

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Imatra  
Prosessitekniikka  
Prosessi- ja paperiteollisuuden suunnittelu

Panu Pelkonen

## **Kappakertoimien uudelleen määrittäminen sellutehtaan D<sub>0</sub>-vaiheessa**

Opinnäytetyö 2012

## Tiivistelmä

Panu Pelkonen

Kappakertoimien uudelleen määrittäminen sellutehtaan D<sub>0</sub>-vaiheessa, 49 sivua, 5 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Imatra

Prosessitekniikka

Prosessi- ja paperiteollisuuden suunnittelu

Opinnäytetyö 2012

Ohjaajat: lehtori Jarkko Männynsalu, Saimaan ammattikorkeakoulu, päivämestari Jarkko Huhtanen, Stora Enso Oyj ja tuotantoinisinööri Joanna Rahko, Stora Enso Oyj

Työn tarkoituksena oli määrittää sellutehtaan kuusivaiheisen valkaisu ensimmäiseen klooridioksidivaiheeseen uudet kappakertoimet. Kappakertoimet olivat lähtötilanteessa pielessä, mikä oli todettavissa operaattorikorjauksen tarpeesta ja D<sub>0</sub>-vaiheen jälkeisen kappaluvun heilahtelusta. Työssä päätettiin keskittyä vain kappakertoimien uudelleen määrittämiseen, koska sillä todettiin olevan merkittävin vaikutus D<sub>0</sub>-vaiheessa tarvittavien klooridioksidiannoksien laskennassa.

Uusien kappakertoimien määrittämiseksi tehtiin kolmivaiheinen koeajo. Askelvastemenetelmällä tehdyssä koeajossa valkaisu syöttökappaa vaihdettiin kolmella eri tasolla (25, 27 ja 30), ja ClO<sub>2</sub>-annoksia muutettiin neljä kertaa per koeajovaihe. Muuten valkaisuolosuhteet pidettiin vakiona. Koeajotuloksia varten kerättiin dataa useista mittauksista sekä ennen D<sub>0</sub>-vaihetta että sen jälkeen.

Koeajotuloksista määritettiin uudet kappakertoimet, joiden toimivuutta seurattiin noin seitsemän kuukauden ajan toukokuusta joulukuuhun. Seurannan perusteella voitiin todeta uusien kappakertoimien pienentäneen jonkin verran operaattorikorjauksen tarvetta, mutta ei poistaneen sitä. Välikapen osalta heilahtelua saatiin vähäisemmäksi, joten määritetyt kappakertoimet jätettiin pysyvästi päälle.

Asiasanat: D<sub>0</sub>-vaihe, kappakerroin, klooridioksidi

## **Abstract**

Panu Pelkonen

Redefinition of Kappa Factors in Pulp Mill's D<sub>0</sub>-stage, 49 pages, 5 appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Unit of Technology, Imatra

Degree Programme in Process Engineering

Orientation of Designing Process and Paper Technology

Thesis 2012

Tutors: Mr. Jarkko Männynsalo, Senior Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences, Mr. Jarkko Huhtanen, Supervisor, Stora Enso Ltd. and Mrs. Joanna Rahko, Production Engineer, Stora Enso Ltd.

The objective of the study was to determine new kappa factors to the first chlorine dioxide stage of a six phased bleaching sequence in a pulp mill. Based on the need of fixing the chlorine dioxide dosages by the operators and the fluctuation of the kappa number after D<sub>0</sub>-stage it was clear that at the beginning of the study kappa factors were incorrect. It was decided to concentrate only on redefining kappa factors, because they have the most significant affect when calculating the needed chlorine dioxide dosages in D<sub>0</sub>-stage.

To define new kappa factors a three phased experiment was executed. The experiment was carried out in step response method in which the kappa number of the pulp coming to the bleaching was changed three times (25, 27 and 30). In every kappa number level the chlorine dioxide dosages were changed four times. Otherwise the bleaching conditions were kept stable. To get results for redefining the kappa factors measurement data were collected from different measurement points both before and after D<sub>0</sub>-stage.

After the definition of new kappa factors their functioning was observed for about seven months from May to December. Although the need of fixing the dosages remained, the other goals set for the redefinition were achieved and therefore the new kappa factors were left on permanently.

Keywords: D<sub>0</sub>-stage, Kappa Factor, Chlorine Dioxide

## Sisältö

1	Johdanto.....	6
2	Kemiallisen massan valkaisu.....	6
2.1	Klooridioksidivalkaisu.....	6
2.2	Klooridioksidin reaktiot.....	7
2.3	Valkaisuvaiheet ja -sekvenssit.....	8
2.3.1	D <sub>0</sub> -vaihe.....	9
2.3.2	Alkalinen uuttovaihe.....	10
2.3.3	D <sub>1</sub> - ja D <sub>2</sub> -vaiheet.....	11
3	Valkaisun valvonta ja ohjaus.....	11
3.1	KajaaniPOLAROX <sub>fi</sub> .....	12
3.2	KajaaniPOLAROX <sub>i</sub> .....	14
3.3	KajaaniCORMEC <sub>i</sub> .....	16
4	Säätötekniikan perusteita.....	18
4.1	Mittaukset.....	18
4.2	Säätöpiirien peruskytkennät.....	19
4.2.1	Takaisinkytkentä.....	19
4.2.2	Kaskadikytentä.....	20
4.2.3	Myötäkytkentä.....	21
4.2.4	Suhdesäätö.....	22
5	Stora Enso Imatran tehtaat.....	24
5.1	Tuotteet.....	24
5.2	Kuitulinja 2.....	25
6	Työn tavoite.....	27
7	D <sub>0</sub> -vaiheen säädön nykytilanne.....	28
8	D <sub>0</sub> -vaiheen laatusäädöt.....	30
9	Koeajosuunnitelma.....	32
10	Koeajojen tulokset.....	35
11	Koeajojen tulosten seurantajakso.....	40
12	Yhteenveto.....	45
	Kuvat.....	47
	Kuviot.....	47
	Taulukot.....	47
	Lähteet.....	49

### Liitteet

Liite 1 Hahmotelma tuotantonopeuksien vaikutuksesta D<sub>0</sub>-vaiheessa tarvittavaan ClO<sub>2</sub>-annokseen

Liite 2 Kappakerroinkuvaajat ja -yhtälöt eri syöttökappatasoilla koeajotulosten seurantajakson operaattorikorjauksien laskemiseksi

Liite 3 Mittausdataa referenssijaksojen ajalta

Liite 4 Referenssijaksojen eri mittausten tilastotiedot

Liite 5 Referenssijaksojen xy-kuvaajat

## Lyhenteet ja merkinnät

ADt	Ilmakuiva sellutonni ( <b>A</b> ir <b>D</b> ry ton)
D	Klooridioksidivaihe (Chlorine <b>D</b> ioxide)
E	Alkaliuuttovaihe ( <b>E</b> xtraction)
ECF	Kloorikaasuton valkaisu ( <b>E</b> lementary <b>C</b> hlorine <b>F</b> ree)
EO/Eo	Hapella tehostettu alkalivaihe
EOP/Eop	Hapella ja peroksidilla tehostettu alkalivaihe
EP/Ep	Peroksidilla tehostettu alkalivaihe
K-moodi	Kaskadimoodi
TCF	Kloorikemikaaliton valkaisu ( <b>T</b> otally <b>C</b> hlorine <b>F</b> ree)
Z	Otsonivaihe ( <b>O</b> zone)

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kuinka sellutehtaan valkaisuolinjan ensimmäistä klooridioksidivaihetta voidaan parantaa sen annossäätöjen osalta. Suurin vaikutus D<sub>0</sub>-vaiheen oikeaan ClO<sub>2</sub>-annokseen on kappakertoimien perusteella laskettavalla perusannoksella. Uusien kappakertoimien määrittämiseksi tehdään askelvastemenetelmällä kolmivaiheinen koeajo, jossa syöttökappaa vaihdellaan kolmella eri tasolla ja jokaisessa koeajovaiheessa klooridioksidiannosta nostetaan askelmaisesti neljä kertaa.

Koeajotuloksista määritetyt uudet kappakertoimet otetaan vanhojen kappakertoimien sijaan annoslaskentaan mukaan, ja niiden toimivuutta seurataan useamman kuukauden ajan. Mikäli kappakertoimien muutoksen todetaan parantaneen D<sub>0</sub>-vaiheen ClO<sub>2</sub>-annoslaskentaa, uudet kappakertoimet jätetään säätöön päälle.

## 2 Kemiallisen massan valkaisu

Kemiallisen massan valkaisun tärkeimpänä tavoitteena on poistamalla massan värillisiä aineita parantaa sen vaaleutta ja puhtautta. Jäännösligniini on merkittävin väriä aiheuttava aine. Se on poistettava niin tarkasti ja selektiivisesti kuin mahdollista, etteivät massan hiilihydraatit liukene valkaisussa.

Myös ligniinin värin vaalennus on mahdollista, jolloin käytetään termiä ligniiniä säästävä valkaisu. Tämä menetelmä on kuitenkin käytössä ainoastaan mekaanisten massojen valmistuksessa. Sellu valkaistaan aina ligniiniä poistavalla tavalla. (Klemetti, Kortelainen, Lyytikäinen, Siitonen & Sironen 2005, 122.)

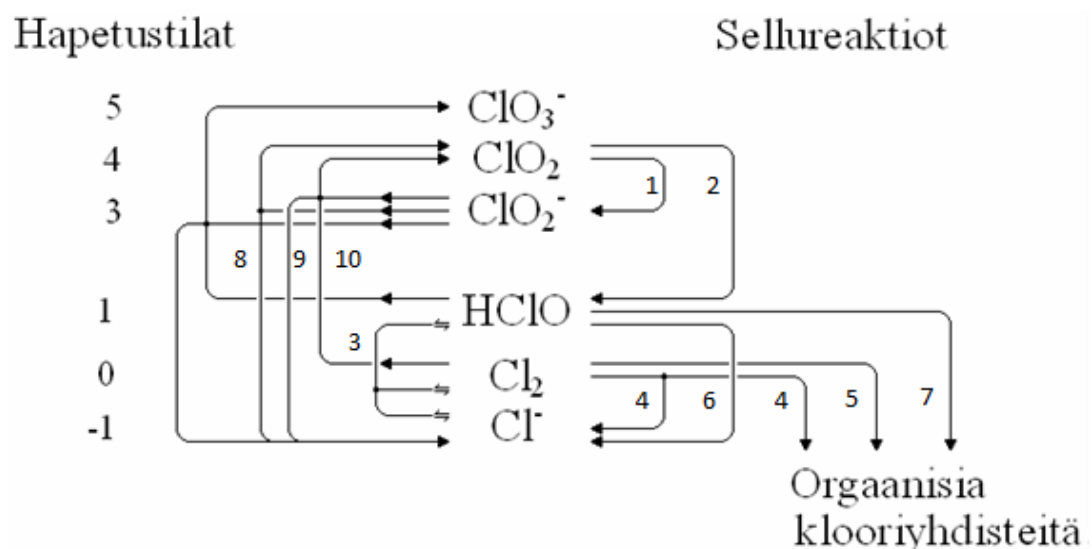
### 2.1 Klooridioksidivalkaisu

Klooridioksidi on monikäyttöinen valkaisukemikaali. Se poistaa tehokkaasti ligniiniä ja nostaa sellun vaaleutta tuhoamatta merkittävästi hiilihydraatteja, jolloin lujuusominaisuudet pysyvät hyvinä.

Klooridioksidilla päästään korkeaan lopputuoteasteeseen, noin 90 % ISO. Käyttökohteesta riippuen haluttu lopputuoteaste voi vaihdella puolivalkaistun mäntysulfaatin alle 80 %:sta ISO täysvalkaistun koivu- ja mäntysulfaatin hieman päälle 90 %:iin ISO. (Gullichsen & Fogelholm 1999, 180–181; Klemetti ym. 2005, 122.)

## 2.2 Klooridioksidin reaktiot

Klooridioksidi reagoi eri tavalla kuin kloori, mutta kloorin tapaan sillä saadaan poistettua ligniiniä. Reagoidessaan ligniinin kanssa useassa eri vaiheessa klooridioksidi itse pelkistyy. Kuvaan 1 on koottu pelkistymisen vaiheet ja eri välituotteet. (Gullichsen & Fogelholm 1999, 171.)



Kuva 1. Klooridioksidin reaktiotuotteet pelkistymisen eri vaiheissa (Gullichsen & Fogelholm 1999)

Klooridioksidi reagoi massan kanssa kuvassa 1 esitettyjen reaktioiden 1 ja 2 mukaisesti itse pelkistyen, jolloin muodostuu kloriitti-ioneja ja alikloorihapoketta ( $\text{HClO}$ ). Alikloorihapoke puolestaan pelkistyy reaktion 6 mukaisesti edelleen kloridi-ioniksi ( $\text{Cl}^-$ ). Kun kloridi-ioni reagoi alikloorihapokkeen kanssa (reaktio 3), syntyy klooria. Alikloorihapoke ja kloori reagoivat sellun kanssa ja hapettavat sitä. Tällöin reaktiotuotteina muodostuu kloorautuneita orgaanisia aineita (reaktiot 4, 6 ja 7). Koska alikloorihapoke on inertti aine, se reagoi hiilihydraattienkin kanssa. Niinpä sen muodostuminen on vahingollista lujuusominaisuuksien kannalta. Kloriitin ja kloorin reagoidessa (reaktio 10)

syntyy taas klooridioksidia. Kun alikloorihapoke ja kloriitti reagoivat keskenään (reaktio 8) syntyy haitallista klooraattia ( $Cl_3^-$ ). Alikloorihapokkeen tapaan klooraatti on inertti aine, joten se ei reagoi lainkaan ligniinin kanssa. Klooraatin muodostuminen vain kuluttaa klooridioksidia, joten se ei olekaan toivottu reaktio. (Dence & Reeve 1996, 264–265.)

Delignifioinnin tehokkuuteen vaikuttaa olennaisesti kloridi-ionipitoisuus. Kun pitoisuus on välillä 0,02–0,5 M, delignifiointitehokkuus pysyy vakiona, mutta jos pitoisuus laskee alle 0,001:n, ligniinin poiston tehokkuus voi jopa puolittua. Kloridi-ioni vaikuttaa suotuisasti klooraatin muodostumiseen; sitä syntyy vähemmän. (Dence & Reeve 1996, 278.)

### 2.3 Valkaisuvaiheet ja -sekvenssit

Kloorikaasu oli vielä ennen vuosituhannen vaihdetta tärkein alkuvalkaisukemikaali, koska se on halpaa ja tehokkaasti ligniiniä hapettavaa. Suomessa kloorin käyttö tosin lopetettiin jo aikaisemmin. Kloorilla ja kloorikemikaaleilla yleensä on varsinkin ympäristön kannalta ajatellen myös haittapuolia. Ympäristön suojelemiseksi kloorikaasun käytöstä on jo luovuttu kokonaan Pohjoismaissa. Viime aikoina onkin pyritty kehittämään yhä enemmän happiryhmän kemikaaleihin perustuvia valkaisu menetelmiä. Kehityksen tuloksena on myös kokonaan kloorikemikaaliton valkaisu. Massat luokitellaan nykyään valkaisuissa käytettävien kemikaalien mukaan ECF-massoihin (Elementary Chlorine Free, valkaistu ilman kaasuklooria) ja TCF-massoihin (Totally Chlorine Free, valkaistu ilman kloorikemikaaleja). (Klemetti ym. 2005, 123.)

Näiden syiden takia sulfaattisellun valkaisu sekvensseissä on tapahtunut merkittäviä muutoksia. Jälkivalkaisua ovat mullistaneet erilaiset keiton modifikaatiot ja happivaiheiden mukaantulo. Käytettäviä kemikaaliyhdistelmiä on yhä enemmän, ja samanaikaisesti valkaisu sekvenssien lukumäärä on pienentynyt. Täysvalkaistavien sulfaattisellujen valkaisu on nykyään useimmiten 3–6 -vaiheinen. Voimakkaan 1980-luvulla alkaneen kehityksen seurauksena standardisekvenssinä voidaan pitää seuraavia:

D-EO-D-E-D tai D-ED-D-D



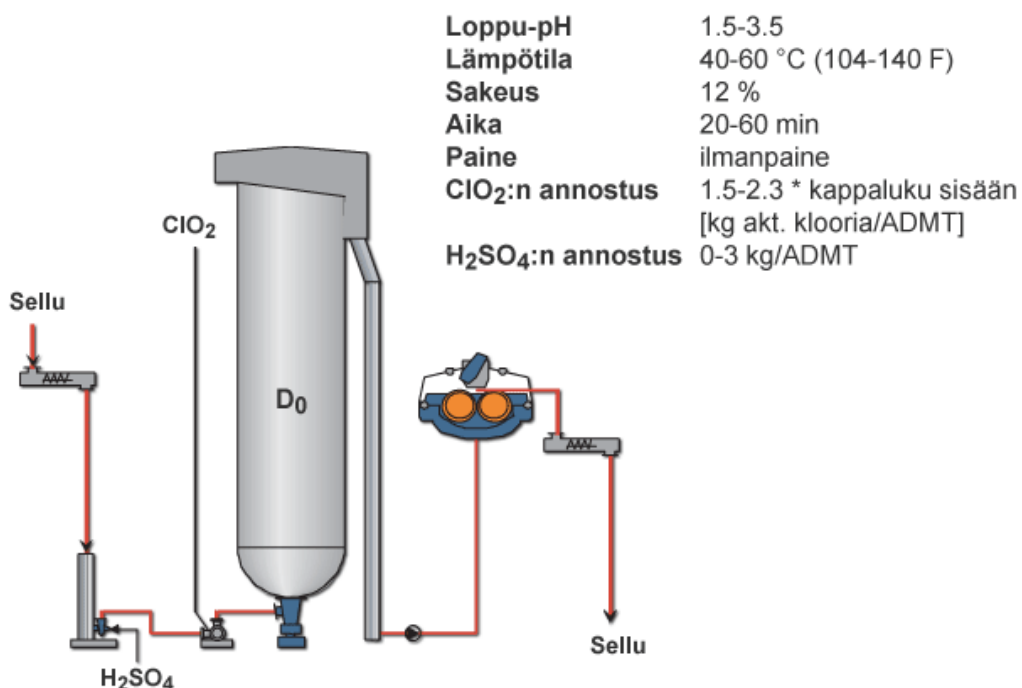
Monet muutkin valkaisu-sekvenssit on mahdollisia. ECF-massan valmistuksessa esimerkiksi sekvenssit D-EOP-D-PO ja Z-EO-D-D ovat käyttökelpoisia. (Isotalo, 2004, 85–86; Klemetti ym. 2005, 123–124.)

Valkaisussa käytettävät kemikaalit ovat klooridioksidi, natriumhydroksidi, happi ja vetyperoksidi. Ensimmäistä klooridioksidivaihetta seuraavat hapella ja peroksidilla tehostetut alkaliset uuttovaiheet. Tämän jälkeen on vielä kaksi klooridioksidivaihetta, joiden välissä yksi alkalinen uuttovaihe. Jokaisen valkaisu-vaiheen jälkeen on massan pesu, jossa edellisen vaiheen reaktiotuotteet ja kemikaalijäännökset pestään pois. (Klemetti ym. 2005 131.)

### 2.3.1 D<sub>0</sub>-vaihe

D<sub>0</sub>-vaiheessa massasta poistetaan valtaosa ligniinistä. D<sub>0</sub>-vaiheen valkaisukemikaalina käytetään klooridioksidia (ClO<sub>2</sub>). Loppu-pH D<sub>0</sub>-vaiheessa on 1,5–3,5. Kuvassa 2 on esitetty D<sub>0</sub>-vaiheeseen tyypillisesti kuuluvat laitteiston pääosat: MC-pumppu (rikkihapon syöttö), kemikaalisekoitin (klooridioksidin syöttö), reaktori ja pesuri.

#### D<sub>0</sub>-vaiheen tyypilliset prosessiolosuhteet



Kuva 2. Tyypillinen D<sub>0</sub>-vaiheen laitteisto (KnowPulp 8.0)

D<sub>0</sub>-vaiheen pH:ta lasketaan usein hapolla (esim. rikki- tai suolahappo) alemmaksi. Aluksi pH on korkeampi, mutta se laskee noin yhdellä reaktioiden johdosta. Säädettyä pH:ta joudutaan tekemään kompromissi, sillä korkeammassa pH:ssa klooridioksidilla saatava valkaisuulos on parempi, mutta alhaisemmassa pH:ssa klooridioksidi poistaa tehokkaammin ligniiniä. D<sub>0</sub>-vaiheeseen tulevan massan kappaluvun mukaan säädetään ClO<sub>2</sub>-annosta, minkä lisäksi annoksen laskemiseksi käytetään kappakerrointa. Havupuusellun kappaluku alenee D<sub>0</sub>-vaiheessa syöttökäpasta (noin 22–28) kappalukuun 4–6, kun vaihetta ei edellä happidelignifiointi. Happidelignifioidun massan kappaluku puolestaan pienenee syöttökäpasta (12–18) tasolle 3–5. (Gullichsen & Fogelholm 1999, 641; Klemetti ym. 2005, 124–125.)

