

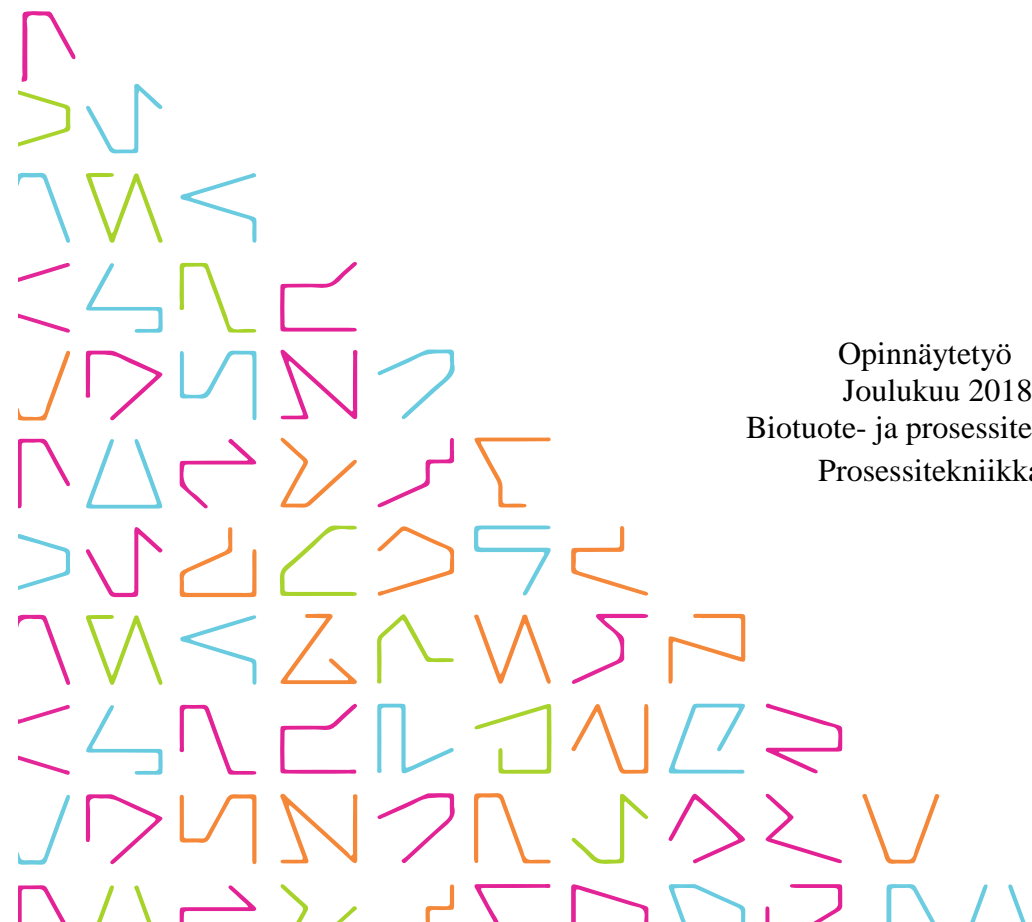


TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# JAUHATUKSEN VAIKUTUS KARTONGIN REUNASILEYTEEN

Alexandra Siponen

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2018  
Biotuote- ja prosessitekniikka  
Prosessitekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessiteknikka

ALEXANDRA SIPONEN:  
Jauhatuksen vaikutus kartongin reunasileyteen

Opinnäytetyö 123 sivua, joista liitteitä 31 sivua  
Joulukuu 2018

---

Opinnäytetyö on tehty Stora Enso Oyj Imatran Tehtaiden yksikössä. Tehtaissa valmistetaan nestepakkaus-, elintarvike- ja graafisia kartonkeja sekä joustopakkauspapereita itse valmistetusta sellusta ja kemikumahierteestä (CTMP). Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia jauhatusprosessin vaikutusta reunasileyteen. Työn kohteena oli löytää kolmikerroksiselle päällystämättömälle kartonkilajille energiatehokas ja sopiva jauhatusparametrien kombinaatio, joka optimoi kartongin reunasileyttä. Työssä tutkittiin mitatuista laatuarvoista tilastollisten analyysien avulla eri pinnoissa vuorottaisia jauhatusyhdistelmiä, joilla reunasileys olisi paras mahdollinen.

Kirjallisuusosuudessa selvitettiin, mitkä tekijät vaikuttavat kartongin reunasileyteen ja miten reunasileyttä pystytään hallitsemaan jauhatuksen vaikutuksella, jota säädetään jauhatusteorioita käyttäen. Kirjallisessa osuudessa käsiteltiin myös kartongin kutistumisen aiheuttamia tekijöitä ja jauhatuksen osuutta siitä. Kokeellisessa osuudessa Imatran Tehtaiden kartonkikoneella ajatun koeajon avulla selvitettiin mahdollisimman toimiva jauhatustapa kartonkilajille analysoimalla pintaominaisuuksien kehitystä jauhatuksen vaikutuksesta.

Koeajon perusteella merkittävimiksi tekijöiksi kartongin reunasileyden hallinnassa on osoittautunut jauhatustapa ja jauhatusmäärä. Koivumassan fibrilloivan ja männyn katkovan jauhatustavan yhdistelmässä ominaiskulutusenergian säädön avulla pintaominaisuudet olivat parhaimmillaan. Sileystuloksista selvisivät parhaan jauhatustavan, kombinaation ja säädön lisäksi poikkiradan kriittiset reuna-alueet, jotka ovat erisuuruiset konelinjan hoito- ja käyttöpuolilla, mikä voi osittain selittää reunasileyden ongelmia.

Luottamuksellinen aineisto on poistettu julkisesta versiosta.

---

Asiasanat: jauhatus, jauhimet, jauhimen terät, jauhatuksen vaikutus, jauhatusteoriat, sileys, reunasileys, reunakutistuma.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct and Process Engineering

ALEXANDRA SIPONEN:

The Effect of Refining on The Edge Smoothness of Board

Bachelor's thesis 123 pages, appendices 31 pages  
December 2018

---

This thesis was commissioned by Stora Enso Oyj Imatra Mills unit. The mills prepare liquid packaging, food and graphic cardboard and flexible packaging papers from the self-produced pulp and chemithermomechanical pulp (CTMP). The aim of this Bachelor's thesis was to investigate the effect of the refining process on the edge smoothness. The focus of the work was to find an energy efficient and suitable combination of refining parameters for the three-layer uncoated cardboard which optimises the board edge smoothness. In this thesis, the measured quality values were investigated by statistical analyses on different surfaces with the best possible edge smoothness.

In the literary section we determine which factors affect the smoothness of the board and how the edge smoothness can be controlled by the effect of refining which is adjusted by refining theories. The written part also deals with the factors that cause contraction of board and how refining affects it. In the experimental section in the Imatra Mills paperboard machine, the test is used to determine the optimal refining method for the paperboard species by analysing the evolution of the surface properties of the refining effect.

According to the test, the most important factors in the management of the edge smoothness of board are the refining method and the amount. The surface properties were found to be the best when refining parameters were set to fibrillate birch mass and cut Scots pine. In addition to finding the best refining method, combination and adjustment, the critical cross section areas were also found, which are different for the machine tending and drive sides, which can partly explain the problems of edge smoothness.

Confidential material has been removed from the published version.

---

Key words: refining, refiners, refiner blades, refiner effect, refining theories, smoothness, edge smoothness, edge shrinkage.

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	7
2 YLEISTÄ JAUHATUKSESTA.....	8
2.1 Jauhatustapahtuma .....	9
2.1.1 Jauhatuksen vaiheet.....	9
2.1.2 Flokkijauhatushypoteesi.....	10
2.2 Jauhatusjärjestelmä .....	11
2.3 Jauhintyytit .....	13
2.3.1 Kartiojauhin.....	14
2.4 Jauhinterät .....	17
2.4.1 Terägeometria .....	18
3 ERI PUUMASSOJEN JAUHATUS.....	22
3.1 Havupuumassan jauhatus .....	22
3.2 Lehtipuumassan jauhatus .....	23
3.3 Kuivatun sellun jauhatus .....	23
4 JAUHATUKSEN VAIKUTUS PUUKUITUIHIN .....	24
4.1 Jauhatuksen vaikutus kuituihin .....	24
4.1.1 Primäärikalvon poistuminen .....	25
4.1.2 Ulkoinen fibrillaatio .....	26
4.1.3 Sisäinen fibrillaatio .....	27
4.1.4 Kuitujen katkeilu .....	28
4.1.5 Pintojen ja hienoaineen muodostuminen .....	28
4.1.6 Kuidun seinämän osittainen tai kokonainen liukeneminen.....	29
4.1.7 Kuitujen suoristuminen .....	29
5 JAUHATUKSEN VAIKUTUS KARTONGIN OMINAISUUKSIIN .....	31
5.1 Yleiset ominaisuudet.....	31
5.1.1 Tiheys ja bulkki.....	32
5.1.2 Neliömassa ja kuituorientaatio .....	34
5.1.3 Formaatio .....	34
5.2 Lujuusominaisuudet .....	35
5.2.1 Vetolujuus ja venymä.....	36
5.2.2 Repäisyjuvuus ja märkäjuvuus .....	38
5.2.3 Puhkaisulujuus .....	40
5.2.4 Palstautumisljuvuus ja taittoljuvuus.....	41
5.3 Pintaominaisuudet.....	42
5.3.1 Sileyys ja karheus.....	43
5.3.2. Reunasileyys .....	44

5.3.3 Huokoisuus ja ilmanläpäisy .....	49
6 JAUHATUKSEN SÄÄTÖ .....	51
6.1 Jauhatuksen vaikutusmekanismi .....	51
6.2 Ominaisrämmäkuormateoria .....	53
6.2.1 Jauhatus- ja hukcateho .....	54
6.2.2 Ominaisrämmäkuorma (OSK) ja ominaiskulutus (EOK).....	55
6.3 Ominaispintakuormateoria .....	56
6.3.1 Ominaispintakuorma (OPK) ja jauhatusmäärä (EOK) .....	57
7 KOKEELLINEN OSUUS .....	58
7.1 Tarkoitus .....	58
7.2 Tausta ja suunnittelu .....	58
7.3 Menetelmät.....	59
7.3.1 Jauhautuneisuuden mittaaminen .....	60
7.3.2 Sileyden mittaaminen.....	62
7.3.3 Karheuden mittaaminen .....	62
7.3.4 OptiTopo- ja Scarredness-mittaus.....	63
7.4 Suoritus .....	65
7.5 Tulokset ja tulkinta.....	67
7.5.1 Suotautuvuusmittauksen tulokset.....	67
7.5.2 Sileys- ja karheusmittausten tulokset.....	70
7.5.3 Reunasileyden tulokset.....	74
7.5.4 Jauhatuksen ja ominaisuuksien väliset matriisitulokset.....	77
8 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	83
9 PARANNUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET.....	87
10 YHTEENVETO .....	89
LÄHTEET.....	90
LIITTEET .....	93
Liite 1. Jauhatuksen ominaisenergian säädön muutokset koeajon aikana. ....	93
Liite 2. Massanäytteiden SR-luvun tulokset. ....	97
Liite 2b. Konerullien PaperLab-tulokset. (Taulukot 1-15 poistettu julkisesta versiosta) .....	99
Liite 3. Poikkiratanäytteiden keskiarvoiset pinta- ja pohjapuolen tuloksia. (Poistettu julkisesta versiosta).....	101
Liite 4. Poikkiratanäytteiden OptiTopo-mittauksen konerullakohtaisia tuloksia. (Taulukot 1,3 poistettu julkisesta versiosta) .....	102
Liite 5. Konerullakohtaiset yhdistelmätrendit reunasileyden havainnointiin. ....	104
Liite 6. Koeajon matriisimukaiset jauhinten väliset riippuvuudet sekä ominaisuuksien käyttäytyminen jauhatuksen edistyessä. ....	115

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

<i>C</i>	Massan sakeus [kg/m <sup>3</sup> ]
<i>d</i>	Jauhinterän ulkohalkaisija [mm]
<i>F</i>	Massan virtaus [l/min]
<i>k</i>	Jauhinkohtainen vakio
<i>l</i>	Teräsärmien kontaktipituus [km]
<i>l<sub>p</sub></i>	Kuidun etäisimpien pisteiden välinen etäisyys [m]
<i>L</i>	Kuidun muotokäyrän pituus [m]
<i>L<sub>s</sub></i>	Leikkausnopeus [km/s]
<i>L<sub>t</sub></i>	Kuitujen kokonaispituus [m]
<i>M</i>	Massavirtaus [kg/s]
<i>n</i>	Kierrosnopeus [1/s]
<i>N</i>	Kulmien lukumäärä [kpl]
<i>N<sub>i</sub></i>	Jauhatusiskujen määrä [km/kg]
<i>P<sub>e</sub></i>	Puhdas jauhatusteho [kW]
<i>P<sub>n</sub></i>	Häviöteho [kW]
<i>P<sub>t</sub></i>	Kokonaisteho [kW]
<i>Z<sub>r</sub></i>	Roottorin harjojen lukumäärä [kpl]
<i>Z<sub>st</sub></i>	Staattorin harjojen lukumäärä [kpl]
<i>α</i>	Kartiokulma [°]
CEL	Leikkaussärmäpituus (Cutting Edge Length) [Km/r]
CI	Kiharusindeksi (Curl Index)
CSF	Suotautuvuus (Canadian Standard Freeness) [ml]
EOK	Energian ominaiskulutus [kWh/t]
IL	Jauhatusiskunpituus (Impact Length) [m]
OPK	Ominaispintakuorma [J/m <sup>2</sup> ]
OSK	Ominaissärmäkuorma [J/m]
SR	Suotautuvuus (Schopper-Riegler)
WRV	Suotautuvuus (Water Retention Valve)

## 1 JOHDANTO

Jauhatus on yksi tärkeimmistä yksikköprosesseista kartongin valmistuksessa, ja sillä on vaikutus käytettyjen kuitujen ominaispiirteisiin ja valmiin kartongin ominaisuksiin. Kartongin valmistuksessa epäsoviva ja väärä jauhatus sekä jauhatustulos näkyvät pahimmillaan heikkona ajettavuutena ja lopputuotteen heikkona laatuna.

Jauhatuksen ja jauhatustuloksen vaikuttavat tekijät eivät rajoitu pelkästään jauhimiin ja jauhatusolosuhteisiin, vaan ne voivat saada alkunsa massavalmistuksesta tai jopa raaka-aineista. Tämän seurauksena jauhatukseen vaadittavien tekijöiden ja itse jauhatettavuuden tutkiminen on erittäin tärkeää kartongin valmistusprosessin kannalta.

Tässä työssä pyritään selvittämään, miten jauhatusprosessissa jauhettavuusasteet ja niiden kombinaatiot vaikuttavat kartongin reunasileyteen. Työn teoriaosuudessa käsitellään pääasiassa yleisesti jauhatusta, johon kuuluu jauhatustapahtuma ja sen vaiheet, jauhatusjärjestelmän jauhimet, jauhinterät sekä terägeometria. Lisäksi teoreettisessa osuudessa keskitytään eri puumassojen jauhatukseen ja tutkitaan jauhatuksen vaikutusta puukuituihin ja valmiin kartongin ominaisuksiin.

Kokeellisessa osuudessa tärkeimpänä tavoitteena oli löytää kolmikerroksisen päällystämättömän kartonkilajin eri laatumassoille sellainen jauhatuksen yhdistelmä, jolla valmiin kartongin sileys ja karheus olisivat parhaimmillaan. Lisäksi selvitetään Imatran tehtaiden kartonkikoneella tehdyn koeajon avulla kartongin eri kerroksissa jauhatuksen ominaisenergiat koivu- ja mäntymassoille löytämällä oikea ajotapa, jotta voidaan saada sekä optimoida tietyt ja halutut ominaisuudet. Koeajon perusteella päätetään kartongin reunasileyden hallintaan käytettävät prosessimuuttujat ja mitkä muutokset pyritään vakioimaan massojen jauhatusprosessissa. Lopuksi saaduista tuloksista ja niiden analysoinnista tehdään parannusehdotuksia kartongin reunasileyden hallinnan kannalta.

## 2 YLEISTÄ JAUHATUKSESTA

Kartongin ja paperin valmistuksessa raaka-aineena käytetään puukuitua, joka voidaan erottaa kemiallisesti ja mekaanisesti. Kuitujen kemiallinen erotus perustuu sellun keittoon ja mekaaninen erotusmenetelmä hiontaan ja hiertämiseen. Paperin ja kartongin valmistuksessa kuidut muodostavat verkoston, jonka alkuvaiheinen lujuus on peräisin pintajännitysvoimista sekä sakeuden kasvaessa kuitujen välillä syntyvistä vetysidoksista. Mekaanisesti ja kemiallisesti irronneiden kuitujen kyky muodostaa sidoksia on hyvin heikko, eivätkä ne muokkaamatta sovellu minkään kartongin ja paperin valmistukseen, koska puukuidut ovat jäykkiä ja sileäpintaisia. (Ebeling 1983, 67; Lumiainen 2000, 86–122.)

Jauhatuksessa kuitujen sitoutumiskykyä kehitetään mekaanisesti rasittamalla niitä jauhinterien välissä, jossa kuidut notkistuvat. Kuidun notkistusprosessiin vaikuttaa rakenteen löystyminen ja primääriseinän poistuminen, jolloin huonosti liukeneva ligniini osittain katoaa. Tämän seurauksena lietteessä olevien kuitujen sisäiset sidokset aukeavat ja kuidut turpoavat kasvattaen sitoutumispinta-alaansa. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 112–113.)

Jauhatusprosessin kemiallisesti erotetut kuidut irtoavat toisistaan paremmin, ovat vahingoittumattomampia ja sisältävät vähemmän jäykistävää ligniiniä kuin mekaanisesti erotetut kuidut. Tämä tarkoittaa, että kemiallisesti erotettujen puukuitujen sitoutumisominaisuudet ovat paremmat kuin mekaanisesti erotetuilla, jotka katkeavat jauhatuksessa enemmän. (KnowPap 2018)

Jauhatusprosessin tavoitteena on muokata kuituja niin, että niiden sitoutumiskyky saadaan aktivoitua. Oikein muokatut kuidut antavat tuotetulle kartongille ja paperille haluttuja ominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 113–115.)



