuitenkaan tapahdu magnesiumilla, joten magnesiumoksidi rikastuu kalkkikiertoon. Kalkkikierrossa kiertävät inertit aineet lisäävät myös meesan ominaispinta-alaa, jolloin rakeiden koko on pienempi ja niiden muoto epäsäännöllisempi. Tämä johtaa siihen, että meesan suodatus ja kuivaus häiriintyy, jolloin meesa on liian märkää, kun se syötetään meesauuniin. Tämä aiheuttaa polttoaineen kulutuksen kasvua, sekä rengas- ja pölyämisiongelmiä uunissa. (Tikka 2008, 188-189)

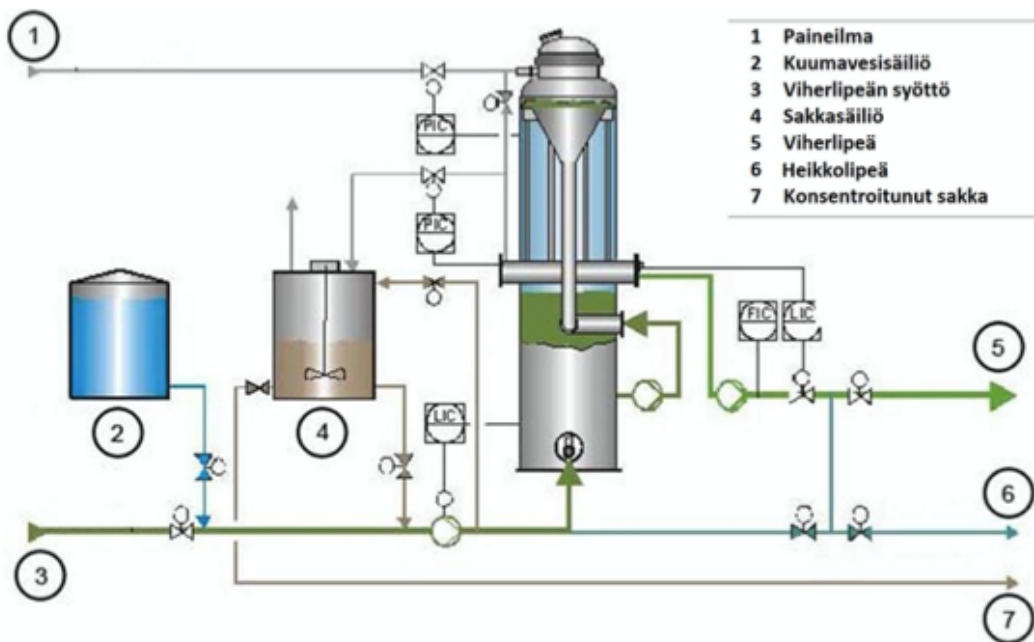
## **4 RISTIVIRTAUSSUODATIN**

Tässä kandidaatintyössä käsitellään viherlipeäsuodattimia, jotka ovat tyypiltään Andritz Oy:n valmistamia X-filttereitä (nyk. LimeGreen), eli laskevan kalvon ristivirtaussuodattimia (engl. falling-film cross-flow filter). Niiden toiminta perustuu voimakkaaseen jatkuvaan alapäin suuntautuvaan virtaukseen, jonka ansiosta suodatinkakkua ei muodostu (Matikka

2020, 15). Tässä työssä keskitytään erityisesti UPM Kaukaan suodattimiin ja ajomalleihin, jotka ovat peräisin 1990-luvulta, eli luonnollisesti ne eroavat valmistajan nykyään tarjoamasta tekniikasta. Kaukaalla on käytössä kolme 1. sukupolven X-filtteriä (viherlipeäsuodattimet 1-3), joista kaikki ovat ajossa normaalitilanteessa.

#### 4.1 Toimintaperiaate

Suodatus tapahtuu pumppaamalla viherlipeää kierrätyspumpun avulla nousuputken kautta ylös jakolaatikkoon, josta lipeä valuu tasaisesti alaspäin pystysuoria suodatinelementtejä pitkin. Suorakulmion muotoisissa elementeissä on polypropeeninen kangas (Matikka 2020, 16). Suodattimen 'likainen' puoli, jossa suodattamaton viherlipeä valuu suodatinelementtejä pitkin, on paineistettu. Näin saadaan aikaan paine-ero suodatinkankaan yli, minkä vaikutuksesta osa viherlipeästä kulkeutuu kankaan läpi ja päätyy suodoskammioihin. Sieltä viherlipeä pumpataan pumppaussäiliön kautta varastosäiliöön. Kuvassa 1 on esitetty viherlipeäsuodattimen prosessikuva.



**Kuva 1** Viherlipeäsuodattimen prosessikuva (Matikka 2020, 14)

Paineilmalla säädetään suodattimen kapasiteettia siten, että likaiselle puolelle päästetään paineilmaa, jolloin paine-ero suodatinkankaan yli kasvaa ja suodoksen virtaus kasvaa

(KnowPulp 2021). Paine-eron avulla voidaan seurata kankaan tukkeutumista – kun suurellakaan paine-erolla ei saavuteta tarpeeksi suurta suodosvirtausta, kankaan vastus on kasvanut eli kangas on tukkeutunut. Suodattimen paine-ero määritellään suodospuolen ja likaisen puolen kaasutilojen paineiden erotuksena.

Normaalin ajotilanteen aikana valuva nestefilmi peittää kankaan kokonaan, joten paineilmaa tarvitaan hyvin vähän. Paine-ero voidaan myös kytkeä pois päältä, jotta valuva viherlipeä tai vesi poistaa kankaan pinnalle kerääntynyttä sakkaa tehokkaammin. (Päykkönen 2020, 20) Tämä tapahtuu päästämällä paineilmaa kankaiden suodospuolelle, jolloin paine-ero tasoittuu. Näitä paineentasauksia tapahtuu useissa eri suodatussekvenssin vaiheissa.

Suodatuksen aikana suodattimen läpi kulkevaa viherlipeää pumpataan jatkuvasti pumppaussäiliön kautta viherlipeän varastosäiliöön. Samalla suodattimeen pumpataan uutta viherlipeää, jotta alaosan pinnankorkeus pysyy vakiona. Suodatusjakson jälkeen suodatin tyhjenetään ja väkevöitynyt lietemäinen viherlipeäsakka pumpataan sakkasäiliöön. Suodattimella voidaan myös sakeuttaa viherlipeäsakkaa (KnowPulp 2021). Tällöin litesäiliöstä pumpataan sakkaa suotimeen, jossa sakka kiertää ja kiintoainepitoisuus kasvaa suodoksen suotautuessa kankaan läpi. Lopuksi sakeutunut sakka palautetaan sakkasäiliöön.

## 4.2 Sekvenssit

Suodatin toimii lähes automaattisesti ajastetuilla sekvensseillä. Taulukossa I on esitetty esimerkki pääsekvenssistä. Yksi pääsekvenssi koostuu kahdesta suodatusvaiheesta (1 ja 2), joiden kesto on noin 4 tuntia. Suodatusten välissä suodatin tyhjenetään. Toisen suodatusvaiheen jälkeen sekvenssissä on lisäksi sakeutus ja sakan pesu, joka tapahtuu sakeutuksen loppuvaiheessa ajamalla hieman vettä sakan sekaan. Sakan tyhjennyttyä sakkasäiliöön suodattimen kankaat pestään kuumalla vedellä, ja suodatin tyhjenetään jälleen uuden sekvenssin alkua varten.

Sekvenssien kulkua ohjaa valvonta-aika, joka varmistaa, että rinnakkaiset viherlipeäsuodattimet pysyvät tasaisessa rytmissä. Kolmen viherlipeäsuodattimen ollessa

samaan aikaan ajossa rytmin epätasaisuus voi aiheuttaa esimerkiksi sen, että kaksi suodatinta tulevat samaan aikaan tyhjennysvaiheeseen, ja sakkasäiliön pinnan ollessa liian korkealla toinen suodattimista joutuu odottamaan tyhjennystä. Tällöin menetetään suodatusaikaa. Valvonta-aika ehkäisee tällaisia tilanteita siten, että suodatus loppuu automaattisesti, kun valvonta-aika päättyy tai vaihtoehtoisesti suodatin tekee paineentasauksia kunnes valvonta-aika on kulunut loppuun. (DNA Help 2021)

**Taulukko I** Esimerkki viherlipeäsuotimen pääsekvenssistä. Taulukon selkeyttämiseksi siitä on jätetty pois paineentasaukset, jotka tapahtuvat täyttöjen ja tyhjennysten yhteydessä sekä kankaan pesujen aikana.