Tämän työn sellutehtaan valkaisuolinjan ensimmäisen klooridioksidivaiheen laatusäätöjen tarkoituksena on annostella massasuspensioon klooridioksidia (ClO<sub>2</sub>) ja pH:n säätämiseksi suolahappoa (HCl). Molemmat mainituista kemikaaleista lisätään massan joukkoon kemikaalisekoittimella juuri ennen D<sub>0</sub>-reaktiotornia. Massan jäännösligniinipitoisuus ja vaaleus ennen D<sub>0</sub>-tornia ovat merkittävimmät vaiheessa tarvittavaan ClO<sub>2</sub>-annokseen vaikuttavat tekijät. Myös massan lämpötila ja sakeus reaktiotornissa, tornia ennen massassa olevat lipeäjäännökset ja massan viipymä (reaktioaika tornissa) vaikuttavat annosteltavan klooridioksidin määrään. (Keinänen 2001, 2.)

### **2.3.2 Alkalinen uuttovaihe**

D<sub>0</sub>-vaihetta seuraava valkaisu vaihe on alkalinen uutto. Alkaliuuttovaiheita voi olla myös kaksi peräkkäin. Natriumhydroksidilla tehtävän alkaliuuton tarkoituksena on poistaa ensimmäisen klooridioksidivaiheen aikana syntyneet klooriligniinit ja muokata kuituja, jotta ne voivat taas reagoida seuraavassa klooridioksidivaiheessa. E-vaihetta voidaan tehostaa hapella ja vetyperoksidilla, joko samanaikaisesti tai peräkkäisissä vaiheissa. Vaiheen lyhenne valkaisuusekvenssissä voi siten olla, E, E<sub>O</sub>, E<sub>P</sub> tai EOP.

Alkalivaiheen pH säädetään NaOH:lla noin 10,5–11,0:een. Ilman happea ja/tai peroksidia alkaliuuttovaiheiden lämpötila on tavallisesti noin 70–78 °C, mutta lisäkemikaalien ollessa mukana lämpötilat ovat hieman korkeampia.

Tehdaskohtaisia eroja kuitenkin on, joten alkalivaiheiden lämpötilojen vaihteluskaala voi olla jopa 60–90 °C (Gullichen & Fogelholm 1999, 644). Vaiheen happi- ja peroksidiannokset ovat natriumhydroksidiannokseen (20–30 kg/ADt) verrattuna pieniä (noin 2–6 kg/ADt). Valkaisuvaiheen on havaittu olevan tehokkain keskisakeudessa (8–12%). D<sub>0</sub>- ja alkalivaiheiden jälkeen massasta on poistunut jo 90 % siinä olleesta ligniinistä. (Dence & Reeve 1996, 293–305; Klemetti ym. 2005, 125.)

### **2.3.3 D<sub>1</sub>- ja D<sub>2</sub>-vaiheet**

Klooridioksidivaiheet D<sub>1</sub> ja D<sub>2</sub> seuraavat alkalista uuttovaihetta. Niiden välissä voi olla vielä yksi alkaliuutto, kuten esimerkiksi Kaukopään VA4:lla. Nykyään alkalivaiheen sijaan ollaan siirtymässä viimeisten klooridioksidivaiheiden välillä pelkkään pesuun. Loppu-pH:lla on tärkeä rooli klooridioksidivaiheen säädössä. Massan viskositeetin ja puhtauden kannalta pH 3–4 olisi ihanteellinen, mutta vaaleus puolestaan olisi parhaimmillaan pH:ssa 4–6. Niinpä tässäkin valkaisuvaiheessa pH:n kohdalla on tehtävä kompromissi, jossa pH-arvo on noin 4. D<sub>1</sub>- ja D<sub>2</sub>-vaiheita verrattaessa pH on hieman korkeampi jälkimmäisessä klooridioksidivaiheessa.

D-vaiheissa sopiva lämpötila on noin 70–80 °C. Klooridioksidin kulutuksen kannalta D<sub>1</sub>-vaiheen lämpötila on hieman alhaisempi kuin D<sub>2</sub>-vaiheen. Tavallisesti ClO<sub>2</sub>-annos jakautuu D-vaiheiden kesken suhteessa 2:1. Mahdolliset klooridioksidijäänteet hävitetään massasta rikkidioksidiveden avulla. (Klemetti ym. 2005, 125–126.)

## **3 Valkaisun valvonta ja ohjaus**

Modernit valkaisimot ovat hyvin pitkälle automatisoituja laitoksia. Erikoisinstrumentteja valkaisuolosuhteiden säätöön on kehitetty useita. Tärkein seikka valkaisun valvonnassa on valkaisukemikaalien optimiannostus. Liian suuri annostus johtaa kasvaviin käyttökustannuksiin ja liian pieni alilaatuisen massa. Valkaisua ohjataan vaihekohtaisesti erikoismitta-antureilla, jotka on kehitetty juuri kemikaalien annostuksen määrittämiseen. Toimiva valkaisun

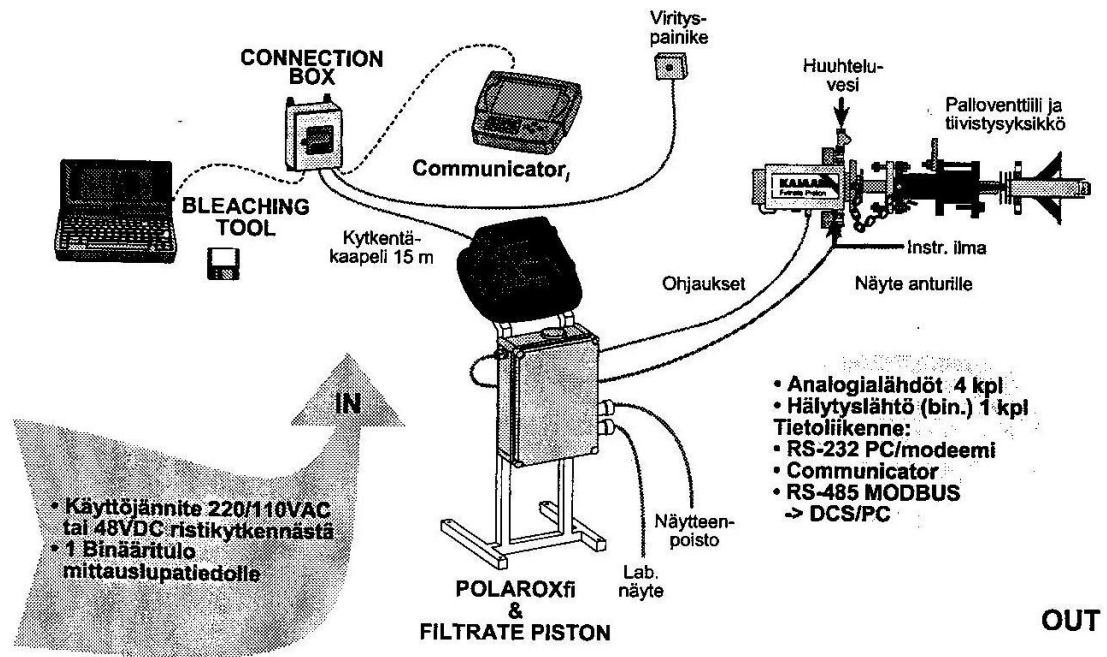
ohjaus edellyttää erikoisantureiden lisäksi kunnossa olevaa instrumentointia. Valkaisujärjestelmiin tyypillisesti liittyviä mittauksia ovat esimerkiksi:

- massavirtausmittaukset
- kemikaalivirtausmittaukset
- pH-mittaukset
- sakeusmittaukset
- lämpötilamittaukset
- kemikaalijäännösmittaukset
- vaaleusmittaukset
- kappaluvun mittaukset

Lähes kaikki luetelluista mittaustarpeista löytyvät kaikista valkaisuvaiheista. Perusinstrumentiikan lisäksi valkaisun tarpeisiin on kehitetty älykkäitä erikoismittareita, jotka mittaavat kappalukua, vaaleutta ja kemikaalijäännöksiä. Seuraavissa kappaleissa käsitellään Metso Automationin Kajaani-mittalaitteita, joilla edellä mainittuja suureita mitataan. (Klemetti ym. 2005, 133.)

### **3.1 KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>**

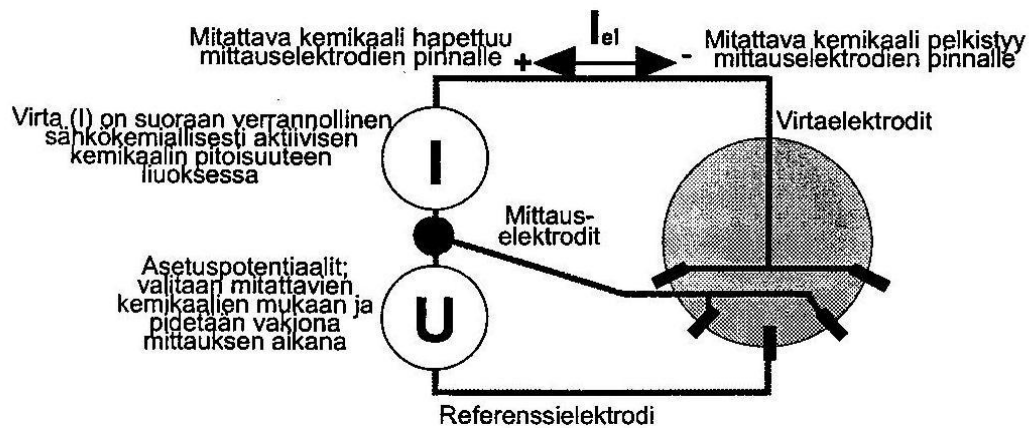
KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub> on itsenäisesti, ilman ulkopuolista ohjausta toimiva mittalaite, jota käytetään TCF- ja ECF-valkaisujen kemikaalijäännösmittaukseen. Jäännösmittaus on tärkeää, jotta valkaisukemikaalien syöttöä voidaan säätää juuri sopivaksi koko valkaisuvaiheen ajaksi. Kuvassa 3 selvennetään POLAROX<sub>fi</sub>-järjestelmää.



Kuva 3. KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub> järjestelmä (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002b)

Laitteen kajaaniFILTRATEPISTON-suodosnäytteenottimelta saatava näyte viedään POLAROX<sub>fi</sub>:n jäännösmittauskennoon. Suodosnäytteen virtausnopeus vakioidaan mittakennon sekoittimen mittauselektrodeilla. Mittaustulokseen eivät vaikuta häiriöt sulpun tai näytelinjan virtausolosuhteissa. POLAROX<sub>fi</sub>-anturissa on laboratorionäytteidenottoa varten venttiili. Laboratorionäytteitä tarvitaan laitteen kalibroimiseksi prosessiin, jäännösmittauksen tarkistukseen sekä jäännösmittaussignaalin virittämiseksi halutuiksi insinööriyksiköiksi. Myös pH:n ja johtokyvyn mittaukset on mahdollista asentaa POLAROX<sub>fi</sub>:n yhteyteen. (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002b; Metso Automation.)

KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>:n mittausperiaatteen perustana ovat monielektrodijärjestelmä ja sähkökemiallisesti aikaansaadun virran mittaus. Kuvassa 4 on esitetty POLAROX<sub>fi</sub>:n mittausperiaatetta.



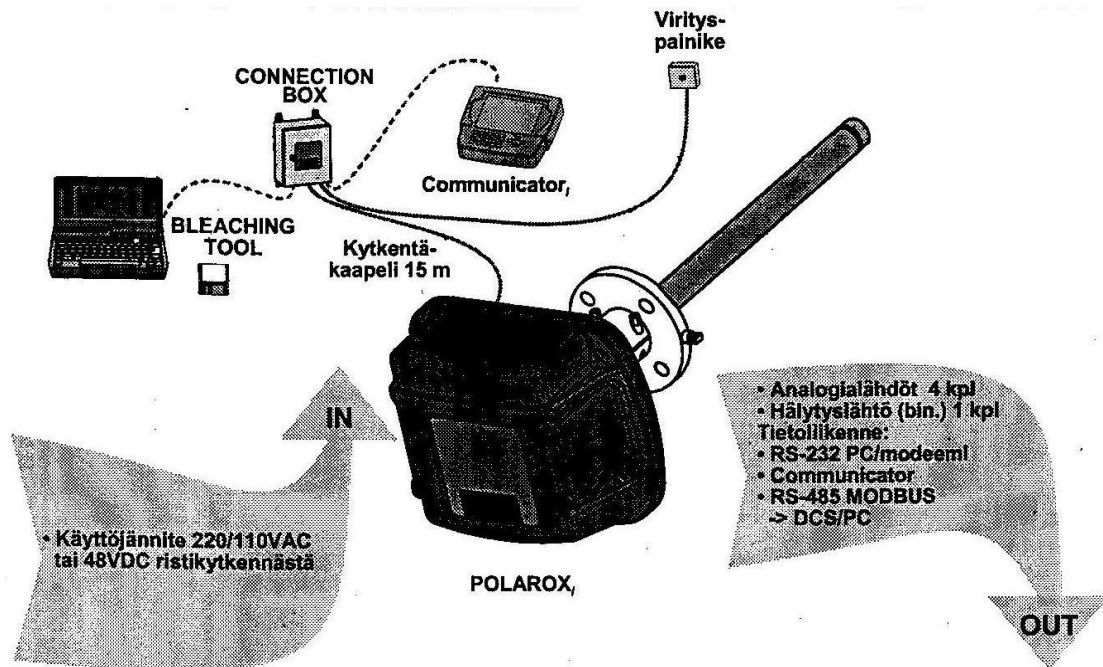
Kuva 4. KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>:n mittausperiaate (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002b)

Mitattava virta määräytyy reagoivan kemikaalin diffuusiosta liuoksesta mittauselektrodin pinnalle. Mitattavan kemikaalin pitoisuus ja diffuusiovirta ovat toisiinsa nähden suoraan verrannollisia. Mittausprosessori asettaa mittauspotentiaalit, jonka jälkeen elektrodivirrat mitataan. Mittauksia on kahta eri tyyppiä, normaali- ja sweep- eli pyyhkäisymittaus. Normaalimittauksessa mittaalektrodin signaali mitataan neljällä asetuspotentiaalilla yhtä monta kertaa kuin mittauksien lukumäärä. Kullekin asetuspotentiaalille mitataan lämpötila, joista lasketaan keskiarvo. Lämpötilojen keskiarvon avulla tehdään asetuspotentiaaleilla mitatuista jäännösarvoista lasketulle raakamittauskeskiarvolle lämpötilakompensointi, jolloin saadaan lopulliset jäännösmittausarvot. Pyyhkäisymittauksessa mittaalektrodin signaalia mitataan kahden asetuspotentiaalissa asettamissa rajoissa muuttamalla portaittain asetuspotentiaalia määrätyn suuruusella ja pituisella askeleella. Elektrodin signaali mitataan 10 millisekunnin välein joka askeleelta. Niistä lasketaan keskiarvo, jolloin saadaan lopulliset jäännösmittausarvot. (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002b.)

### 3.2 KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>

KajaaniPOLAROX<sub>i</sub> on itsenäisesti toimiva älykäs lähetin, jonka käyttöliittymänä on kannettava pääte. Anturiin on integroitu virtalähdöt ja muut liitännät. Prosessori pitää huolen sisäisten vahvistusten valinnasta automaattisesti.

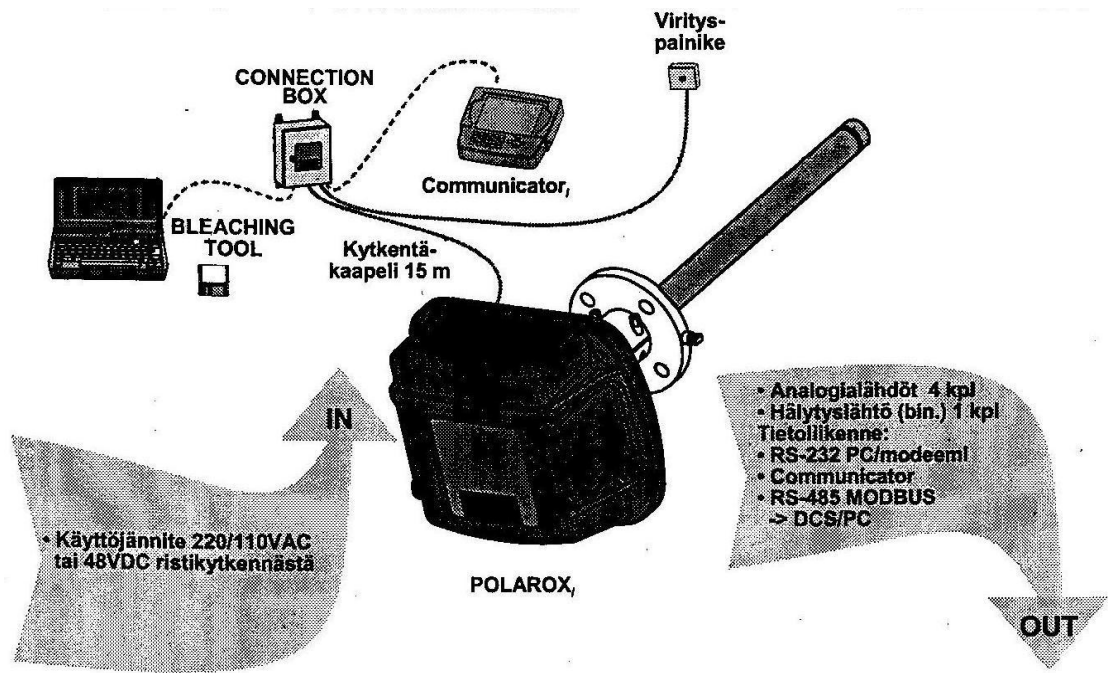
Mittaelektrodit ovat pinta-alaltaan suuria, mikä takaa häiriöttömät, varmat, nopeat ja tarkat mittaukset. POLAROX<sub>i</sub> on suunniteltu sellun valkaisussa käytettävien kemikaalien jäännösten mittaamiseen. Kuvassa 5 on POLAROX<sub>i</sub>-järjestelmän pääosat.



Kuva 5. KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>-järjestelmä (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002c)

Anturi asennetaan asennusyhteellä ja palloventtiilillä prosessiin erityisellä asennustyökalulla. Anturin asennussyvyys saadaan optimoitua syvyyssäädöllä. (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002c.)

Kuvassa 6 on esitetty kajaaniPOLAROX<sub>i</sub>:n mittausperiaate. Mittausperiaate on samanlainen kuin kajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>:ssa.



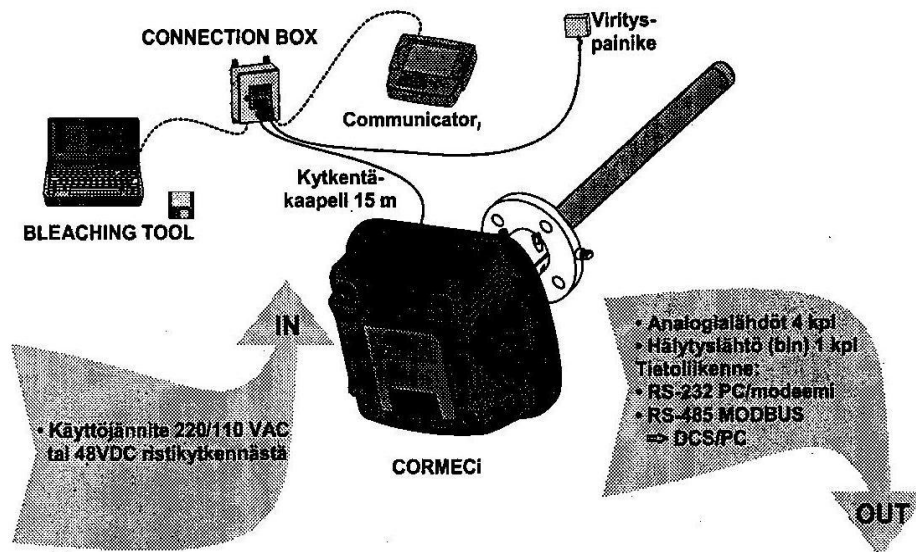
Kuva 6. KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>:n mittausperiaate (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002c)

Myös mittausmenetelmät ovat aivan vastaavanlaiset kuin edellä esitellyssä POLAROX<sub>i</sub>:ssa, mutta normaali- ja sweep-mittauksen lisäksi myös pulssimittaus on mahdollinen.

### 3.3 KajaaniCORMEC<sub>i</sub>

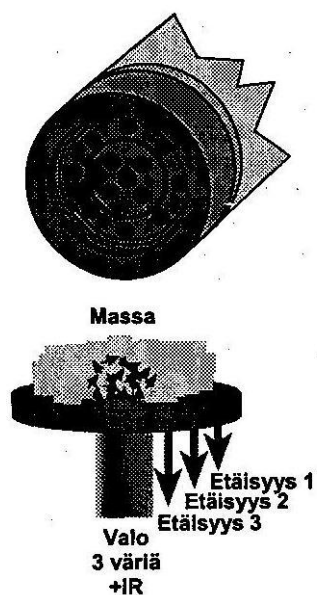
KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>:n tapaan kajaaniCORMEC<sub>i</sub>:n käyttöliittymänä toimii kannettava pääte, ja se on itsenäisesti toimiva älykäs lähetin. Liitännät ja virtalähdöt on integroitu anturiin. Optisen vaaleusmittari CORMEC<sub>i</sub>:n mittaukset ja signaalinkäsittely ovat nopeita led-pohjaisen valonlähteen ansiosta. Mittalaite soveltuu laaja-alaisesti käyttöön valkaisuprosessissa - kierrätyskuidusta kemialliseen ja mekaaniseen massaan. Anturit kalibroidaan identtisiksi mustalla ja valkoisella referenssillä, mikä mahdollistaa anturin vaihdon ilman prosessin uudelleen virittämistä. CORMEC<sub>i</sub>-järjestelmään kuuluvat osat on esitetty kuvassa 7. (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002a.)