## 2.1 Jauhatustapahtuma

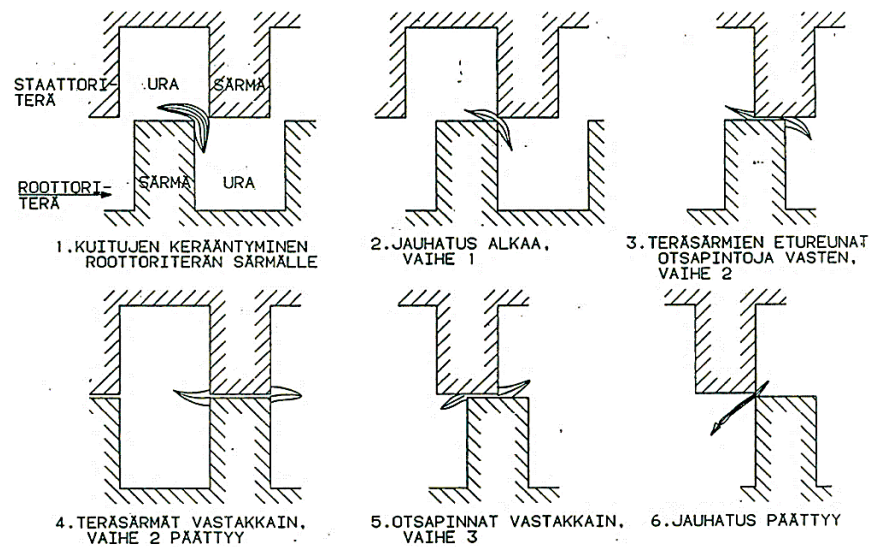
Jauhatustapahtuma on yksi tärkeimmistä paperin ja kartongin valmistusosaprosesseista. Jauhatuksella on mahdollisuus vaikuttaa kuitujen ominaisuuksiin ja sitä kautta myös paperin tai kartongin laatuarvoihin. Osa ominaisuuksista paranee, kuten vetolujuus, ja osa huononee, esimerkiksi opasiteetti. Tämä tarkoittaa, että jauhatuksessa joudutaan tekemään mahdollisimman kustannustehokas kompromissi valmistettavan tuotteen, jatkojalostuksen ja loppukäytön kannalta. (KnowPap 2018)

Jauhatus tapahtuu staattorin ja roottorin välissä, joka on suuruudeltaan suunnilleen 0,1 mm. Tämä etäisyys vastaa 2–5 jauhamattoman tai 10–20 jauhetun kuidun paksuutta. Ensin massankäsittelysystemissä vesilietteessä olevia kuituja muokataan homogeeniseksi massaksi haluttuun sakeuteen. Tyypillisen massan sakeus massankäsittelysystemissä on noin 3–5 prosenttia. Massa pumpataan jauhimen teräväliin, jossa itse jauhatustapahtuma toteutuu. (Lumiainen 2000, 87–88; Sepsilva Ltd Oy 1997, 24.)

### 2.1.1 Jauhatuksen vaiheet

Jauhatustapahtuma voidaan jakaa kuuteen päävaiheeseen, joka on esitetty kuvassa 1:

- 1) Kuitujen kokoontuminen roottorinterän särmälle
- 2) Jauhatus alkaa (vaihe 1) ja särmien pinnat kohtaavat kuitukimpun pinnat
- 3) Terässärmien etureunat asettuvat otsapintoja vasten (vaihe 2)
- 4) Terässärmät asettuvat vastakkain (vaihe 2 päättyy)
- 5) Otsapinnat sijoittuvat vastakkain (vaihe 3)
- 6) Jauhatuksen lopetus



KUVA 1: Jauhatustapahtuman vaiheet, alkaen kuvan vasemmasta yläkulmasta. (Lumiainen J. 1989, 12.)

Aluksi yksittäisessä jauhatustapahtumassa massan kuidut kerääntyvät kuitukimppuna teräsärmien välin, jossa roottorin liikkeessä päästään seuraavan vaiheeseen. Tässä vaiheessa roottorin ja staattorin särmät ovat vastakkain. Tämän vaiheen tarkoituksena on, että kuiduista poistuu kuitukimppuihin sitoutunutta vettä yhdessä lyhempien kuitujen kanssa terissä oleviin uriin kovan iskun ja paineen seurauksena. Seuraavassa vaiheessa otsapintojen väliset kuitukimput litistyvät samalla kun teräsarmat etenevät niiden pintaa pitkin. Jauhatuksessa kuormittavin ajanjakso on se, jossa kuitukimppujen sisältämät kuidut muokkaavat toisiaan puristamisesta syntyvän kitkan avulla. Vaihe päättyy, kun roottorin kuormittava terässärmä kohtaa staattorin seuraavan särmän, jolloin terien otsapinnat ovat kokonaan vastakkain. Roottorin liikkeessä seuraavan staattorin teräsarmää kohti kuitukimppu, joka on muokkautunut, vapautuu puristuksesta ja yksittäinen jauhatustapahtuma loppuu. (Lumiainen 2000, 87–88.)

### 2.1.2 Flokkijauhatushypoteesi

Jauhatustapahtuma on suljetun systeemin prosessi, josta ei ole mahdollista ottaa massanäytteitä ja tarkasti määrittää puukuitujen käyttäytymistä jauhimessa. Tämän seurauksena kuitujen jauhatustapahtumaan pätee flokkijauhatushypoteesi.

Flokkijauhatushypoteesi voidaan tiivistää oletuksiin jauhatuksen ominaispiirteistä, joista olennaisin on jauhatuskäsittelyn epätasaisuus eli se, kuinka osa kuiduista saa rajun

käsittelyn ja osaa ei käsitellä käytännössä ollenkaan. Jauhimessa kuidut ovat kuitukimppuina eli flokkeina, joista osa kulkee jauhatusvyöhykkeen läpi jauhimen terien urissa joutumatta lainkaan jauhatuskäsittelyyn, koska teräväli 50–100 µm on pieni suhteessa flokkien tyypilliseen 1-5 millimetrin paksuuteen. Jauhatusvoimat kohdistuvat siis yksittäisten kuitujen sijaan flokkeihin ja jauhimen teräväliä voidaan käyttää massan flokkisuustilan kuvailuun. Osin edellä mainituista ilmiöistä johtuen jauhatuksen yksi ominaispiirre on myös suuri energiankulutus. (KnowPap 2018)

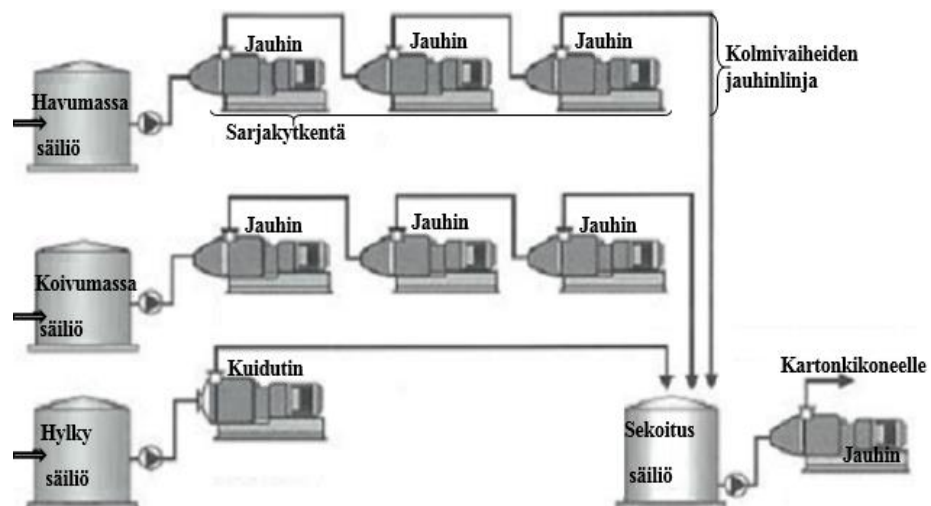
## 2.2 Jauhatusjärjestelmä

Jauhatusjärjestelmä on useiden rinnakkain tai sarjaan kytkettyjen jauhimien paperi- ja kartonkikoneella oleva järjestelmä, jonka avulla massankäsittelystä vastaanotettu jauhamaton massa muutetaan jauhamalla käytännölliseen muotoon. Jauhatuslinjan toteutustavan yleisiä vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi jauhatusmassan laatu ja sen määrä, tarvittava jauhatuskapasiteetti ja varsinkin lopputuotteen vaatimukset sekä loppukäyttö. Tehtaiden olosuhteissa tarvittava jauhatuskapasiteetti asettaa jauhimien tarvelukumäärän ja niiden kokoluokat. Lisäksi eri massalajien mukaisesti tuotettavan paperin ja kartongin laatuvedellytykset säätävät jauhatustavan luonnetta. Jälkimmäiseen voidaan vaikuttaa jauhatustapahtuman olosuhteilla, kuten jauhatussakeudella, sekä käytettävillä terätyypeillä ja terägeometrialla. (Koskenhely 2007, 122; Lumiainen 2000, 101.)

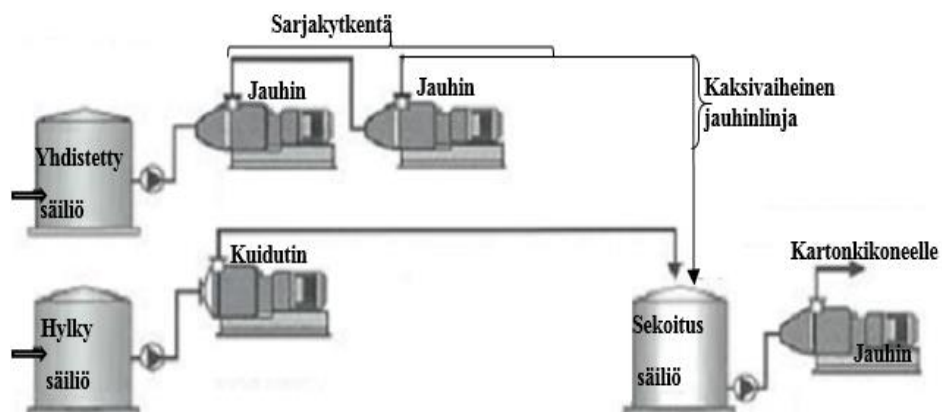
Jauhinlinja voi olla erillinen ja yhdistetty. Erillisen jauhatusjärjestelmän mukaan eri massalaadut jauhetaan omalla jauhinlinjalla, vastaavasti yhdistetyillä järjestelmillä massat käsitellään samalla jauhinlinjalla eli massalaadut sekoitetaan ennen jauhimia. Jauhinten määrä eli vaiheiden lukumäärä molemmissa tapauksessa määräytyy kapasiteetin vaihteluiden ja tavoiteltavan jauhatustuloksen perusteella. (Koskenhely 2007, 100). Toisaalta vaiheiden lukumäärä riippuu vaatimuksista jauhatusasteen ja haluttujen kuituominaisuuksien suhteen. (KnowPap 2018) Tästä seuraa, että isompi jauhatuksen tarve vaati enemmän jauhimia.

Erilaisen jauhatustavan vaativia massalajeja säädetään erillisissä jauhatuslinjoissa. Tällöin jauhatus pohjautuu jokaisen massalajin ominaisuuksiin, jotta saadaan parempi massakohtainen jauhatuksen laatu sekä alhaisemmat jauhatuskustannukset. Erillinen jauhatuslinja edellyttää enemmän tehdaspinta-alaa kuin yhdistetty jauhatuslinja. Tämän seurauksena vanhojen paperi- ja kartonkikoneiden jauhatuslinjojen modifiointi ei ole aina mahdollista, jolloin yhtenäinen jauhatuslinja on kannattavampi valinta. (Lumiainen 2000, 101–102.)

Erillinen jauhatusjärjestelmä on esitetty kuvassa 2 ja yhdistetty kuvassa 3. Kummastakin kuvasta voidaan nähdä myös vaiheiden lukumäärä ja kytkentätapa. Ehdotetuissa esimerkeissä jauhinlinjojen läpi pumpataan syöttöpumpulla massa annostelusäiliöistä sekoitussäiliöön ja sieltä viimeistelyjauhimen kautta kartonkikoneelle.



KUVA 2: Erillinen jauhatusjärjestelmä. (Lumiainen 2000, 102. muokattu)



KUVA 3: Yhdistetty jauhatusjärjestelmä. (Lumiainen 2000, 102. muokattu)

Lisäksi jauhatusjärjestelmään on viimeisen jauhimen jälkeen mahdollista asettaa massan takaisinkytkentälinja, joka on riippuvainen tuotannon vaihteluista. Tällaisessa kytkennässä osa jauhetusta massasta toimitetaan takaisin syöttöpumppuun liittämällä se imuputkistoon ennen sekoitussäiliötä. Takaisinkytkennän tarkoituksena on vahvistaa massanvirtaus jauhimien läpi tuotantotilanteesta riippumatta. (Lumiainen 2000, 116.) Jauhatusjärjestelmän jauhatustulokseen vaikuttavat jauhatuslinjassa olevat jauhinluokat, jauhinterät ja terägeometria.

### 2.3 Jauhintyyppit

Jauhatusmenetelmät ovat kehittyneet viimeisten vuosisatojen iskevästä järjestelmästä moderneihin jatkuvatoimisiin jauhimiin. Jauhatusjärjestelmien ja jauhatustekniikan kehittymisen ensisijaiset vaikutukset ovat tuotantotehon kasvaminen ja siitä kautta jauhatuskapasiteetin lisääntyminen. Massanjauhatusta voidaan suorittaa erityyppisillä jauhimilla, joiden valinta on riippuvainen jauhettavasta massasta ja valmistettavasta lopputuotteesta. Jauhimet voidaan jakaa kolmeen erilaiseen tyyppiin, joita ovat sylinteri-, levy- ja kartiojauhimet. (Koskenhely 2007, 94; Syrjänen & Oivanen 1983, 453–454.)

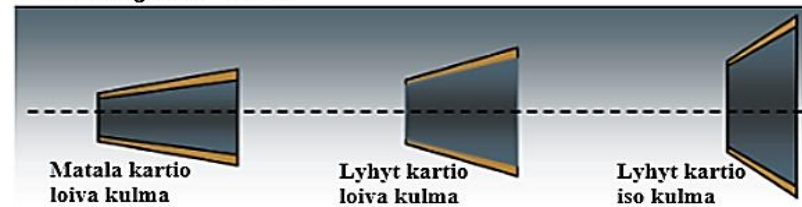
Teoreettisesti jauhimia on kahta päätyyppiä eli levy- ja kartiojauhimet, koska sylinterijauhimet ovat kartiojauhimia, joiden kartiokulma on nolla. (KnowPap 2018) Kartiojauhimilla on monia etuja levyjauhimiin verrattuna, esimerkiksi suuri jauhatuspinta, laaja jauhatusvyöhyke ja pitkä viipymäaika sekä yksi stabiili rako monirakoisesta sijasta. Lisäksi virtauskuvio on keskipakovoiman suuntainen, mikä auttaa ajamaan kuituja ja puhdistamaan terävälejä. (Hägblom- Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 113–115.)

Erytyyppisillä jauhimilla on omanlaiset jauhatusparametrit ja rakenne. Kartio- ja levyjauhintyyppien keskeiset systeemit ovat näkyvissä kuvassa 4 sekä tyypilliset parametrit on esitetty taulukossa 1. (Lumiainen 2000, 99–101.)

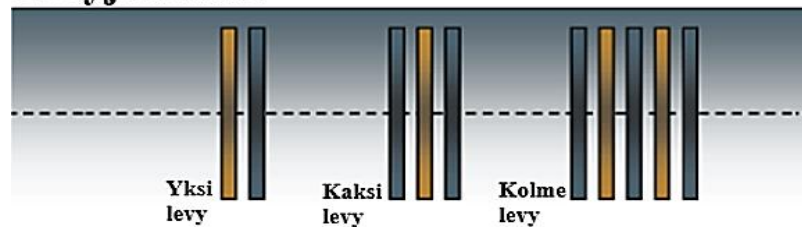
TAULUKKO 1: Tyypilliset kartio- ja levyjauhimien parametrit havumassalle. (KnowPap 2018)

Jauhin	Teräsharjan leveys [mm]	OSK [J/m]	OPK [J/m <sup>2</sup> ]	Massan sakeus [%]
<b>Kartiojauhin</b>	3,5 – 5,5	0,9 – 6,0	250 – 1000	3,5 – 4,5
<b>Levyjauhin</b>	3.0 →	1.5 – 4,0	500 →	3,5 – 4,5

### Kartiojauhimet



### Levyjauhimet



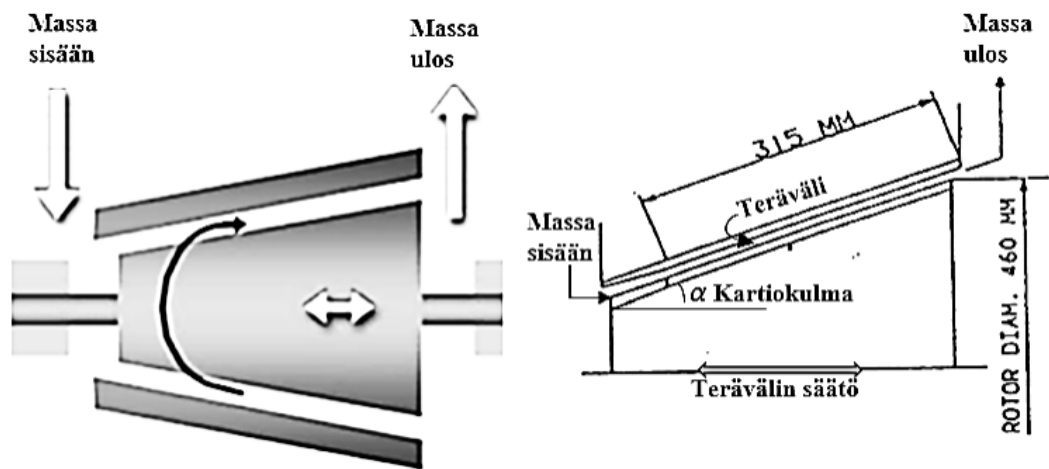
KUVA 4: Kartio- ja levyjauhintyyppejä. (KnowPap 2018, muokattu)

Yleisesti levyjauhimen käyttökohde on mekaaniset massat ja kartiojauhintyyppillä kemialliset massat. On kuitenkin tapauksia, joissa kartiojauhimella hienonnetaan mekaanista massaa. Tämä johtuu fibrilloitumisen tehostamisesta ja pyrkimyksestä lujuusominaisuuksien parantamiseen, joka saavutetaan kartiojauhimella tehokkaammin kuin levyjauhimella. (Koskenhely 2007, 94.)