Vaihe	Aika, [min]
Käynnistys	
Täyttö viherlipeällä	
1. suodatus	240
Tyhjennys sakkasäiliöön	
Täyttö kuumalla vedellä	
Kankaan välipesu	20
Tyhjennys laihavalkolipeäsäiliöön	
Täyttö viherlipeällä	
2. suodatus	240
Sakeutus ja sakan pesu	10
Tyhjennys sakkasäiliöön	
Täyttö kuumalla vedellä	
Kankaan pesu	20
Tyhjennys laihavalkolipeäsäiliöön	

#### 4 SUODATINKANKAIDEN LIKAANTUMINEN JA PESU

Tieteellisissä artikkeleissa ei ole juuri käsitelty laskevan kalvon ristivirtaussuotimen kaltaisia tapauksia, sillä ne ovat melko harvinaisia ratkaisuja. Kankaiden likaantuminen on kuitenkin ilmiö, joka tunnetaan kaikenlaisen suodatuksen yhteydessä. Likaantuminen johtuu sekä kankaan sisään juuttuneista että sen pintaan kiinnittyneistä partikkeleista. Partikkeleiden irrottamiseksi tarvitaan suurempi irrotusvoima kuin niiden kiinnitysvoima kankaaseen. (Weigert ja Ripperger 1996)

Weigert ja Ripperger (1996) ovat tutkineet kankaan likaantumista kakkusuodatuksen tapauksessa. He havaitsivat, että vaikka suodinkakku poistettiin ja kangas pestiin jokaisen suodatusvaiheen välillä, suodinkankaan vastus kasvoi ja suodoksen virtaus hiipui seuraavassa suodatusvaiheessa. Kankaan likaantuminen oli nopeinta kokeen alussa ja saavutti lopulta likimain vakioarvon.

Sama vaikutus on nähtävissä viherlipeäsuotimissa. Niiden tapauksessa suodatinkakku ei muodostu, joten kapasiteetin lasku johtuu lähes yksinomaan kankaan likaantumisesta. Kangasta likaava kiintoaine sisältää viherlipeäsakkaa ja natriumsuoloja. Kaikkea kiintoainetta ei saada poistettua kankaasta vesipesuilla, joten kangas likaantuu ajan saatossa. Tällöin kankaat pestään laimealla hapolla.

Viherlipeän suodatuksen alkuvaiheessa kiintoaineen konsentraatio on matalampi kuin loppuvaiheessa. Tällöin hienojakoiset partikkelit, jotka mahtuvat läpäisemään suodatinkankaan, läpäisevät sen suuremmalla todennäköisyydellä kuin suodatuksen loppuvaiheessa. Kun kiintoainepitoisuus on suurempi, hienojakoiset partikkelit kiinnittyvät todennäköisemmin toisiinsa ja kankaaseen, jolloin ne eivät kulkeudu kankaan läpi. (Sparks 2011, 27) Sekä kiintoainepitoisuuden kasvu että kankaan likaantuminen suodatusajan kuluessa tukevat oletusta, että varsinkin kankaan pesun jälkeisen suodatusjakson alussa hienojakoisia kiintoainepartikkeleita saattaa siirtyä suodatettuun viherlipeään.

Headley (1996) esittää, että ristivirtaussuodattimessa kiertävän viherlipeän sakkapitoisuudella on merkittävä vaikutus kankaiden likaantumiseen ja sakan pH-arvoon. Siten olisi olemassa sakkapitoisuuden arvo, jossa suodatus kannattaisi lopettaa ja kankaat

pestä. Tämä on kuitenkin käytännössä mahdoton havaita, sillä viherlipeäsuodattimissa ei ole sakkapitoisuuden online-mittareita.

### **5.1 Suodatinkankaiden pesu**

Kohdetehtaalla suodattimen kankaat pestään aina toisen suodatusvaiheen jälkeen, mutta ne voidaan tarvittaessa myös pestä suodatusvaiheiden välissä, kun suodin on tyhjillään. Tätä kutsutaan ns. välipesuksi. Pesujen kesto vaihdellaan ajotilanteen mukaan, mutta yleinen kesto on noin 30 minuuttia mukaan lukien paineentasaukset, suodatus, täyttö ja tyhjennys. Esimerkiksi mikäli suodattimilla on läpäisyvaikeuksia, pesuja pidennetään ja tehdään välipesuja. Itse pesu koostuu paineentasauksista ja pesusuodatuksesta, eli veden suodatuksesta jatkuvatoimisesti kankaan läpi viherlipeän tapaan. Pesusuodatuksen aikana olisi mahdollista palauttaa pesuvettä takaisin kuumavesisäiliöön, mutta sille ei ole nähty Kaukaalla tarvetta, sillä kuumaa vettä on saatavilla reilusti. Sen sijaan pesuvesi päättyy joko laihavalkolipeäsäiliöön tai viherlipeän varastosäiliöön.

Paineentasauksien, eli kankaan pesun, jossa paine-ero on kytketty pois päältä, on viherlipeäsuodattimien valmistajan mukaan havaittu olevan tärkeässä roolissa sakan irrottamisessa, sillä ne poistavat kankaan pinnalle kertyneen sakan tehokkaammin kuin pelkkä pesusuodatus, joka tehoaa lähinnä kankaan sisäiseen sakkaan. Tätä tukee muun muassa Fuchs et al. (2015) tutkimuksessaan, jossa todettiin, että laskevassa kalvossa saadaan parempi pesutulos pystysuoralla pinnalla, kun käytetään suurta tilavuusvirtaa suhteessa valumispinnan ympäröykseen. Paineentasauksen tapauksessa pesuvettä ei suodatu kankaan läpi, joten tilavuusvirta on suurempi pesusuodatuksen nähden, ja tuottaa siten myös suuremman leikkaus- eli irrotusvoiman kankaaseen. Lisäksi suodattimen paine-erolla on merkitystä pesuun – paine-ero kannattaa pitää pesun aikana nollassa tai negatiivisena, jotta sakka poistuu kankaan pinnalta tehokkaammin (Andritz 2019). Paineentasaus tehostaa tätä vaikutusta. Paineentasauksien pidentäminen säästää myös kuumaa vettä, sillä niiden aikana suodattimeen ei pumpata vettä. Kaukaalla kuumaa vettä on kuitenkin saatavilla ylimäärin, joten veden säästön hyöty on käytännössä mitätön.



Kankaanpesussa ensimmäinen paineentasausta tehdään täytön aikana, ja sen tehtävä on estää pesuveden suotautuminen kankaan läpi täytön aikana, kun kierrätyspumppu on käynnissä. Toinen paineentasausta tapahtuu pesusuodatuksen jälkeen, ja sen tehtävä on puhdistaa suodatinkangas. Kaukaan järjestelmissä vain toisen paineentasaustuksen kestoa pystytään muuttamaan operointinäytöltä, ja paineentasausta ei pystytä myöskään lisäämään.

Kun suodatinkankaat ovat tukkeutuneet ja vesipesut eivät enää auta, kankaat pestään laimealla muurahaishappoliuoksella. Tällöin suodatin on pidemmän aikaa pois käytöstä, kun happoliuosta kierrätetään suotimessa. Happopesu sisältää myös vesipesuja ja paineentasausta. Happopesu suoritetaan yleensä vain, kun viherlipeäsuodattimella on läpäisyvaikeuksia kankaiden tukkeutumisen takia, ja vesipesut eivät tehoa. Läpäisyvaikeudet havaitaan paine-erosta ja suodoksen virtauksesta, kun suodatin ei enää saavuta haluttua suodosvirtaa maksimipaine-erolla. Suodattimen kankaat vaihdetaan mahdollisen rikkoutumisen takia minimissään noin puolen vuoden välein ja maksimissaan noin vuoden välein.

## **TUTKIMUSOSA**

### **6 TYÖN TAUSTA**

Kokeellisessa osassa suoritetaan viherlipeäsuodattimilla kaksi koeajoa, joiden tulosten pohjalta pyritään arvioimaan sopiva kankaiden vesipesun ajomalli viherlipeäsuotimille. Tuloksien avulla vertaillaan kahden ajomallin tehokkuutta kankaiden puhdistuksessa. Mikäli kankaan pesun tehokkuutta saadaan nostettua nykyisestä, voidaan päästä lyhentämään kokonaispesuaikaa. Se taas nostaa suodatinten kapasiteettia, joka on kohdetahtaa aika ajoin tehtaan ajovauhtia rajoittava tekijä.

Tiedetään siis, että viherlipeäsuodattimien kankaiden pesu parantaa suodattimien läpäisevyyttä ja estää niiden tukkeutumista. Etuna voi olla myös se, että pesuveden liukenee kankaan sakasta natriumia, jota ei muuten olisi mahdollista ottaa talteen. Natrium on hyvin vesiliukoisessa muodossa, joten pelkkä natriumin talteenotto ei tarvitse pitkää pesuaikaa.

Mertakorpi (2021, 84) vertaili työssään kahden sellutehtaan sakkasuotimen viherlipeäsakkaa, ja havaitsi että Kaukaalla oli niistä korkeampi viherlipeäsakan natriumpitoisuus. Keskeinen ero kahden tehtaan välillä oli se, että Kaukaan viherlipeäsuodattimissa sakan esipesu ei ollut käytössä suodatuskapasiteetin lisäämisen takia. Kankaanpesuajan lyhentyessä se voitaisiin mahdollisesti ottaa takaisin käyttöön, jolloin saatettaisiin nähdä vaikutus viherlipeäsakan natriumpitoisuudessa. On myös mahdollista, että itse kankaan pesussa saadaan tehostettua natriumin talteenottoa. Tässä työssä tärkeimpänä tavoitteena pidetään kuitenkin suodattimien kapasiteetin nostoa, sillä sen vaikutukset koko prosessiin ovat suurimmat.

Yksi tehokkaamman kankaanpesun haittapuoli saattaa olla se, että pesua seuraavan suodatusvaiheen alussa hienojakoinen kiintoaines läpäisee kankaan. Ei ole tiedossa, tapahtuuko viherlipeäsuodattimilla tätä ilmiötä. Asiaa tutkitaan lyhyesti ottamalla näytteitä yhdestä suodatusjaksosta.