Kuva 7. KajaaniCORMEC<sub>i</sub>-järjestelmä (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002a)

KajaaniCORMEC<sub>i</sub> mittaa valon sirontaa massasta neljällä eri aallonpituudella. Massan valaisu ja mittaus tapahtuu lukuisilla kuitukaapeleilla, joilla flokkisesta massasta tehdään optinen keskiarvoistava suodatus. Kuvassa 8 on esitetty CORMEC<sub>i</sub>:n mittausperiaate.



Kuva 8. KajaaniCORMEC<sub>i</sub>:n mittausperiaate (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002a)

CORMEC<sub>i</sub>:n vaaleusmittauksen pohjana on optinen mittausperiaate, jossa mitattava vaaleusalue on 20 - 95° SCAN. Vaaleuden lisäksi CORMEC<sub>i</sub>-anturilla voidaan mitata myös lämpötilaa ja uusiomassan mustetta. (Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002a.)

Kajaanin mittalaitteiden perheeseen kuuluu lisäksi kajaaniKAPPA<sub>i</sub>, jolla voidaan mitata kappalukua ja kajaaniBRITE<sub>i</sub>, jolla voidaan mitata joko vain vaaleutta tai sekä vaaleutta että kappalukua samanaikaisesti.

## **4 Säätötekniikan perusteita**

Prosessit ovat monimutkaisia järjestelmiä, joissa esiintyy niin mekaanisia kuin sähköisiäkin ilmiöitä. Prosessit voidaan jakaa osaprosesseihin, joissa voi olla säätöpiirejä.

Mittalaitteet, säätimet ja toimilaitteet ovat osa instrumentointia, jolla prosessin säätö toteutetaan ja sen toimintaa valvotaan. Prosessin tilan mahdollisimman tarkka mittaaminen on olennaista prosessien hallinnassa, sillä säätäminen on mahdollista vain samalla tarkkuudella kuin mittaaminenkin. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

### **4.1 Mittaukset**

Mittauskohteita kutsutaan usein systeemeiksi. Mittauksia tehdään, kun halutaan saada selville jonkin suureen arvo ja tutkia sen käyttäytymistä. Systeemiin tulee erilaisia vaikutteita. Nämä herätteet eli tulospinaalit saavat systeemissä aikaan tapahtumia, joita sanotaan lähtösignaaleiksi eli vasteiksi. Riippumatta siitä mitataanko saapuvia herätteitä, järjestelmässä on aina myös lähtösuureita. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

Monesti prosesseissa mielenkiinto kohdistuu vain yhteen tulosuureeseen ja yhteen lähtösuureeseen. Mittaustekniikka tutkii, minkälaisilla laitteilla ja menetelmillä mittaukset tulisi tehdä, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia ja mahdolliset mittausvirheet pystyttäisiin huomioimaan. Saatujen mittaustietojen käyttötarkoitus vaihtelee, ja se voidaankin jakaa kolmeen ryhmään sen perusteella, mitä halutaan tutkia. Käyttötarkoitukset ovat seuraavat:

- järjestelmän tilan määrittäminen
- järjestelmän ominaisuuksien tutkiminen
- järjestelmän käyttäytymisen säätäminen

Seuraavassa luvussa käydään yksityiskohtaisemmin läpi viimeisenä mainittua tapausta, jossa mittaus ohjaa suoraan systeemin käyttäytymistä.

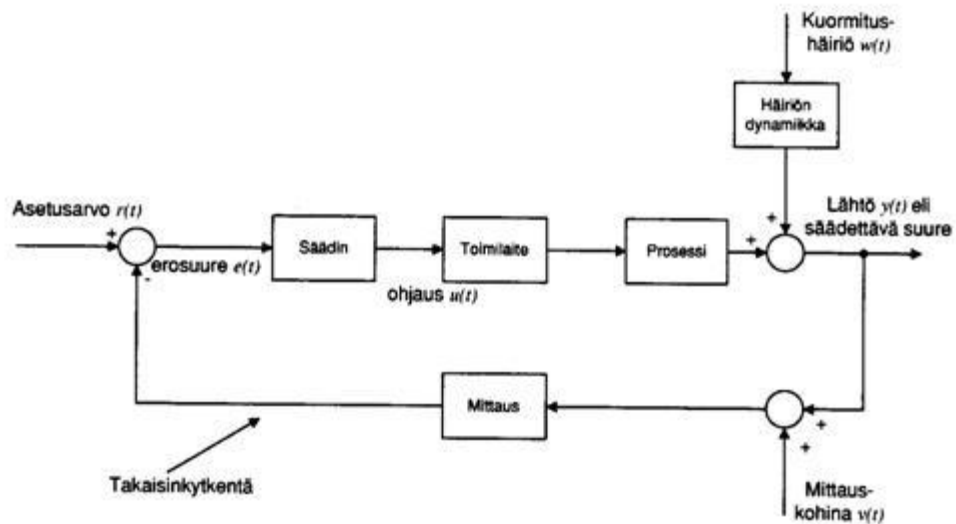
## **4.2 Säätöpiirien peruskytkennät**

Säätöpiirin perusosat ovat säädettävä prosessi toimilaitteineen, mittausanturi- ja lähetin sekä säädin. Toimilaite saa ohjauksen säätimeltä virtaviestinä analogiamuotoisena (4–20 mA).

Toimilaite vaikuttaa yhteen tai useampaan prosessisuureeseen, esimerkiksi lämpötilaan, paineeseen tai pitoisuuteen. Useasti toimilaite vaikuttaa moneen prosessisuureeseen samanaikaisesti. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

### **4.2.1 Takaisinkytkentä**

Takaisinkytkennässä säädettävä suure mitataan, ja saatu mittausviesti kytketään takaisin säätimelle. Mitattua oloarvoa verrataan säätimellä käyttäjän tai jonkin toisen säätimen antamaan asetusarvoon. Siten saadun erosuureen perusteella säädin laskee ohjauksen toimilaitteelle. Kuvassa 9 on esitetty säätöpiirin peruskomponentit. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

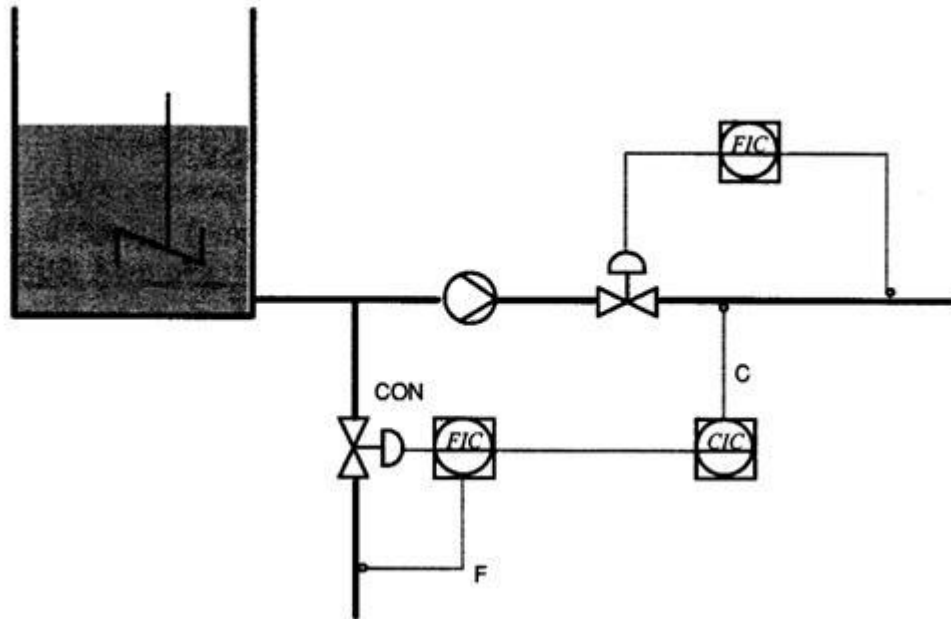


Kuva 9. Säätopiirin peruskomponentit (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009)

Kuvassa 9 esiintyvät signaalien lyhenteet  $r$ ,  $e$ ,  $u$  ja  $y$  ovat yleisesti käytettyjä. Systemin käyttäytymisestä saatavaa mittaustietoa käyttävä säädön takaisinkytkentä on säätötekniikan perusta. Takaisinkytkennän tavoite on nimenomaan erilaisten häiriöiden vaikutuksen poistaminen. Takaisinkytkennän hyvien ominaisuuksien vastapainoksi löytyy myös haittapuolia, joista huomattavin on mahdollinen epästabiili käyttäytyminen. Epävakaudella tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, että ohjaus alkaa vahvistaa säätöpiirissä jatkuvasti kasvavaa värähtelyä, kunnes se karkaa täysin hallinnasta. Kun takaisinkytkentätietoa hyödynnetään, säädin on automaattilla, ja säätöpiiri on suljettu. Järjestelmä on avoin puolestaan silloin, kun säädin on manuaaliohjauksella eikä takaisinkytkentälenkki ole käytössä. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

#### 4.2.2 Kaskadikykentä

Kaskadisäätopiiri koostuu sisäkkäisistä säätösilmukoista (kuva 10). Uloin säädin on nimeltään yläsäädin (isäntäsäädin) ja apusäädintä kutsutaan aläsäätimeksi (renkisäädin). (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

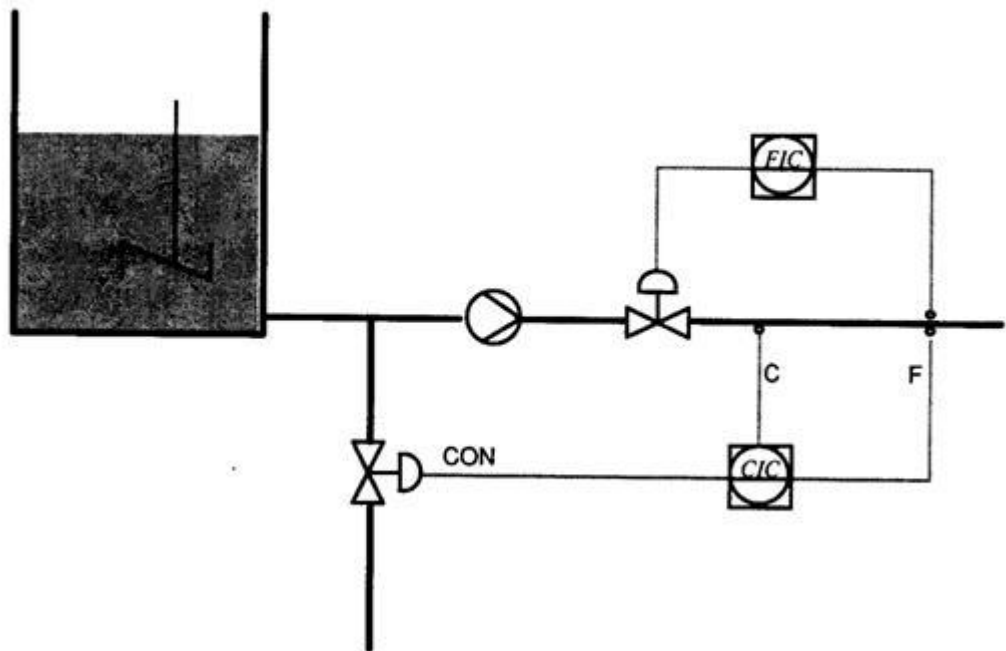


Kuva 10. Kaskadisäätö PI-kaavioesityksenä (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009)

Kuvan 10 esimerkkipiirroksessa sakeuden asetusarvon (C) lisäksi tarvitaan sekä sakeus- että virtausmittaus (CIC ja FIC), ja ohjaus (CON) on kytketty laimennusvesiventtiilille. Kaskadiyhteyksessä ohjaussuureita on useita, mutta säädettäviä suureita on vain yksi. Toisin sanoen varsinaisen suureen ohjaus säädetään toisen suureen kautta. Säätöä voidaan nopeuttaa käyttämällä varsinaisen säätimen ohella apusäätäjää, joka reagoi ohjausmuutoksiin nopeammin. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

#### 4.2.3 Myötäkytkentä

Mikäli prosessin kuormitushäiriö on mitattavissa ja käytössä on soveltuva ohjaussuure, toimilaitteen ohjaukseen voidaan summata myötäkytkentä (kuva 11).

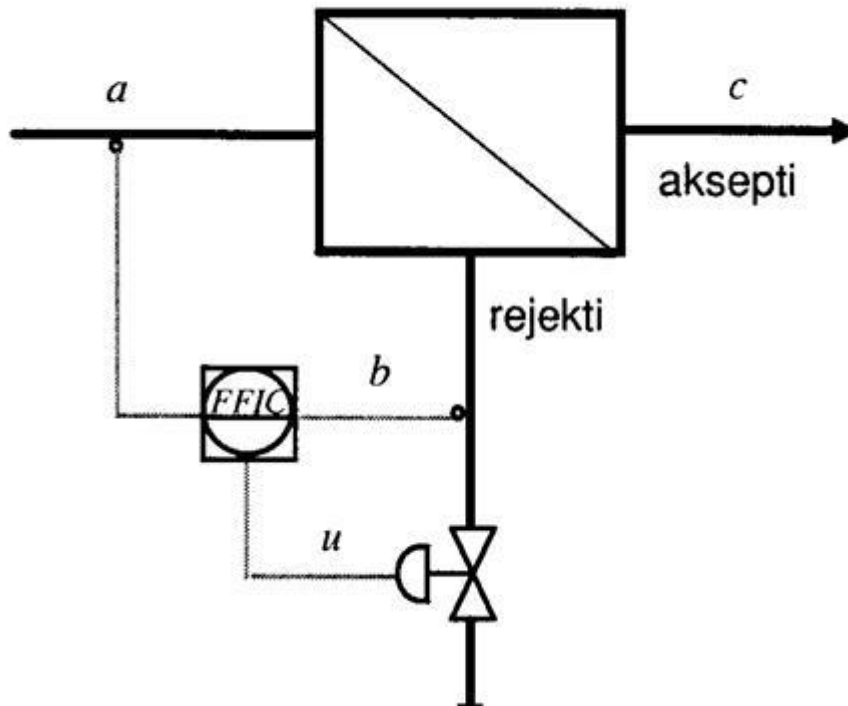


Kuva 11. Esimerkki myötäkytken PI-kaaviosta (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009)

Yllä olevan kuvan 11 esimerkkitapauksessa sakeussäätimen ohjaukseen summataan massavirtauksen muutoksista riippuva termi. Myötäkytkenässä ohjauksen ja säädettävän suureen välisen viiveen on kuitenkin oltava pienempi tai yhtä suuri kuin häiriön ja säädettävän suureen välinen viive, jotta kompensointi olisi tarkka. Myötäkytkenä korjaa ohjaussuuretta jo ennen häiriön vaikutuksen näkymistä säädettävässä suureessa. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

#### 4.2.4 Suhdesäätö

Monissa sekoitus- ja annosteluprosesseissa tyypillisin kytkentätapa on suhdesäätö. Suhdesäädön tavoitteena on pitää yllä tietty suhde kahden tai useamman prosessimuuttujan välillä (kuva 12).



Kuva 12. Esimerkki suhdessäädöstä, painelajittimen PI-kaavio (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009)

Kuvan 12 esimerkissä lajittimen päävirtauksesta (a) erotetaan rejekti (b) ja aksepti (c). Suhdesäätimen asetusarvona voidaan pitää suhdetta, jolla rejektivirtaus seuraa päävirtausta. (Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009.)

## **Kokeellinen osa**

### **5 Stora Enso Imatran tehtaat**

Stora Enso Imatran tehtaat muodostuvat kahdesta tehdaskokonaisuudesta, Kaukopäästä ja Tainionkoskesta. Lisäksi päällystystehdas Karhulassa kuuluu organisatorisesti Imatran tehtaisiin. Yhteensä nämä yksiköt työllistävät noin 1000 henkeä. Kaukopäässä on kolme kartonkikonetta (KA1, KA2 ja KA4) ja yksi paperikone (PK6). Tainionkoskella puolestaan on sekä yksi kartonkikone (KA5) että yksi paperikone (PK7).

Imatran tehtaiden kartonki- ja paperikoneiden yhteenlaskettu kapasiteetti on noin 1 080 000 tonnia vuodessa. Massojen osalta tuotantokapasiteetti on korkeampi, noin 1 300 000 tonnia vuodessa. Tehtaiden tuotannosta yli 90 % menee vientiin. Päämarkkina-alueita on Eurooppa, mutta myös Kaakkois-Aasiaan menee merkittävä osa tuotannosta. (Stora Enso 2010.)

#### **5.1 Tuotteet**

Kartonkikone 1 valmistaa juomakuppi-, vuoka- ja nestepakkauskartonkeja. Cupforma soveltuu kuuma- ja kylmäjuomakuppeihin, vanukkaiden ja jogurtin sekä jäätelön ja kuivien elintarvikkeiden pakkaamiseen. Trayforma puolestaan sopii uuni- ja mikroaaltouunivuokiin ja Enso Prime neste- ja aseptisiin pakkauksiin.

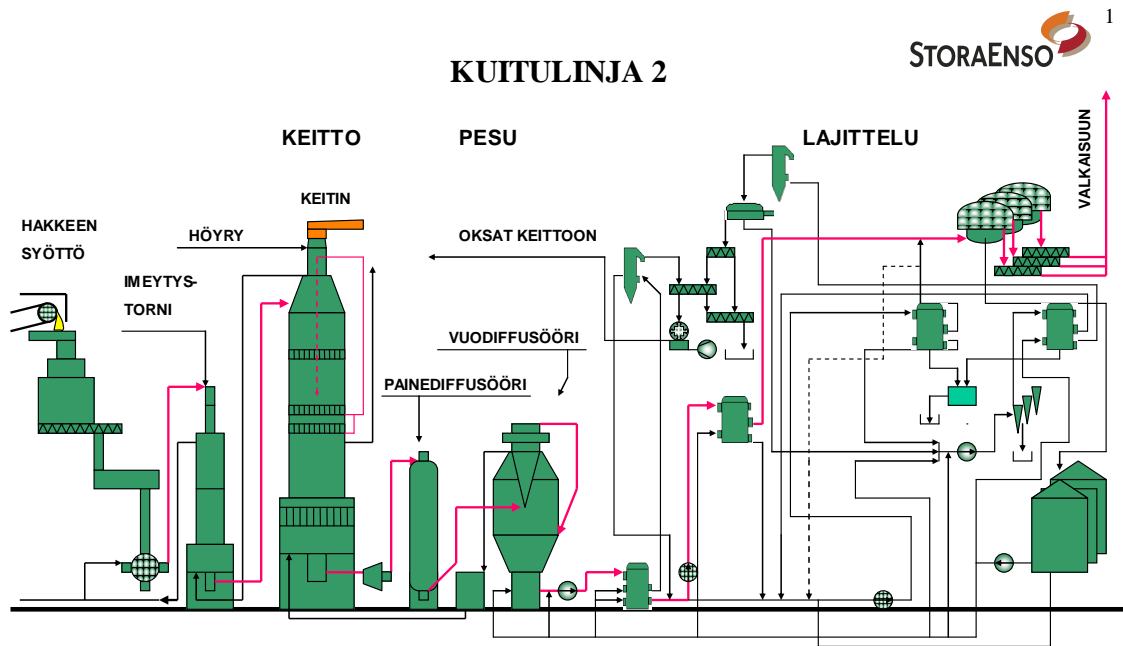
Kartonkikone 2:lla valmistetaan kotelo- ja graafisia kartonkeja. Loppukäyttökohteita pakkauspuolella ovat esimerkiksi kosmetiikka ja elintarvikkeet ja graafisella puolella postikortit ja kirjojen kannet. KA4:lla tehdään vain nestepakkauskartonkeja. Käyttökohteita ovat siten mm. meijerituotteiden, mehujen ja pesuaineiden pakkaukset. Myös Tainionkosken kartonkikone 5 valmistaa ainoastaan nestepakkauskartonkeja.

Paperikone 6 keskittyy pakkauspapereiden valmistukseen. Loppukäyttökohteita ovat mm. etiketit, tarrat ja elintarvike- ja savukepakkaukset. Tainionkoskella sijaitseva, mutta Kotka Mills Oy:lle kuuluva PK7 valmistaa ruskeita, imukykyisiä Absorbex-voimapapereita. (Stora Enso 2010.)



## 5.2 Kuitulinja 2

Kuitulinja 2 (kuva 13) on valmistunut vuonna 1976. Siellä valmistettiin valkaistua koivusellua kevääseen 2001 saakka, kunnes uusi koivusellua tuottava KL3 käynnistyi. Kuitulinja 2:sta modernisoitiin ja mäntyselluntuotanto aloitettiin saman vuoden kesäkuussa, kun aiemmin havusellua tuottaneen kuitulinja 1:n toiminta lopetettiin. (Wallenius 2005.)