#### 2.3.1 Kartiojauhin

Kartiojauhimen nimitys tulee kartiomuotoisista teristä, jotka on esitetty alla kuvassa 8. Ulkoinen terä toimi staattorina ja sisäinen terä roottorina, joka pyöri akselinsa ympäri. Massa syötetään jauhimeen syöttöyhteen, joka sijaitsee kartion kapeammassa päässä. Jauhettava massa kulkee koko jauhimen läpi staattorin ja roottorin terävälissä jauhatusaluetta pitkin ja lähtee poistoputken kautta seuraavaan vaiheeseen, esimerkiksi sekoitussäiliöön. Kartiojauhimen kuormitusta säädetään pyörivän roottorin positiota muuttamalla jauhatustapahtuman kontrolloimiseksi. Jauhimen geometria sekä toimintaperiaate havainnoidaan kuvassa 5, jossa oikealla puolella terävälän ja

kartiokulman muodostuminen sekä vasemmalla puolella jauhattavan massan kulku jauhatuspierin läpi. (Koskenhely 2007, 111; Knowpap 2018)

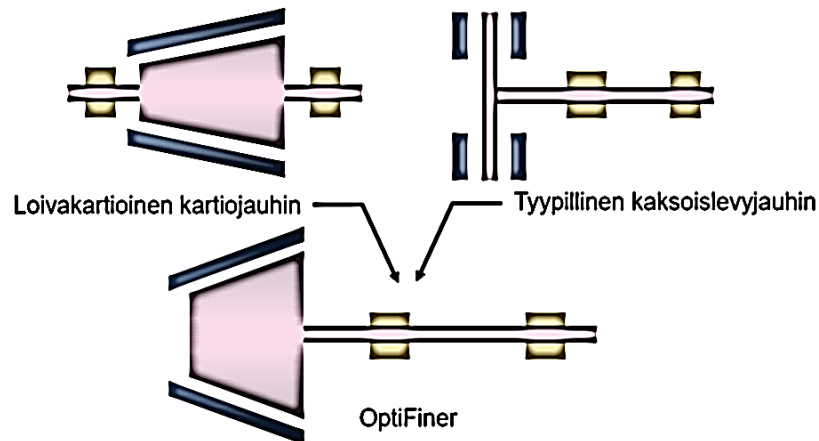


KUVA 5: Kartiojauhimen JC-01 toimintaperiaate (vas.) ja geometria (oik.). (Loijas M. 2018)

Ensimmäinen kartiojauhin oli matalan kartiokulman Jordan-tyyppinen jauhin, joka on varustettu läpiakselilla eli tällöin jauhimen rakenteessa pyörivä roottori on laakerointien välissä. Itse asiassa jauhinta käytettiin karkeilla terillä katkovan jauhatusvaikutuksen saavuttamiseksi. Seuraavaksi tuli Claflin-tyyppinen jauhin, jossa oli mahdollista säätää terien pituutta hyvin lyhyemmäksi ja jyrkemmäksi noin 30 asteen kartiokulman avulla. Molempien jauhinten rakenneheikkous on läpiakseli, koska jauhinterien vaihto ja muut jauhimen kunnossapitotyöt olivat hankalia. Kartiojauhimen nykyisessä rakenteessa ei ole läpimenevää akselia, vaan akselin laakerointi realisoituu akselin päässä olevaan pyörivään roottoriin ja jauhimen avattavaan kanteen kiinnitettyyn staattoriin. (Koskenhely 2007, 111; KnowPap 2018; Lumiainen 2000, 98–99.)

Loivakartiojauhimen parantamisessa keksittiin nykyaikainen kartiojauhin, jolla kartiokulma on noin 20 astetta. Tämä pieni kartiokulma on edullinen, koska sen kasvattaminen suurentaa terien halkaisijaa ja häviötehoa. Kuvassa 6 on esimerkinomaisesti esitetty modernityyppinen kartiojauhin Optifiner, joka syntyi loivakartio- ja kaksoislevyjauhimen konseptien kehityksestä. Innovaatioiden tuloksena jauhimen konsepti soveltuu mekaanisen ja kemiallisen massan sekä kiertokuitujen prosessointiin haluttujen kuituominaisuuksien saavuttamiseksi. Kyseisen jauhimen keskeiset hyödyt kohdistuvat kuitujen mekaaniseen muokkaamiseen, säätöpotentiaalnin toimintaan ja tekniseen käyttöön. Esimerkki jauhimen hyödystä on homogeenisempi

jauhatustulos tasaisemman massansyötön seurauksena, joka syötetään suoraan jauhatusvyöhykkeen teräsärmille. Lisäksi yleinen kartonkikoneen ajettavuus, prosessin automatisointi sekä helppo ohjaus ja kunnossapito. Asianmukaisen säädön mukaan pieni energian kokonaiskulutus on myös ominaista tälle jauhintyyppille. (Loijas M. 2018)

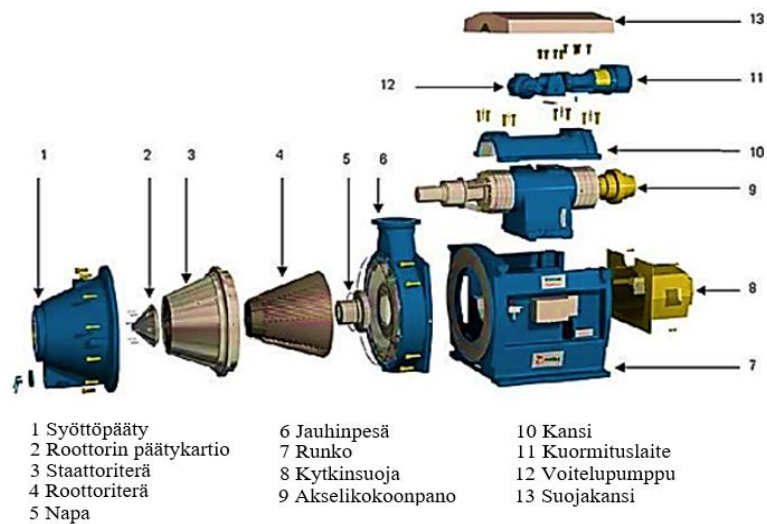


KUVA 6: Kartiojauhimen OptiFinerin kehitys. (Loijas M. 2018)

Kartiojauhimia on saatavilla erilaisilla kokoluokilla ja terävälivaihtoehdoilla, riippuen siitä, missä olosuhteissa jauhinta käytetään. Esimerkiksi erään jauhinvalmistajan mukaan on saatavissa kuusi eri kartiojauhinluokkaa, joilla tehon laajuus vaihtelee 200 kilowatista 3000 kilowattiin sekä teräväliä voidaan säätää sähkömekaanisesti. (Koskenhely 2007, 111.)

Modernityyppisen jauhimen pääkomponentit voidaan nähdä kuvasta 7. Optimaalisessa käyttökohteessa yksi uudentyyppinen kartiojauhin voi kompensoida kahta perinteistä kartiojauhinta. Jälkimmäisessä jauhimessa puukuidut kulkevat koko jauhatuspiirin läpi, jolloin vain osa kuiduista saa jauhatuskäsittelyä, mikä aiheuttaa hienoaineen syntymistä, käsiteltyjen kuitujen heikkenemistä sekä tehotonta energian kohdistumista kuituihin. Uudentyyppisen jauhimen rakenne mahdollistaa tasaisen jauhatuksen, jolloin käsiteltyjen puukuitujen määrä on suurempi, kun jauhatusterien pituus sekä koko jauhatuspiiri on tehokkaasti käytetty. Lisäksi uudentyyppisen jauhimen jauhatustehokkuus on suurempi kuin muilla jauhimilla. (KnowPap 2018; Loijas M. 2018)





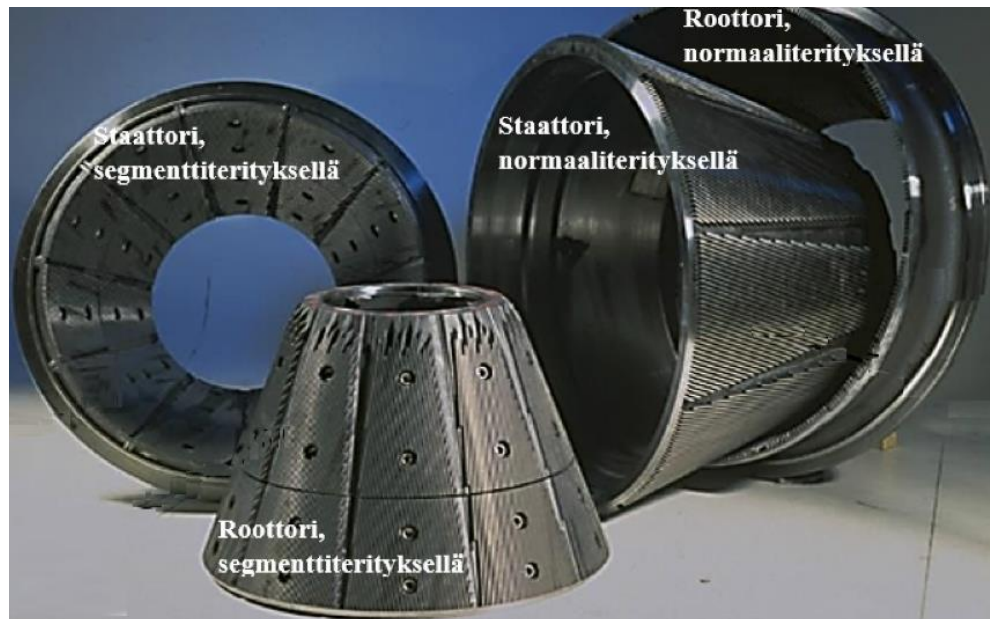
KUVA 7: Kartiojauhimen pääkomponentit. (Loijas M. 2018)

## 2.4 Jauhinterät

Yksi tärkeimmistä tekijöistä jauhatuksen onnistumisessa ovat hyvät ja oikeat terät, sillä jauhimen jauhatusenergia siirretään terien kautta muokattaviin kuituihin. Terien ominaisuuksiin vaikuttavat teräsmateriaali, mittapysyvyys ja teräsgeometrian valinta, jotka ovat merkittävästi riippuvaisia jauhatettavan massan laadusta ja jauhintyyppistä. Terien materiaalin on kestävä jauhatusprosessin rasituksia ja lämmönvaihteluita. Terämateriaalin on oltava kova, mutta samalla sitkeä, jotta jauhatuksessa teräpinnat eivät kiillotu, vaan pysyvät mahdollisimman pitkään alkuperäisessä laadussa. Muita vaadittavia terämateriaalin ominaisuuksia ovat murtolujuus, korroosion kesto ja kulumiskestävyys. Viimeisellä on suora yhteys energiankulutukseen, koska teräsärmän ja liiallisen pyöristymisen yhteydessä energiankulutus kasvaa ja heikentää kuitujen jauhautuneisuutta. (Lumiainen 2000, 116; Syrjänen & Oivanen 1983, 461.)

Jauhinterät voivat olla kiinteät eli valmistettu yhdestä kiinteästä osasta tai segmenteittäin eli jauhimen terät koostuvat useammista teräsegmenteistä. Segmentin teräkuviointi muodostuu monista teräharjanteista sekä niiden välisistä urista, jossa teräharjanteen särmä- ja otsapinnat rasittavat kuituja jauhatustapahtumassa. Terien perinteisinä valmistusmenetelminä käytetään yleensä valamista, koneistamista ja hitsaamista. Terägeometrian mittavariaatiot, jotka mahdollistavat erittäin kapeiden teräurien ja -harjanteiden valmistamisen, ovat lisääntyneet laserteknologian kehityksen aikana. Käytetyin terämateriaali on ruostumaton teräs, mutta tarvittaessa materiaalia on

mahdollista muokata prosessiolosuhteisiin sopivaksi. Yleisimmin käytetyt kartioterät ovat nähtävissä kuvassa 8, jossa vasemmalla puolella segmenttiterät ja oikealla kiinteät eli normaaliterityksen mukaiset terät. (Koskenhely 2007, 128.)








KUVA 8: Kaksi kartiojauhimen teräparia, joista vasemmalla puolella olevat terät segmenttiterityksellä ja oikealla kiinteät kartioterät normaaliterityksellä. (Loijas M. 2018, muokattu)

### 2.4.1 Terägeometria

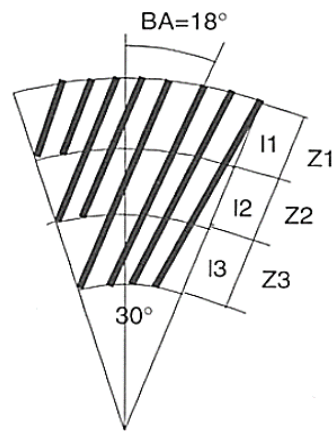
Terägeometrian avulla voidaan määrittää kuituihin kohdistuvan rasituksen luonne ja jauhatusvoimien keskittyminen. Lisäksi terägeometriat muodostuvat teräurien- ja harjanteiden mitoista sekä jauhimen jauhatuspinta-alasta. Teräsegmenttien säädettäviin parametreihin kuuluvat teräurien syvyys ja leveys sekä niiden radiaalikulma ja teräharjanteen leveys ja pituus. Yleensä roottorin ja staattorin terien välinen leikkauskulma on noin 20–35 astetta, joka on riippuvainen jauhattavasta massasta ja halutusta jauhatustuloksesta. Leikkauskulman avulla voidaan vaikuttaa jauhimen käyttöön ja samalla estetään kuituja katkovaa ominaisuutta. Oikeanlaisen teräkuviointin valinta perustuu jauhattavan massaan, jauhatustavoitteisiin ja jauhatusolosuhteisiin. Esimerkiksi vahvoille ja pitkille havupuukuiduille tarvitaan leveämmät teräurat ja -harjanteet kuin heikoille ja lyhyille kuiduille. Taulukossa 2 on esitetty tyypillisiä

jauhinterien mittoja erilaisille massalaaduille sekä niiden sovellettavuus fibrilloivassa ja katkovassa jauhatuksessa. (Lumiainen 2000, 115.)

TAULUKKO 2: Tyypillisiä jauhinterien mittoja erilaisille massalaaduille ja jauhatustavalle. (Loijas M. 2018.)

Sovellus	Terän leveys, mm.	Uran leveys, mm.	Muoto
Lehtimassa	2.0 – 3.0	3.0 – 4.0	
Seosmassa	3.5	4.5	
Havumassa	4.0 – 5.5	5.0 – 7.0	
Fibrilloiva jauhatus	4.0 – 8.0	3.0 – 5.0	
Katkova jauhatus	2.5 – 4.5	7.0 – 9.0	

Terien leikkausnopeuden  $L_s$  (luku 6, yhtälö 5) on laskettavissa ominaissärmäkuorman  $OSK$  yhtälöstä (4) (luku 6). Leikkauspituus voidaan johtaa yhtälöstä (5) kun kierrosnopeutta  $n$  otetaan pois, niin silloin tarkastellaan teräkohtaista leikkaussärmäpituutta (CEL). CEL kertoo yhden teräparin ja yhden kierroksen aikana leikkaavien teräsärmien pintojen yhteispituuden. Leikkaussärmäpituuden laskenta on esitetty kuvassa 9, jossa CEL on leikkauspituus [Km/r],  $Z_{st}$  on staattorin teräharjojen lukumäärä,  $Z_r$  on roottorin teräharjojen lukumäärä sekä  $l$  on teräsärmien kontaktipituus [km]. (Koskenhely 2007, 116; Loijas M. 2018; Lumiainen 2000, 93.)



$$CEL = Z_r * Z_{st} * l$$

Roottori ja staattori sisältää 12 segmenttiä (360/30), jokaisessa segmentissä on

- \* 4(neljä) 315 mm pitkiä harjoja
- \* 2(kaksi) 210 mm pitkiä harjoja
- \* 2(kaksi) 210 mm pitkiä harjoja

$l_1=l_2=l_3=100$  mm,  
todellinen pituus =  $l_1 \dots l_3 / \cos BA$

Yksi kierros sisältää

- \* Zone1 =  $96r+96st$  harjaa, 105 mm kpl
- \* Zone2 =  $72r+72st$  harjaa, 105 mm kpl
- \* Zone3 =  $48r+48st$  harjaa, 105 mm kpl

Leikkauspituuden laskenta

- \* Zone1  $96 * 96 * 0,105$  m = 967,7 m/r
- \* Zone2  $72 * 72 * 0,105$  m = 544,3 m/r
- \* Zone3  $48 * 48 * 0,105$  m = 241,9 m/r

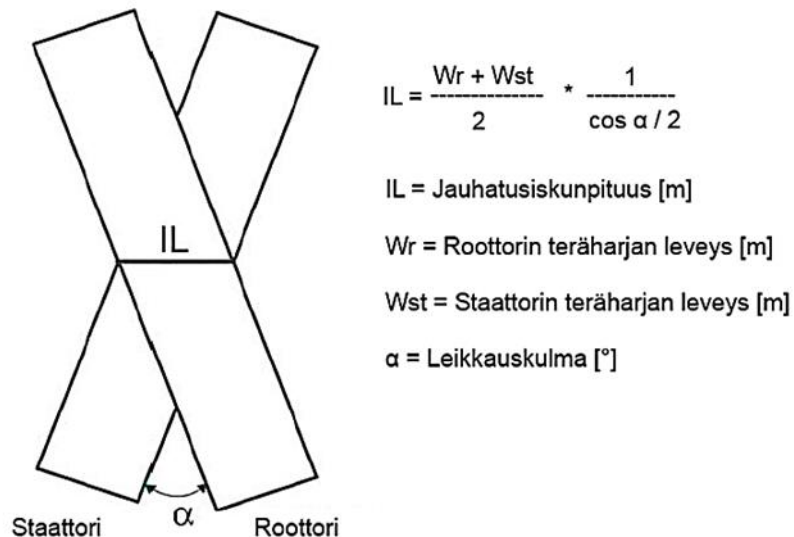
Yhteensä (Zone1.....Zone3) = 1753,9 m/r

CEL = 1,754 km/r yksilevyjauhimelle tai kartiojauhimelle  
= 3,508 km/r kaksilevyjauhimelle

KUVA 9: Leikkaussärmäpituuden laskenta. (Lumiainen 2000, 93.)

Staattorin ja roottorin teräharjojen yhdistetty pituus on toisin sanoen terien leikkauspituus, ja se on riippuvainen jauhimen teräharjojen lukumäärästä ja kokoluokasta sekä jauhintyyppistä. Tämä tarkoittaa, että kuituihin kohdistuvaa jauhatustensiteettiä muuttamalla jauhatuksen määrää voidaan lisätä. Suuren leikkauspituuden ansioista teräpintojen määrä kasvaa ja samalla parantaa kuitujen jauhautuneisuutta eli todennäköisyyttä päästä rasitettavaksi teräpintoihin. (Loijas M. 2018; Lumiainen 2000, 94–95.)