Tutkimuksen kohteena olevalla tehtaalla on aiemmin käytetty kankaan pesussa suhteellisen lyhyttä paineentasausaikaa ja pitkää pesusuodatusaikaa. Pesuajojen pidentäminen on yleensä tehty pesusuodatusaikaa pidentämällä. Andritz (2019) suosittelee studyssään paineentasausajan pidennystä, joten kahdessa koeajossa pyritään selvittämään, päästäänkö pidemmällä paineentasausajalla parempaan suodatustehokkuuteen. Kun paineentasausaikaa pidennetään, lyhennetään pesusuodatusaikaa vastaava määrä. Näin varmistetaan se, että eri suodattimien sekvenssit pysyvät rytmisissä.

Koeajon aikana pesuveden virtausta ei ole käytännössä järkevää muuttaa, minkä takia työssä tutkitaan pesusekvenssin osien kestoa. Haasteita ja epävarmuutta koeajolle aiheuttaa muun muassa viherlipeän vaihtelevat ominaisuudet sekä se, että pesu on osittain jatkuvatoiminen ja osittain panosprosessi. Tämän lisäksi tehdasmittakaavassa edustavien näytteiden ottaminen on haastavaa, joten näytteenotoista aiheutuva virhe on suhteellisen suuri.

Käytännössä absoluuttista optimaalipesu- tai paineentasausaikaa ei ole olemassa, vaan se on aina tapauskohtaista, ja riippuu esimerkiksi suodatukseen tulevan viherlipeän

sakkapitoisuudesta, ajovauhdista ja kankaiden likaisuudesta. Tämän työn tarkoituksena ei siis ole tuottaa yhtä kaikkiin tilanteisiin sopivaa ajomallia. Näitä tietoja voidaan hyödyntää, kun pohditaan kankaan pesun ajomallien ohjeellisia arvoja.

## **7 KOEAJOJEN SUORITUS**

Työssä suoritettiin kaksi koeajoa noin kuukauden päässä toisistaan. Tässä kappaleessa on esitetty koeajojen ajomallit ja menetelmät.

### **7.1 Ensimmäinen koeajo**

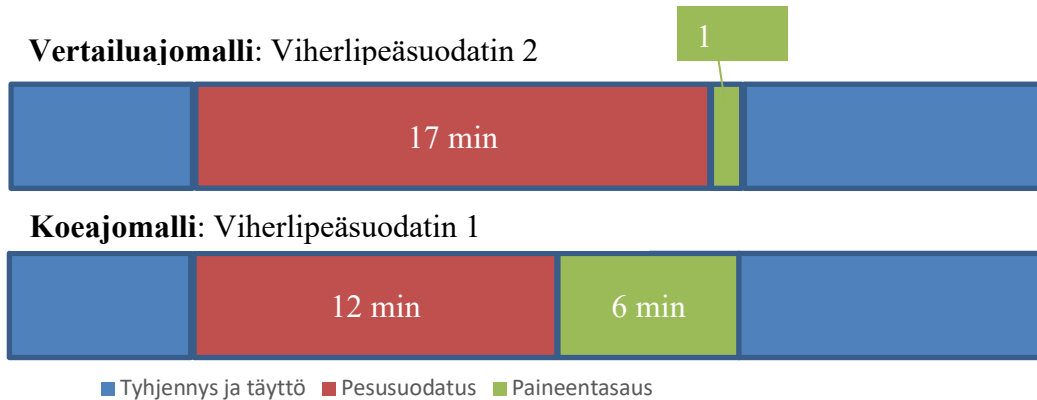
Ensimmäisessä koeajossa tutkittiin yhden kankaanpesun aikana tapahtuvaa aineensiiirtoa pesuveteen lyhyen paineentasauksen ja normaalia pidemmän pesusuodatusajan ollessa käytössä. Viherlipeäsuodatin 1:n pesusuodatuksen kestoa pidennettiin 30 minuuttiin, ja paineentasausaika pidettiin 1 minuutissa. Vedestä otettiin näytteitä samanaikaisesti kierrätyslinjasta ja suodattimesta poistuvan suodoksen linjasta. Ensimmäiset näytteet otettiin, kun pesu oli kestänyt 5 minuuttia, ja sen jälkeen näytteet otettiin 5 minuutin välein, kunnes pesu loppui ja suodin tyhjentyi. Näytteistä analysoitiin natrium- ja kiintoainepitoisuudet. Tutkimuksen kohteena olevan tehtaan viherlipeäsuodattimien kankaiden pesuvesiä ei ole juuri aiemmin tutkittu, joten ennen ensimmäistä koeajoa otettiin ns. harjoitusnäytteitä, joilla varmistettiin, että näytteenotto ja analyysit onnistuvat.

### **7.2 Toinen koeajo**

Toisessa koeajossa otettiin viherlipeäsuodatin 1:lle käyttöön ajomalli, jossa pesusekvenssin paineentasaus oli pidempi kuin normaalisti, ja pesusuodatusaika vastaavasti lyhyempi. Suodattimet 2 ja 3 toimivat vertailukohteena tavallisesti käytössä olevalla ajomallilla. Koeajon ajomallit on esitetty Kuvassa 2. Koeajo kesti noin 5 päivää.

Toisen koeajon aikana suoritettiin ensimmäisen koeajon kaltainen näytteenottosarja pesun aikana, jotta koeajoja voitiin vertailla keskenään. Näytteitä otettiin kiertolinjasta 5, 10, ja 15 minuutin suodatuksen kohdalla sekä tyhjennyksen aikana. Suodoksesta näytteet otettiin 5 ja

10 minuutin kohdalla, koska paineentasauksen aikana ei ole mahdollista ottaa suodosnäytteitä. Lisäksi seurattiin paine-eron ja suodosvirtauksen online-mittauksia, jotta pystyttiin arvioimaan, miten koeajo vaikutti suodatinten läpäisykykyyn. Online-mittausten arvot kerättiin prosessinohjausjärjestelmästä keskiarvoina 10 minuutin välein.



**Kuva 2** Toisen koeajon ajomallit: ylempänä vertailuajomalli, ns. normaali ajomalli, ja alempana koeajomalli.

Toisen koeajon aikana otettiin myös viherlipeänäytteet kankaan pesun jälkeisen suodatusjakson aikana 5, 15 ja 50 minuutin kuluttua viherlipeätäytön paineentasauksen loppumisesta. Näistä näytteistä analysoitiin kiintoainepitoisuudet. Viherlipeän kiintoainepitoisuusanalyysissä pyrittiin huomioimaan viherlipeän kiteytyminen sen jäähtyessä, minkä takia ne suoritettiin mahdollisimman nopeasti näytteenoton jälkeen, joskin 15 minuutin kohdalla otettu näyte ehti olla pisimpään huoneenlämmössä.

### 7.3 Analyysit

Näytteiden kiintoainepitoisuusanalyysit suoritettiin imusuodattamalla tiedetty tilavuus (noin 50-70 ml) näytettä punnitun suodatinpaperin läpi, ja kuivaamalla paperia 105 celsiusasteen lämpötilassa noin 1 tunti. Suodatinpaperit punnittiin analyysivaa'alla. Natriumpitoisuusanalyysit tehtiin kiintoainepitoisuusanalyysien suodoksista liekkifotometrillä. Analyysija varten suodokset laimennettiin 200-kertaisesti (0,5 ml suodosta 100 ml:aan tislattua vettä), jotta päästiin liekkifotometrin mittausalueelle. Ennen mittauksia liekkifotometri kalibroitiin tislattulla vedellä ja 10 mg Na/l kalibroitiliuoksella.

Kiintoainepitoisuusanalyysit suoritettiin samana päivänä kuin näytteet otettiin, ja natriumpitoisuusanalyysit 1-2 päivän päästä näytteenotosta.

Analyyseihin olisi todennäköisesti saanut lisää tarkkuutta pesemällä suodatinpaperiin jääneen kiintoaineen kuumalla vedellä ennen kuivausta. Nykyisellä menetelmällä varsinkin jäähtyneissä näytteissä on todennäköisesti tapahtunut natriumsuolojen kiteytymistä, mikä nostaa kiintoainepitoisuuden arvoa. Myös suodatinpaperit ovat saattaneet sisältää suolaa. Kiintoainepitoisuuden ja -määrän arvot sisältävät siis jonkin verran kiteytynyttä natriumsuolaa. Tämä pätee erityisesti viherlipeään, mutta voi päteä joiltakin osin myös pesuvesinäytteisiin.

## **8 LASKENTA**

Kiintoaineen ja natriumin pitoisuuksista laskettiin niitä vastaavat massat, jotta voitiin helpommin arvioida aineiden määriä suodattimessa ja vertailla niitä keskenään.