RKn 11/01

Kuva 13. Kuitulinja 2:n prosessikuva (Stora Enso 2005)

Sellun keitto tapahtuu 2-astiaisessa nestefaasikeittimessä, jossa hake imeytetään erillisessä imeytystornissa. Käytössä on konventionaalinen ajomalli (kuva 14), jonka päätteeksi on vastavirtapesu Hi-Heat-vyöhykkeessä. Kuvasta 13 puuttuu vuopesurin jälkeinen O<sub>2</sub>-vaihe. (Stora Enso 2005.)

## KL2 KEITIN, KONVENTIONAALINEN AJOMALLI

### Olot keittimessä

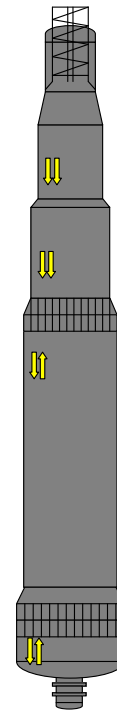
tuotannolla 800 ADMT/D mäntyä

Myötävirtakeitto: tilavuus 438 m<sup>3</sup>  
lämpötila 160 °C  
viive 87 min  
(imppi n. 20 min)

Vastavirtapesu tilavuus 987 m<sup>3</sup>  
lämpötila 160 °C>90° C  
viive 262 min

Pohja: tilavuus 23 m<sup>3</sup>  
viive 6 min

Valmistaja: Ahlström Machinery Group



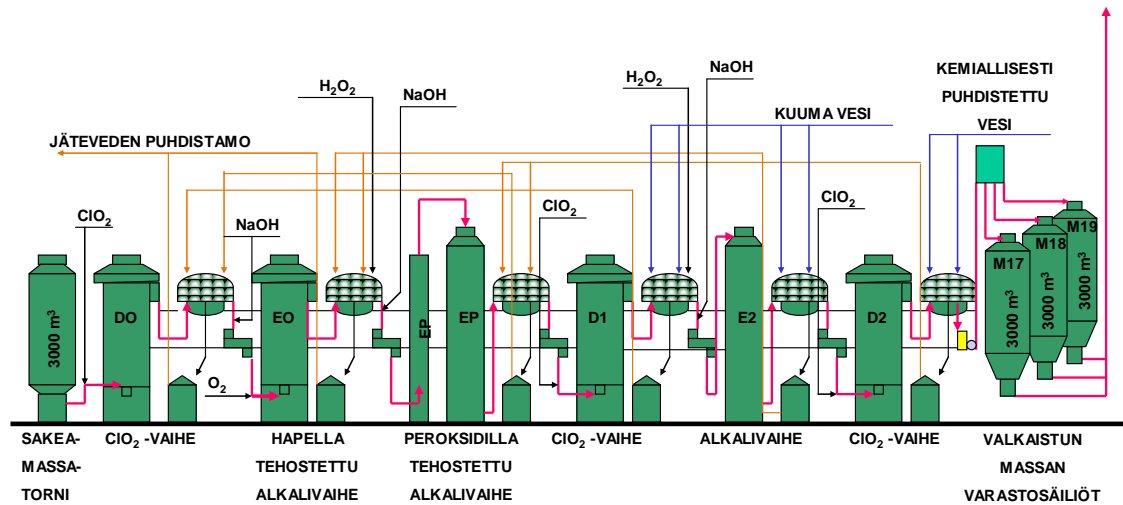
Kokonaistilavuus 1448 m<sup>3</sup>  
Kokonaisviive 355 min  
Kokonais H-tekijä 1300

Copyright© Ahlström Machinery Corporation RKn 11/01

Kuva 14. Perinteisen keiton ajomalli (Stora Enso 2005)

Keittoa seuraavat paine- ja vuopesurit sekä lajittamo pesureineen. Keiton jälkeinen prosessivaihe on valkaisu, jota käsitellään seuraavassa luvussa tarkemmin.

## KUITULINJA 2 / VALKAISU 4



RK:n 11/01

Kuva 15. KL2:n valkaisu 4:n prosessikuva (Stora Enso 2005)

Kaukopään sellutehtaan kuitulinja 2:n valkaisu on 6-vaiheinen (kuva 15). Valkaisusekvenssi on seuraava:

$D_0$ -EO-EP- $D_1$ -E<sub>2</sub>- $D_2$

Alkuvuoden 2011 aikana EO- ja EP-vaiheet tosin ajettiin yhdistettynä, jolloin EP-vaihe oli ohitusajolla.

## 6 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena oli minimoida  $D_1$ -vaiheen syöttökapan eli välikapan heilahtelut sekä saada  $D_0$ -vaiheen  $ClO_2$ -annossäätö toimimaan paremmin, jolloin operaattorin ei tarvitsisi korjata kokonaisannosta. Lisäksi tavoitteena oli ottaa tuotannon korjauskerroin (nykyisessä säädössä kerroin on nolla) mukaan säätöön.

Tasaisen välikappatason saavuttamiseksi nykyistä säätöä muokattiin klooridioksidiannoksen laskentaan vaikuttavien kappakertoimien ja tuotannon korjauskertoimen osalta. Aikataulusyistä tuotannon korjauskertoimen ottaminen uudelleen käyttöön kuitenkin rajattiin tämän työn ulkopuolelle.

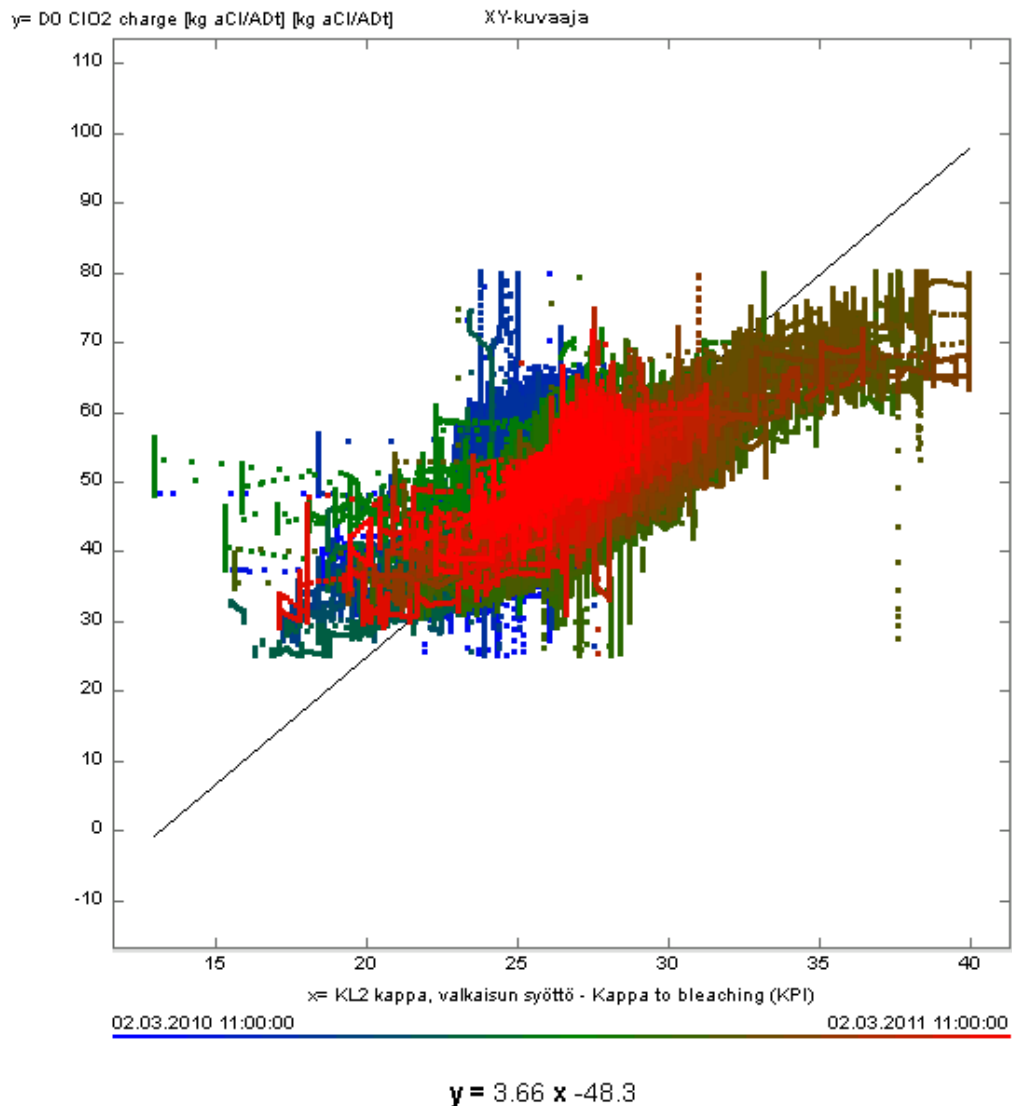
## 7 D<sub>0</sub>-vaiheen säädön nykytilanne

Taulukkoon 1 on koottu eri syöttökappatasojen nykyiset kappakertoimet ja niillä lasketut ClO<sub>2</sub>-annokset.

Syöttökappa	Nyk. kappakerroin	ClO <sub>2</sub> -annos [kg aCl/ADt]
18	0,140	25,20
20	0,145	29,00
22	0,150	33,00
24	0,157	37,68
27	0,173	46,71
30	0,181	54,30
33	0,193	63,69
36	0,200	72,00

Taulukko 1. Nykyiset D<sub>0</sub>-vaiheen kappakertoimet ja ClO<sub>2</sub>-annokset eri syöttökapoilla

Taulukon 1 ClO<sub>2</sub>-perusannokset on laskettu yhtälön (4) mukaisesti.



Kuvio 1. D<sub>0</sub>-vaiheen kokonaisklooridioksiidiannos syöttökapan funktiona

Kuviossa 1 näkyy kokonaisklooridioksiidiannoksia eri syöttökappatasoilla. Esimerkiksi syöttökapalla 25 klooridioksiidiannoksen vaihteluväli on peräti noin 30 - 60 kg aCl/ADt. Kuvion 1 ClO<sub>2</sub>-annokset ovat todellisia annoksia, joten mukana on myös operaattorikorjauksen osuus (noin 10 kg aCl/ADt). Operaattorikorjauksen tarpeesta voidaan päätellä, että perusannoksen laskennassa mukana olevat kappakertoimet ovat pielessä.

Kun klooridioksisäädöt on tehty, on tuotannon laskennassa ollut korjauskerroin 1,2. Kappakertoimet on siis pitänyt määrittää pienemmiksi, kun tuotantoa on korjattu 1,2-kertaiseksi. Kun korjauskerroin on pari vuotta siten otettu pois käytöstä, ei kappakertoimia ole päivitetty vastaamaan käytettyä tuotantolukua.

Tällä hetkellä säätö ei huomioi eri tuotantotasojen ja niiden äkillisten muutosten aiheuttamia lisätarpeita klooridioksidiannoksen. Sen vaikutusta kokonaisannokseen ja operaattorikorjauksen tarpeeseen ei pystytä päättelemään ennen kappakertoimia varten tehtyjä koeajoja, joten aluksi keskityttiin ainoastaan kappakertoimien uudelleen määrittämiseen.

Järkevien klooridioksidiannoksien valitsemiseksi koeajoja varten tukena oli xy-kuvaaja (kuvio 1) syöttökappasta ja D<sub>0</sub>-vaiheen kokonaisklooridioksidiannoksesta. Kuviosta 1 nähdään, että klooridioksidiannoksen vaihteluväli jokaiselle kolmelle syöttökappatasolle oli varsin laaja, joten koeajoissa annoksen muutosaskeleet muodostuivat selkeiksi. Kuviosta käy ilmi myös syöttökappan vaikutus kokonaisklooridioksidiannokseen; korkeampi syöttökappavaatii isomman klooridioksidiannoksen.

## 8 D<sub>0</sub>-vaiheen laatusäädöt

Tämä laatusäädöistä kertova luku pohjautuu osin Stora Enson sisäiseen raporttiin (Keinänen 2001). Säättökuvausta on täydennetty vastaamaan valkaisu vaiheen nykytilannetta haastatteleamalla tehtaan automaatiopuolen henkilöstöä talvella 2011.

Klooridioksiannoksen ohjaus ja toteutunut kemikaaliannos lasketaan yhtälöillä (1) ja (2):

$$\text{ohjaus [dm}^3/\text{s]} = \text{annosasetusarvo ([kg Cl}_2\text{/ADt] piiriltä VA4 – XQ071)} / 86,4 \cdot \text{tuotanto ([ADt/d] piiriltä VA4 – XI001)} / \text{väkevyys ([g akt. Cl}_2\text{/dm}^3\text{] piiriltä VKA – QI102)} \quad (1)$$

$$\text{toteutunut kemikaaliannos [kg Cl}_2\text{/ADt]} = \text{ClO}_2\text{ – virtaus ([dm}^3\text{/s] piiriltä VA4 – FC005)} \cdot \text{väkevyys ([g akt. Cl}_2\text{/dm}^3\text{] piiriltä VKA – QI102)} \cdot 86,4 / \text{tuotanto ([ADt/d] piiriltä VA4 – XI001 D0 – vaiheen tuotantotieto)} \quad (2)$$

D<sub>0</sub>-vaiheen kokonaisklooridioksiannos koostuu syöttökappan ja kappakertoimen avulla lasketusta perusannoksesta (kappaohjaus).

Laskukaavaan (yhtälö (3)) kuuluvat lisäksi lämpötila, pH, tuotanto ja niiden kertoimet sekä tasokorjaus G5. Perusannos muodostaa kokonaisklooridioksidiannosta selkeästi suurimman osan, noin 80 % tai operaattorikorjauksesta riippuen jopa enemmän.

$$\text{kappaohjaus} = \text{syöttökappa} \cdot \text{kappakerroin} + (\text{lämpötila} - \text{ref.lämpötila}) \cdot G2 + (\text{pH} - \text{ref.pH}) \cdot G3 + (\text{tuotanto} - \text{ref.tuotanto}) \cdot G4 + G5 \quad (3)$$

Kaavassa (3) esiintyvät kertoimet G2, G3 ja G4 sekä tasokorjaus G5 ovat nykyisessä säädössä kaikki nolliä, joten klooridioksidin perusannoksen laskukaava yksinkertaistuu syöttökapan ja kappakertoimen tuloksi.

D<sub>0</sub>-vaiheen syötön Cormec-mittauksen (positio VA4-QI025) perusteella lasketaan ennustettu kappaluku (ns. Cormec-kappa). Esimerkiksi jos tuleva kappa on 27 ja kappakerroin 0,173, ClO<sub>2</sub>-perusannos lasketaan kappaluvun, kappakertoimen ja vakion 10 tulona (yhtälö (4)), jolloin saadaan klooridioksidiannos sellutonnia kohden:

$$27 \cdot 0,173 \cdot 10 = 47 \text{ kg aCl/ADt} \quad (4)$$

Laskennassa mukana oleva kappaluku (yllä olevassa esimerkissä 27) tarkistetaan ja tarpeen vaatiessa korjataan aina, kun kappa-analysointiltaan saadaan uusi D<sub>0</sub>-vaiheen syöttökappamittaus. Tarkistuksessa ja korjauksessa otetaan huomioon kappa-analysointiltaan mittausaika, noin 30 minuuttia. Kun uusi kappamittaus on valmistunut, sen arvoa verrataan noin 30 minuuttia vanhaan ennustetun kappan arvoon. Mikäli ennustetun kappan (Cormec-kappa) ja uuden kappamittauksen tulokset eroavat toisistaan, Cormec-kappalukuun tehdään tarvittava korjaus.

Klooridioksidin perusannosta korjataan nopealla takaisinkytkennällä vaaleus- ja jäännösmittauksien perusteella (positiot VA4-QI025 (Cormec) ja VA4-QI026 (Polarox)). Nopeaa takaisinkytkentää kuitenkin rajoitetaan siten, ettei korjattua annosta päästetä tiettyä rajaa kauemmas kappaluvusta lasketusta perusannoksesta. Säädon rajoittamaton ohjaus ei voi poiketa rajoitetun ohjauksen ylä- tai alarajan ulkopuolelle. Niinpä Cormec-vaaleus ja Polarox-jäännössäätö vaikuttavat annokseen heti rajoittamattoman ohjauksen lähtiessä

takaisinpäin. Jos Cormec/Polarox-säädön ohjaus saavuttaa määritellyn ylä- tai alarajan, säätö antaa hälytyksen.

Kokonaisannokseen kuuluu myös lukuisia mittauksia huomioiva, mutta siihen vähäisesti vaikuttava pitkä takaisinkytkentä. Toisen alkaliuuttovaiheen (E<sub>P</sub>) jälkeisen välikapan (positio KL2-QI0024) perusteella lasketaan takaisinkytkentäkorjaus D<sub>0</sub>-vaiheen klooridioksidisäädölle (positio VA4-XQ071, kappakorjattu ClO<sub>2</sub>-annos, D<sub>0</sub>-vaihe). Pitkän takaisinkytkennän annosta pienentävä tai suurentava vaikutus on alle 1 kg aCl/ADt, joten sen merkitys oikean kokonaisannoksen suhteen on hyvin pieni.

Neljäs tekijä klooridioksidin kokonaisannoksessa on valvomotyöntekijän syöttämä operaattorikorjaus. Tilanteen mukaan operaattorikorjauksella joko suurennetaan tai pienennetään klooridioksidiannosta, jotta kokonaisannos on riittävä haluttujen välikappa- ja vaaleustasojen saavuttamiseksi. Operaattorikorjaus on useimmiten annoslisä, jopa yli 10 kg aCl/ADt.

D<sub>0</sub>-vaiheen klooridioksidiannos koostuu siis neljän osatekijän summasta, joista selkeästi merkittävin osuus on perusannoksella. Kokonaisannos ei ole riittävä ilman operaattorikorjausta, joten säätöä lähdettiin parantamaan nimenomaan perusannoksen laskennan kautta. Parannuksessa päätettiin keskittyä pielessä olevien kappakertoimien uudelleen määrittämiseen kolmivaiheisella koeajolla, koska siten säätöä saatiin eniten korjattua.

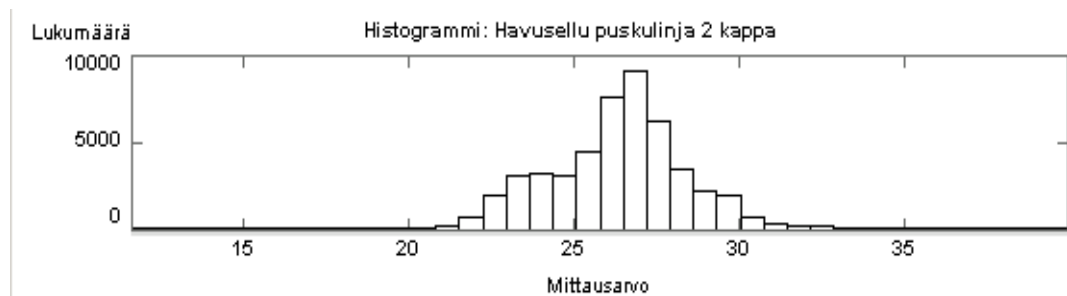
Jotta klooridioksidia ei kuluisi suotta massan pH:n alentamiseen, D<sub>0</sub>-vaiheen pH:n säätöön käytetään suolahappoa, joka annostellaan takaisinkytkentäsäädöllä suolahapon ja ClO<sub>2</sub>:n syötön jälkeiseen pH-mittaukseen (positio VA4-QC038) perustuen.

## **9 Koeajosuunnitelma**

Koeajojen tarkoituksena oli saada tuloksia oikeista klooridioksidiannoksista eri syöttökappatasoille, jotta niistä voidaan laskea uudet kappakertoimet. Seuraamalla D<sub>0</sub>-vaiheen jälkeistä kappalukua (välikappa, positio KL2-QI0024), voitiin päätellä, mitkä olivat riittäviä ClO<sub>2</sub>-annoksia. Kuviossa 2 on esitetty

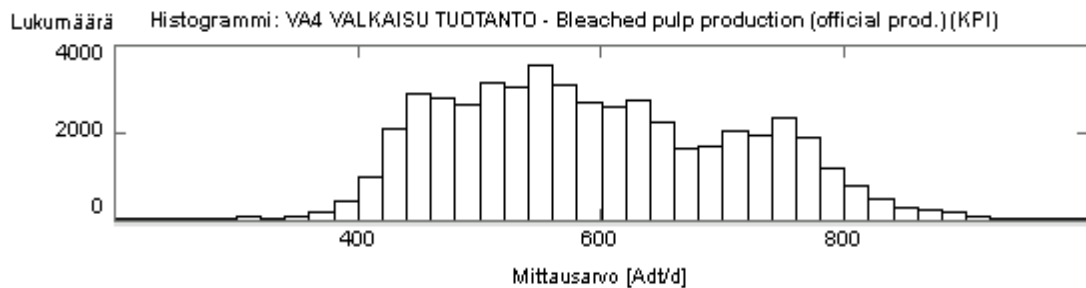


syöttökapan histogrammi, jonka perusteella valittiin koeajoissa käytetyt syöttökapan tasot 25, 27 ja 30.



Kuvio 2. Syöttökapan histogrammi

Kuviosta 2 nähdään, että syöttökappa vaihtelee laajemmalla välillä kuin 25–30, mutta tämän välin ulkopuoliset syöttökapat johtuvat useimmiten poikkeustilanteista, esimerkiksi seisokin jälkeisestä startista tai ongelmista valkaisu edeltävässä happivaiheessa. Koeajo pyrittiin tekemään mahdollisimman normaaleissa ja vakaisissa ajo-olosuhteissa, joten syöttökappalukujen rajaaminen väliin 25–30 oli perusteltua.