Jauhatuskunpituuden (IL) laskiessa hyödynnetään ominaispintakuorman (OPK) yhtälöä (9). IL voidaan määrittää sekä roottorin että staattorin teräharjanteiden leveyden ja kulman perusteella. Kuvassa 10 alla on esitetty jauhatuskunpituuden laskenta. IL-luku kertoo sen matkan pituuden, minkä kuidut saavat kuormituksessa teräharjojen otsapintojen välissä. (Lumiainen 2000, 95.)



KUVA 10: Jauhatusiskunpituuden laskenta. (Lumiainen 2000, 95. muokattu)

Terägeometrian valinnassa on otettava huomioon massanlaatu, jauhatustulos sekä jauhatustapa. Lisäksi tulee huomioida kolme hyvin tärkeää tekijää, jotka ovat terien virtauksen käsittelykyky, teräsärmien kulutuskestävyys ja terien kyky muokata puukuidun rakennetta. Jälkimmäistä kuidun muokkauskykyä pidetään tärkeimpänä, koska jauhimen ensisijainen tarkoitus on muuttaa puukuidun rakennetta. Toisaalta terät, jotka muokkaavat hyvin kuituja ovat hyödyttömiä, jos teräkuviointi ei edistä virtauksen käsittelykykyä, joka jauhatustuloksen kasvaessa pienenee. (J&L Fiber Services 1999.)

Tähän mennessä on käsitelty yleisellä tasolla jauhatustapahtuma, jauhatussysteemit sekä jauhintekniikka, jotka pohjaavat jauhatuksen vaikutuksia. Esimerkiksi jauhatuksen vaikutus kuituihin ja eri puumassoihin (luku 7.6.1 Suotautuvuusmittauksen tulokset) sekä paperi- ja kartonkiominaisuuksiin (luvut 7.6.2–7.6.3 Sileys- ja karheusmittausten tulokset –Jauhatuksen ja ominaisuuksien väliset matriisitulokset). Mainittuja vaikutuksia voidaan vahvistaa jauhatusteorioilla ja jauhatuksen säädöillä, joihin jauhintyypeillä ja terägeometrialla on suuri merkitys.

### 3 ERI PUUMASSOJEN JAUHATUS

Eri massojen jauhatuksessa on otettava huomioon massalajin kemiallinen rakenne. Esimerkiksi mänty- ja koivupuusellun kemiallisessa koostumuksessa on eroja niiden aineosissa, mutta selluloosapitoisuus molemmissa massalajeissa on 40 %. Männyn hemiselluloosan pitoisuus on 25–30 % välillä, mikä on hieman vähemmän kuin koivun 30–35 %. Ligniinipitoisuus mäntysellulla on noin 25–30 %, mikä on suurempi kuin koivusellun ligniinipitoisuus, joka johtuu koivun korkeammasta selluloosapitoisuudesta. Jauhatettavan massan kemiallinen koostumus määritetään valmistusprosessin avulla. Esimerkiksi matala keittoprosessin saanto voi nopeuttaa massan jauhautuvuutta, toisaalta keittokapan (kappaluku kuvaa massan ligniinipitoisuutta) vähentyessä jauhattavuus hidastuu. Hemiselluloosapitoisuuden korottuessa massan jauhatusenergiämäärä laskee lisättyjen kuitujen joustavuutta, mutta samalla lopputuotteen repäisylujuus ja bulkki laskevat. (Stora Enso 2018; Vahlroos 2005, 28.)

#### 3.1 Havupuumassan jauhatus

Havupuun kuitudimensiot vaihtelevat puun maantieteellisen sijainnin sekä keräyskauden mukaan. Esimerkiksi pohjoismaisen havupuukuidun pituus on noin 2,0–4,0 mm sekä kuitujen paksuus on noin yksi prosentti kuidun pituudesta. Tällä massalajilla on hyvät lujuusominaisuudet. Yksi lujuusominaisuuksista on vetolujuus, jolla on verrannollinen yhteys rajumpaan jauhatukseen. Toisin sanoen vetolujuus kasvaa melko nopeasti rajumman jauhatuksen vaikutuksesta. Havupuumassoilla on hyvä vetolujuuden ja repäisylujuuden keskinäinen suhde, mutta repäisylujuuden kehittämiseen on valittava fibrilloiva jauhatustapa. Varovainen jauhatustapa ehkäisee repäisylujuuden laskemista jauhatuksen edistyessä, koska sen maksimi yleensä saavutetaan jauhatuksen alkuvaiheessa. Havumassojen opasiteetti laskee jauhatuksen edetessä ja se on alhaisempi lehtipuumassoihin nähden. (Stora Enso 2018; Levin 1982, 6; Lumiainen 2000, 118–120.)

Käytännössä havumassasta puhuttaessa käytetään myös termiä armeerausmassa. Termillä tarkoitetaan pitkäkuituista massaa, joka antaa kartongille lujuutta sekä ajettavuutta kartonki- ja painokoneella. (Levlin 1982, 1–6.)

### 3.2 Lehtipuumassan jauhatus

Lehtipuukuidut ovat kooltaan ohuita ja lyhyitä suhteutettuna havupuukuituihin. Lehtipuukuidun pituus on noin 1,0–2,0 mm ja paksuus on suunnilleen 0,025 mm. Lehtipuusellun jauhatuksen tärkein tavoite on kehittää lopputuotteen optisia ja painettavuusominaisuuksia sillä tavalla, ettei lujuus heikentyisi. Lyhyelle kuidulle soveltuu parhaiten hellavarainen eli fibrilloiva jauhatustapa. Lehtipuusellulla on heikko kuormituksen kantokyky, joka suuremmalla kuormituksella saattaa aiheuttaa staattorin ja roottorin välisiä teräkosketuksia ja sen seurauksena terien kulumista. Lehtipuukuitujen morfologian ansioista kuidut jauhautuvat helpommin ja edellyttävät vähemmän energiaa. (KnowPap 2018, Levlin 1983, 29.)

### 3.3 Kuivatun sellun jauhatus

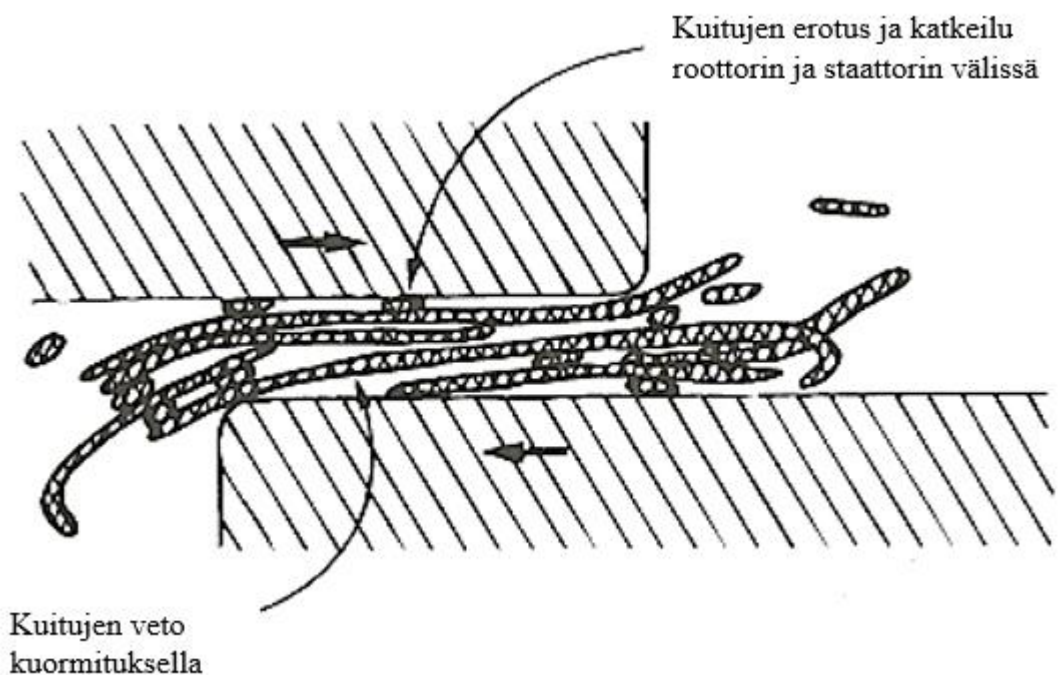
Kuivatun sellun jauhatuksessa on tietynlaisia haasteita, ja yksi niistä johtuu nimenomaan massan kuivatusprosessista, jossa kuidulle tapahtuu palauttamattomia muutoksia. Massan muutokset näkyvät selkeämmin, kun saavutetaan noin 60–70 prosentin kuiva-ainepitoisuustaso, joka näkyy massan fysikaalisten ominaisuuksien avulla. Kuidun amorfiseen osaan ilmestyy vetysidoksia, jotka jauhatuksen ja vettymisen yhteydessä eivät rikkoutu vaivattomasti. Tästä seuraa, että kuivattujen kuitujen jauhatuksessa syntyy enemmän hienoainetta, koska ne eivät turpoa niin hyvin kuin kuivaamattomat kuidut. Rakenteeltaan kuivatut kuidut ovat hauraita ja kovia, ja niiden vedenpoistumiskyky on paljon alhaisempi kuin kuivaamattomilla kuiduilla. Lisäksi palauttamattomat kuitumuutokset kasvavat, kun hemiselluloosapitoisuus nousee. Käytännössä muutokset ilmenevät kuidun koossa, muun muassa tilavuudessa, kuidun ominaispinnassa ja notkeudessa. Kuivattu massa vaatii enemmän aikaa jauhatuksessa kuivaamattomaan nähden, mikä voidaan huomata SR-luvun eli suotautuvuusluvun ja lujuusominaisuuksien edistyessä. Lisäksi jauhatusenergian tarve kuivatuilla valkaistuilla massoilla voi olla puolet enemmän kuin kuivaamattomilla massoilla. (Ebeling 1983, 92–94; Levlin 1982, 14; Wang 2006, 6; Lumiainen J. 1989, 8–9.)

## 4 JAUHATUKSEN VAIKUTUS PUUKUITUIHIN

Yleisesti ottaen jauhatus vaikuttaa kuidun morfologiaan ja paperin ominaisuksiin. Luvussa neljä katsotaan tärkeimmät puukuituihin vaikuttavat tekijät jauhatusprosessissa.

### 4.1 Jauhatuksen vaikutus kuituihin

Yksittäisen jauhatustapahtuman perusvaikutus (kuva 11 suurennettu mittakaava) näkyy monenlaisina rakenteellisina muutoksina kuituissa. Perusvaikutuksilla eli primäärivaikutuksilla tarkoitetaan kaikkia tapahtumia, joiden perusteella jauhettu kuitu on erotettavissa jauhamattomasta. Kuidun morfologian perusteella erilaiset primäärivaikutukset liittyvät hyvin läheisesti toisiinsa, mutta vaikutusten laajuus vaihtelee aina kuidusta toiseen. (KnowPap 2018; Lumiainen 2000, 89.)

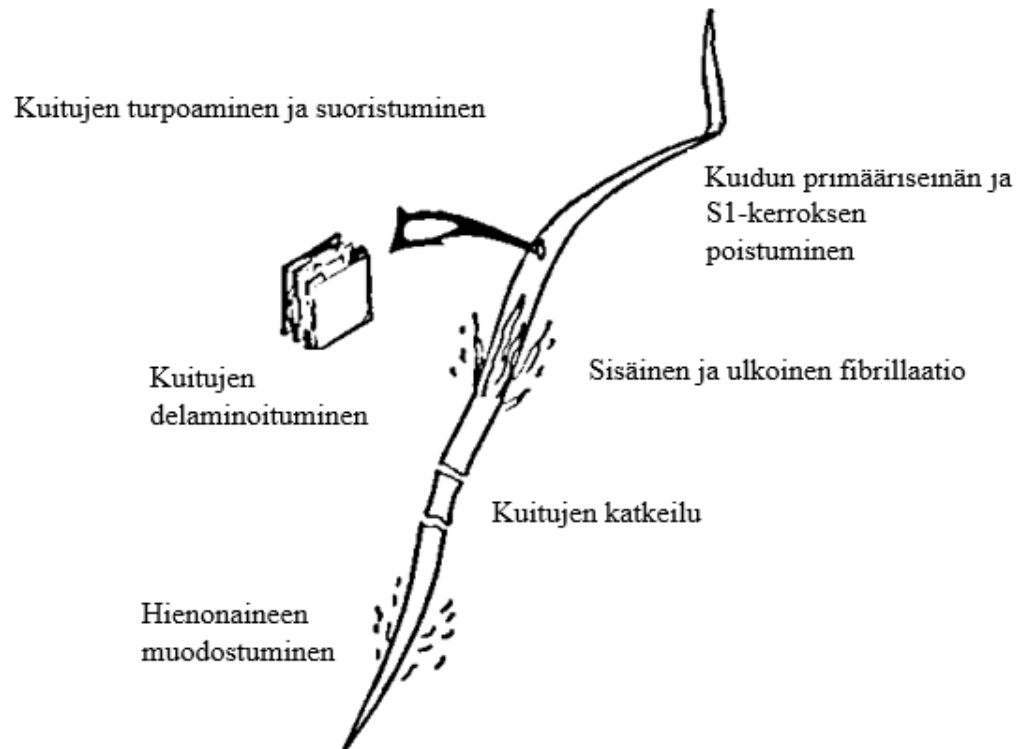


KUVA 11: Jauhatuksen vaikutus kuitukimppuun, joka on roottorin ja staattorin teräsärmien välissä. (Baker 2000, 117. muokattu)

Primäärivaikutusten avulla luvussa 2 esitetty flokkijauhatusteoria on yksinomaan kvalitatiivinen, eli eri primäärivaikutuksia ei ylipäätään pystytä kvantitatiivisesti



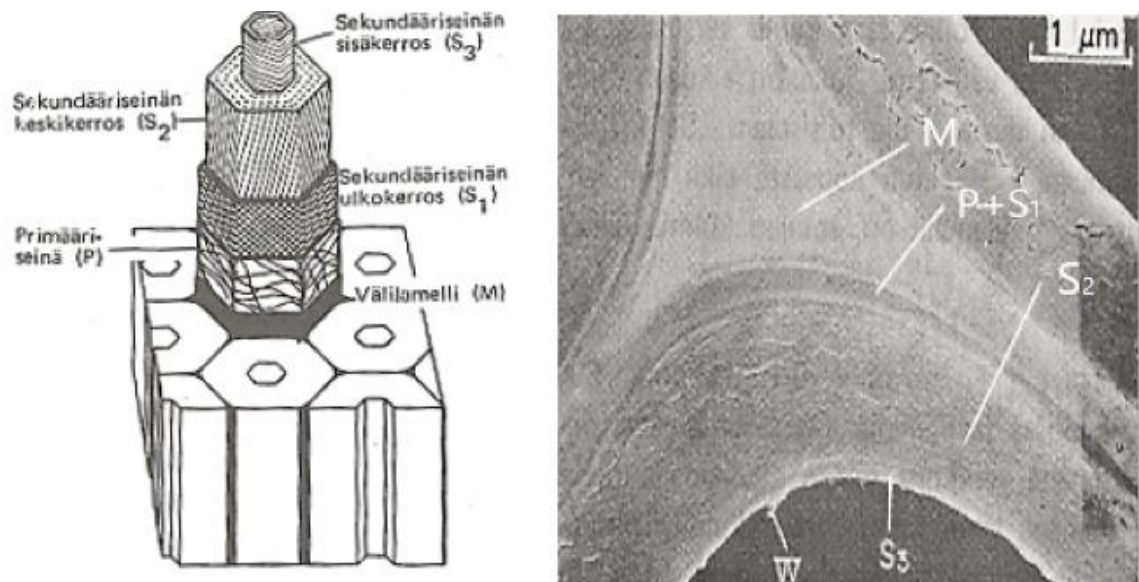
mittamaan (Ryti 1998, 43.). Jauhatuksen primäärivaikutukset (kuva 12) suspensiossa oleviin kuituihin ovat primäärikalvon poistuminen, ulkoinen ja sisäinen fibrillaatio, pintojen ja hienoaineen muodostuminen, kuitujen katkeilu ja suoristuminen, sekä kuidun seinämän osittainen liukeneminen.



KUVA 12: Jauhatuksen vaikutukset kuituihin. (KnowPap 2018, muokattu)

#### 4.1.1 Primäärikalvon poistuminen

Primäärikalvo on vettä läpäisevä, mutta turpoamaton. Se estää kuitujen turpoamista sekä kykyä muodostaa sidoksia naapurikuitujen kanssa. Kuvassa 13 alla primäärikalvoa vastaa primääriseinä, josta suurin osa häviää jo sellun keitossa ja valkaisuissa sekä loppu poistuu jauhatuksessa. (Ryti 1998, 44.)



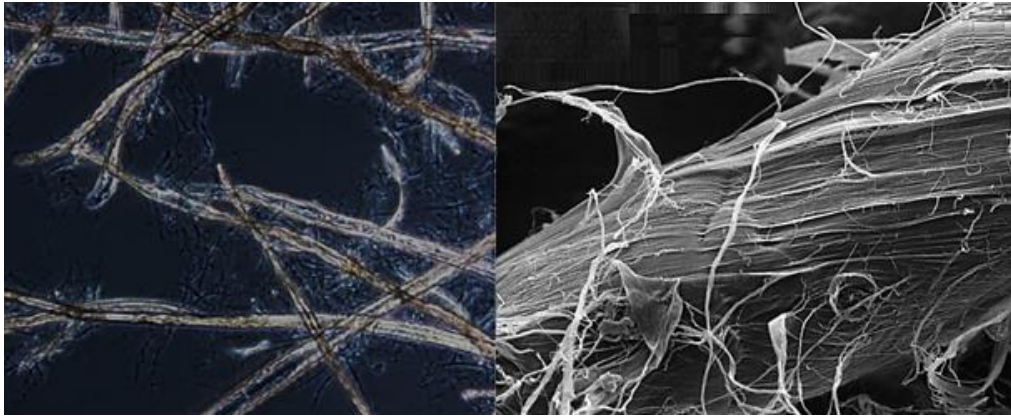
KUVA 13: Kaaviokuva puukuidun seinärakenteesta (vas.) ja soluseinän poikkileikkauksen elektronimikroskooppikuva (oik.). (Sjöström 1977, 22. muokattu)

Kuidun sekundääriseinämän avautuminen tapahtuu jauhatuksen alkuvaiheessa hyvin nopeasti, jolloin myös ensimmäinen kerros eli sekundääriseinämän ulkokerros (S1) alkaa irrota. P-kalvon ja S1-kerroksen irtoaminen on paperiteknisesti tärkeä ilmiö, joka mahdollistaa vahvojen kuitusidosten syntymisen. (KnowPap 2018)

#### 4.1.2 Ulkoinen fibrillaatio

Ulkoisen fibrillaation tavoitteena on kuidun pintakerroksen rakenteen löystyminen ja särkyminen jauhatuksessa. Tällöin toisistaan irtautuu pintaosien mikrofibrillikimppuja, joiden orientaatio suunta poikkeaa hieman kuidun pituusakselista. Tämän vaikutuksesta fibrillaatio tapahtuu helpommin. Lisäksi jauhatuksen kehittyessä kuidulle muodostuu yllä mainittuja mikroskoopissa näkyviä fibrillikimppuja, joita useimmin kutsutaan myös fibrilleiksi.