Suodattimessa kiertävän pesuveden sisältämän natriumin ja kiintoaineen massa laskettiin kaavalla 1. Laskentaa varten oli arvioitava suodattimessa kiertävän pesuveden tilavuus pesun aikana. Tämä laskettiin kuumavesisäiliön tilavuudesta ( $107 \text{ m}^3$ ), sekä pinnanmittauksen arvon muutoksesta silloin, kun pumpataan kuumaa vettä viherlipeäsuodattimeen. Pinnankorkeuden muutos laskettiin alkaen vesitäytön alusta, sekä loppuen kierrätyspumpun käynnistymiseen, jolloin tiedettiin, että suodattimen alaosan pinnanmittaus näytti arvoa 30 %. Näin saatiin selville, millaista tilavuutta suodattimen alaosan pinnanmittauksen arvo likimain vastaa. Tämä tilavuus laskettiin jokaiselle suotimelle erikseen viiden vesitäytön keskiarvosta. Kierrätyspumpun ollessa käynnissä myös nousuputki ja jakolaatikko ovat täynnä vettä, ja niiden tilavuudeksi avioitiin noin  $10 \text{ m}^3$ . Tilavuuden laskenta on kokonaisuudessaan karkea, sillä siinä ei otettu huomioon muun muassa kuumavesisäiliön pinnansäätöä, tyhjennyksessä suodattimen pohjalle jäävää sakkaa tai sitä, että suodatin ei ole täysin tyhjä pinnanmittauksen näyttäessä nollaa.

$$m_{kierto} = c_{kierto} * (10 \text{ m}^3 + \frac{(\Delta n) * \frac{107 \text{ m}^3}{100 \%}}{30 \%} * n_t) \quad (1)$$

„jossa	$m$	kiertolinjassa olevan aineen massa, [kg]
	$c_{kierto}$	analyysitulokset aineen pitoisuudesta kiertolinjassa, [kg/m <sup>3</sup> ]
	$V$	suotimessa kiertävän pesuveden tilavuus, [m <sup>3</sup> ]
	$\Delta n$	kuumavesisäiliön pinnanmittauksen arvon muutos vesitäytön alusta kierrätyspumpun käynnistymiseen, [%]
	$n_t$	suodattimen alaosan pinnanmittauksen arvo näytteenottohetkellä, [%].

Suodoksen mukana poistuvan aineen massavirta laskettiin kaavalla (2). Massavirran määrittämiseksi jokaiselta näytteenottohetkeltä otettiin ylös likimääräinen suodoksen tilavuusvirta, joka saatiin online-mittarista. Mittari sijaitsee suodoslinjassa pumppaussäiliön jälkeen, mutta pumppaussäiliön tilavuus on vain noin 5 m<sup>3</sup>, joten se jätettiin huomiotta. Pitoisuudet kerrottiin tilavuusvirralla, jolloin saatiin poistuvan aineen massavirta.

$$\dot{m}_{suodos} = c_{suodos} * \dot{V} \quad (2)$$

„jossa	$\dot{m}$	suodoksen mukana poistuva massavirta, [kg/s]
	$c_{suodos}$	analyysitulokset aineen pitoisuudesta suodoksessa, [kg/l]
	$\dot{V}$	suodoksen tilavuusvirta näytteenottohetkellä, [l/s].

Kaavalla (3) laskettiin suodattimesta poistuvan kiintoaineen ja natriumin määrä, mikäli pesu lopetettaisiin ajan hetkellä  $t$ . Laskenta tehtiin summaamalla kiertolinjassa ajan hetkellä  $t$  olevaan massa kumulatiivinen suodoksen mukana poistunut massa aikavälillä 5-t, joka laskettiin ottamalla kultakin väliltä keskiarvo ja kertomalla se välin pituudella 300 s. Laskennassa ei ole otettu huomioon aikavälillä 0-5 poistuvaa ainetta.

$$m_{poistuva} = m_{t,kierto} + \sum_{i=1}^n \frac{\dot{m}_{t,suodos} + \dot{m}_{t-1,suodos}}{2} * 300 \text{ s} \quad (3)$$

„jossa	$m_{poistuva}$	suodattimesta poistuvan aineen määrä, [kg]
	$m_{t,kierto}$	kiertolinjassa olevan aineen massa ajan hetkellä $t$ , [kg]

$n$	mittauspisteiden määrä, [-]
$\dot{m}_{t,suodos}$	suodoksessa poistuvan aineen massavirta ajan hetkellä $t$ , [kg]
$\dot{m}_{t-1,suodos}$	suodoksessa poistuvan aineen massavirta edellisessä mittauspisteessä, [kg].

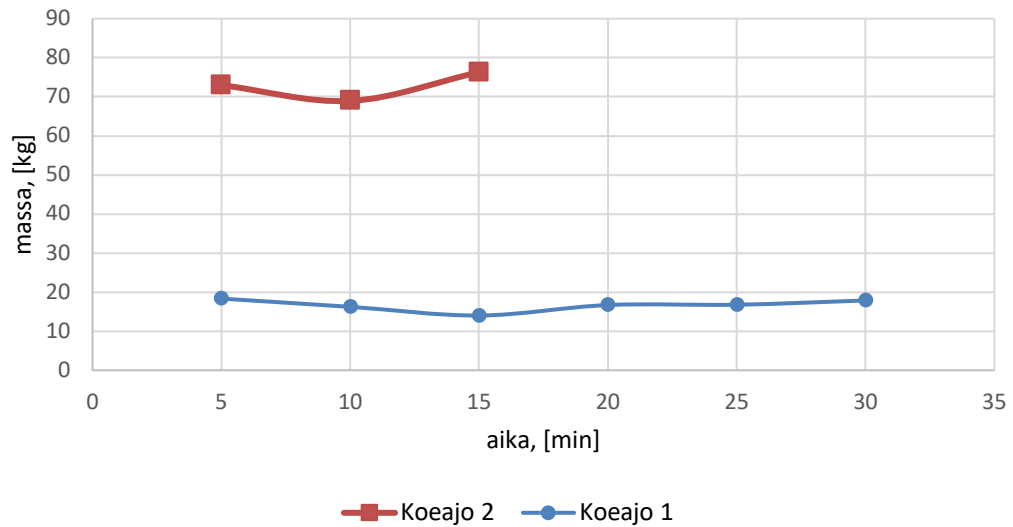
## 9 TULOKSET

Tässä kappaleessa on esitetty analyysien perusteella piirretyt kuvaajat ensimmäisessä ja toisessa koeajossa, sekä online-mittausten seurannan tulokset toisessa koeajossa.

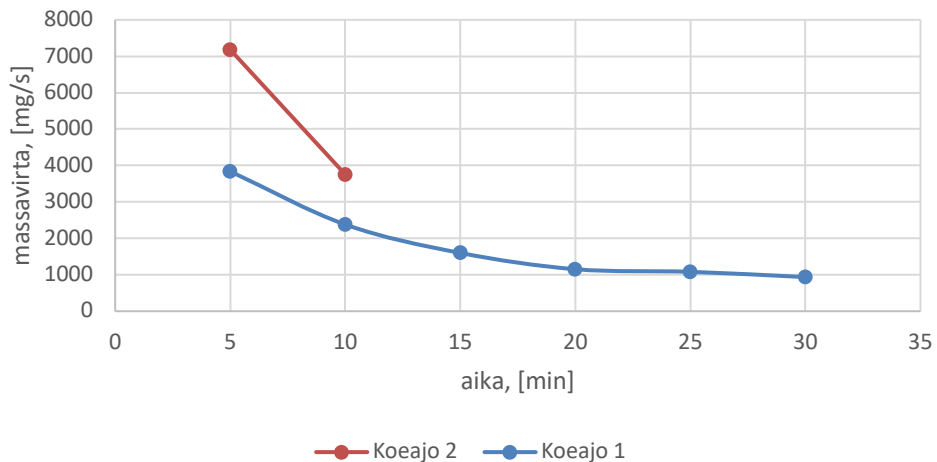
### 9.1 Kiintoaine

Kiintoaineen tulokset on esitetty Kuvissa 3 ja 4. Kuvista nähdään, että toisessa koeajossa kiintoainetta on ollut kiertolinjassa sekä suodoksessa huomattavasti enemmän. Tämä voisi selittyä esimerkiksi raakaviherlipeän sakkapitoisuuden vaihtelulla. Sakkapitoisuutta seurataan tehtaalla säännöllisesti, ja koeajojen läheisyydessä analysoidut näytteet tukevat oletusta, että toisessa koeajossa sakkapitoisuus oli korkeampi. Päivä ennen ensimmäistä koeajoa tehdaslaboratorio sai raakaviherlipeän sakkapitoisuuden arvoksi 811 mg/l, kun taas toisen koeajon päivänä tulos oli 953 mg/l.

Kiintoainemäärien kuvaajista nähdään, että kiertolinjassa kiintoaineen määrä pysyy likimain vakiona. Kiintoaineen poistumisnopeus suodoksessa on suurempi pesun alussa, mutta vähenee voimakkaasti saavuttaen vakioarvon noin 20 minuutin suodatuksen jälkeen. Tulokset ovat linjassa viherlipeäsuodattimen toimintaperiaatteen kanssa, sillä suurin osa kiintoaineesta pysyy kiertolinjassa ja kankaan pesun aikana kiintoaineen määrä kiertolinjassa ei juuri muutu. Kuvaajien voidaan tulkita joiltakin osin noudattavan Sparksin (2011, 27) esittämää teoriaa siitä, että suuremman kiintoainepitoisuuden tapauksessa kiintoainetta poistuisi vähemmän suodoksen mukana. Toisessa koeajossa kiintoainepitoisuus ja -määrä kiertolinjassa on yli kolminkertainen ensimmäiseen koeajoon verrattuna, mutta suodoksen tapauksessa tämä ero on huomattavasti pienempi, mikä tukee teoriaa.