Kuvio 3. VA4:n tuotannon histogrammi

Kuviosta 3 nähdään, että tuotanto on yleisimmin välillä 500-800 ADt/d, joten koeajojen aikainen tasainen tuotantonopeus 750 ADt/d soveltui oikein hyvin koeajoihin tavoiteltujen ajo-olosuhteiden raameihin.

D<sub>0</sub>-vaiheen koeajo suunniteltiin ajettavaksi askelvastemenetelmällä, jossa klooridioksidiannosta nostettiin 60 minuutin välein syöttökapan pysyessä vakiona. Koeajoja tehtiin kolmella eri syöttökappatasolla, joissa jokaisessa neljällä eri klooridioksidiannoksella. Syöttökappa säädettiin halutuksi valkaisu edeltävällä happivaiheella. Happivaiheen syöttökapan tavoitearvoa muuttamalla

saatiin valkaisuun tuleva kappa säädettyä niin pienemmäksi kuin isommaksi. Esimerkiksi syöttökapan tavoitearvolla 36, valkaisuun tuleva kappa oli noin 27, ja tavoitearvolla 39 noin 30. Tuotanto ja D<sub>0</sub>-vaiheen pH:n säätöön käytetty HCl-annos pidettiin koeajojen aikana vakiona. Myös EO-vaiheen vetyperoksidiannos pidettiin vakioarvossa (3,0 kg/ADt). EO-vaiheen natriumhydroksidiannostus laitettiin koeajojen ajaksi K-moodiin, eli EO-vaiheen syöttö-pH pyrittiin siten pitämään vakiona. Koeajojen ClO<sub>2</sub>-annoksien muuttaminen näkyi luonnollisesti välikapan heilahteluna, mutta D1- ja D2-vaiheilla kompensoimalla pystyttiin vielä saavuttamaan haluttu loppuvaaleus, joten sekundamassalta vältyttiin.

Taulukkoon 2 on koottu ensimmäisessä koeajossa käytetyt klooridioksidiannokset kolmella eri syöttökappatasolla.

	Syöttökappa	ClO <sub>2</sub> -annos [kg aCl/ADt]
<b>1. vaihe</b>	27	44
	27	50
	27	56
	27	62
<b>2. vaihe</b>	25	41
	25	45
	25	50
	25	55
<b>3. vaihe</b>	30	51
	30	55
	30	59
	30	63

Taulukko 2. Koeajojen syöttökappatasot ja askelmaisesti vaihdetut ClO<sub>2</sub>-annokset

Syöttökapan säätäminen halutulle tasolle vaatii oman aikansa (n. 3,5–4h), joten koeajot päätettiin tehdä kahtena eri päivänä. Ensimmäinen vaihe ajettiin 21.3.2011, mutta KAPPABRITE<sub>i</sub>:n näytteenotto-ongelmien vuoksi koeajo piti uusia toisena päivänä. Ensimmäinen vaihe päästiin ajamaan uudelleen 5.4.2011. Koeajojen toinen ja kolmas vaihe ajettiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti 31.3.2011. Lajitellun massan säiliön viiveen takia ennen koeajon toisen vaiheen päättymistä voitiin jo aloittaa syöttökapan nostaminen 30:een. Näin samana päivänä saatiin jouhevasti ajettua kaksi jälkimmäistä koeajovaihetta.

## 10 Koeajojen tulokset

Koeajojen tuloksia seurattiin Kappakone 2:lta (kajaaniKAPPABRITE<sub>i</sub>) ja laajemmin Wedgestä, joka kerää dataa kaikista valkaisun eri mittauksista. KAPPABRITE<sub>i</sub> säädettiin ottamaan näytteitä koeajojen aikana tiheämmin kuin normaaliajoissa. Yhden annosaskeleen aikana saatiin siten yhden sijaan kolme välikapan arvoa, mikä lisäsi huomattavasti tulosten luotettavuutta. Välikappamittauksen luotettavuus varmistettiin myös ottamalla massasta koeajon 2. vaiheessa joka annosaskeleen aikana yksi käsinäyte, joka analysoitiin laboratoriossa.

Alla olevaan taulukkoon 3 on koottu kaikkien kolmen koeajovaiheen tulokset.

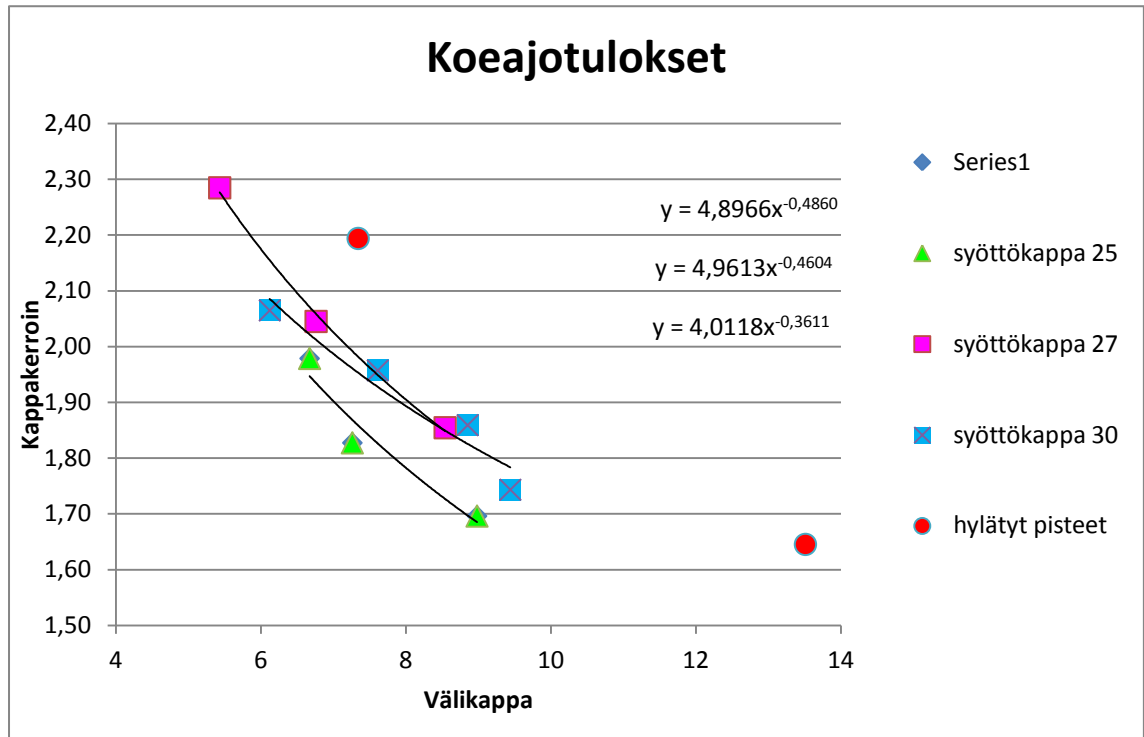
	Syöttökappa	ClO <sub>2</sub> -annos	kappakerroin	välikappa	välikappa(labra)
<b>1. vaihe</b>	26,79	44,07	1,65	13,51	
	26,96	49,99	1,85	8,54	
	27,22	55,66	2,04	6,76	
	27,10	61,91	2,28	5,43	
<b>2. vaihe</b>	23,97	40,65	1,70	8,98	8,95
	24,24	44,29	1,83	7,26	7,25
	24,66	48,79	1,98	6,67	6,70
	24,16	53,00	2,19	7,34	
<b>3. vaihe</b>	29,97	52,24	1,74	9,44	
	29,61	55,04	1,86	8,85	
	29,95	58,61	1,96	7,61	
	30,04	62,02	2,06	6,12	

Taulukko 3. Askelvastekoeajojen tulokset

Taulukon 3 syöttökapat, ClO<sub>2</sub>-annokset ja välikapat ovat keskiarvoja kunkin askelannoksen ajalta. Vertaamalla koeajotulosten syöttökappoja ja klooridioksidiannoksia koeajosuunnitelmaan (taulukko 2) huomataan, ettei aivan samoihin arvoihin päästy. Tärkeämpää kuitenkin oli, että syöttökappa pysyi joka koeajovaiheessa suurin piirtein samana. Taulukkoon 3 on myös laskettu ClO<sub>2</sub>-annoksien ja niitä vastaavien syöttökappojen osamääränä saatavat kappakertoimet. Ensimmäisen koeajovaiheen ensimmäisen annosaskeleen ja toisen koeajovaiheen neljännen annosaskeleen välikapat (13,51 ja 7,34)

poikkeavat muista koeajotuloksista niin paljon, että ne päätettiin jättää lopullisesta tulosten tarkastelusta pois.

Kuviossa 4 on esitetty eri koeajovaiheiden tuloksista lasketut kappakertoimet välikapan funktiona.



Kuvio 4. Koeajovaiheiden kappakertoimet välikapan funktiona

Kuviossa 4 on mukana myös kaksi koeajoissa hylättyä pistettä. Hylättyjen pisteiden vaikutus uusien kappakertomien laskennassa olisi ollut merkittävä ja selkeästi vääristävä, joten oli järkevää jättää ne tarkastelun ulkopuolelle. Koeajojen tuloksia käsiteltiin edelleen laskemalla keskiarvot joka vaiheen syöttökapoista ja kappakertoimista (taulukko 4). Välikappatavoitteeksi asetettiin 6,7 (valkaisimon tavoite välikapaksi 6–7).

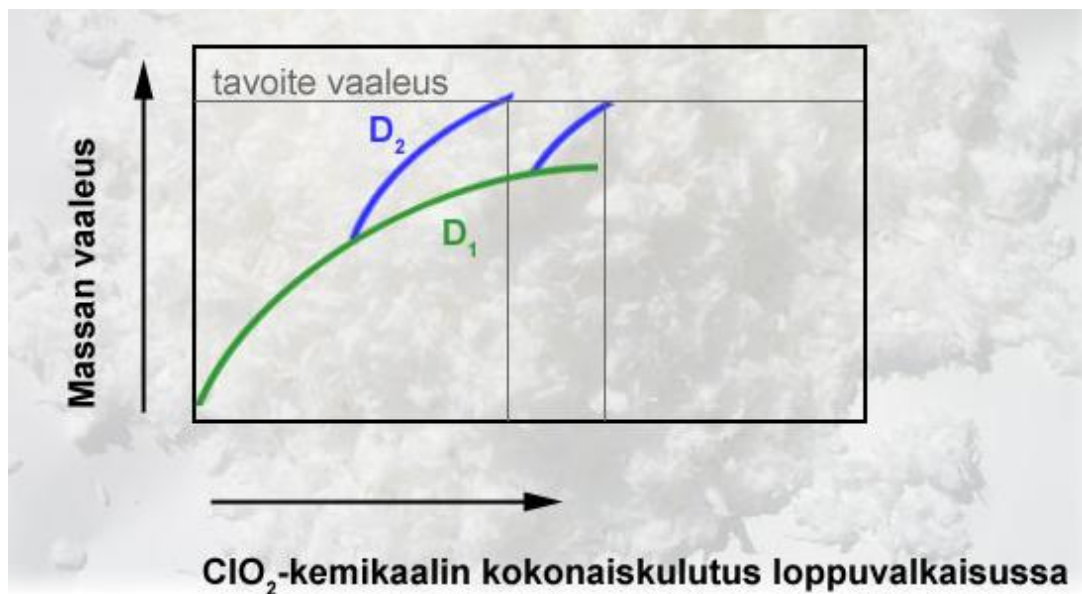
	Syöttökappa (keskiarvo)	ClO <sub>2</sub> -annos [aCl/ADt] (laskettu)	Kappakerroin (kuvioista 4)	Välikappa (tavoite)
<b>2. vaihe</b>	24,29	47,19	1,94	6,7
<b>1. vaihe</b>	27,02	55,84	2,07	6,7
<b>3. vaihe</b>	29,89	60,34	2,02	6,7

Taulukko 4. Koeajotulokset

Taulukossa 4 olevat kappakertoimet on laskettu kuvion 4 kuvaajien yhtälöihin sijoittamalla. Esimerkiksi ensimmäisen koeajovaiheen (syöttökappa 27) tuloksien perusteella välikappatavoitteeseen päästään, kun välikappatavoite (6,7) sijoitetaan käyrän yhtälöön:

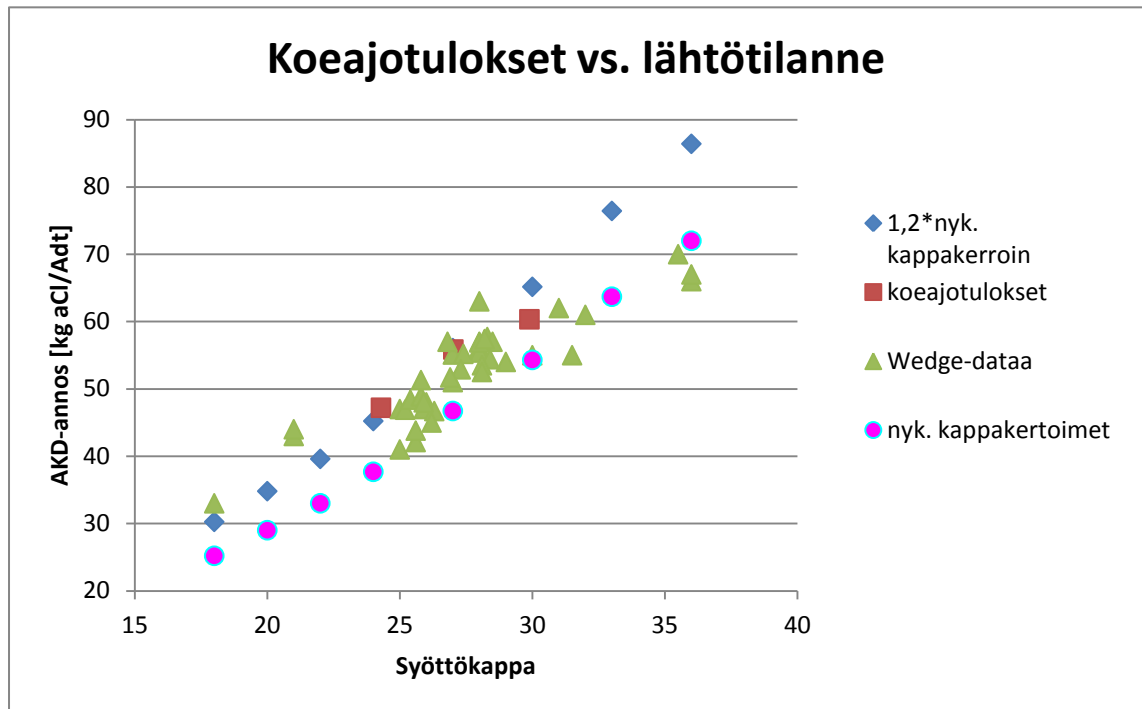
$$\text{kappakerroin}(1.\text{koeajovaihe}) = 4,9613 * 6,7^{-0,4604} \approx 2,07 \quad (5)$$

Koeajotuloksien perusteella lasketuista kappakertoimista nähdään, etteivät ne eivätkä siten klooridioksidiannoksetkaan kasva lineaarisesti syöttökapan kasvaessa. Tämä voidaan selittää valkaisu- $D_0$ -vaiheen kyllästymisellä. Kun klooridioksidiannos ylittää tietyn rajan, ei kemikaali enää reagoi ligniinin kanssa.



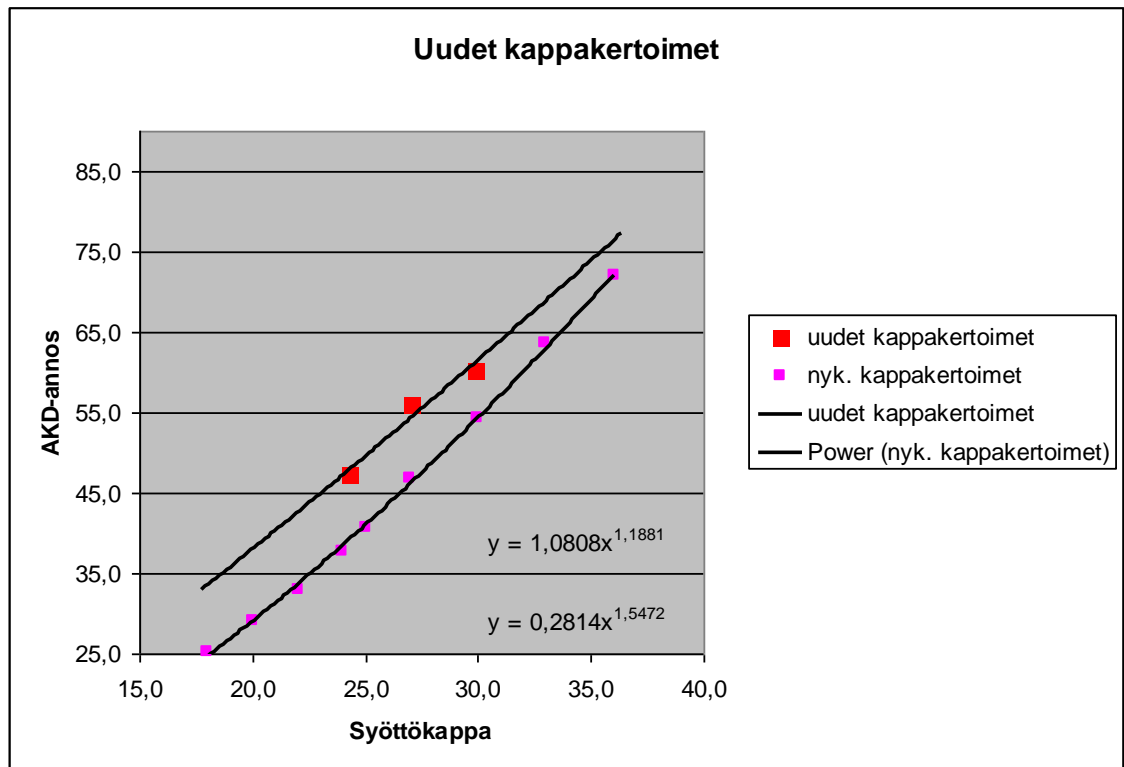
Kuva 16. Valkaisu- $D_0$ -vaiheen merkitys  $\text{ClO}_2$ :n kokonaiskulutukseen (KnowPulp 8.0)

Kuvasta 16 käy ilmi, että tavoitevaaleuteen päästään pienemmällä kokonaisannoksella ja useammalla valkaisu- $D_0$ -vaiheella kuin annostelemalla klooridioksidi liikaa jo  $D_0$ -vaiheessa. Jos kyllästymistä tapahtuu, osa kemikaalista jää reagoimatta, ja seurauksena on turhaa klooridioksidikulutusta.



Kuvio 5. Koeajotulokset lähtötilanteen kappakertoimiin nähden

Kuviossa 5 on taulukon 4 koeajotuloksien lisäksi nykyiset kappakertomet ja aiemmin käytössä olleella tuotannon korjauskertoimella 1,2 kerrotut kappakertoimet. Viimeisenä mainitut ovat mukana siksi, että uudelle kappakerroinkäyrälle (kuvio 6) saatiin sen avulla oikeaa muotoa. Koeajotuloksien pisteiden tueksi on haettu Wedgestä dataa vastaavista ajo-olosuhteista ajalta ennen koeajoja. Näistä tuloksista yhdessä määritettiin kuvion 6 kappakerroinkäyrä ja sen yhtälö, jolla uudet kappakertoimet laskettiin.



Kuvio 6. Koeajotuloksista lasketut uudet kappakertoimet

Taulukkoon 5 on koottu kuvion 6 yhtälöllä (6)

$$y = 1,0808x^{1,1881} \quad (6)$$

lasketut klooridioksidiannokset jokaiselle syöttökappatasolle. Esimerkiksi syöttökappalla 27 (yhtälö (7)) klooridioksidiannokseksi muodostuu

$$y_{27} = 1,0808 \cdot 27^{1,1881} \text{ kg aCl/ADt} \approx 54,24 \text{ kg aCl/ADt} \quad (7)$$

Laskennallisista klooridioksidiannoksista saatiin kappakertoimet jakamalla ne syöttökappaluilla ja vakiolla 10 (vrt. yhtälön (1) tilanne käänteisenä).

Syöttökappa	Uusi kappakerroin	Uusi ClO <sub>2</sub> -annos [aCl/ADt]
18	0,186	33,51
20	0,190	37,98
22	0,193	42,53
24	0,197	47,16
27	0,201	54,24
30	0,205	61,48
33	0,209	68,85
36	0,212	76,35

Taulukko 5. Uudet kappakertoimet ja niitä vastaavat ClO<sub>2</sub>-annokset

Vertaamalla taulukon 5 tuloksia taulukon 1 vastaaviin, on kappakertoimien muutos ja siten myös klooridioksidiannoksien kasvu selvästi todettavissa.