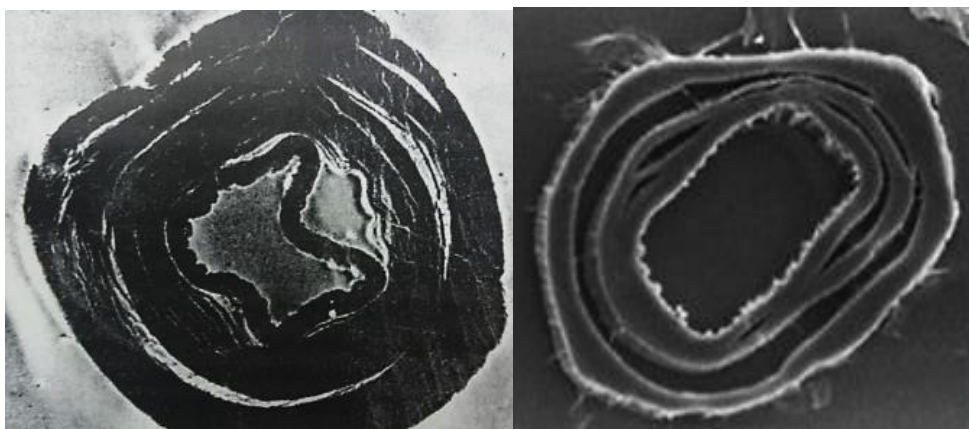
Puukuidun rakenteen vuoksi kuidulle ei tapahdu halkeamista, vaan ulkoinen fibrillaatio on havaittavissa fibrillien osittaisena irtautumisena pintakerroksen ja kuitupinnan välissä. Ulkoisen fibrillaation tuloksena (kuva 14) kuidun ulkoinen pinta suurenee, joka vaikuttaa positiivisesti uuden sidosten syntymiseen kuitujen välissä. (Ryti N. 1998, 44-45.)



KUVA 14: Mikroskooppikuvat puukuidun ulkoisesta fibrillaatiosta eri skaalassa. (Lumiainen J. 2000, 100; Parason machinery LDT. 2012, 8.)

#### 4.1.3 Sisäinen fibrillaatio

Sisäisen fibrillaation tarkoituksena on kuitukerroksien palstautuminen ja kuidun amorfisen alueen turpoaminen (kuva 15). Tämä tapahtuu, kun kuitua ympäröivä vesi pääsee huokosten kautta kerrosten läpi sen sisälle. (Koskenhely 2007, 96.) Molekyylitasolla tämä voidaan ymmärtää ketjumolekyyliden hydroksyyliyhmiin vetysidosten aukeamisena ja korvautumisena ketju- ja vetymolekyyliden välillä. Sisäinen fibrillaatio tekee kuidusta plastisen ja sen taipumiskyky paranee. Tämän ansiosta jauhetut kuidut muokkautuvat arkinmuodostusvaiheessa toistensa muotoihin. Arkin kuivuessa kuitujen väliset kosketuspinnat suurenevat sekä sidosten syntymisedellytykset ovat hyvät. (Ryti N. 1998, 44.)



KUVA 15: Sisäinen fibrillaatio kuidun poikkileikkauksessa, jossa sisäiset seinämät palstautuvat veden vaikutuksesta. (Retulainen, Niskanen & Nilsen 1998, 62; Komulainen 2015, 13. muokattu)

#### 4.1.4 Kuitujen katkeilu

Kuitujen katkeilulla tarkoitetaan jauhatusrasituksen seurauksena yksittäisen kuidun lyhentymistä. Kuormituksen kasvaessa jauhimen teräväli pienenee aiheuttaen kuitujen puristumista toisiinsa vasten tai kuidut pysyvät teräsärmän reunalla. Teräsärmän reunoihin kohdistuvan vetovoiman vaikutuksesta voima kasvaa liian suureksi kuidun kestävyydelle, jonka seurauksena kuitu katkeaa. (Koskenhely 2007, 99.)

Katkeamistodennäköisyys on riippuvainen jauhatusprosessin olosuhteista. Lisäksi kuidun pituudella on vaikutusta arkinmuodostuksessa tasaisuuteen sekä paperin lujuusominaisuuksiin. Tästä syystä jauhatustapahtumassa kuitujen katkeaminen on tärkeää muiden primäärivaikutusten ohella. (KnowPap 2018; Rytin N. 1998, 45.)

#### 4.1.5 Pintojen ja hienoaineen muodostuminen

Kuitujen ja kuituseinämien osien jauhautuminen pieniksi partikkeleiksi massalietteessä saa aikaan hienonainetta, joka toteutuu kuidun ulkopintojen lohkeamisena ja osittaisena kuituseinälamellien irtautumisena. Lisäksi kuituseinäosien mm. mikrofibrillien ja lamellien erikseen leikkautumisena ja niiden irrallisina osina.

Hienoaineen koostumus on hyvin samanlainen kuin muissakin kuidun osissa: se sisältää selluloosaa, hemiselluloosaa, ligniiniä sekä muita pieniä partikkeleita jauhattavasta kuituaineesta. Jauhattavan massalietteen hienoaine voidaan jakaa joko primääri- tai sekundäärihienoainekseen. Ensimmäinen primääriaine on jo jauhattavassa massassa ja sekundäärihienoaine syntyy jauhatustapahtumassa. (Koskenhely 2007, 100; Sirviö 2008, 69–71.)

Hienoaineen käsite ei ole aina yksiselitteisesti määritelty, vaan se vaihtelee puukuidun rakenteen mukaisesti. Rytin mukaan hienoaineksi katsotaan aine, joka ei ota osaa massalietteeseen. Esimerkiksi paperikuidulle hienoaineksi luokitellaan noin 200 meshin (74 µm.) kuituverkon läpäisevä osuus. (KnowPap 2018; Rytin N. 1998, 45.)

#### 4.1.6 Kuidun seinämän osittainen tai kokonainen liukeneminen

Kuidun amorfisen osaan mikrofibrillien väliin on keskittynyt hemiselluloosa ja ligniini. Jauhituksen kehittyessä puukuidun rakenne löystyy. Tämän seurauksena osa ligniinistä ja hemiselluloosasta päätyy veden ja jauhatusvoimien liuottavan vaikutuksen alaiseksi. Kuitua ympäröivän vesifaasin jauhatuksessa vapautuu kuidussa olevia kolloidisia ja liuennaita materiaaleja. Pitkäkuituisesta massasta vapautuu enemmän orgaanista ainesta kuin lyhytkuituisesta massasta, joiden molekyylipaino on pienempi. Orgaanisen aineen vapautumiseen ja osittaisen seinämän liukenemiseen vaikuttavat veden suolapitoisuus ja kuidun varaustiheys. (Koskenhely 2007, 101; Sjöström 2000.)

Tavallisimmin liukenemisen määrä on riippuvainen massan saannosta, joka esimerkiksi kemiallisilla massoilla voi olla noin 0,3–1% koko massan painosta. Massan saannon kasvaessa liukeneminen nousee useampaan prosenttiyksikköön, koska kuitujen välisenä sideaineena toimii hemiselluloosa. (KnowPap 2018)

#### 4.1.7 Kuitujen suoristuminen

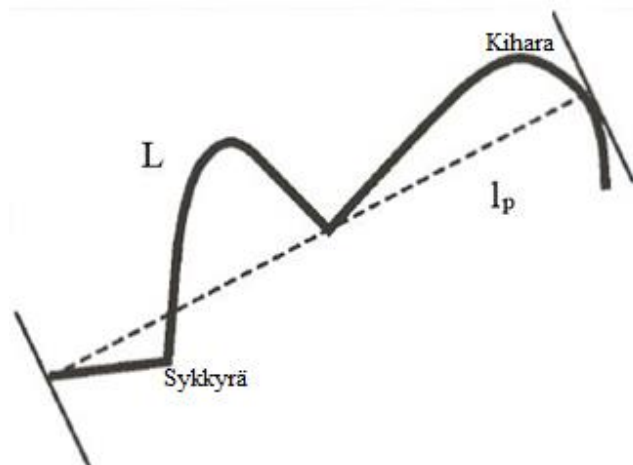
Kuitujen kihartuminen tapahtuu sellun valmistuksessa ja massan valkaisuolosuhteissa, sekä kuidun vaurioituminen pääsääntöisesti ilmenee massan pumppaus- ja sekoitusvaiheissa. Prosessien edistyessä kuidut tyypillisesti menevät sykkyrälle, kiertoan tai kuituseinämän matriisissa ilmestyy paikallisia sijoiltaan menoja, jotka nostavat kihartuneisuutta. (Koskenhely 2007, 98.) Sykkyröiden ja kiharoiden ero perustuu käsittelyolosuhteissa kuidun muodostamaan geometriaan. Sykkyrä on kuidun rakennekohta, jossa kuidun suunta muuttuu ja muodostaa selkeän kulman. Kihara on muodoltaan loiva kaari, joka näky kaaviosta 1 alla. (Heikkurinen 1999, 31.)

Kuitujen kihartuneisuus voidaan määrittää kaavan (1) avulla, jonka mukaan kiharusindeksi eli Curl Index (CI) on kuidun koko pituuden ja päästä päähän laskettu suoran välinen suhde. Tapauksessa, jossa kiharusindeksi on nolla, kuitu on kiharaton.

Käytännössä CI-indeksi on suurempi kuin nolla, koska massalietteessä oleva kuidut käyvät läpi useita mekaanisia prosesseja, jotka vaikuttavat CI-indeksiin.

$$CI = \frac{L}{l_p} \quad (1)$$

jossa  $L$  [m] on kuidun muotokäyrän pituus ja  $l_p$  [m] on kuidun etäisimpien pisteiden välinen etäisyys. (Heikkurinen 1999, 31; Koskenhely 2007, 98.)



KAAVIO 1: Kuidun sykkyrä ja kihara. (Heikkurinen 1999, 31. muokattu)

## 5 JAUHATUKSEN VAIKUTUS KARTONGIN OMINAISUKSIIN

Jauhatuksella on suuri vaikutus melkein kaikkiin kartongin ominaisuuksiin. Kun tutkitaan jauhatuksen vaikutusta kartonkiin laatusuureisiin, ajaututaan luottamaan tapauskohtaisiin mittaustietoihin. Eri massalajeista valmistetusta kartongista voidaan suoraan ottaa poikkiradan näytteet valmistuneesta konerullasta ja niistä valmistaa käsiarkkeja sekä tutkia niiden laatuominaisuuksia. Toinen tapa on tunnistaa ja luoda tuotannon aikaisista prosessi- ja laatuominaisuuksista tilastollinen laatumalli, jossa laboratoriomittaukset on otettu huomioon. (Lappalainen J.T. 2004, 34)

Käytännössä jauhatustuloksen arviointi on mahdollista suorittaa kriittisten ominaisparien perusteella, jotka määritetään lopputuotteiden ja tuotantokoneiston mukaisesti. Jauhatuksen edistyessä toinen ominaisuuksista paranee ja toinen vastaavasti huononee, mistä itse asiassa nimitys ”kriittiset ominaisuusparit” on syntynyt. Tyypillisiä ominaisuuspareja ovat (KnowPap 2018):

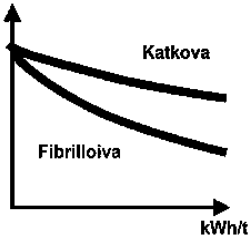
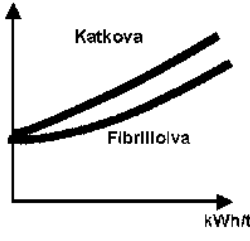
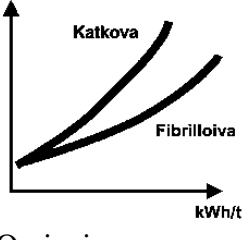
- jauhatusteite – vetolujuus
- repäisyteite – vetolujuus
- bulkki – vetolujuus
- opasiteetti – vetolujuus
- ilmaläpäisy – sileyte
- ilmanläpäisy – vetolujuus
- vedenpoistovastus – repäisyteite

Yleisesti ottaen jauhatuksen vaikutus valmiin kartongin ominaisuuksiin on suuri, mikä ilmenee seuraavasti: jauhatuksen edistyessä kartongin rakenne tiivistyy, veto-, puhkaisu-, taitto- ja palstautumislujuus sekä tiheys kasvavat. Vastaavasti pienenevät imukyky, mittapysyvyys, opasiteetti ja kokoonpuristuvuus. Lisäksi jauhatuksen alkuvaiheessa repäisyteite kasvaa, mutta sen jälkeen laskee. (Lumiainen J. 1989b, 8–9.)

### 5.1 Yleiset ominaisuudet

Jauhatuksen edistyessä kartongin kuitujen sitoutuneisuus toisiinsa kasvaa ja kartongin rakenne tiivistyy. Näiden rakennemuutosten vaikutus näkyy esimerkiksi lopputuotteen yleisissä ominaisuuksissa, jotka ovat neliömassa, bulkki, tiheys, formaatio ja kuituorientaatio. Taulukossa 3 on esitetty jauhatuksen vaikutus yleisiin ominaisuuksiin, jossa on otettu huomioon fibrilloiva ja katkova jauhatustapa. (KnowPap 2018)

TAULUKKO 3: Jauhatuksen vaikutus yleisiin ominaisuuksiin. (KnowPap 2018, muokattu)

Ominaisuus / Mekanismi Kuvauskaavio / Tulkinta	Ominaisuus / Mekanismi Kuvauskaavio / Tulkinta
<p><b>Bulkki /</b> Jauhatusenergiakuorman lisäys alentaa bulkkia</p>  <p>Ominaisuus huononee</p>	<p><b>Tiheys /</b> Jauhatuksen lisäys alentaa huokososuutta ja tiheys kasvaa</p>  <p>Ominaisuus huononee</p>
<p><b>Formaatio /</b> Sellun jauhatuksen lisäys kasvattaa kuitujen taipuisuutta, turpoamista sekä hienoainetta parantaen formaatiota</p>  <p>Ominaisuus paranee</p>	<p><b>Neliömassa /</b> Ei ole suoranaista vaikutusta</p> <p><b>Kuituorientaatio /</b> Ei ole suoranaista vaikutusta</p>

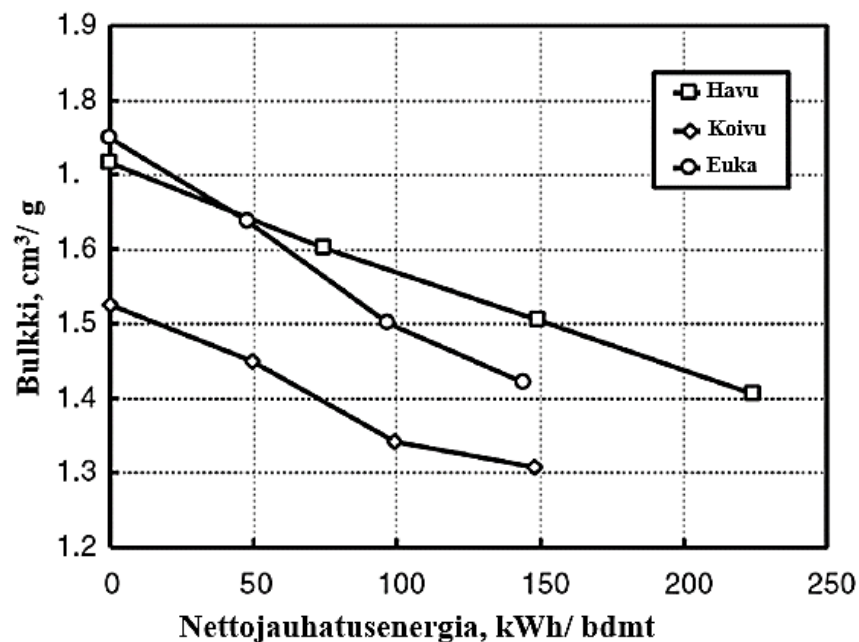
### 5.1.1 Tiheys ja bulkki

Tiheys ja bulkki ovat kartongin rakenteellisia ominaisuuksia, jotka voidaan selvittää neliömassasta ja paksuudesta. Kartongin paksuus mitataan ISO 534 -standardin mukaisesti mikrometrillä, jonka mittapää on kahden neliösenttimetrin suuruinen ja painaa kartonkiarkkia kohtisuorassa noin kahden kilogramman painolla eli ilmakehän paineella (n.100 kPa). Tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ] on neliömassa [ $\text{g/m}^2$ ] jaettuna paksuudella [ $\mu\text{m}$ ] ja bulkki on



tiheyden käänteisarvo, jonka perusyksikkönä on [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]. Käytännössä kartongille ja paperille haluttu ominaisuus on suuri bulkki ja pieni tiheys, jos kriittiset ja muut priorisoidut ominaisuudet on saavutettu. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 83–84.)

Bulkki korreloi opasiteetin, kokoonpuristuvuuden, repäisylujuuden ja jäykkyyden kanssa. Jälkimmäinen ominaisuus on hyvin tärkeä eri pakkauskartongin lajeille. Jäykkyyteen vaikuttavat kartongin eri kerroksen kimmokertoimet ja paksuus. Hyvän jäykkyyden hallintaa esimerkiksi kolmikerroksisella kartongilla pyritään saamaan kerrosten välillä siten, että keskimmaiseen kerrokseen lisätään paksuutta ja bulkkia sekä pintakerroksien kimmokertoimet yritetään saada suuriksi. Lisäksi valmistusprosessissa bulkkiin vaikuttavat eniten märkäpuristus ja kalanterointi, mutta jauhatuksellakin on merkitystä. Jauhatuksen puhtaan energian kasvu alentaa bulkkia, joka voidaan nähdä kaaviosta 2: bulkki nettojauhatusenergian funktiona. (Lumiainen 2000; Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 83–84.)