**Kuva 3** Kiertolinjan kiintoaineen massa ajan suhteen kuvattuna ensimmäisessä ja toisessa koeajossa.

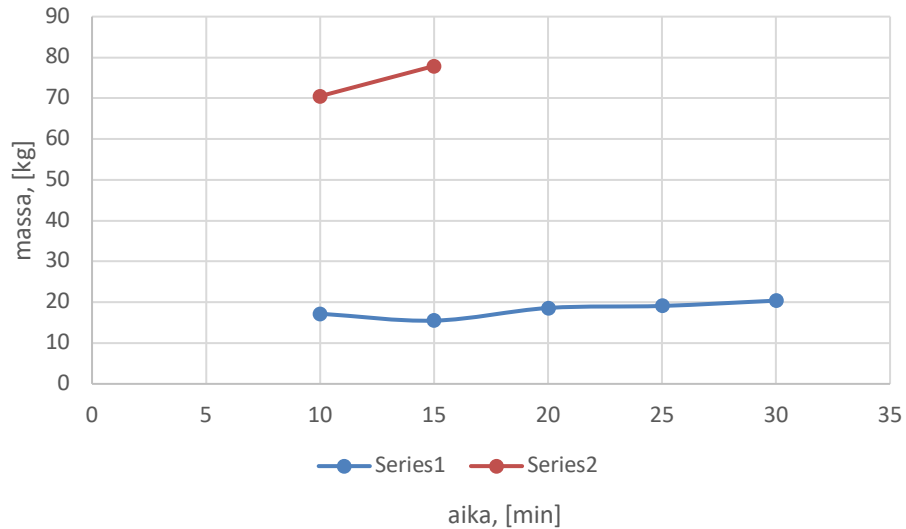


**Kuva 4** Suodosvirrassa poistuvan kiintoaineen massavirta ajan suhteen kuvattuna ensimmäisessä ja toisessa koeajossa.

Tuloksista laskettiin, kuinka paljon kiintoainetta suodattimesta kokonaisuudessaan poistuu suodoksen sekä kiertolinjan tyhjennyksen kautta, mikäli pesu lopetetaan tietyllä ajan hetkellä. Tulokset on esitetty Kuvassa 5. Poistuvan kiintoaineen määrä näyttäisi kasvavan tasaisesti, mutta kuitenkin loivasti pesun edetessä. Ensimmäisessä koeajossa kasvu on loivempaa kuin toisessa. Näiden tuloksien perusteella kannattaisi siis käyttää mahdollisimman pitkää pesuaikaa, mikäli kangas halutaan pestä mahdollisimman hyvin puhtaaksi kiintoaineesta.



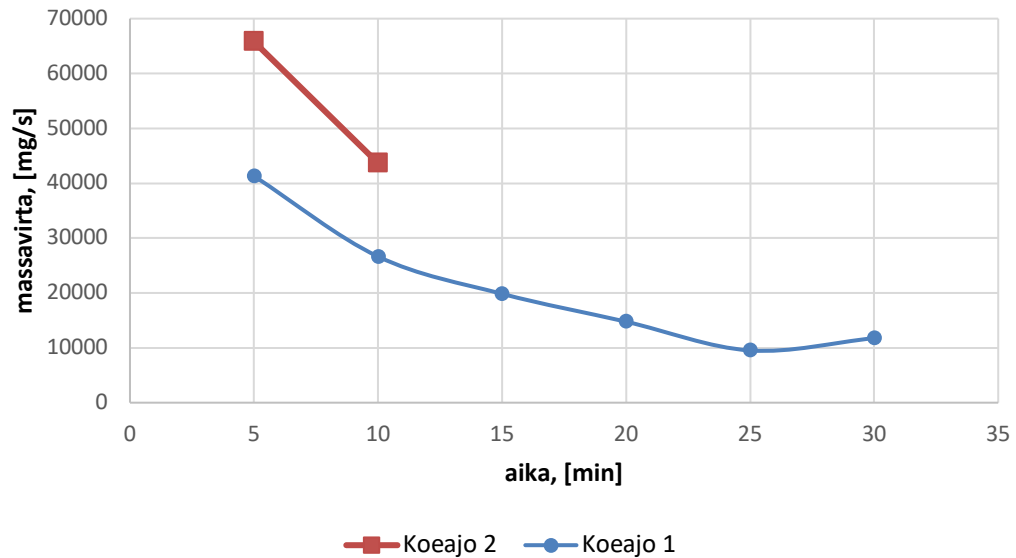
Tiettyssä pisteessä pesuajan pidentäminen ei kuitenkaan ole enää järkevää, kun varsinainen suodatusaika lyhenee vastaavasti.



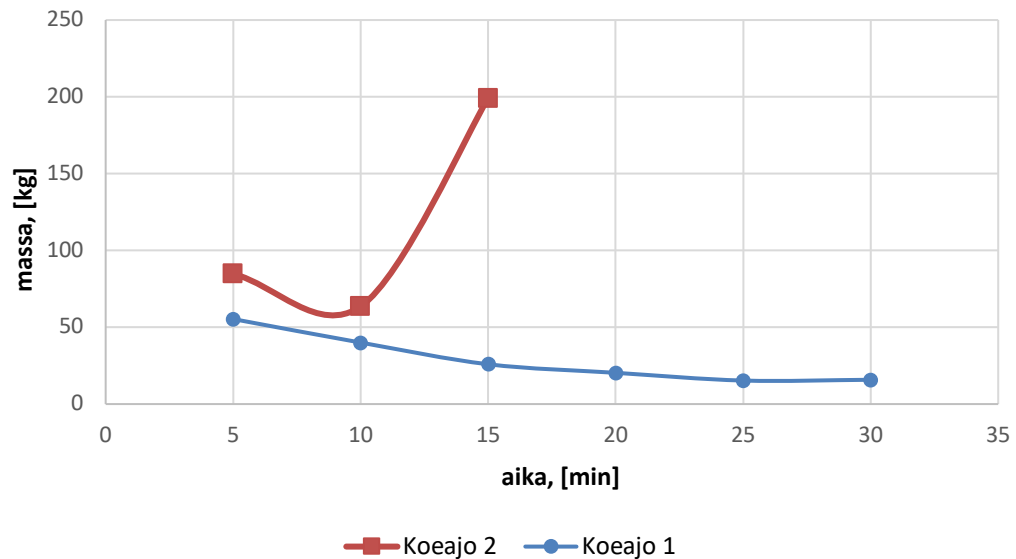
**Kuva 5** Suodattimesta poistuvan kiintoaineen määrä, jos pesu lopetettaisiin ajan hetkellä t.

## 9.2 Natrium

Natriumin massa kiertolinjassa on esitetty Kuvassa 6, ja suodoksen mukana poistuva natrium Kuvassa 7. Kuvaajista nähdään, että natrium käyttäytyy ensimmäisessä koeajossa vesiliukoisena aineena tavoin, sillä kiertolinjan natriumin määrä laskee. Toisessa koeajossa kiertolinjan natriumin ensimmäiset mittauspisteet käyttäytyvät vastaavalla tavalla, mutta 15 minuutin kohdalla määrä on huomattavan korkea. Yhden poikkeaman perusteella ei voida kuitenkaan sanoa, onko tulos todellinen. Suodosvirrassa poistuvan natriumin massavirta laskee molemmissa koeajoissa likimain samalla nopeudella, vaikkakin se on korkeampi toisessa koeajossa.



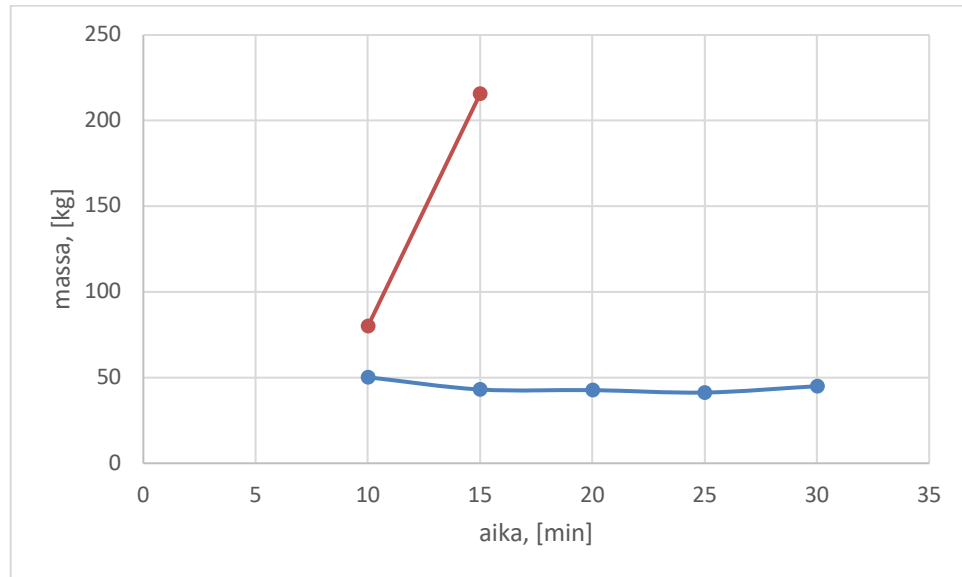
**Kuva 6** Suodosvirran mukana poistuvan natriumin massavirta ajan suhteen kuvattuna ensimmäisessä ja toisessa koeajossa.