Koeajotuloksista ja Wedgestä kerätystä datasta tehtiin lisäksi hahmotelma (liite 1) eri tuotantonopeuksien vaikutuksesta tarvittavaan klooridioksidiannokseen. Wedgestä otettiin mittaustuloksia eri tuotantonopeuksille etenkin koeajojen syöttökappatasoilla. Hahmotelmasta käy ilmi, että kun tuotantonopeus kasvaa ja syöttökappa pysyy samana, on tarvittava ClO<sub>2</sub>-annos hieman suurempi. Tuotannon korjauskertoimen avulla säätö huomioisi äkilliset tuotannon muutokset. Koska kappakertoimet toimivat vain tasaisella tuotannolla, tuotantonopeuden muutoksia varten tarvittaisiin säätöön mukaan tuotannon korjauskerroin. Aikataulusyistä hahmotelmaan pohjautuvia koeajoja ei kuitenkaan tehty, joten alkuperäisenä tavoitteena ollut tuotannon korjauskertoimen käyttöön ottaminen rajattiin työn ulkopuolelle.

## 11 Koeajojen tulosten seurantajakso

Koeajotuloksista määritetyt uudet kappakertoimet vaihdettiin vanhojen kappakertoimien tilalle 13.5.2011. Seurantajakson tarkoituksena oli selvittää, kuinka kappakertoimien muutokset vaikuttavat operaattorikorjauksen tarpeeseen ja välikapan heilahteluun. Seurantajakson tuloksia kerättiin Wedgestä tunnin mittausaikavälillä 27.10.2011 saakka. Tulosten käsittelyyn otettiin mukaan neljä eri mittausta: valkaisu päivakohtainen tuotanto, valkaisu syöttökappa, D<sub>0</sub>-vaiheen todellinen ClO<sub>2</sub>-annos ja välikappa. Lisäksi mukana olivat uusilla kappakertoimilla saadut laskennalliset D<sub>0</sub>-vaiheen ClO<sub>2</sub>-annokset



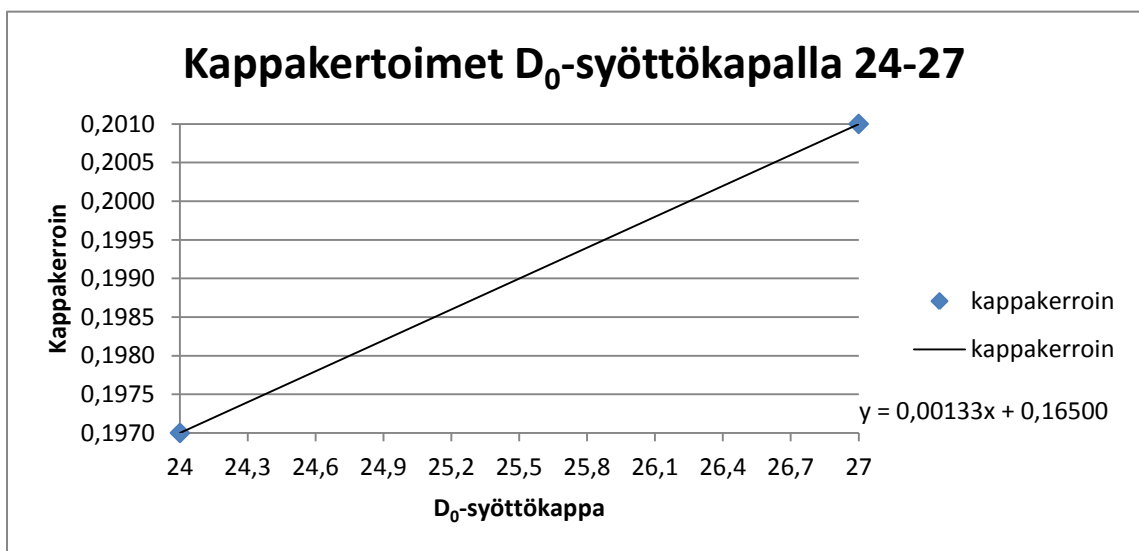
sekä todellisten ja laskennallisten ClO<sub>2</sub>-annoksien erotukset eli operaattorikorjaukset. Kappakertoimien vaihtoa edeltävä kuukausi (14.4. - 13.5.2011) otettiin varsinaisen seurantajakson vertailuajanjaksoksi, jotta muutoksien osoittaminen olisi helpompaa.

Edellä mainitut tulosten käsittelyyn mukaan otetut D<sub>0</sub>-vaiheen syöttökapan mittaustulokset taulukoitiin suuruusjärjestykseen pienimmästä suurimpaan. Tämän tehtiin siksi, että operaattorikorjauksien laskentaa varten tarvittavien kuvaajien ja niistä saatavien yhtälöiden muodostaminen olisi mahdollisimman yksinkertaista. Esimerkiksi kuvion 7 kuvaajan suoran yhtälön avulla (yhtälö (8)) laskettiin ClO<sub>2</sub>-annokset, kun D<sub>0</sub>-vaiheen syöttökappa vaihteli välillä 18 - 20. Laskennallinen klooridioksidiannos kerrottiin vakiolla 10, sillä annoksen säätöpiirin laskennassa kappakertoimet on myös kerrottu kymmenellä.

$$y = 0,002x + 0,15 \quad (8), \text{ jossa}$$

y=kappakerroin

x=D<sub>0</sub>-syöttökappa

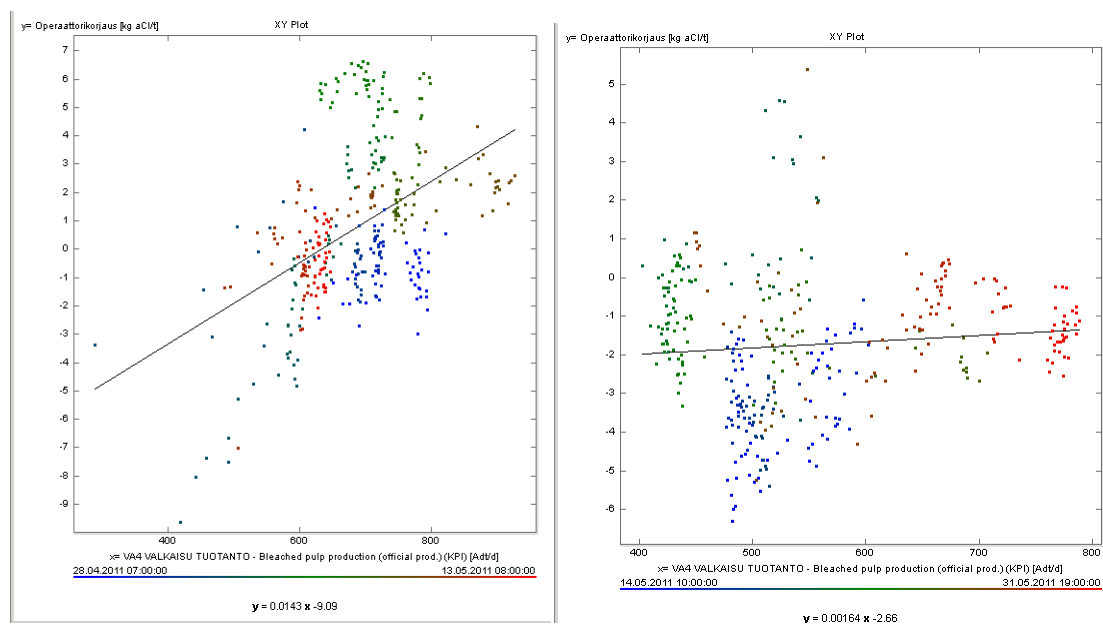


Kuvio 7. Kappakerroin syöttökappatasolla 24 - 27

Liitteessä 2 on viiden muun eri syöttökappatason kappakerroinkuvaajat, joiden suorien yhtälöillä laskettiin klooridioksidiannokset yllä olevan esimerkin tapaan. Koska kappakertoimien muutokset eri syöttökappatasoilla ovat hyvin pieniä,

oletettiin kappakertoimien kasvavan lineaarisesti jokaisella välillä. Näin voitiin määrittää kappakerroinkuvaajien suorien yhtälöt, joita hyödyntämällä saatiin tarkat laskennalliset  $\text{ClO}_2$ -annokset  $D_0$ -vaiheessa.

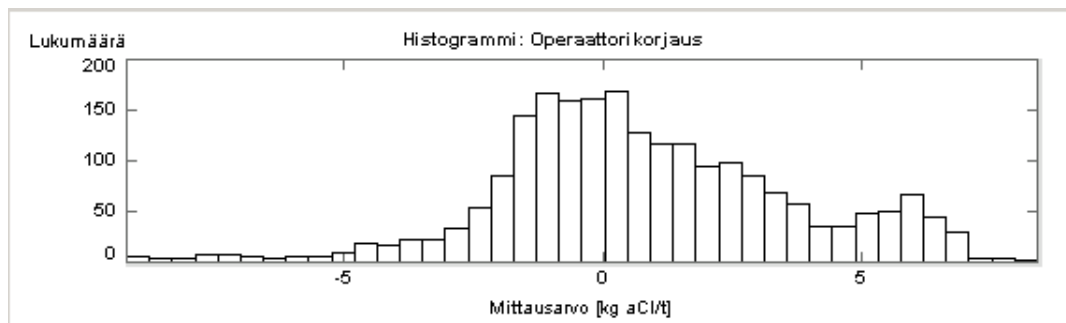
Todellisten ja laskennallisten klooridioksidiannoksien erotukset eli operaattorikorjaukset esitettiin niin tuotannon,  $D_0$ -vaiheen syöttökapan kuin  $D_1$ -vaiheen syöttökapan eli välikapan funktiona (kuviot 9, 11 ja 13). Operaattorikorjauksista tehtiin vastaavat kuviot (kuviot 8, 10 ja 12) myös noin kahden viikon ajalta (28.4. - 13.5.2011) ennen koeajotulosten seurantajakson alkua, jotta saatiin vertailupohjaa ja tukea tehdyille muutoksille. Seurantajaksoksi valittiin noin 1 kk ennen ja jälkeen muutoksen, koska niissä valkaisun syöttökappala oli lähes vakio (liite 3, jossa kappakertoimien muutosajankohta merkitty punaisella viivalla).



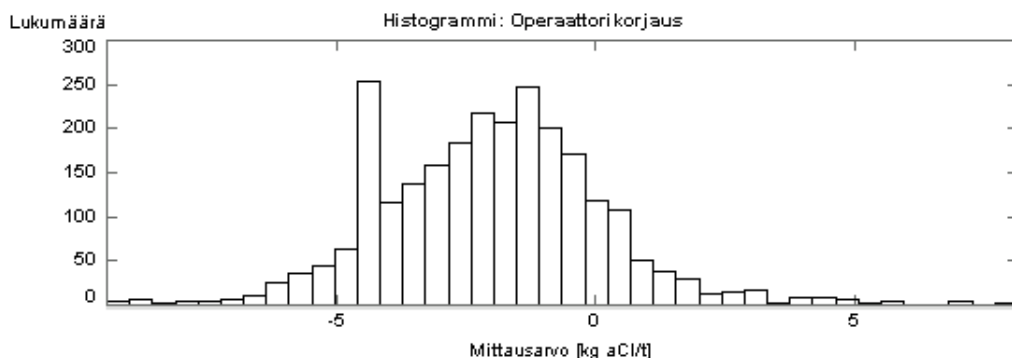
Kuvio 8. Operaattorikorjaus tuotannon funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen

Kuvion 8 kuvaajia vertaamalla on todettavissa, että operaattorikorjauksen vaihteluväli on kaventunut nimenomaan annoksen lisäyksen puolelta. Toisaalta tuotantonopeudet ovat olleet keskimäärin hieman alhaisempia seurantajakson alkupuolella (553 ADt/d) kuin ennen sitä (683 ADt/d). Tulokset eivät täten ole täysin vertailukelpoisia, koska koeajojen aikainen tuotantonopeus oli noin 750 ADt/d. Tuotantonopeuksien erosta huolimatta voidaan todeta, että uusilla

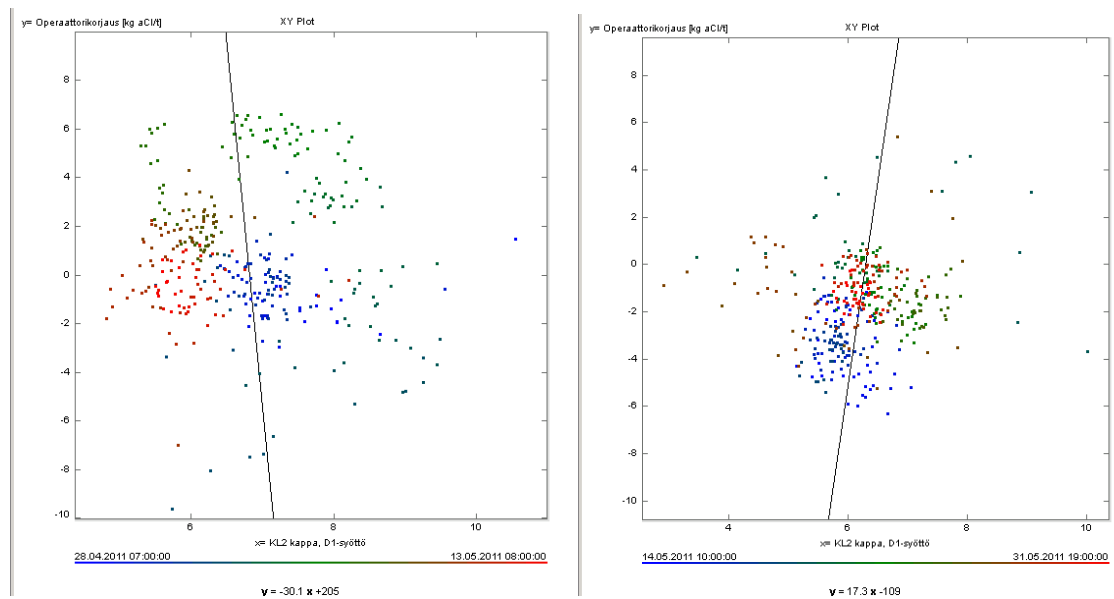
kappakertoimilla on saatu  $D_0$ -vaiheen operaattorikorjauksen tarvetta pienemmäksi. Ennen kappakertoimen muutosta operaattorikorjaus oli  $-3-7$  kg/ADt ja hajonta  $3,3$  kg aCl/ADt muutoksen ja muutoksen jälkeen  $-5-1$ kg/ADt ja hajonta  $1,8$  kg aCl/ADt. Tarkemmat tilastotiedot eri seurantajaksoista ovat liitteessä 4 ja kuvioissa 9 ja 10. Koeajotuloksien tulkitsemista varten seurantajaksoja on myös pidemmältä aikaväliltä ennen kappakertoimien muuttamista (9.2. - 8.4.2011) ja muutoksen jälkeen (14.5. - 15.9.2011 ja 1.10. - 12.12.2011). Näidenkin referenssijaksojen tilastotiedot ovat liitteessä 4 ja eri mittauksien xy-kuvaajat aikajärjestyksessä liitteessä 5. Tuotantonopeudet ovat tosin selvästi pienempiä (alle 600 ADt/d) kuin maaliskuuhuhtikuun koeajojen aikana, joten tulosten tarkasteleminen näihin referenssijaksoihin nähden ilman tuotantonopeuden ja tuotannon korjauskertoimen huomioimista on haasteellista.



Kuvio 9. Operaattorikorjaushistogrammi tuotannon funktiona ennen kappakertoimien muutosta

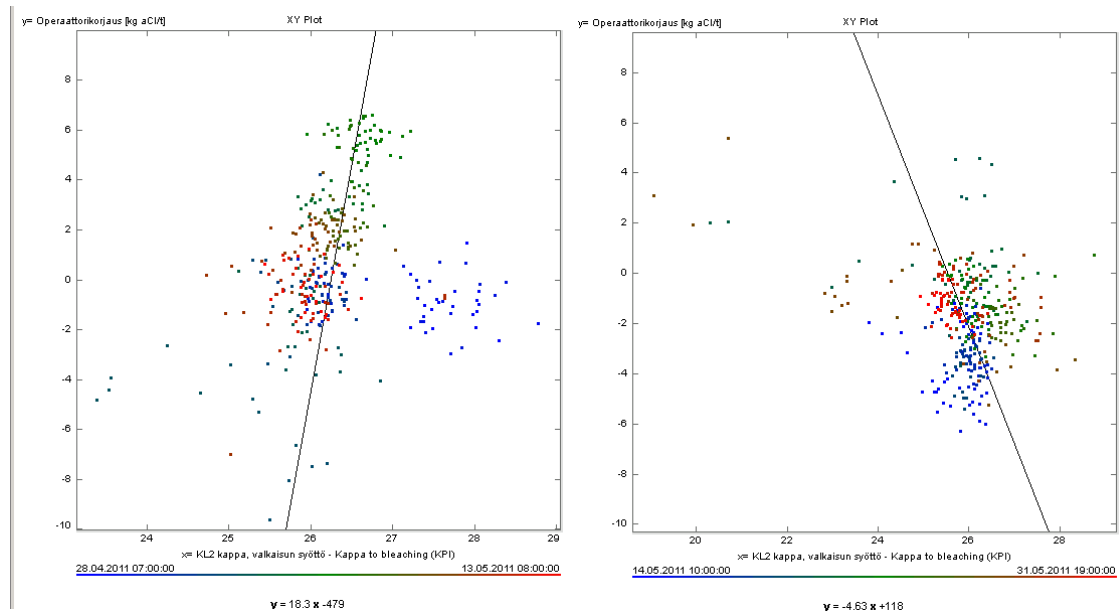


Kuvio 10. Operaattorikorjaushistogrammi tuotannon funktiona kappakertoimien muutoksen jälkeen



Kuvio 11. Operaattorikorjaus välikapan funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen

Kuvion 11 kuvaaja vertaamalla huomataan, että välikappa on uusien kappakertoimien muuttamisen jälkeen hieman laskenut. Liitteen 4 tilastotiedoista nähdään, että välikapan keskiarvo on laskenut 6,9:stä 6,2:een ja hajonta 1,3:sta 0,8:aan. Yhtenä työn tavoitteena ollut välikapan heilahtelun pieneneminen siis toteutuu uusilla kappakertoimilla. Välikapan hienoisesta laskusta huolimatta se on edelleen sallituissa rajoissa, joten klooridioksidiannoksien ei voi sanoa uusien kappakertoimien myötä nousseen liian korkeiksi. Tuotantonopeuden vaikutusta ei voi kuitenkaan jättää huomioimatta, sillä keskimääräinen klooridioksidiannos on pienempi kappakertoimien muutoksen jälkeen kuin ennen sitä (49,9 aCl/ADt ja 53,1 aCl/ADt), ja silti välikappa on laskenut.



Kuvio 12. Operaattorikorjaus  $D_0$ -syöttökapan funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen

Kuvion 12 kummastakin kuvaajasta voi päätellä, ettei  $D_0$ -vaiheen syöttökappa ole juurikaan vaikuttanut operaattorikorjauksen tarpeeseen. Sekä kappakerroinmuutoksia edeltävän että niiden jälkeisen seurantajakson aikana syöttökapan vaihteluväli on noin 25 - 28 (keskiarvot 26,3 ja 25,9), mutta operaattorikorjausta suuntaan tai toiseen on tarvittu. Uusien kappakertoimien myötä operaattorikorjauksen tarve annoslisän osalta on kuitenkin selkeästi vähentynyt.

## 12 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä määritettiin sellutehtaan valkaisulinjan ensimmäiseen klooridioksidivaiheeseen uudet kappakertoimet, joilla  $ClO_2$ -perusannos lasketaan. Kolmivaiheisen koeajon tuloksista voitiin määrittää uudet kappakertoimet, joiden toimivuutta seurattiin noin seitsemän kuukauden referenssijakson ajan (14.5. - 12.12.2011, poislukien seisokit).

Uusien kappakertomien myötä oli tarkoituksena saada  $D_0$ -vaiheen annossäätö toimimaan paremmin, jotta annosta ei tarvitsisi muuttaa operaattoreiden toimesta valvomosta käsin. Operaattorikorjauksesta ei päästy kokonaan eroon, mutta sitä saatiin jonkin verran pienennettyä. Maalis-huhtikuun koeajo-

olosuhteisiin verrattuna loppuvuoden referenssijaksolla tuotantonopeus oli selvästi hitaampi, mikä osaltaan selittää operaattorikorjauksen tarpeen vaihtumisen annosta lisäävästä annosta pienentäväksi. Välikapan heilahtelun pieneneminen sen sijaan toteutui paremmin, joten siltä osin työn tavoitteisiin päästiin. Näin ollen uudet kappakertoimet jätettiin päälle seurantajakson päättymisen jälkeenkin.

Uusien kappakertoimien lisäksi tässä työssä oli alun perin tarkoituksena pohtia kuinka tuotantonopeuden äkilliset vaihtelut voitaisiin huomioida. Aikataulusyistä tuotantonopeuksien vaihtelun vaikutuksen tarkempi tutkiminen ja korjauskertoimen käyttöön ottaminen jäivät Koeajojen tulokset -luvussa esitellyn hahmotelman (liite 2) tasolle. Tuotantonopeusmuutoksien huomioiminen olisi kuitenkin välttämätön lisätutkimuskohde. Tällä hetkellä tuotannon korjauskerroin tai jokin tietty annoslisä eivät ole käytössä, mutta valmius niiden ottamisesta käyttöön on olemassa. Tuotantonopeuden vaikutus annossäädön toimivuuteen on ilmeinen, sillä pelkällä kappakertoimien uudelleen määrittämisellä säätöä ei saatu kuntoon.