KAAVIO 2: Jauhatuksen nettoenergian vaikutus bulkkiin eri massalajeille. (Lumiainen J. 1989a, 45. muokattu)

Kartongin tiheys on olennaisesti riippuvainen lajin raaka-aineiden ainestiheydestä ja huokoisuudesta. Huokoisuus on myös rakenneominaisuus, joka tarkemmin käsitellään luvussa 5.3 Pintaominaisuudet. Käytännössä kartonki on tiheämpää, kun se sisältää

enemmän täyteaineita ja mahdollisesti päällystettä. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 83–84; KnowPap 2018)

### 5.1.2 Neliömassa ja kuituorientaatio

Neliömassalla tarkoitetaan kartongin massaa grammoina laskettua neliometriä kohden [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]. Neliömassan mittaus suoritetaan kartonkikoneen on-line-mittauksen avulla, vaihtoehtoisesti sitä voidaan mitata myös laboratoriossa. Jälkimmäisessä tapauksessa neliömassan mittaus sekä laboratoriomittareiden kalibrointi noudattaa ISO 536 -standardia. Kartongin kuiva-aine ja vesi kuuluvat neliömassaan. Kuiva neliömassa on mahdollista laskea on-line-mitatusta kosteuspitoisuudesta, eli näiden mittauksien erotuksesta. Päällystämättömän kartongin neliömassat vaihtelevat, mutta useasti ne ovat monikerroksisia ja niiden neliömassat alkavat noin  $140 \text{ g}/\text{m}^2$  sekä saavuttavat noin  $600 \text{ g}/\text{m}^2$ . (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 78.)

Kuituorientaatiolla tarkoitetaan kartongin tasosuuntaisten kuitujen satunnaisjakauman tai kuituorientaatiojakauman epäsymmetrisyyttä. Tämä jakauma ilmoittaa kartongin tasossa konesuuntaan ja poikkisuuntaan osoittavien kuitujen suhteellisen osuuden. Käytännössä suuri osa kuiduista on konesuunnassa. Kuituorientaatio voidaan mitata suorasti tai epäsuorasti. Suora mittaus tapahtuu laskemalla värjättyjen kuitujen kuitupituutta kartongin ylä- ja alapinnalla, mutta tämä tapa edellyttää värikuitujen ja kuva-analyysimenetelmän käyttöä. Yleisimmin käytetty epäsuora mittaus sisältää optiset, sähköiset tai mekaaniset menetelmät. Näiden menetelmien perusideana on mitata sellaista kartonkiominaisuutta, joka korreloi kuituorientaation kanssa. Lisäksi kuituorientaatio on mahdollista mitata kartongin eri kohdassa ja eri kerroksissa: esimerkiksi halkaisemalla näytte teippimenetelmällä, minkä jälkeen kuituorientaatiota mitataan eri kerroksista kuiva-analyysia käyttäen. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 95; KnowPap 2018)

### 5.1.3 Formaatio

Formaatio on pienimittakaavainen neliömassavaihtelu, pohjanmuodostus. Toisin sanoen se on kuitujen tapa jakautua, asettua ja sekoittua keskenään kartongin muodostuksessa. Formaatiolla ja kartongin pohjalla on korreloiva yhteys, johon täyteaineet, kalanterointi, päällystyys ja jauhatus tekevät oman vaikutuksensa. Lisäksi formaatio on yksi harvinaisista ominaisuuksista, jonka parantuessa muut tärkeät ominaisuudet eivät huonone. Yleisesti formaation paraneminen vaikuttaa positiivisesti muihin ominaisuuksiin, esimerkiksi ajettavuus ja vetolujuus paranevat kartongin heikkojen kohtien vähenemisestä. Reikien harvenemisesta läpipainatus ja ilmanläpäisy vähenevät sekä opasiteetti kehittyy formaation parantuessa. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 105.)

Mittausmenetelmänä formaatiolle voidaan käyttää optisesti transmissioon perustuvaa massamittausta tai  $\beta$ -säteilyn absorptioon pohjautuvaa neliömassamittausta. Optinen mittaus tapahtuu suoraan kartonkikoneen radalta ja enemmän aikaa vaativa  $\beta$ -säteilymittaus suoritetaan laboratoriossa. Tarkempi  $\beta$ -mittaus on hyvin korreloiva painojäljen tasaisuuden kanssa. Toisaalta optinen formaatiomittaus kuvaa paremmin ulkonäköä, joka on tärkeä kartongin hyvyysvaikutelman muodostumisessa. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 105.)

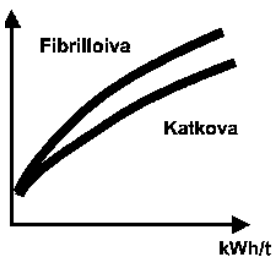

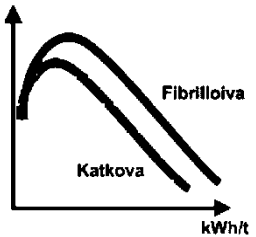
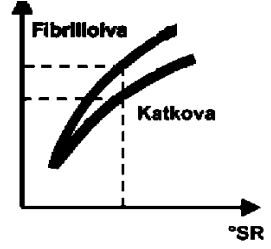
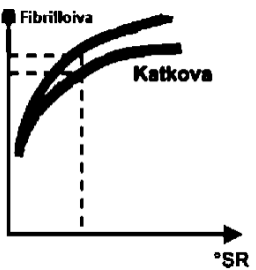
Kartongin valmistuksessa formaatiopotentiaaliin vaikutetaan jauhatuksella, jolloin kuidut katkeilevat, mutta pituusmassa ei muutu. Pituusmassa optimoidaan valitsemalla raaka-aineita ja massanvalmistustekniikoilla. Käytännössä jauhatusta lisätessä massan suotautumisvastus kasvaa ja tavallisesti vaatii korkeampaa perälaatikkosakeutta, joka heikentää formaatiota. Mikäli formaatioon pyritään vaikuttamaan jauhatuksella, on valittava katkova jauhatustapa. Optimijauhatus on aina kompromissi formaation ja muiden kartongin oleellisten ominaisuuksien välillä. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006,106; KnowPap 2018.)

## **5.2 Lujuusominaisuudet**

Lujuusominaisuudet mitataan kuormittamalla kartonkinäytettä, kunnes se murtuu ja toteamalla tilanne murtohetkellä. Kuormituksesta riippuen lujuuksia voivat olla: puhkaisu-, repäisy-, taitto-, veto-, palstautumis-, pintalujuus sekä jäykkyys ja venymä. Jauhatuksen vaikutus lujuusominaisuuksiin on enimmäkseen positiivinen: se vahvistaa

myös kartongin rakennetta (Ryti N. 1998, 98). Taulukossa 4 on tiivistetty jauhatuksen vaikutus lujuusominaisuuksiin fibrilloivaa ja katkovaa jauhatustapaa käyttäen. (KnowPap 2018)

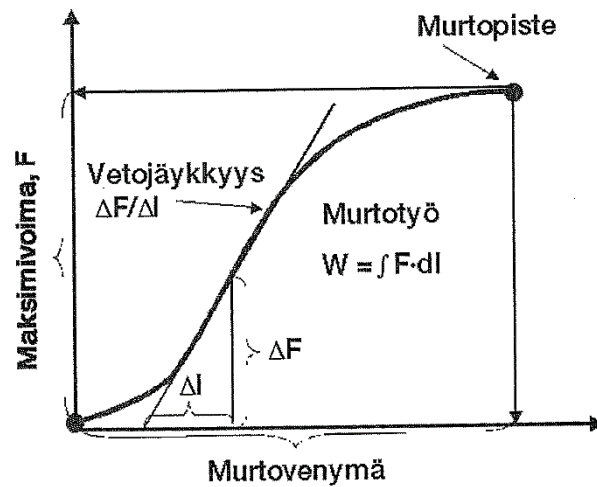
TAULUKKO 4: Jauhatuksen vaikutus lujuusominaisuuksiin. (KnowPap 2018, muokattu)

Ominaisuus / Kuvauskaavio / Tulkinta	Ominaisuus / Kuvauskaavio / Tulkinta
<p><b>Vetolujuus /</b></p>  <p>Ominaisuus huomattavasti paranee</p>	<p><b>Venymä /</b></p>  <p>Ominaisuus kasvaa</p>
<p><b>Repäisylujuus /</b></p>  <p>Ominaisuus huononee</p>	<p><b>Puhkaisulujuus /</b></p>  <p>Ominaisuus paranee</p>
<p><b>Märkälujuus /</b></p>  <p>Ominaisuus paranee</p>	<p><b>Taittolujuus /</b></p> <p>Ominaisuus paranee tiettyyn rajaan saakka</p> <p><b>Z-lujuus /</b></p> <p>Ominaisuus paranee</p>

### 5.2.1 Vetolujuus ja venymä

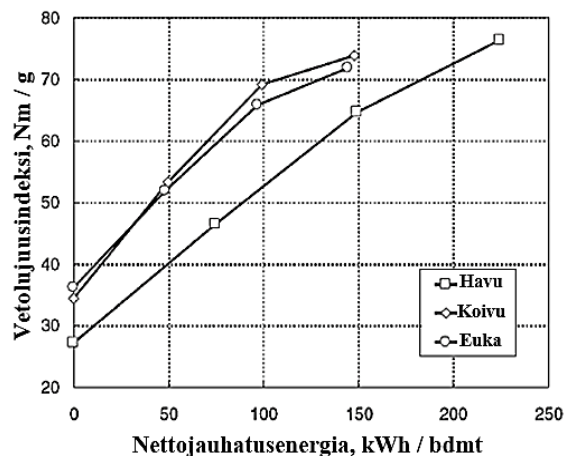
Venymäkäyttäytyminen ISO 1924/2 -standardin mukaan määritetään laitteella, joka mittaa kartonkinäytteestä leikatun 15 mm leveän liuskan venymää sellaisella vetonopeudella, että murtuminen tapahtuu noin 20 sekunnissa. Tuloksena syntyy kuvassa 16 esitetty voima–venymäkäyrä, jossa maksimivoiman vastaava kireys on vetolujuus ja suoran osan tangentti vetojäykkyys. Vetojäykkyys kuvaa kimmokerrointa vetosuunnassa

ja käyrän alle jäävä pinta-ala on vedon aikana tehty työ. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 93–94.)



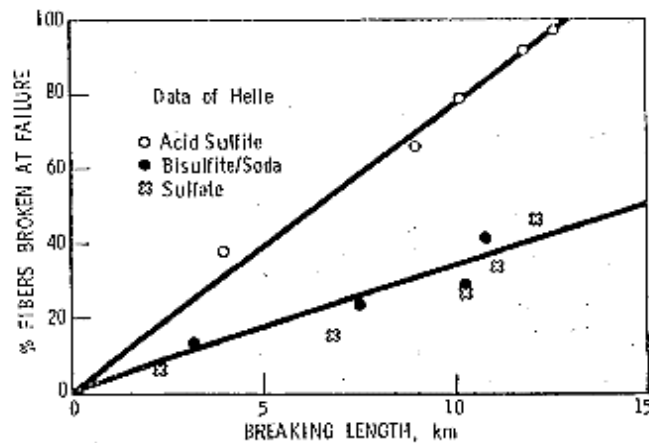
KUVA 16: Kartonkiliuskan voima–venymäkäyrä. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 93. muokattu)

Voima–venymäkäyrästä voidaan tutkia yllä mainitun ISO 1924/2 -standardin mukaiset ominaisuudet, jotka ovat vetojäykkyys, murtotyö, murtovenymä ja vetolujuus. Kartongin vetolujuus on suurin kuormitus, joka kohdistuu kartongista leikattuun liuskaan vedettäessä vastakkaisiin suuntiin ennen murtumista. Toisin sanoen se on voima leveysyksikköä kohti. Vetolujuudesta, vetojäykkyydestä ja murtotyöstä voidaan laskea indeksi, kun valmistettavan kartongin neliömassa ei ole tiedossa. Indeksia lasketaan massaa tai yleensä raaka-aineseokoitusta käyttäen, eli neliömassasta riippuva lukema jaetaan arkin neliömassalla. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 94.) Indeksien avulla voidaan tutkia prosessin tai haluttujen ominaisuuksien riippuvuutta. Esimerkiksi kaaviossa 3 alla nähdään, miten vetoindeksi kehittyy jauhatuksen edistyessä.



KAAVIO 3: Jauhituksen vaikutus vetolujuusindeksiin. (Lumiainen J. 1989a, 46. muokattu)

Jauhatusta suurentamalla kasvaa murtokuormaa katkenneiden kuitujen osuuden kasvaessa, mikä voi heikentää kuitujen lujuutta ja pienentää kartongin murtolujuutta. Esimerkiksi liiallinen jauhatusta ei kuitenkaan lisää sidosten määrää kartongissa, mutta heikentää yksittäisten kuitujen lujuutta. Tällöin vetolujuus laskee jauhatuksen funktiona. Lisäksi katkenneiden kuitujen osuus voidaan esittää vetolujuuden funktiona, josta nähdään jauhatuksen määrää muuttamalla saavutettu lujuus. Kuvasta 17 huomataan, että suurenevan jauhatuksen määrän vaikutuksesta kuitujen katkeamispituus ja sen mukaan vetolujuus myös kasvaa. (Ryti N. 1998, 100.)

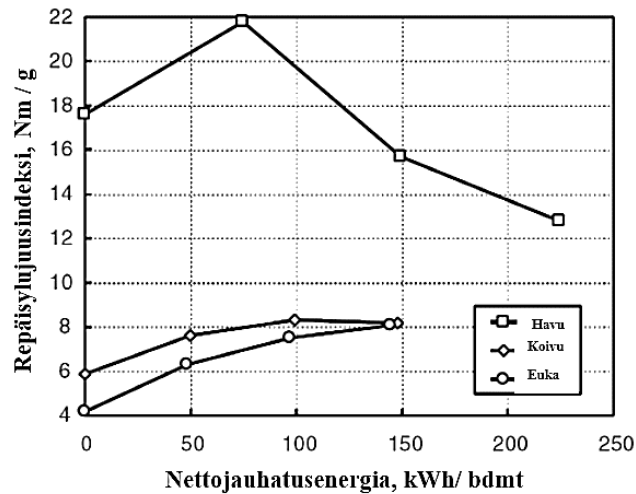


KUVA 17: Katkenneiden kuitujen prosentiosuus vetolujuuden funktiona. (Ryti N. 1998, 100.)

### 5.2.2 Repäisylujuus ja märkälujuus

Repäisylujuutta mitataan Elmendorfin periaatteen mukaisesti (ISO 1974). Mittauksessa selvitetään sellainen tarvittava työ, joka tarvitaan neljän kartonkiarkin repäisemiseen alkuvuillosta lähtien. Repäisylujuuden yksikkö on [mN]. Aiemmin mainittu indeksi on mahdollista laskea myös repäisylujuudelle, eli samalla tavalla jakamalla repäisylujuus neliömassalla, jolloin yksiköksi tulee [mNm<sup>2</sup>/g]. Repäisyindeksi jauhatuksen kehittyessä on nähtävissä kaaviosta 4, jossa esimerkkinä on eri massojen jauhatusta. Jauhatuksen alussa repäisylujuus suurenee, mutta jauhatuksen jatkuessa ominaisuus alenee. Usealla sellulla ja lujuuskäyrällä ei ole alussa nousevaa osaa, vaan repäisylujuus alusta alkaen pienenee

jauhatuksen funktiona. (Lumiainen J. 1989, 6–7; Ryti N. 1998, 105; Häggblom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 98.)



KAAVIO 4: Havu- koivu- ja eukalyptussellun jauhatuksen vaikutus repäisylujuuteen. (Lumiainen J. 1989a, 48. muokattu)

Jauhatuksen vaikuttavaa mekanismia repäisylujuuteen Niilo Rytin mukaan voidaan käsitellä seuraavasti: Valmiissa kartongissa jauhamattomat kuidut eivät ole kiinnittyneet lujasti toisiinsa ja niitä on mahdollista vetää ehjinä toistensa läpi. Tässä suurimmaksi osaksi vastustava voima on kitkavoima. Vaikka jauhatusta lisää kuitujen sidosten määrää ja arkki on tiiviimpi, erillisen kuidun ulosvetämiseen tarvittava voima kuitenkin suurenee ja voiman vaikutusmatka pysyy samana. Seurauksena tarvittava työ ja myös repäisylujuus ovat suurentuneet. Edelleen jauhatuskuormitusta lisätessä kuidut tarttuvat niin voimakkaasti verkostoon, että ne repäistäessä katkeavat. Vastaavasti jos katkaisuun tarvittava voima on suurempi, kuin kuidun ulosvetämiseen tarvittu ja voiman vaikutusmatka on lyhyt, niin silloin tarvittava työ ja sen mukana myös repäisylujuus pienentyvät. (Ryti N. 1998, 105-106.)

Edellä oleva kuvaus perustuu repäisykokeessa mitattuun työhön, joka on kaikkien repäisykohdassa olevien kuitujen kohdalla tehtyjen töiden summa. Repäisytyö on repäisyyn tarvittava voima kerrottuna repäisymatkalla, joka kokeessa on standardisoitu. Kartongin repäisyyn tarvitaan sellainen voiman määrä, että repäisykohtaan syntyvä jännityshuippu riittää murtamaan sen. Jauhatuksen vaikutuksesta tiivistyneessä kartongissa jännitys ei leviä suurelle alueelle, joten melko pieni repäisyvoima voi olla riittävä saadakseen suuremman jännityshuipun.

Tutkittaessa repäisylujuutta jauhatuskuormaa lisättäessä voidaan olettaa niiden keskeistä riippuvaisuutta myös siksi, että jauhatuksessa kuidut lyhentyvät ja heikkenevät. Käytännössä tämä ei selitä vielä repäisylujuuden alenemista jauhatuksen funktiona, koska sidosten määrää kuitujen välillä voidaan lisätä märkäpuristuksella, jolloin kuitujen lyhentämistä ja katkeilua ei tapahdu, mutta repäisylujuus kuitenkin alenee. (Ryti N. 1998, 106.)