**Kuva 7** Kiertolinjan natriumin massa ajan suhteen kuvattuna ensimmäisessä ja toisessa koeajossa.

Suodattimesta pois saatavan natriumin määrä pesun lopetushetkellä on esitetty Kuvassa 8. Ensimmäisen koeajon kuvaaja laskee loivasti, eli tulosten mukaan natriumia saataisiin poistettua sitä vähemmän, mitä pidempää pesuaikaa käytetään. Tämä ei vastaa todellisuutta, sillä natrium ei voi poistua muualle kuin suodokseen ja kiertolinjan pesuvedeen. Tämä kertoo tulosten

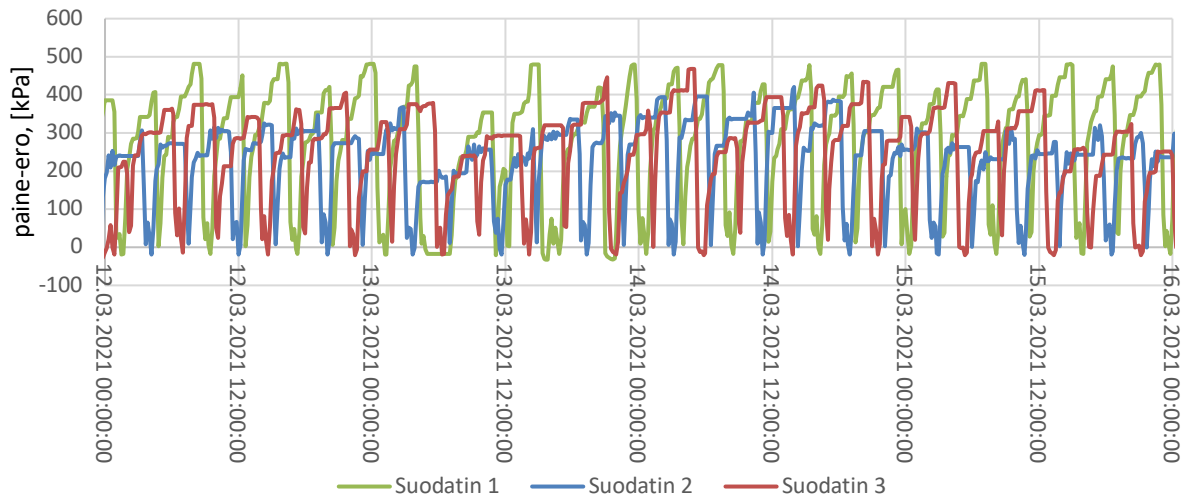
epätarkkuudesta. Toisen koeajon kuvaajaan vaikuttaa 15 minuutin kohdalla saatu korkea tulos. Tuloksista ei pystytä myöskään tulkitsemaan, saavutetaanko jommallakummalla ajomallilla merkittävästi parempi natriumin talteenotto.



**Kuva 8** Suodattimesta poistuvan natriumin määrä, jos pesu lopetettaisiin tietyllä ajan hetkellä.

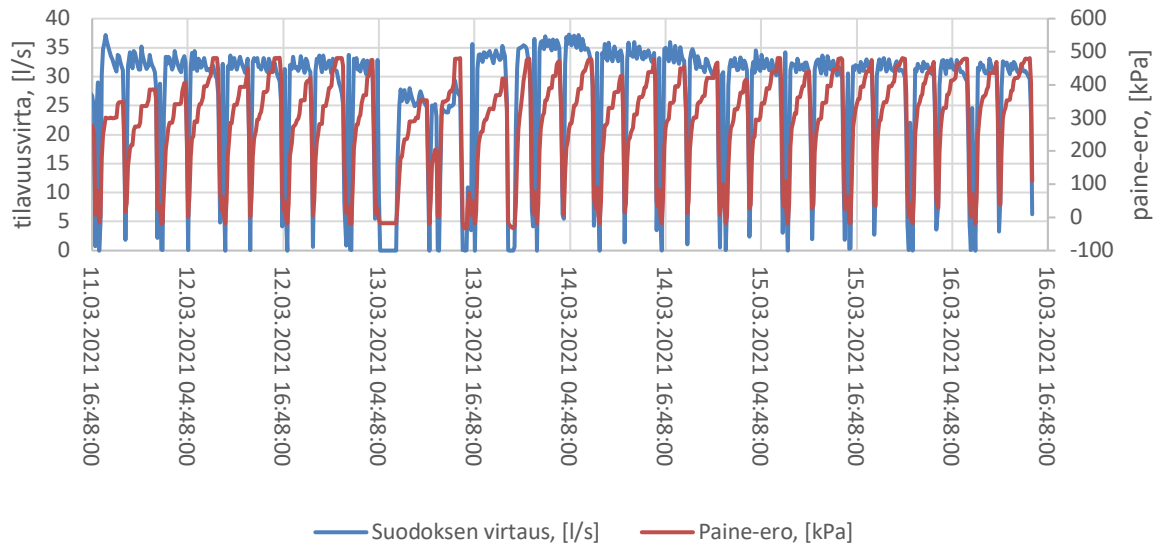
### 9.3 Online-mittaukset

Kuvassa 9 on esitetty viherlipeäsuodattimien paine-erojen kuvaajat 4 vrk ajalta ennen koeajoa, kun kaikki suodattimet ovat olleet ajossa vertailuajomallilla. Suodoksen virtaus on ollut kyseisellä ajanjaksolla likimain sama kaikissa suodattimissa. Kuvista havaitaan, että viimeisen vuorokauden aikana viherlipeäsuodatin 1:n suodatuksen aikaiset paine-erot ovat systemaattisesti korkeampia kuin muiden suodattimien, sekä ne kasvavat voimakkaammin suodatusjakson edetessä. Tämä kertoo siitä, että suodatinkangas on tukkeutuneempi koeajosuodattimessa verrattuna muihin suodattimiin. Tämän takia rinnakkaisia suodattimia vertaillaan vain paine-erojen keskiarvojen muutosten avulla (taulukko II).

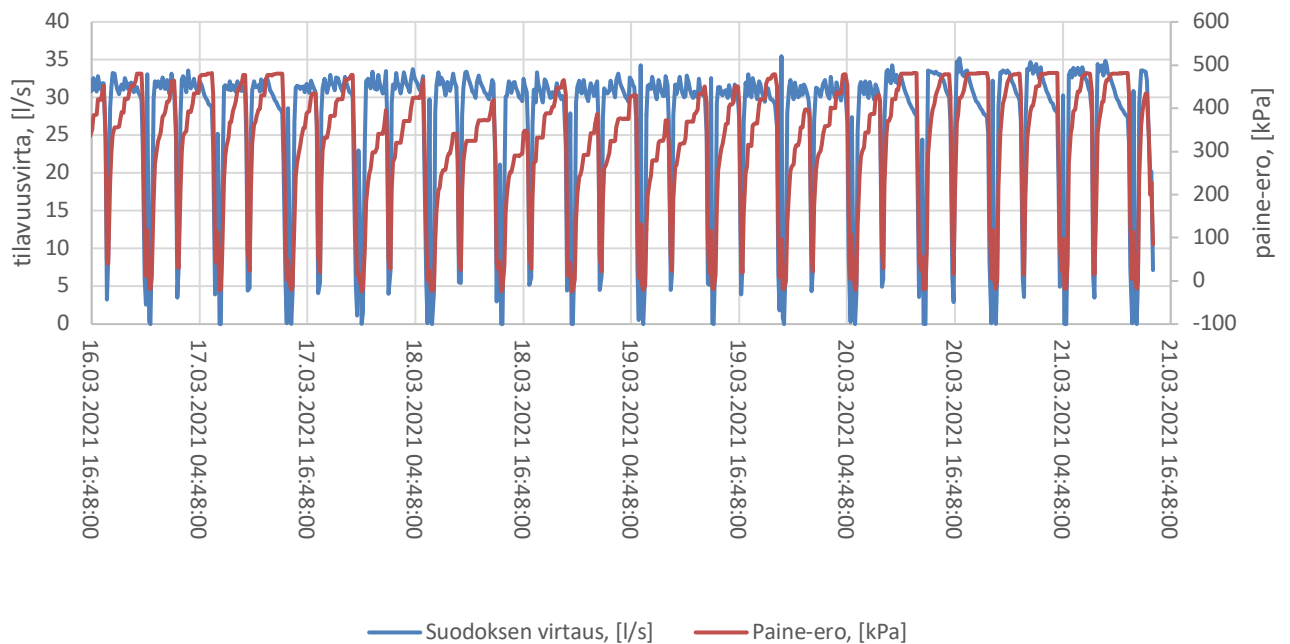


**Kuva 9** Viherlipeäsuodattimien paine-erot noin neljän vuorokauden ajalta ennen koeajoa.

Kuvassa 10 on esitetty viherlipeäsuodin 1:n paine-erot ja suodoksen virtaukset vertailuajanjaksolla ennen koeajoa, ja Kuvassa 11 vastaavat arvot koeajon aikana. Tuloksista voidaan silmämääräisesti havaita, että paine-eroissa ei ole tapahtunut merkittävää parannusta koeajon aikana. Päinvastoin suodatinkankaat päätyvät koeajon loppupuolella tilanteeseen, jossa ne eivät enää suodatusjakson loppupuolella saavuta haluttua suodoksen tilavuusvirtaa. Tämä tarkoittaa sitä, että suodatinkankaat ovat tukkeutuneet niin paljon, että happopesu on tarpeellinen. Näistä tuloksista ei kuitenkaan pystytä tulkitsemaan yksinkertaisesti, onko kankaanpesun ajomallin muutoksella ollut osuutta kankaiden tukkeutumiseen, vai olivatko kankaat joka tapauksessa menossa tukkoon.