Lisäksi jatkotutkimuksena voisi järjestää koeajon, jossa syöttökappa pidetään tietyllä tasolla ja klooridioksidiannoksia nostetaan. Tätä jatkettaisiin niin kauan, kunnes kappaluku (välikappa) ei enää laske, eli toisin sanoen tapahtuu kyllästyminen, kun ligniini ja klooridioksidi eivät enää reagoi. Koeajoja voisi suunnitella myös sen pohjalta, että tässä työssä vakioina pidettyjä säätöparametreja ja olosuhteita muutettaisiin. Täten päästäisiin tarkastelemaan yksityiskohtaisemmin ja monipuolisemmin valkaisulinjan korjaavia toimenpiteitä vaativia säätöosioita.

## Kuvat

- Kuva 1. Klooridioksidin reaktiotuotteet pelkistymisen eri vaiheissa, s. 7
- Kuva 2. Tyypillinen D<sub>0</sub>-vaiheen laitteisto, s. 9
- Kuva 3. KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub> järjestelmä, s. 13
- Kuva 4. KajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>:n mittausperiaate, s. 14
- Kuva 5. KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>-järjestelmä, s. 15
- Kuva 6. KajaaniPOLAROX<sub>i</sub>:n mittausperiaate, s. 16
- Kuva 7. KajaaniCORMEC<sub>i</sub>-järjestelmä, s. 17
- Kuva 8. KajaaniCORMEC<sub>i</sub>:n mittausperiaate, s. 17
- Kuva 9. Säättöpiirin peruskomponentit, s. 20
- Kuva 10. Kaskadisäätö PI-kaavioesityksenä, s. 21
- Kuva 11. Esimerkki myötäkytkennän PI-kaaviosta, s. 22
- Kuva 12. Esimerkki suhdesäädöstä, painelajittimen PI-kaavio, s. 23
- Kuva 13. Kuitulinja 2:n prosessikuva, s. 25
- Kuva 14. Perinteisen keiton ajomalli, s. 26
- Kuva 15. KL2:n valkaisu 4:n prosessikuva, s. 27
- Kuva 16. Valkaisun monivaiheisuuden merkitys ClO<sub>2</sub>:n kokonaiskulutukseen, s. 37

## Kuviot

- Kuvio 1. D<sub>0</sub>-vaiheen kokonaisklooridioksidiansios syöttökapan funktiona, s. 29
- Kuvio 2. Syöttökapan histogrammi, s. 33
- Kuvio 3. VA4:n tuotannon histogrammi, s. 33
- Kuvio 4. Koeajovaiheiden kappakertoimet välikapan funktiona, s. 36
- Kuvio 5. Kappakerroin syöttökappatasolla 24 - 27, s. 38
- Kuvio 6. Koeajotulokset lähtötilanteen kappakertoimiin nähden, s. 39
- Kuvio 7. Koeajotuloksista lasketut uudet kappakertoimet, s. 41
- Kuvio 8. Operaattorikorjaus tuotannon funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen, s. 42
- Kuvio 9. Operaattorikorjaushistogrammi tuotannon funktiona ennen kappakertoimien muutosta, s. 43
- Kuvio 10. Operaattorikorjaushistogrammi tuotannon funktiona kappakertoimien muutoksien jälkeen, s. 44
- Kuvio 11. Operaattorikorjaus välikapan funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen, s. 44
- Kuvio 12. Operaattorikorjaus D<sub>0</sub>-syöttökapan funktiona ennen kappakertoimien muutosta ja sen jälkeen, s. 45

## Taulukot

- Taulukko 1. Nykyiset D<sub>0</sub>-vaiheen kappakertoimet ja ClO<sub>2</sub>-annokset eri syöttökapoilla, s. 28
- Taulukko 2. Koeajojen syöttökappatasot ja askelmaisesti vaihdetut ClO<sub>2</sub>-annokset, s. 34

Taulukko 3. Askelvastekoeajojen tulokset, s. 35

Taulukko 4. Koeajotulokset, s. 37

Taulukko 5 Uudet kappakertoimet ja niitä vastaavat ClO<sub>2</sub>-annokset, s. 40



## Lähteet

Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002a. W4510100V2.2 kajaaniCORMEC<sub>i</sub>.

Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002b. W4190013V2.2 kajaaniPOLAROX<sub>fi</sub>.

Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje 2002c. W4180101V2.2 kajaaniPOLAROX<sub>i</sub>.

Dence, C. & Reeve, D. 1996. Pulp bleaching, Principles and practice. Atlanta: TAPPI Press.

Gullichsen, J. & Fogelholm, C-J. 1999. Papermaking science and technology 6A: Chemical pulping. Helsinki: Fapet Oy.

Isotalo, K. 2004. Puu- ja sellukemia. 3. uudistettu painos. Opetushallitus.

Keinänen, P. 2001. Stora Enso, sisäinen raportti.

KnowPulp 8.0

Metso Automation.

[http://www.metso.com/automation/pp\\_prod.nsf/WebWID/WTB-041104-2256F-A1398?opendocument](http://www.metso.com/automation/pp_prod.nsf/WebWID/WTB-041104-2256F-A1398?opendocument) (Luettu 24.2.2011)

Oulun seudun ammattikorkeakoulu 2009. Automaatiotekniikka.

[http://www.tekniikka.oamk.fi/~terohi/auto1\\_s2009u.htm](http://www.tekniikka.oamk.fi/~terohi/auto1_s2009u.htm) (Luettu 3.3.2011)

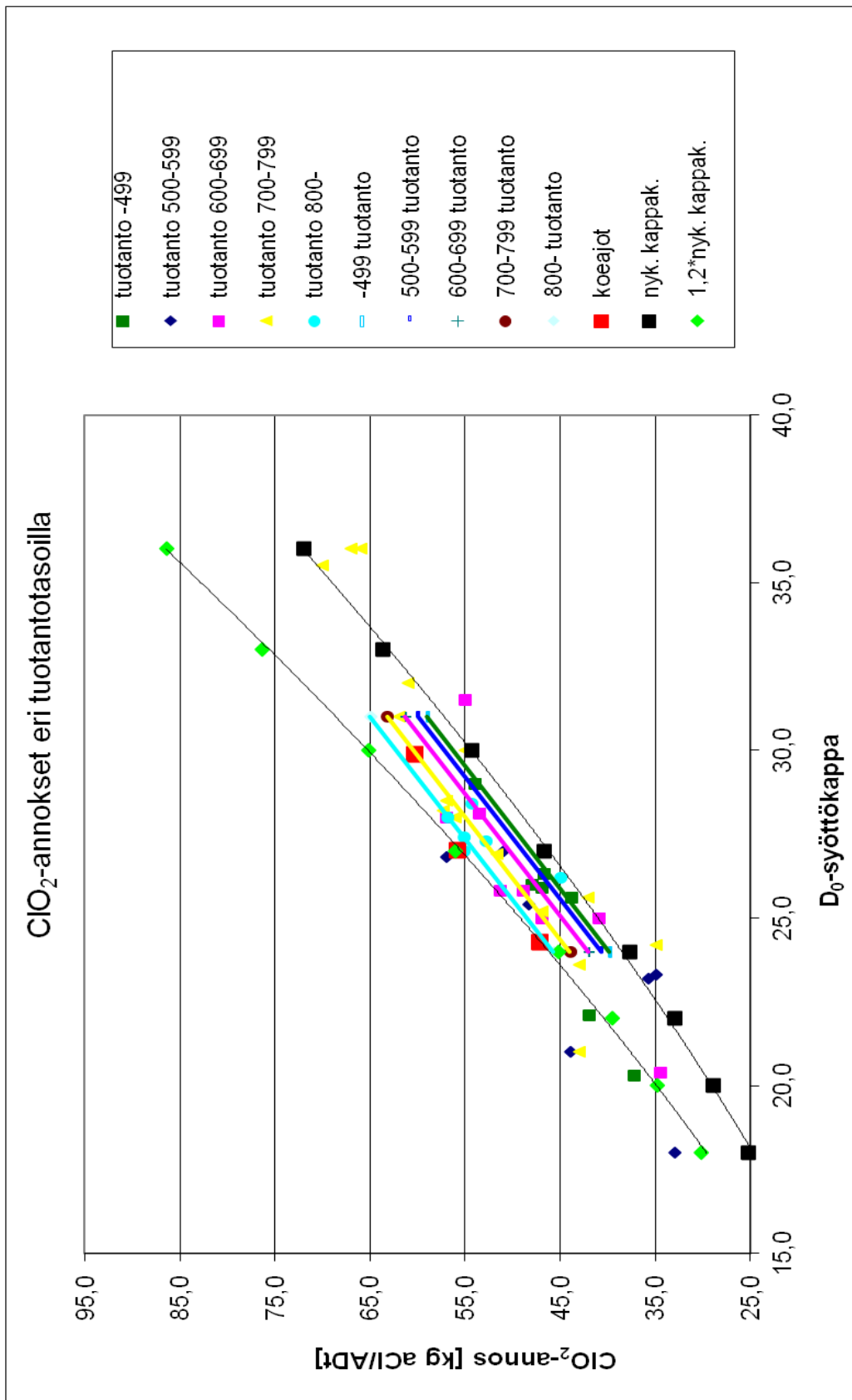
Klemetti, U., Kortelainen, V-A., Lyytikäinen J., Siitonen H. & Sironen, R. 2005. Teoksessa Seppälä, M. (toim.) Paperimassan valmistus. 2. - 3. painos. Opetushallitus.

Stora Enso 2010. Imatran tehtaiden yleisesittely. PowerPoint-materiaali.

<http://imatramills/imt/esitysaineisto/default.htm> (Luettu 7.1.2011)

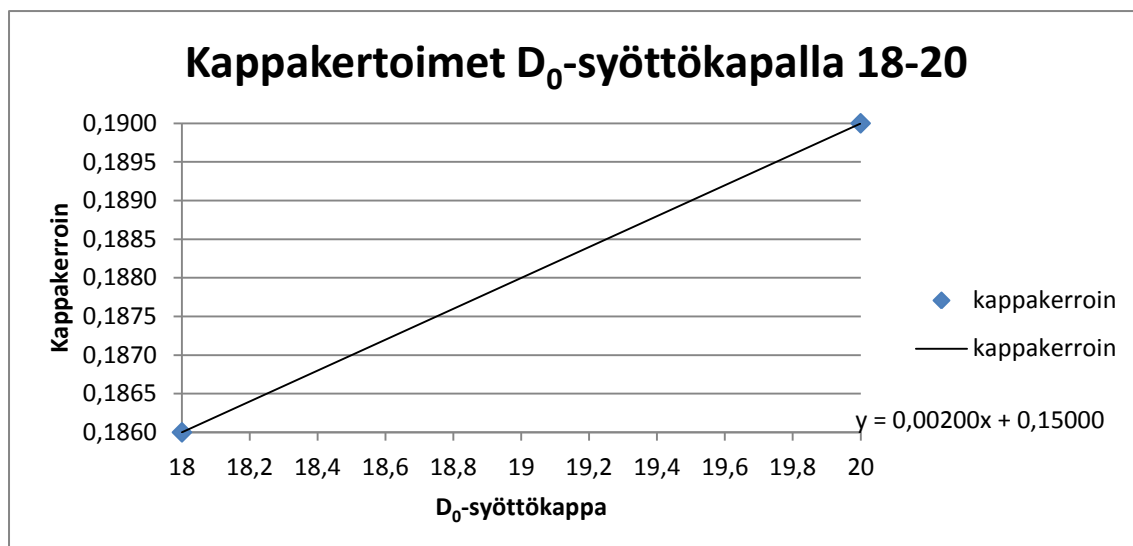
Wallenius, S. 2005. Kuitulinja 2. Stora Enso Imatran tehtaot, Intranet.

<http://imatramills/imk/ims/kl2/kl2esittely.htm> (Luettu 7.1.2011)



Kuvio 1. Hahmotelma tuotantonopeuksien vaikutuksesta D<sub>0</sub>-vaiheessa tarvittavaan ClO<sub>2</sub>-annokseen

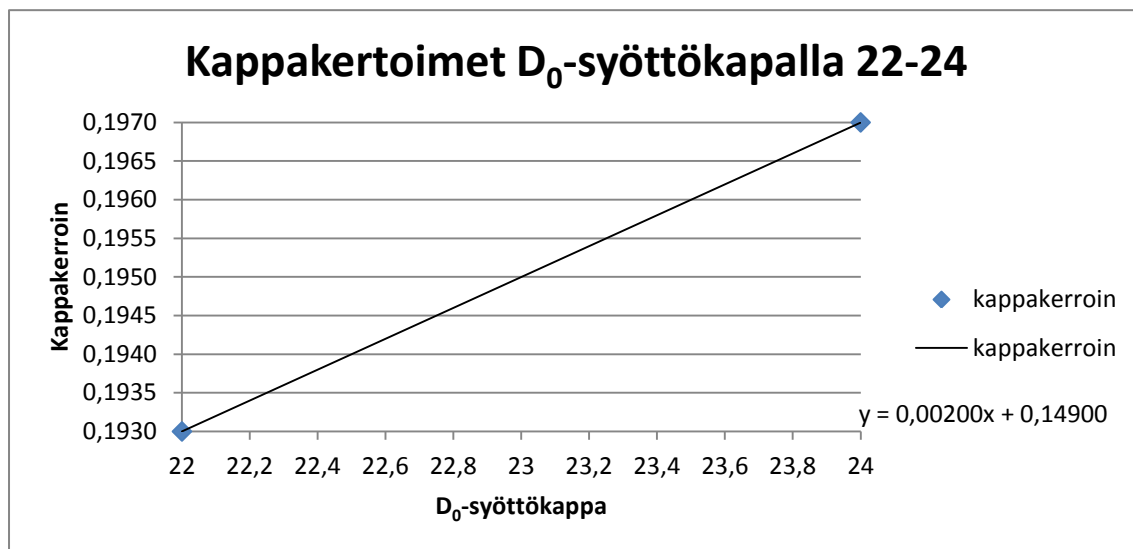
**Kappakerroinkuvaajat ja -yhtälöt eri syöttökappatasoilla koeajotulosten seurantajakson operaattorikorjauksien laskemiseksi**



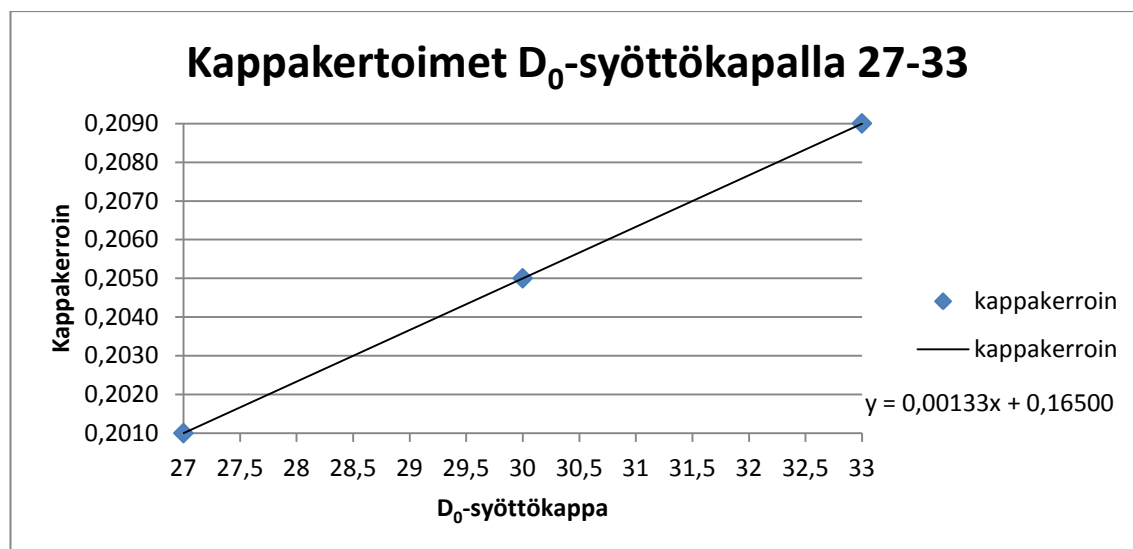
Kuvio 2. Kappakerroin syöttökappatasolla 18 - 20



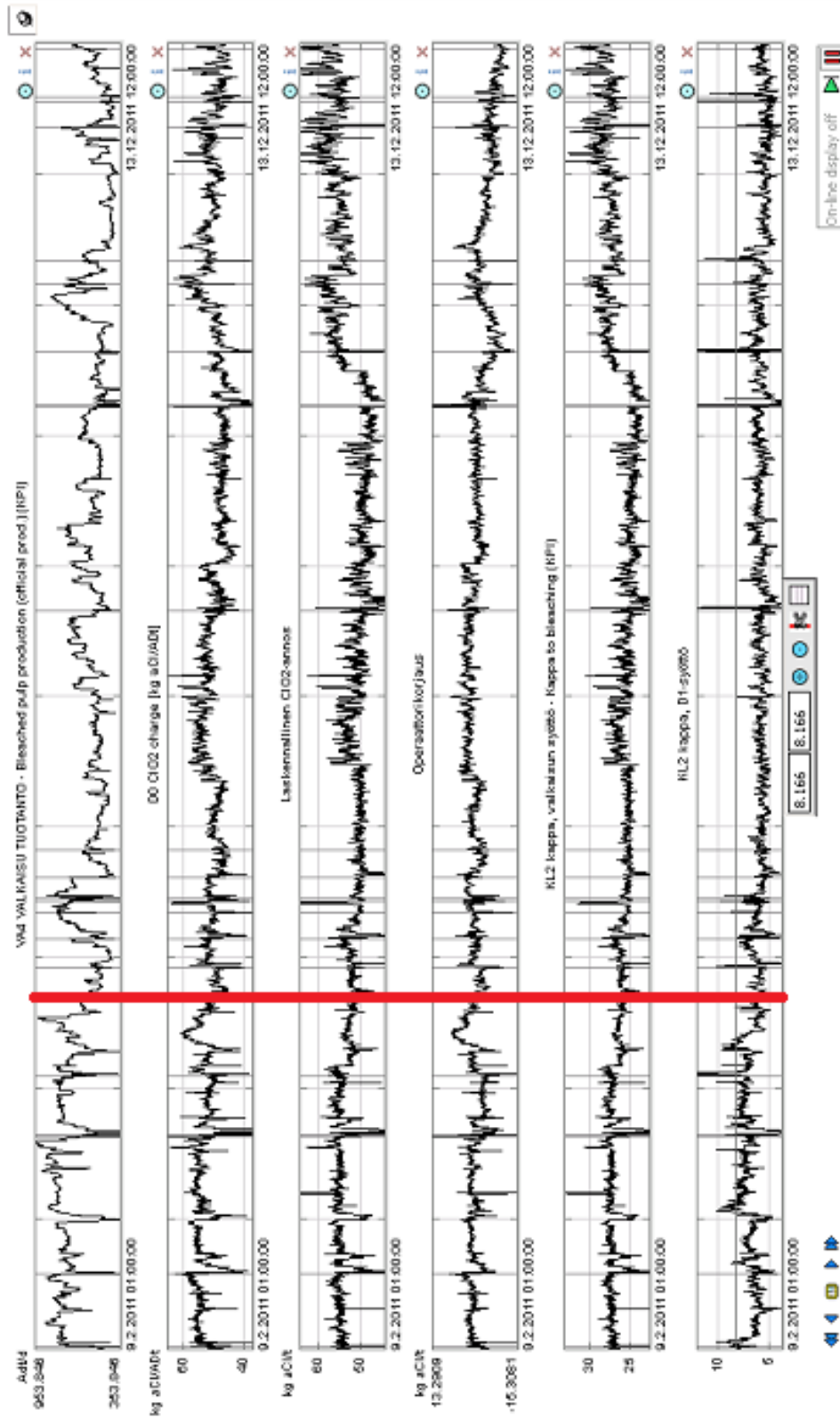
Kuvio 3. Kappakerroin syöttökappatasolla 20 - 22