Märkäljuudella tarkoitetaan vedellä kyllästetyn kartongin mekaanista lujuutta. Yleisesti kartongin ja paperin lujuus on 6–8% vedellä kyllästettynä alkuperäiseen kuivalujuuteen verrattuna. Lisäksi märkäljuuden ylittäessä 15 % kartonkia kutsutaan märkälujaksi. Mittaus noudattaa ISO 3781 -standardia, jossa metodin mukaan kartonkinäytteen luiska upotetaan 23-asteiseen tislattuun veteen tunnin ajaksi. Seuraavaksi luiska on testattava välittömästi ja mittaus jatkuu normaalisti aiemmin esitetyn vetolujuuden testimenetelmän mukaisesti. (Stora Enso. 2017, 11.) Märkäljuuden riippuvuus jauhatuksesta on näkyvissä taulukosta 4 (5.2 Lujuusominaisuudet), jossa märkäljuus on fibrilloivan ja katkovan jauhatustavan funktiona. (KnowPap 2018)

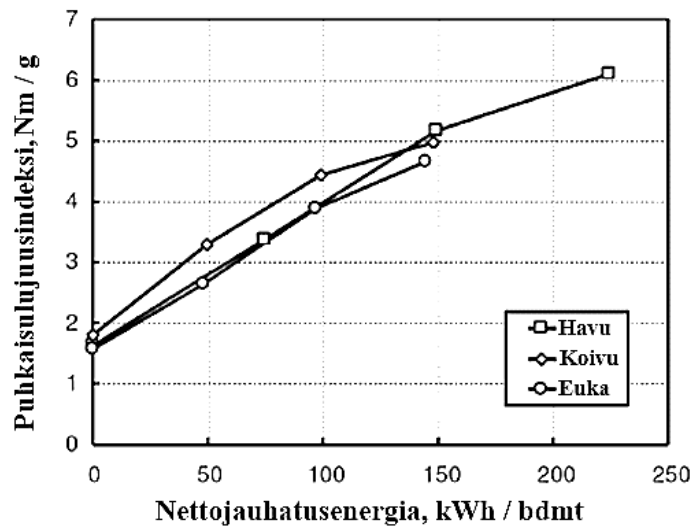
### 5.2.3 Puhkaisulujuus

Puhkaisulujuus kuuluu empiirisiin lujuusmittoihin, ja se on riippuvainen useasta eri tekijästä, jotka voivat vaihdella esimerkiksi olosuhteiden muuttuessa toisistaan riippumatta. Puhkaisulujuuden mittausmetodi perustuu ISO 2759 -standardiin. Mittaus suoritetaan Mullen-laiteella, jolla kartonkinäytteen pinta pyritään puhkaisemaan kohtisuoraan luomalla siihen suurentuva hydraulinen paine. Puhkaisulujuutta ilmaistaan paineen yksiköllä [kPa], kun puhkaisulujuuden indeksi on  $[kPa m^2/g]$  eli puhkaisulujuus jaettuna neliömassalla. Testauksen suorittamisen etuna on helppous ja nopeus, ja puhkaisulujuus on tietyin rajoituksin käyttökelpoinen kartongin yleislujuuden mitta. (Ryti N. 1998, 104–105; Stora Enso 2017, 14.)

Jauhatuksen vaikuttava efekti puhkaisulujuuteen, kuten aiemmin mainitussa taulukossa 4, on positiivinen eli jauhatuksen kehittyessä ominaisuus paranee. Tämä voidaan myös havainnoida puhkaisulujuuden indeksin avulla, joka on esitetty kaaviossa 5 alla. Kuvassa



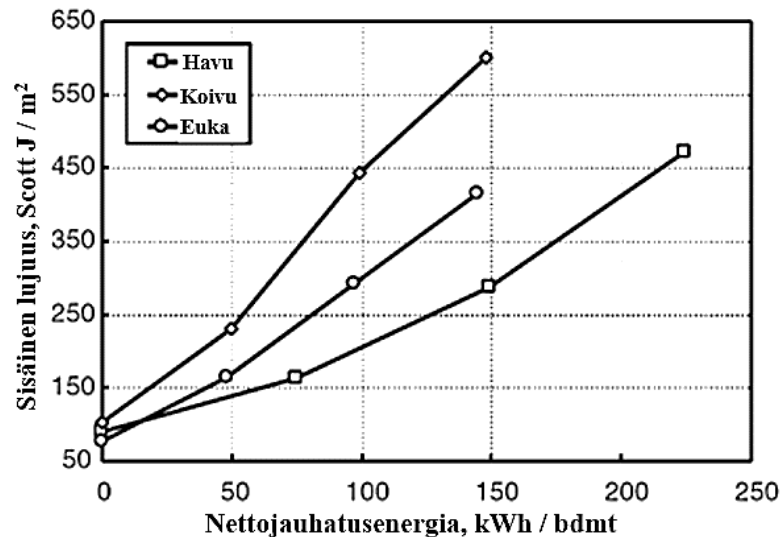
näky eri massalajien puhkaisuindeksi jauhatuksen nettoenergian funktiona. (Lumiainen J. 1989a, 47.)



KAAVIO 5: Havu-, koivu ja eukalyptusmassojen puhkaisuindeksin riippuvuus jauhatuksen nettoenergiasta. (Lumiainen J. 1989a, 47. muokattu)

### 5.2.4 Palstautumisluku ja taittoluku

Palstautumislukuuta, bondingia tai z-lukuuta voidaan kuvata kartongin pinta-alayksikköä kohti sinä työnä, jolla näyte halkeaa tai palstautuu pinnan suuntaisesta tai sitä vastaan kohtisuorasti vaikuttavasta vetokuormituksesta. Eri kerrosten palstautumista näytteessä sanotaan ply bondeiksi (kerroksien välinen luku), ja sisäinen luku eli internal bond kuvaa kerroksen sisällä oleva luku. Siinä tapauksessa, kun kerrosten välinen luku on suurempi kuin heikomman kerroksen sisäinen luku, eri kerrosten kartonki halkeaa heikomman kerroksen sisältä. Palstautumislukun mittaustilanteessa näytekappaleen molempiin pintoihin suuntautuu kohtisuorasti kohdistuneita voimia, jotka on kiinnitetty kaksipuolisen teipin avulla. Laitteen käyttämä yksikkö on [kPa]. Lisäksi taulukossa 4 on myös esitetty jauhatuksen vaikutus z-lukuuteen, ja kaaviossa 6 on sisäinen luku jauhatuksen funktiona, josta voidaan todeta, että palstautumisluku paranee jauhatusta lisätessä. (KnowPap 2018; Stora Enso 2017, 13–14.)



KAAVIO 6: Jauhatusen nettoenergian vaikutus sisäiseen lujuuteen. (Lumiainen J. 1989a, 52. muokattu)

Taittolujuutta selvitetään mittauksella, jossa testataan, montako edestakaisin taittoa jännitetty koeliuska kestää ennen, kun se murtuu. Se on empiirinen väsytyksko, joka noudattaa ISO 5626 -standardia. Väsytyksko voidaan käsittää vetokokeena heikennetyille kartonkikoeliuskalle, koska taittoon kohdistuva voima tapahtuu kahden kilon vetokuormalla. (Ryti N. 1998, 107–108; Stora Enso 2017, 16.)

Tietyllä tavalla jauhatusneista kuiduista valmistettu kartongin taittoluku eli taittolujuus suurenee neliömassan kasvaessa tiettyyn optimiin saakka ja kääntyy sen jälkeen laskuun. Tämä tapahtuu, koska jauhatusen kasvaessa taittolukuun vaikuttaa nouseva vetolujuus. Jauhatusen jatkuessa taittoluku laskee ennen kuin vetolujuus saavuttaa suurimman arvonsa. Syynä on kimmokertoimen edistyminen jauhatusen kehittyessä. (Ryti N. 1998, 107–108.)

### 5.3 Pintaominaisuudet

Kartongin pintaominaisuuksiin voidaan myös vaikuttaa jauhatusella. Yleisiin pintaominaisuuksiin kuuluvat karheus, huokoisuus, ilmanläpäisevyys ja sileys sekä tässä työssä tutkittava reunasileys. Massasta valmistetun kartongin sileys paranee ja karheus alenee jauhatusen kehittyessä. (KnowPap 2018)

### 5.3.1 Sileys ja karheus

Kartongin pinnan sileys on rakenneominaisuus, jolla on merkitystä painatuksessa esimerkiksi syväpainomenetelmää käytettäessä. Menetelmässä erityisen tärkeää on, että painava pinta ulottuu joka kohdaltaan koskettamaan paperia, jotta painettuun kuvaan ei synny virheitä ja epätasaisuutta. Sileydellä, jonka kartonki saavuttaa painokoneen puristuksessa on suuri merkitys painatustuloksen kannalta. (Ryti N. 1998, 86.)

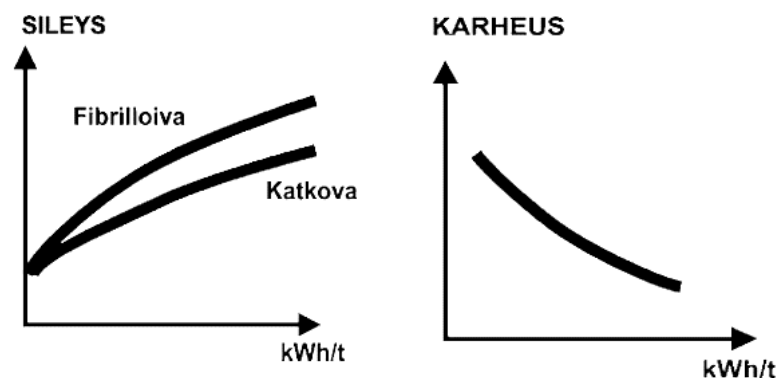
Kartongin sileyden käsitettä on vaikea tarkoituksenmukaisella tavalla kuvata fysikaalisin määritelmän. Niilo Rytin (1998) esittämässä teoriassa sileyden mittaa voidaan ymmärtää seuraavasti: paljonko kartongin paksuussuunnassa olevan pinnan eri kohdat poikkeavat keskimääräisestä tasosta olevasta pinnasta. Tulos on kuitenkin riippuvainen mitta-alan suuruudesta, jossa pinnan keskimääräinen taso vaati myös tarkempaa määrittelyä, esimerkiksi miten kartongin mittauksessa huomataan kartongin paksuusvaihtelut. (Ryti N. 1998, 86–88.)

Sileydestä tai karheudesta puhuessa on myös otettava huomioon kartongin toispuolisuus, joka tarkoittaa kartongin pintojen erilaisuutta. Tämä ilmenee ominaisuuksien toisenlaisuutena, jotka on mitattu kartongin viira- ja yläpuolelta, esimerkiksi pohja- ja pintapuolelta. Sileys riippuu nimenomaan tästä toispuolisuudesta ja kartongin flokkirakenteesta. Sileyden toispuolisuutta on hyvin vaikea korjata esimerkiksi kalanteroimalla. Käytännössä yritettäessä korjata sileyden toispuolisuutta kartongin pinnan karheammasta puolesta tulee kiiltävämpi kuin sileästä puolesta. Erityisen hankalaa on kaikkien kartongin ominaisuuksien optimointi molemmin puolin. Syynä voi olla virheellinen vian tunnistus ja sitä kautta korjaus. Kartongin valmistuksessa kaikkia ilmestyviä vikoja on korjattava syntymäpaikalla, jotta olisi mahdollista saada kaikilta ominaisuuksiltaan tasaista kartonkia. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 88.)

Pinnan tasaisuudesta puhuttaessa voidaan terminä sileyden lisäksi käyttää sen vastakohtaa eli karheutta. Karheuden vaihtelua jaetaan mittakaavan perusteella mikrokarheuteen, makrokarheuteen ja optiseen karheuteen. Karheusvaihteluilla on vaikutuksia kartongin pinnan kiiltoon ja painatusjälkeen. (KnowPap 2018) Yleisimmät mittaamenetelmät erilaisille karheuksille perustuvat tasaisen metallipinnan ja kartongin pinnan välissä virtaavan ilman mittaamiseen. Menetelmissä voidaan mitata tietyn ilmamäärän

virtaamiseen kuluva aika sekä ilman virtausnopeutta tietyllä puristuspaineella ja ilmanpaine-erolla. Makrokarheuden mittaamenetelmiin kuuluvat Pohjoismaissa Bendtsen (ISO 8791/2), jolla yksikkönä on [ml/min], Yhdysvalloissa Sheffield (ISO 8791/3), [ml/min] ja Saksassa Bekk (DIN 531979), jonka mittaussyksikkö on [s]. Mikrokarheuden mittaamiseen soveltuu paremmin PPS-karheus (Parker Print Surf), jolloin tietyllä paineella saatu mittalukema muutetaan karheuslukemaksi, esimerkiksi kaksi baaria muutetaan mikrometreiksi. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 84.) Sileyden ja karheuden mittaamenetelmät on selostettu tarkemmin kohdassa 7.4. (Menetelmät), joiden mukaan työn mittaukset on suoritettu.

Mittauksien avulla voidaan päästä arvoihin ja niiden analysointiin, jotta pystytään tutkimaan jonkun prosessin vaikutusta ominaisuuksiin. Sileyden ja karheuden käyttäytyminen jauhatuksen edistyessä voidaan kuvata seuraavan kaavion 7 avulla. Kuvasta näkee, että jauhatuksen kasvaessa sileyys paranee ja karheus vastaavasti alenee. (KnowPap 2018)



KAAVIO 7: Vasemmalla puolella jauhatuksen vaikutus sileyteen ja oikealla puolella karheuteen. (KnowPap 2018, muokattu)

### 5.3.2. Reunasileyys

Reunasileyys voidaan ymmärtää yllä esitetyn sileyden avulla. Se on valmistettavan kartongin reunojen kohdassa oleva sileyys, joka voidaan mitata samoilla mittaamenetelmillä kuin sileyys tai ilmaista karheuden avulla. Reunasileyteen vaikuttaa rainan kuivatusosalla kuivumisen yhteydessä ilmenevä reunakutistuma. Rainan kuivatuksessa kuumennetut valurautasylinterit kohtaavat rainan, joka pyrkii kutistumaan.

Kartonkiarkin kutistuminen voidaan estää venyttämällä sitä kuivatusvaiheessa: tällöin puhutaan arkin kutistuman muuttamisesta negatiiviseksi. Vastaavasti potentiaalisella kutistumalla tarkoitetaan kuivuessaan vapaasti kutistuneen kartongin kutistumaa. Siinä tapauksessa, kun kuivatuksen aikana kutistumista estetään osittain tai kokonaan, potentiaalinen kutistuma on suurempi kuin todellinen kutistuma. Potentiaalisen ja todellisen erotuksen avulla saadaan jähmettynyt venymä. Todellinen kutistuma ja jähmettynyt venymä vaikuttavat kartongin lujuuteen, reologisiin ominaisuuksiin ja mittapysyvyyteen, joiden avulla selitetään myös Rytin (1998, 62–63) esittämä kuivatusvikojen mekanismi.

Jähmettyneen venymän mekanismi selittää monien kuivumisvikojen syntymistapoja. Vikojen syntymisen keskeisenä syynä on, että kartongin eri osat eivät kuivu tasaisesti, vaan saavuttavat kyllästymispistettä alhaisemman vesipitoisuuden eri tahdissa sekä pyrkivät kutistumaan eri aikaan. Tällöin tiettyjen edellytyksien täytyessä kartongin eri kohtiin ilmestyy erisuuruisia jähmettyneitä venymiä, minkä seurauksena valmiiseen kartonkiin syntyy paikallisia kierteitä ja löysiä kohtia.

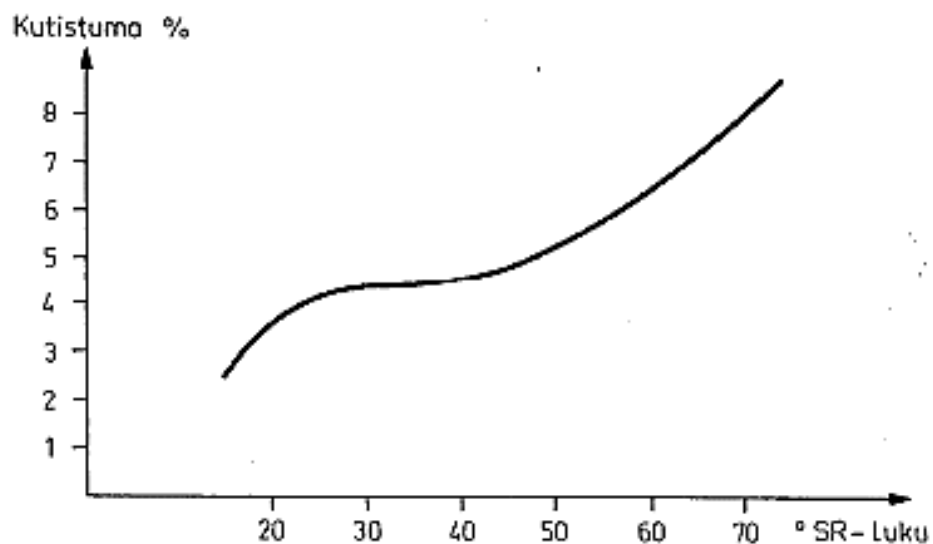
Kartonkikoneella rainan löysien reunojen syntymismekanismi voidaan selittää seuraavasti:

- Rainan reunat saavuttavat kyllästyspisteen nopeammin, koska ne kuivuvat nopeammin kuin muut rainan osat.
- Reunojen vesipitoisuuden laskiessa alle kyllästymispisteen kutistuma alkaa tapahtua. Konesuuntaista kutistumista tässä vaiheessa ei kuitenkaan voi muodostua, sillä muu osa rainasta on ajoteknisistä syistä pidettävä kireällä. Reunoihin muodostuu jähmettynyt venymä.
- Lopulta rainan keskiosa kuivuu myös konesuunnassa ja koko raina lyhenee. Reunat ovat jo kutistuneet eivätkä enää voi kutistua, ja ne jäävät näin muuta rainaa pitemmiksi.

Vian ratkaisemiseksi tasaisen kosteusprofiilin lisäksi on myös pidettävä raina loppukuivatuksessa niin kireällä, ettei konesuuntaista kutistumista pääse tapahtumaan. Toisaalta jos loppukuivatuksessa venytetään rainaa liikaa, niin rainan keskiosa venyy ja kimmoisemmat reunat pysyvät samanlaisena. Lopputuloksena saadaan rainaa, jonka reunat ovat kireät eli lyhemmät kuin keskusta. (Ryti N. 1998, 114.)

Koneesta valmistuneen kartongin kuivumiskutistuma konesuunnassa on tavallisesti kokonaan tai osittain estetty. Muodonmuutoksen konesuunnassa asettavat kuivatusryhmien väliset nopeuserot, siinä todellinen kutistuma voi olla jopa negatiivinen. Poikkisuunnassa kutistumista estävät kuivatussylinterien väliset kitkavoimat sekä rainan tasossa vaikuttavat leikkausvoimat, jotka ovat sylinterien välissä.

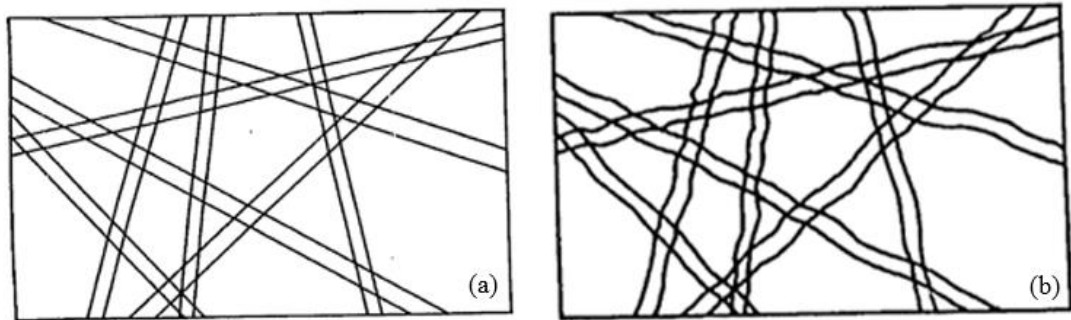
Massan jauhautuneisuudella on vaikutus todelliseen kutistumaan, joka on esitetty kaaviossa 8 alla. Kuvassa potentiaalinen kutistuma jauhautuneisuuden funktiona. Mittaus on tehty valkaisuamattomalle sulfaattisellulle laboratorionkokeessa Valley-jauhetusta massasta. (Ryti N. 1998, 63.)