**Kuva 10** Viherlipeäsuodattimen 1 paine-erot ja suodostvirtauksen ennen koeajoa.



**Kuva 11** Viherlipeäsuodattimen 1 paine-erot ja suodostvirtaukset koeajan aikana.

Jotta pystyttiin vertailemaan kankaiden tukkeutumista eri ajanjaksoilla, viherlipeäsuodatin 1:n ja 2:n paine-eroille laskettiin keskiarvot ensimmäiseltä ja viimeiseltä vertailu- ja koeajanjakson vuorokaudelta. Kyseisinä ajankohtina suodattimen tuotanto oli likimain yhtä suuri, ja

ajanjaksoilla oli saman verran kankaanpesuja ja tyhjennyksiä. Tulokset on esitetty Taulukossa II. Tulosten perusteella keskimääräisen paine-eron muutoksen ero vertailu- ja koeajanjaksoilla oli likimain sama molemmilla suodattimilla, eli merkittävää eroa eri ajomallien välillä ei voida havaita.

**Taulukko II** Viherlipeäsuodatin 1:n ja 2:n paine-erojen keskiarvot ja niiden muutokset ensimmäisellä ja viimeisellä vuorokaudella vertailu- ja koeajanjaksoilla.

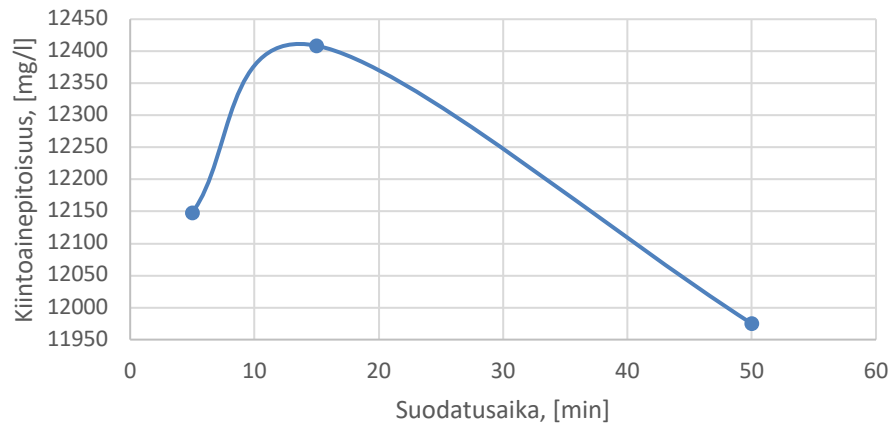
	Viherlipeäsuodatin 1		Viherlipeäsuodatin 2	
	Vertailuajanjakso, [kPa]	Koeajanjakso, [kPa]	Vertailuajanjakso, [kPa]	Koeajanjakso, [kPa]
<b>Ensimmäinen vuorokausi</b>	275	329	209	270
<b>Viimeinen vuorokausi</b>	326	371	232	281
<b>Muutos</b>	51	41	24	12

#### 9.4 Hienoaineen läpäisy suodatusjakson alussa

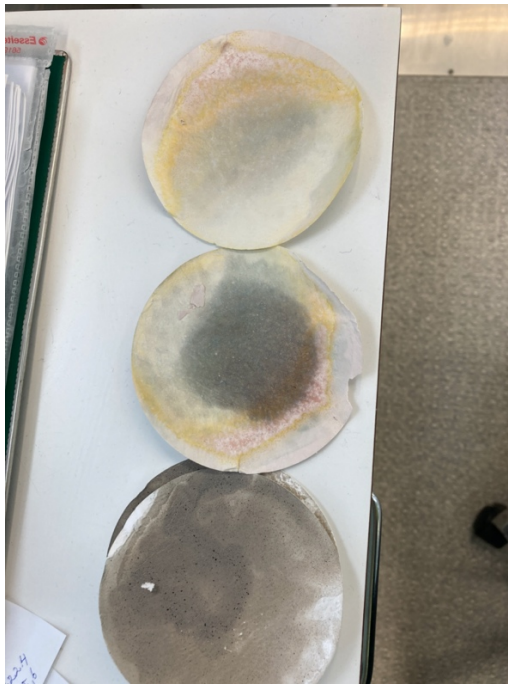
Kankaan pesun jälkeisen suodatusjakson aikana otettujen näytteiden kiintoainepitoisuus-analyysien tulokset on esitetty Kuvassa 12. Kiintoainepitoisuus on korkeampi suodatuksen alkupuolella, mutta ero on vain muutaman prosentin luokkaa, mikä todennäköisesti sopii määrittelyn virhemarginaalin sisään. Kuitenkin mikäli arvot ovat todellisia, ne vastaavat likimain sakkapitoisuutta 150-400 mg/l. Arvo on merkittävästi suurempi kuin viherlipeän varastosäiliön sakkapitoisuus Kaukaalla, joka on koeajon aikana ollut noin 0-15 mg/l luokkaa. Sakan kulkeutuminen kankaan läpi tapahtuu kuitenkin vain lyhyen aikaa suodatusjakson alussa, joten todennäköisesti sillä ei ole juuri merkitystä viherlipeän laatuun.

Viherlipeäsakan läpäisy voidaan kuitenkin havaita selkeästi suodatinpapereiden ulkonäöstä, joka on esitetty Kuvassa 13. Kuivatuissa suodosnäytteissä on näkyvissä tummanharmaata viherlipeäsakkaa eniten viiden minuutin kohdalla otetussa näytteessä, sekä hieman 15 minuutin kohdalla otetussa näytteessä, mutta ei enää lainkaan 50 minuutin kohdalla otetussa näytteessä.

Näiden tulosten perusteella hienojakoista viherlipeäsakkaa siis kulkeutuu suodatusjakson alussa kankaan läpi arviolta noin 10- 20 minuutin ajan.



**Kuva 12** Viherlipeän kiintoainepitoisuus kankaan pesun jälkeisessä suodatusjaksossa



**Kuva 13** Kiintoainepitoisuusanalyysien suodatinpaperit ylhäältä alas lukien: viherlipeän suodatus 15 minuutin kohdalla, viherlipeän suodatus 5 minuutin kohdalla, ja vertailukohteena kankaan pesun aikana otettu näyte, jossa on viherlipeäsakkaa.

## 10 JATKOTOIMENPITEET

Tässä työssä ei havaittu eroja kahden eri ajomallin välillä, mutta pidemmällä koeajoajanjaksolla eroja voitaisiin saada näkyviin. Kokeilemalla rohkeasti erilaisia kankaanpesun ajomalleja voidaan löytää optimaalisin paineentasaus- ja pesusuodatusaika. Kyseisten aikojen muuttaminen ei sisällä suuria riskejä suodattimien ajettavuuden kannalta, kunhan varmistetaan että rinnakkaisten suodattimien yhteenlasketut pesuajat ovat samat.

Viherlipeän sakkapitoisuuden online-mittaus olisi hyödyllinen lisä prosessin seurantaan esimerkiksi suodattimen sisällä tai raakaviherlipeässä. Tällä hetkellä suodattimien valmistajalla ei ole mittaukseen toimivaa tapaa, mutta Jari Pääkkönen suosittelee diplomityössään (2020, s. 64), että viherlipeäsuotimien valmistaja tutkisi Collo-tekniikan käyttöä viherlipeän sakkapitoisuuden mittaamisessa. Collo perustuu radioaaltoihin, joiden perusteella voidaan mitata kiintoainepitoisuutta ja muita nesteiden ominaisuuksia.

## 11 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön teoriaosan tarkoitus oli esitellä viherlipeäsuodatin ja sen toiminta, sekä käydä läpi kankaan likaantumisen ja pesun teoriaa niiltä osin, joilta se oli sovellettavissa viherlipeäsuodattimeen. Teoriaosassa esiteltiin viherlipeäsuodattimen kankaan pesun käytäntö, sekä todettiin, että kohdetehtaalla voitaisiin mahdollisesti päästä parempiin kankaanpesun tuloksiin muuttamalla kankaan pesun ajomalleja.

Työn kokeellisessa osassa tutkittiin UPM Kaukaan sellutehtaan viherlipeäsuodatuksen kankaan pesun toimintaa, ja vertailtiin kahta keskenään erilaista kankaanpesun ajomallia. Ajomallien keskeinen ero oli pesusuodatuksen ja paineentasauksen kestojen vaihtelu. Oletuksena oli, että pidempi paineentasaus tuottaisi paremman pesutuloksen, mikä nostaisi suodatinten kapasiteettia.



Vertailussa tärkein tekijä oli suodattimien paine-ero, joka on verrannollinen kankaiden likaantumisasasteeseen. Koeajossa käytetyn viherlipeäsuodattimen paine-eroja analysoimalla ei pystytty toteamaan merkittävää eroa ajomallien välillä.

Työssä tutkittiin kankaan pesun toimintaa ottamalla näytteitä pesuvedestä ja analysoimalla niistä kiintoaine- ja natriumpitoisuudet. Havaittiin, että viherlipeän sakkapitoisuudella oli merkitystä pesuvesien kiintoaine- ja natriumpitoisuuksiin. Kiintoaine ja natrium käyttäytyivät pesun aikana odotetulla tavalla, sillä kiintoaine pysyi kiertolinjassa ja natrium siirtyi suodoksen mukana pois suodattimesta. Työssä havaittiin myös, että kankaan pesun jälkeisen viherlipeän suodatusjakson aikana viherlipeäsakkaa suotautuu kankaan läpi enemmän kuin suodatuksen loppuvaiheessa. Tämä vaikutus kuitenkin katoaa noin 10-20 minuutin suodatuksen jälkeen. Kahden eri ajomallin välillä ei pystytty havaitsemaan merkittävää eroa näytteiden tuloksissa.