Kuvio 4. Kappakerroin syöttökappatasolla 22 - 24



Kuvio 5. Kappakerroin syöttökappatasolla 27 - 33

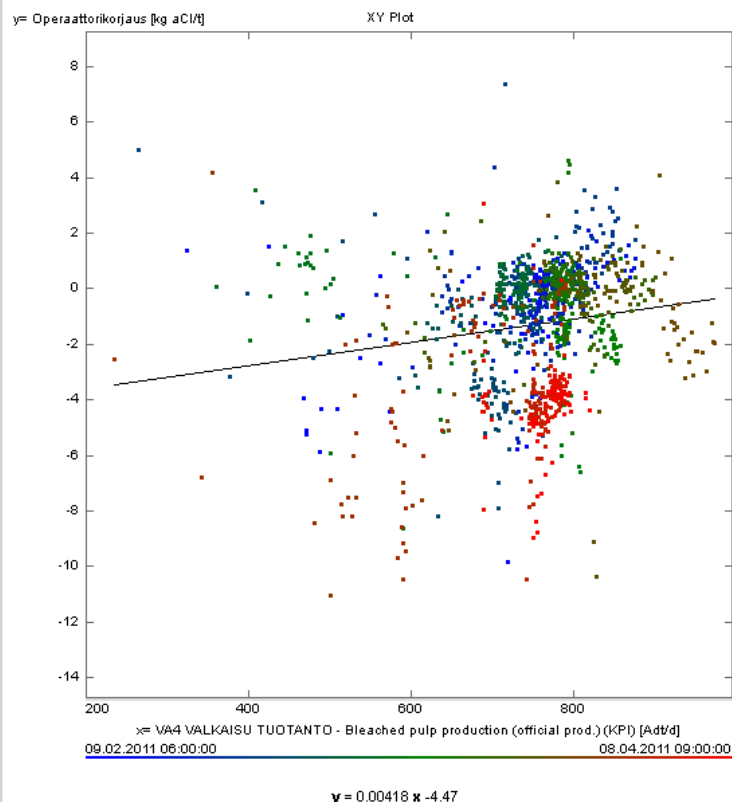


Kuvio 6. Mittausdataa referenssijaksojen ajalta

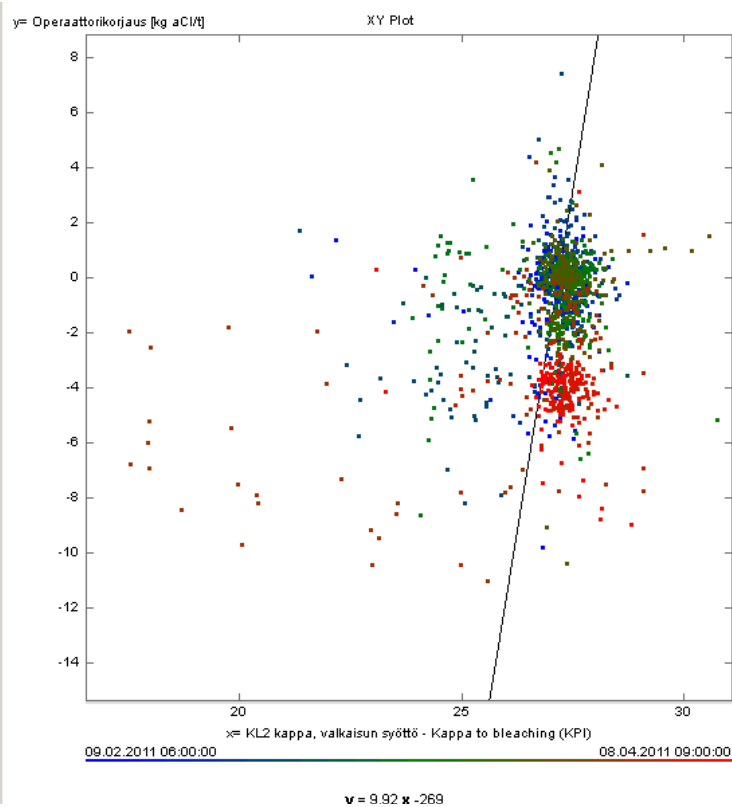
<b>9.2. - 8.4.2011</b>					
<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Hajonta</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>
VA4 Valkaisu tuotanto	Adt/d	749,30	92,78	974,30	234,80
D0 ClO2 charge [kg aCl/ADt]	kg aCl/ADt	52,97	4,26	77,31	25,64
Laskennallinen ClO2-annos	kg aCl/t	54,31	2,98	81,84	32,42
Operaattorikorjaus	kg aCl/t	-1,33	2,62	22,50	-24,34
KL2 kappa, valkaisu syöttö		27,02	1,27	37,98	17,52
KL2 kappa, D1-syöttö		6,86	0,95	9,99	2,33
<b>8.4.2011 - 13.5.2011</b>					
<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Hajonta</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>
VA4 Valkaisu tuotanto	Adt/d	683,50	91,16	927,70	289,30
D0 ClO2 charge [kg aCl/ADt]	kg aCl/ADt	53,07	3,77	60,70	37,90
Laskennallinen ClO2-annos	kg aCl/t	52,65	1,63	58,49	45,79
Operaattorikorjaus	kg aCl/t	0,42	3,32	6,60	-14,88
KL2 kappa, valkaisu syöttö		26,32	0,69	28,78	23,39
KL2 kappa, D1-syöttö		6,91	1,32	15,24	4,81
<b>14.5. - 31.5.</b>					
<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Hajonta</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>
VA4 Valkaisu tuotanto	Adt/d	553,40	105,90	788,80	402,40
D0 ClO2 charge [kg aCl/ADt]	kg aCl/ADt	49,94	2,58	59,16	38,95
Laskennallinen ClO2-annos	kg aCl/t	51,70	2,39	58,47	35,86
Operaattorikorjaus	kg aCl/t	-1,76	1,82	5,36	-6,32
KL2 kappa, valkaisu syöttö		25,92	1,02	28,77	19,06
KL2 kappa, D1-syöttö		6,21	0,81	10,02	2,90
<b>14.5. - 15.9.2011</b>					
<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Hajonta</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>
VA4 Valkaisu tuotanto	Adt/d	561,80	86,07	833,70	384,30
D0 ClO2 charge [kg aCl/ADt]	kg aCl/ADt	49,61	3,22	64,56	38,95
Laskennallinen ClO2-annos	kg aCl/t	50,33	2,41	64,92	35,86
Operaattorikorjaus	kg aCl/t	-0,72	2,03	6,77	-6,32
KL2 kappa, valkaisu syöttö		25,33	1,03	31,40	19,06
KL2 kappa, D1-syöttö		5,76	0,57	9,22	2,52
<b>1.10. - 12.12.2011</b>					
<b>Mittaus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Hajonta</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>
VA4 Valkaisu tuotanto	Adt/d	504,90	97,51	836,60	211,00
D0 ClO2 charge [kg aCl/ADt]	kg aCl/ADt	49,98	3,77	63,44	18,97
Laskennallinen ClO2-annos	kg aCl/t	55,40	3,57	72,53	40,10
Operaattorikorjaus	kg aCl/t	-5,42	3,24	6,22	-34,00
KL2 kappa, valkaisu syöttö		27,48	1,50	34,41	20,95
KL2 kappa, D1-syöttö		5,60	0,80	14,54	2,94

Taulukko 1. Referenssijaksojen eri mittausten tilastotiedot

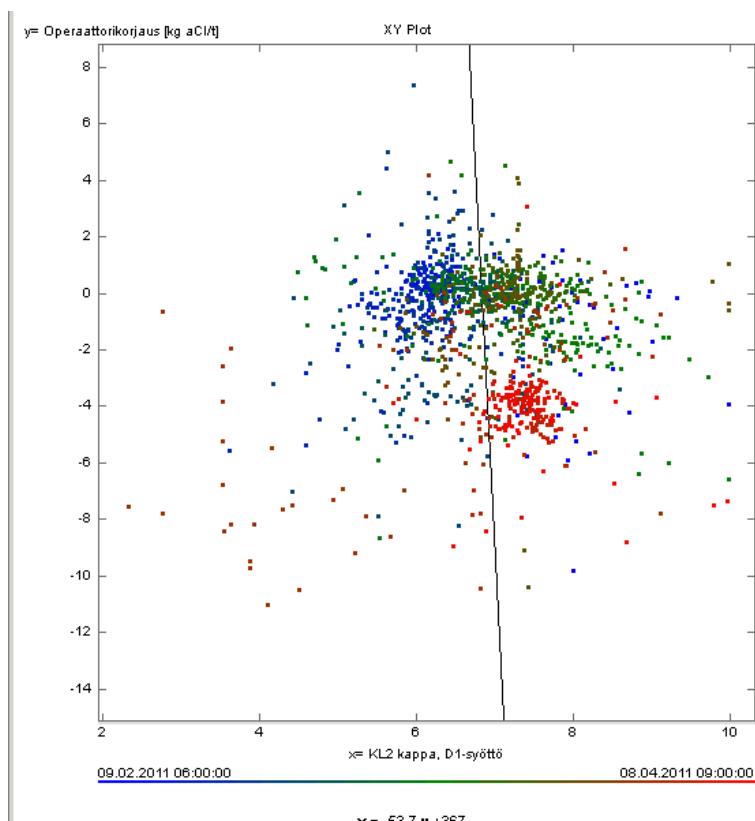
### Referenssijaksojen xy-kuvaajat



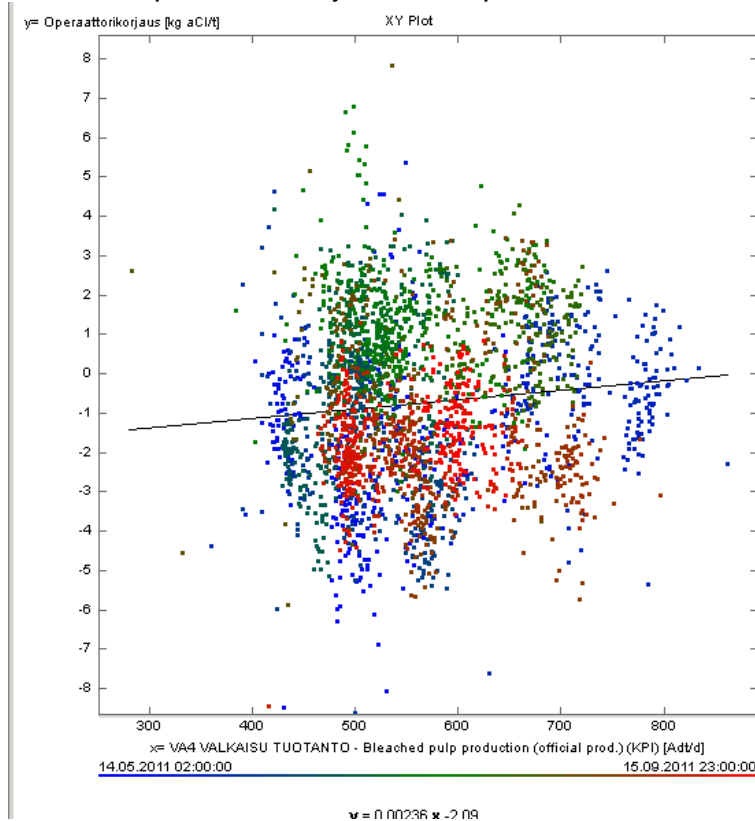
Kuvio 7. Operaattorikorjaus tuotannon funktiona ennen koeajoja ja niiden aikana



Kuvio 8. Operaattorikorjaus  $D_0$ -syöttökapan funktiona ennen koeajoja ja niiden aikana

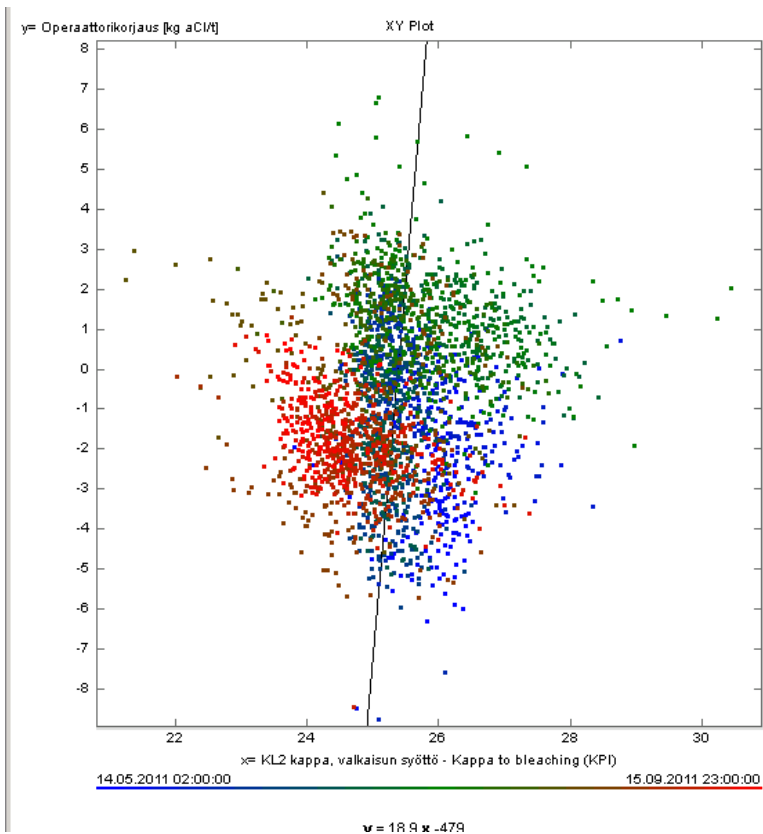


Kuvio 9. Operaattorikorjaus välikapana funktiona ennen koeajoja ja niiden aikana

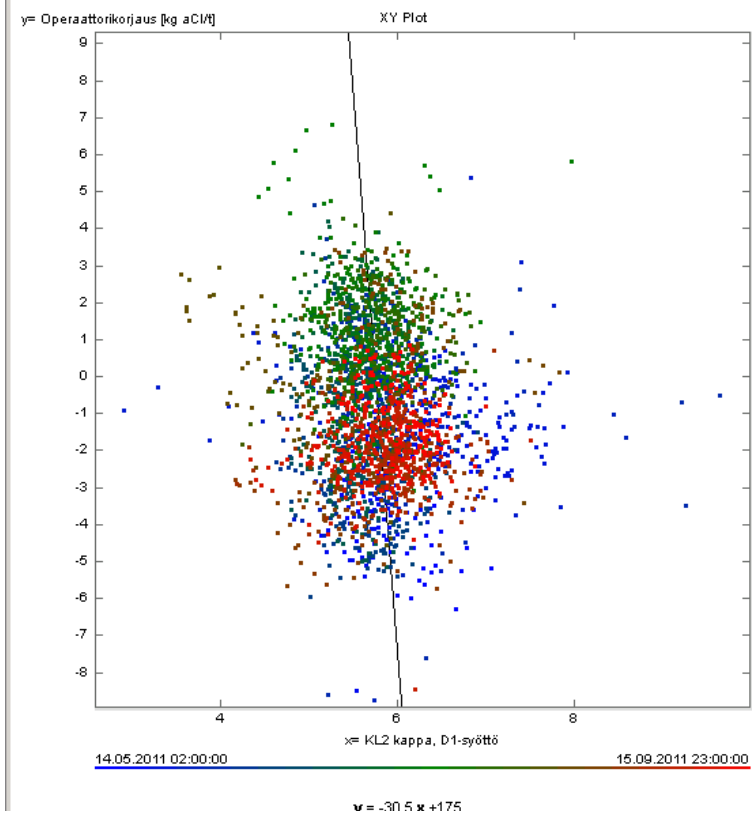


Kuvio 10. Operaattorikorjaus tuotannon funktiona koeajotulosten seuranta-jakson aikana ennen syyskuun seisokkia

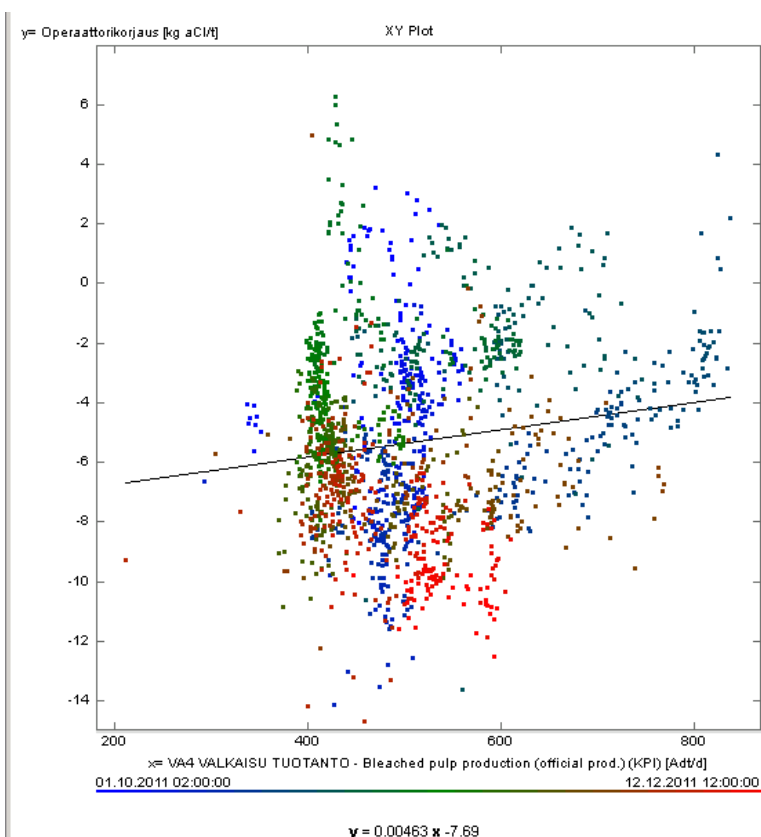




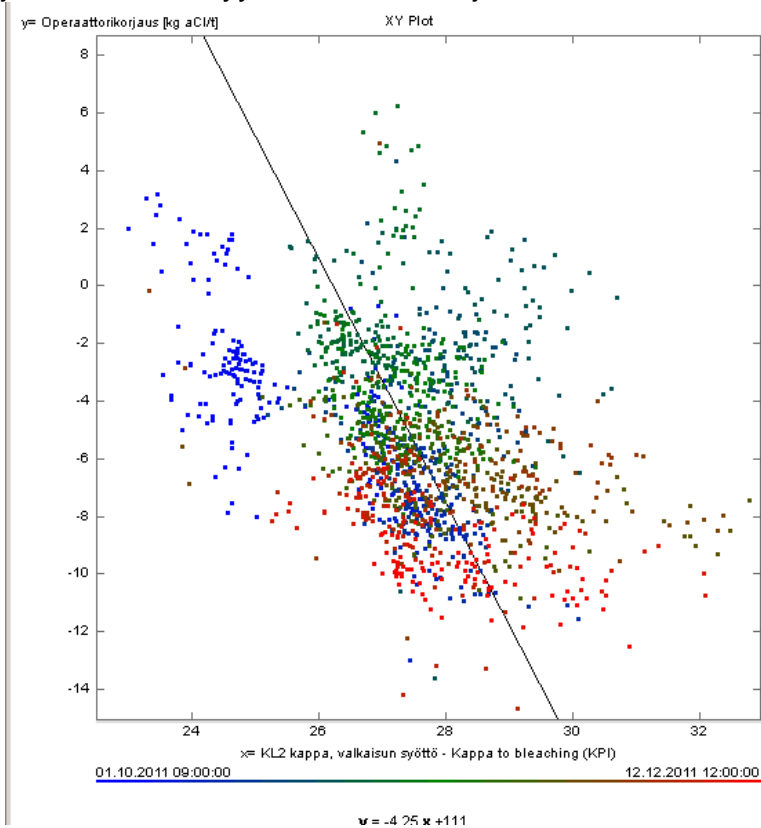
Kuvio 11. Operaattorikorjaus  $D_0$ -syöttökapan funktiona koeajotulosten seuranta-  
jakson aikana ennen syyskuun seisokkia



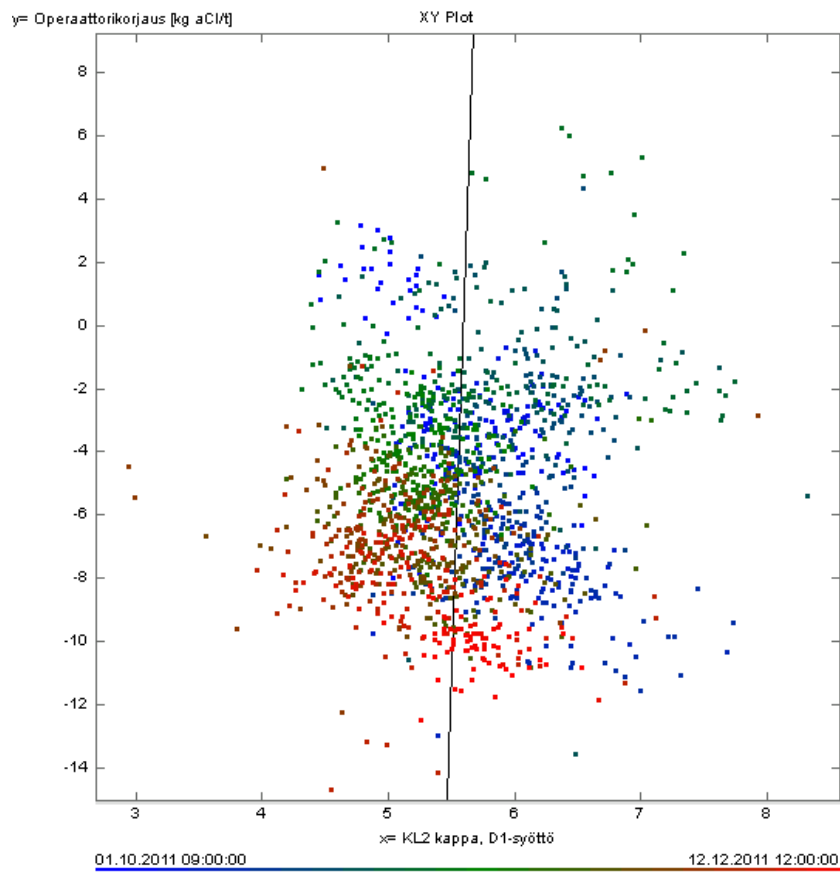
Kuvio 12. Operaattorikorjaus välikapan funktiona koeajotulosten seuranta-  
jakson aikana ennen syyskuun seisokkia



Kuvio 13. Operaattorikorjaus tuotannon funktiona koeajotulosten seuranta-jakson aikana syyskuun seisokin jälkeen



Kuvio 14. Operaattorikorjaus  $D_0$ -syöttökapan funktiona koeajotulosten seuranta-jakson aikana syyskuun seisokin jälkeen



$$v = 116 x - 650$$

Kuvio 15. Operaattorikorjaus välikapan funktiona koeajotulosten seurantajakson aikana syyskuun seisokin jälkeen