Yleisesti voidaan todeta, että työssä käytetyt menetelmät eivät ole parhaita mahdollisia menetelmiä viherlipeäsuodattimien kankaiden pesun toiminnan seuraamista ajatellen. Online-mittausten osalta tarvittaisiin pidempi ajanjakso, jotta nähtäisiin selviä eroja kankaanpesujen muutosten seurauksena. Kankaan likaantumisen vertailu eri ajanjaksojen ja suodattimien välillä todettiin haastavaksi kankaiden likaisuuden, ajovauhdin, sekä viherlipeän sakkapitoisuuden erojen takia.

## LÄHTEET

- Andritz Oy. X-filter Study, UPM Kaukas. 2019. Raportti. Yksityinen materiaali
- Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. 2009. Pulp and Paper Chemistry and Technology - Pulping Chemistry and Technology, Volume 2. Luku 13. The Recovery of Cooking Chemicals: The White Liquor Preparation Plant.
- Fuchs E. et al. 2015. An experimental comparison of film flow parameters and cleaning behaviour of falling liquid films for different tilt angles. Food and bioproducts processing 93 (2015): 318–326. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.10.004>
- Golmaei, M, Kinnarinen, T., Jernström, E. & Häkkinen, A. 2017. Study on the Filtration Characteristics of Green Liquor Dregs. Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland : 1996) 317 (2017): 471–480. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2017.02.104>
- Headley, R. L. 1996. New liquor filtration options provide production and quality improvements. Pulp & Paper, 70(13), 69-72.
- KnowPulp. 2021. KnowPulp – Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. Online-tietokanta. Versio 19.0. Saatavissa: <http://www.knowpulp.com/>. Vaatii maksullisen lisenssin.
- Mahmoudkhani M., Richards T. & Theliander H. 2004 RECYCLING OF SOLID RESIDUES TO THE FOREST - Experimental and Theoretical Study of the Release of Sodium from Lime Mud and Green Liquor Dregs Aggregates. Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection, 2004, 82(B3): 230–237 Saatavissa: <https://doi.org/10.1205/095758204323065993>
- Matikka, J. 2020. Viherlipeäsuotimen nousukanavan ja sen tuennan kehitys. Diplomityö. LUT-yliopisto, LUT School of Energy Systems, LUT Kone. Lappeenranta. 82 s.
- Mertakorpi, A. 2021. Vierasaineiden käyttäytyminen sulfaattisellutehtaan kalkkikierrrossa. Diplomityö. LUT-yliopisto, LUT School of Energy Systems, LUT Energia. Lappeenranta. 137 s.
- Päykkönen, J. 2020. Development of measures and controls in white liquor plant. Diplomityö. LUT-yliopisto, LUT School of Energy Systems, LUT Energia. Lappeenranta. 67 s.
- Sparks, T. 2012. Solid-Liquid Filtration - A Users' Guide to Minimizing Costs and Environmental Impact; Maximizing Quality and Productivity. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- UPM Kymmene Oyj. DNA Help-järjestelmän toimintakuvaukset. 2021. Kaukaan sellutehtaan tehdasjärjestelmät. Julkaisematon materiaali.

Tikka, P. 2008. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.

Weigert, T. & Ripperger, S. 1996. Effect of Filter Fabric Blinding on Cake Filtration. Artikkele. Filtration & separation 34.5 (1997): 507–510. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(97\)84764-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84764-7)

## LIITE I Kokeellisen osan mittaus- ja välitulokset

**Taulukko III**

1. koeajon suodoksen kiintoainevirtauksen laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Näytteen tilavuus, [ml]	Suodatinpaperin massa, [mg]	Paperin massa kuivauksen jälkeen, [mg]	Massan muutos, [mg]	Kiintoainepitoisuus, [mg/l]	Suodoksen virtaus näytteenottohetkellä, [l/s]	Kiintoaineen virtaus, [mg/s]
5	62	332,1	338,9	6,8	109,7	35	3840
10	62	329,7	333,8	4,1	66,13	36	2380
15	62	329	332,1	3,1	50,00	32	1600
20	64	325,4	327,2	1,8	28,13	41	1150
25	66	328,1	330,2	2,1	31,82	34	1080
30	68	326,8	328,1	1,3	19,12	49	937

**Taulukko IV**

1. koeajon kiertolinjan kiintoainemassan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Näytteen tilavuus, [ml]	Suodatinpaperin massa, [mg]	Paperin massa kuivauksen jälkeen, [mg]	Massan muutos, [mg]	Kiintoainepitoisuus, [mg/l]	Suotimen pinnankorkeus, [%]	Kiintoaineen massa, [kg]
5	60	328,3	347	18,7	311,7	50	18,3
10	62	331,7	348,8	17,1	275,8	50	16,2
15	62	327,5	343,6	16,1	259,7	45	14,0
20	62	328,8	346,1	17,3	279,0	51	16,7
25	60	326,1	343,2	17,1	285,0	50	16,8
30	64	325,8	344,6	18,8	293,8	52	17,9

**Taulukko V**

1. koeajon suodoksen natriumvirtauksen laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Na-pitoisuus laimennetussa näytteessä, [mg/l]	Na-pitoisuus laimentamattomassa näytteessä, [mg/l]	Suodoksen virtaus näytteenottohetkellä, [l/s]	Na:n virtaus, [mg/s]
5	5,9	1180	35	41300
10	3,7	740	36	26600
15	3,1	620	32	19800
20	1,8	360	41	14800
25	1,4	280	34	9520
30	1,2	240	49	11800

**Taulukko VI**

1. koeajon kiertolinjan natriummassan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Na-pitoisuus laimennetussa näytteessä, [mg/l]	Na-pitoisuus laimentamattomassa näytteessä, [mg/l]	Suotimen pinnankorkeus, [%]	Na:n massa, [kg]
5	4,7	940	50	55,3
10	3,4	680	50	40,0
15	2,4	480	45	25,9
20	1,7	340	51	20,3
25	1,3	260	50	15,3
30	1,3	260	52	15,8

**Taulukko VII**

2. koeajon suodoksen kiintoainevirtauksen laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Suodatettu tilavuus, [ml]	Suodatin-paperin massa, [mg]	Paperin massa kuivauksen jälkeen, [mg]	Massan muutos, [mg]	Kiintoainepitoisuus, [mg/l]	Suodoksen virtaus näytteenottohetkellä, [l/s]	Kiintoaineen virtaus, [mg/s]
5	58	325,9	337,8	11,9	205	35	7180
10	66	328,2	334,9	6,7	102	37	3760

**Taulukko VIII**

2. koeajon kiertolinjan kiintoainemassan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Suodattettu tilavuus, [ml]	Suodatinpaperin massa, [mg]	Paperin massa kuivauksen jälkeen, [mg]	Massan muutos, [mg]	Kiintoainepitoisuus, [mg/l]	Suotimen pinnan korkeus, [%]	Kiintoaineen massa, [kg]
5	60	330,3	404,7	74,4	1240	50	73,0
10	66	329,5	406,8	77,3	1171	50	68,9
15	64	327,8	413,6	85,8	1340	48	76,3

**Taulukko IX**

1. koeajon suodoksen natriumvirtauksen laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Na-pitoisuus laimennetussa näytteessä, [mg/l]	Na-pitoisuus laimentamattomassa näytteessä, [mg/l]	Suodoksen virtaus näytteenottohetkellä, [l/s]	Na:n virtaus, [mg/s]
5	9,4	1880	35	65800
10	5,9	1180	37	43660

**Taulukko X**

2. koeajon kiertolinjan natriummassan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Na-pitoisuus laimennetussa näytteessä, [mg/l]	Na-pitoisuus laimentamattomassa näytteessä, [mg/l]	Suotimen pinnankorkeus, [%]	Na:n massa, [kg]
5	7,2	1440	50	84,8
10	5,4	1080	50	63,6
15	17,5	3500	48	199,2

**Taulukko XI**

1. koeajossa poistuvan kiintoaineen ja natriumin massan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Kiintoaineen määrä kiertolinjassa, [kg]	Suodoksessa poistuvan kiintoaineen määrä, [kg]	Yhteensä, [kg]	Natriumin määrä kiertolinjassa, [kg]	Suodoksessa poistuvan natriumin määrä, [kg]	Yhteensä, [kg]
10	16,2	0,9	17,2	40,0	10,2	50,21
15	14,0	1,5	15,5	25,9	17,2	43,1
20	16,7	1,9	18,6	20,3	22,4	42,7
25	16,8	2,3	19,1	15,3	26,0	41,3
30	17,9	2,6	20,4	15,8	29,2	45,0

**Taulukko XII**

2. koeajossa poistuvan kiintoaineen ja natriumin massan laskemiseen käytetyt tiedot.

Aika, [min]	Kiintoaineen määrä kiertolinjassa, [kg]	Suodoksessa poistuvan kiintoaineen määrä, [kg]	Yhteensä, [kg]	Natriumin massa kiertolinjassa, [kg]	Suodoksessa poistuvan natriumin massa, [kg]	Yhteensä, [kg]
10	68,9	1,6	70,6	63,6	16,4	80,0
15	76,3	1,6	77,9	199,2	16,4	215,6