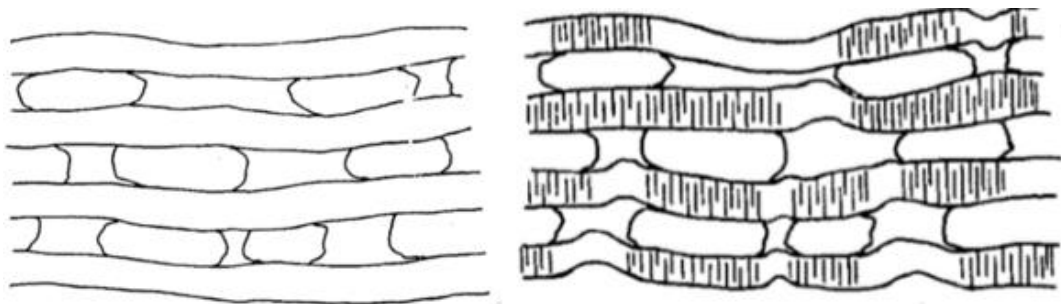
KAAVIO 8: Potentiaalinen kutistuma SR-luvun funktiona. (Ryti N. 1998, 63)

Kartonkiarkin kutistuminen kuivuessa voi johtua itse kuitujen kutistumisesta tai kuitujen siirtymisestä lähemmäksi toisiaan. Toisin sanoen kutistustapahtuma jaetaan kuitujen sisäiseen ja väliseen kutistumaan. Jälkimmäinen kutistuma tapahtuu kuiva-ainepitoisuuden kuitujen kyllästymispisteen alapuolella. Kuitujen kutistumista ja kuitujen välillä olevaa sidosta ei synny vapaan veden läsnä ollessa. Sen sijaan kuiduista irronneita fibrillejä pyrkii pintajännitysvoimien vaikutuksesta vetäytymään lähemmäksi toisiaan. Lisäksi pintajännitysvoimat johtavat suureen kutistumaan kartonkiarkin tasoa vasten kohtisuorassa ja tason suunnassa. Koska jauhatusta tekee kuituja elastiseksi ja fibrillien kautta pintajännitysvoimat voivat vaivattomasti vaikuttaa kuituihin, niin jauhatusta lisää kuitujen välistä kutistumaa. (Ryti N. 1998, 64.)

Kuitujen ja arkin keskinäinen kuivumiskutistuman riippuvaisuus selitetään Pagen kutistumisteorian avulla. Kuvassa 18 a on kaavamaisesti ilmaistu kutistumaton kuituverkosto, jonka kuivuessa kuitujen ristikohtiin muodostuu sidoksia. Kuivatuksen edetessä kuidut kutistuvat poikkisuunnan lisäksi myös kuitusidosten kohdalla. Tämän seurauksena poikkisuunnassa kutistuva kuitu pakottaa siihen sitoutuneen kohtisuorassa olevan kuidun kutistumaan sidosten kohdalla myös pituussuunnassa. Tällöin kuituun syntyy mikrokompressio. Lopputuloksena kuituverkossa tapahtuneista muutoksista on kuvan 18 b mukainen rakenne, jossa alun perin suorat kuituverkko-osat ovat muokkautuneet mutkille. Lisäksi kuvan 19 avulla asia voidaan helpommin havaita kutistuvan kartongin poikkileikkauksesta.



KUVA 18 a, b: Kaavamainen kutistumaton kuituverkosto (oik.) ja muokkautunut kuituverkosto (vas.). (Ryti N. 1998, 66.)

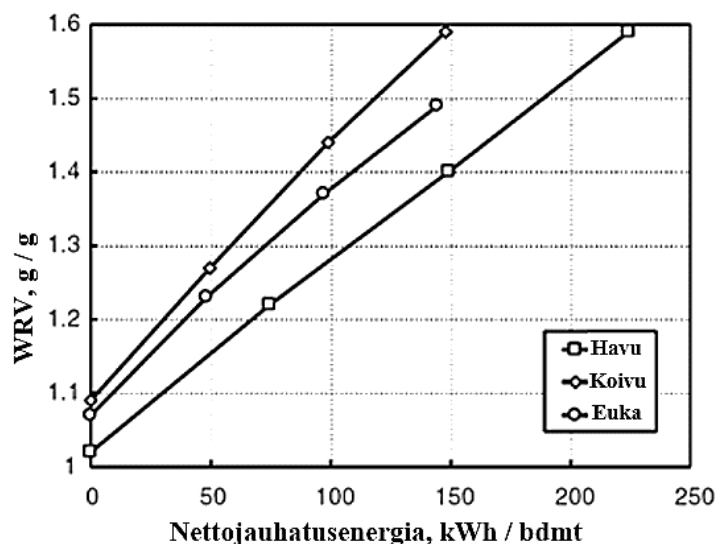


KUVA 19: kartongin kuituverkosto poikkileikkauksessa (vas.) ennen kutistumaa ja (oik.) kutistuman jälkeen. (Ryti N. 1998, 66.)

Pagen kutistumisteoriasta selviää jauhatuksen vaikutus potentiaaliseen kutistumaan, vaikka se ei suorasti muuta yksittäisen kuidun kosteusmuodonmuutoksen määrää. Jauhatus kasvattaa kuitujen välillä sidosten määrää eli niiden pinta-alaa ja sitä kautta kompression kokonaisuusmäärä laajentuu. (Ryti N. 1998, 65.)

Yhteenvedona voidaan todeta, että reunakutistuma tapahtuu kuiduista muodostuneen kuituverkon kuivumisen sekä vedenpoiston yhteydessä. Kuivatuksessa ja veden poistossa yksittäiset kuidut eivät kuivu tasaisesti poikkisuunnassa, vaan kuitujen morfologisen rakenteen, vedenadheesioin ja absorptioin sekä pintajännitysvoimien seurauksena kuidut kuivuvat melko kokonaisuutena verkkona. Ilmiö johtuu yksittäisten kuitujen poikkisuuntaisen ja kuitujen välisten kuitusidosten kuivatuskutistuksesta, joka on esitetty Pagen teorian avulla. Niilo Rytin (1998) mukaan teoriassa on otettu huomioon myös kuituorientaatio, joka asettaa koneella kuituja enemmän konesuuntaan kuin poikkisuuntaan. Koska kuidut kutistuvat huomattavasti enemmän paksuussuunnassa kuin pituussuunnassa, paperi kutistuu enemmän radan poikkisuunnassa kuin pituussuunnassa. Tästä seuraa, että jauhatus kasvattaa kuitujen välistä pinta-alaa ja aiheuttaa siten mikrokompression kokonaismäärän suurenemisen. Lisäksi jauhatus lisää myös kuitujen välistä kutistumaa yllä mainittujen kuitujen notkenemisen ja ulkoisen fibrilloitumisen kautta. (Ryti N. 1998,114–115.)

Lisäksi jauhatus vaikeuttaa veden poistumista massasta, mikä voidaan huomata kartonkikoneen viira-, puristin- ja kuivatusosalla. Kaaviosta 9 alla voidaan nähdä jauhatuksen vaikutus vedenpoistoon WRV-arvon avulla. (Lumiainen 2000.)



KAAVIO 9: Jauhatuksen vaikutus vedenpoistoon. (Lumiainen J. 1989a, 58.)



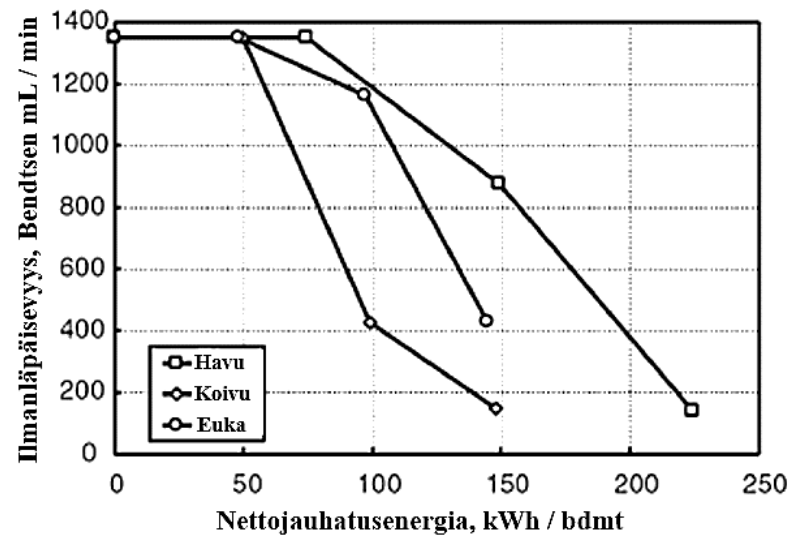
### 5.3.3 Huokoisuus ja ilmanläpäisy

Kartonki koostuu kuituverkostosta ja kuitujen sidosten väliset tilat muodostavat vuorostaan huokosverkoston. Näillä huokosilla on suuri merkitys kaasujen ja nesteiden virtauksille. Esimerkiksi ilmanläpäisevyyskyky, vesiabsorptio sekä muiden kartongin valmistusprosessissa käytettyjen aineiden tunkeutuminen riippuvat huokoisuudesta ja huokoskoon jakautumisesta. Kartongin huokosjakaumaan sekä kuituverkostoon vaikuttavat samat valmistustekijät, kuten jauhatus, jonka lisääminen aiheuttaa huokosten koon pienemisen ja niiden määrän vähentymisen. Syynä on ilmatilan hupeneminen kuitujen välissä ja siitä johtuva huokostilavuuden supistuminen jauhatuksen vaikutuksesta, jolloin suuremmat huokokset häviävät tai pienenevät huomattavasti.

Tilanteen kuvaamiseen, voidaan ajatella huokossädejakaumaa niin, että jakauman huippu ohentuu ja huokossäde pienenee. Lisäksi on muita tekijöitä, joiden vaikutuksesta huokosen määrä laskee. Esimerkiksi kartongin valmistuksessa huokososuutta voidaan tarkoituksellisesti alentaa hyödyntämällä seuraavia tekijöitä, kuten päällystäminen, kalanterointi, suuri märkäpuristus. Lisäksi mekaanisten massojen pieni freeness, tärkkelyksen ja täyteaineiden lisäys. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 83–, 88–89.)

Yleisimmin käytetty läpäisevyyden mittari on ilmanläpäisevyys. Sen kautta on mahdollista analysoida nesteiden tai painovärien tunkeutumista päällystämättömän kartongin sisään ja läpi, joka korreloi ilmanläpäisevyyden kanssa. Yleinen mittaamenetelmä ilmanläpäisevyydelle on Bendtsen [ml/min], jossa mitataan kartongin läpi menevä ilmavirtaus tietyllä paine-erolla standardin ISO 5636/3 mukaan. Tiiviille kartongille sopi paremmin Gurley-menetelmä (ISO 5636/5). Metodissa mitataan kartongin läpäisevä tietty ilmatilavuus aikaan nähden, jolloin yksikkönä on [s]. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 89.)

Jauhatuksen kasvaessa ilmanläpäisevyys laskee, mikä aiemmin mainittujen kriittisten ominaisuusparien mukaisesti vaikuttaa myös sileyteen. Sileyden parantuessa ilmanläpäisevyys laskee ja päin vastoin. Kaaviossa 10 alla on esitetty erilaisten massalajien ilmanläpäisevyys jauhatuksen edistyessä.



KAAVIO 10: Ilmanläpäisevyys jauhatuksen nettoenergian funktiona. (Lumiainen J. 1989a, 53.)

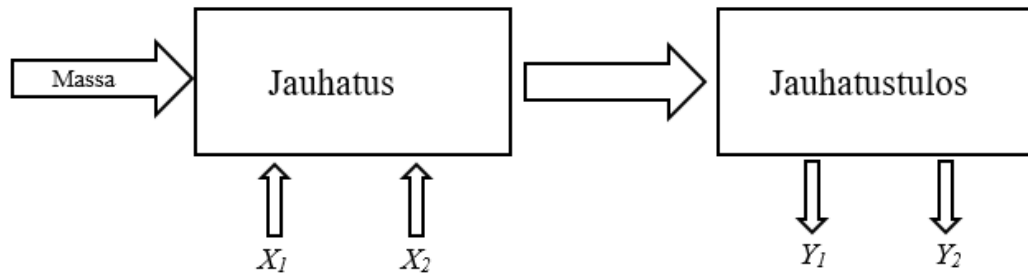
## 6 JAUHATUKSEN SÄÄTÖ

Tähän asti on käsitelty kartongin lujuus-, pinta- ja yleisiä ominaisuuksia ja jauhatuksen vaikutusta niihin. Jauhatuksen säädöllä voidaan saada haluttuja ominaisuuksia jauhatusteorioita käyttäen. Tässä luvussa tarkastellaan jauhatusmekanismia, jauhatusteorioita ja jauhatuksen säätöä.

Jauhatuksen tulosta säädetään jauhimen terien terävälillä, joka suoraan vaikuttaa jauhimen käyttämän energian määrään. Terien jauhatusenergia estää terän väliset fyysiset kosketukset sekä siirtyy terävälissä olevaan jauhatettavaan massa. Jauhatuksen lisäys vaikuttaa jauhimen kuormitukseen lisääntyvästi, jolloin jauhimen terävälit pienenevät. Vastaavasti jauhatuksen kuormitusta laskettaessa jauhimen teräväliä kasvatetaan. Jauhatuksen ohjaamisprosessi on hyvin monimutkainen: haasteina ovat jauhimen terävälin heterogeeninen jauhatustapahtuma ja epälineaarinen vaikutus jauhatusenergiaan. Jauhatustapahtuman heterogeenisyys tarkoittaa kuitujen jauhautuneisuuden epätasaisuutta, jolloin yksittäinen kuitu voi edetä jauhimen läpi rasittumalla useita kertoja, kerran tai rasittumatta ollenkaan, kuten yllä mainituissa flokkijauhatushypoteesissa. (Koskenhely 2007, 114–115.)

### 6.1 Jauhatuksen vaikutusmekanismi

Paperitekninen jauhatusmekanismi on hyvin kompleksinen ja laajaskaalainen. Niilo Rytin (1998) viittaus ”Tehdasjauhimen toiminnan arviointi” koulutukseen, jossa selitetään Arjasen kehittämää käsittelyjärjestelmää jauhatusprosessin manipulointia varten (Arjas A. 1971, osa 2.) Järjestelmä kuvassa 20 assosioi ominaispintakuorma- ja ominaissärmäkuormateorian toimivan mekanismin, jossa jauhimen toimintaa voidaan kuvata kahdella käsitteellä  $x_1$  ja  $x_2$ . Jauhatuksen määrä  $x_1$  kuvaa jauhimen suorittaman jauhatustyön määrää ja  $x_2$  kuvaa jauhimen toimintatapaa. Lisäksi massan reaktioita jauhatukseen voidaan esittää myös kahdella käsitteellä  $y_1$  ja  $y_2$ . Ensimmäinen kuvaa massan ominaisuuksien muutoksen määrää ja  $y_2$  kuvaa massan ominaisuuksien muuttumistapaa eli sitä, missä nopeudessa primäärivaikutukset (luku 3) ovat muuttuneet.



KUVA 20: käsittelyjärjestelmä jauhatusprosessin manipulointiin. (Ryti N. 1970, 48.)

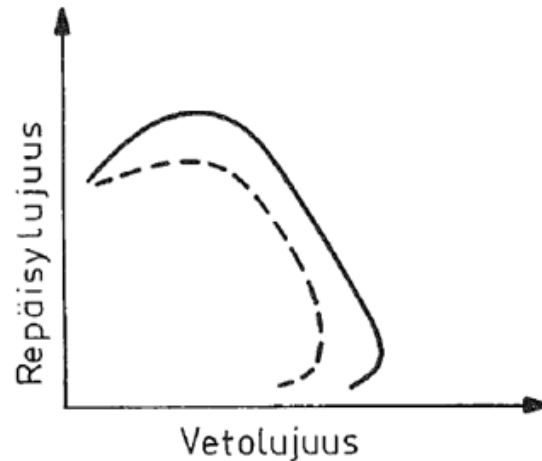
Käsittelyjärjestelmän termit vaikuttavat toisiinsa seuraavien lainmukaisuuksien avulla:

- Jos kahdessa eri jauhimessa tiettyä massaa jauhetaan siten, että jauhatustapa on molemmissa sama, niin jauhautumistapa on molemmissa tapauksissa edelleen sama.
- Jos jauhatusta ohjataan yllä mainitussa tapauksessa siten, että jauhatuksen määrä molemmissa jauhimissa on sama, niin massan jauhautuneisuus on molemmissa tapauksissa edelleen sama. (Ryti N.1998, 48.)

Yllä esitetty käsittejärjestelmä perustuu pohjan jauhimen suorituskyvyn vertailulle. Järjestelmän edellytyksenä on, että näille neljälle konseptille on mahdollista esittää sellaiset kvantitatiiviset mitat, että seuraavat lainmukaisuudet pitävät riittävällä tarkkuudella paikkansa.

- Kaikista massoista mitattavan suureen avulla voidaan kvantifioida jauhautuneisuutta, kun muuttuvat suureet tutkittavalla alueella muuttuvat tasaisesti jauhatuksen määrän muuttuessa. Tällaisia suureita ovat esimerkiksi suotautuvuutta kuvaava SR-luku, koearkista mitattu vetolujuus tai ilmanläpäisevyys.
- Kahdessa eri jauhatuksessa massan jauhautumistapa on sama, jos sen ominaisuudet edistyvät molemmissa tapauksissa samalla nopeudella. Tämä edellyttää kahden ominaisuuden keskinäisten muutosnopeuksien seuraamista. Ominaisuudet on valittava siten, että toinen niistä on enemmän riippuvainen fibrillaatiosta ja toinen katkeilun määrästä. Esimerkiksi kaaviossa 11 on esitetty

vetolujuuden ja repäisylujuuden ominaispari, joka on yksi yleisimmistä ominaisuuspareista jauhautumistavan kuvaamiseksi. Kaaviossa 11 ylempi käyrä viittaa jauhautumistapaan, jossa on ulkoinen ja sisäinen fibrillaatio, sekä alempi käyrä kuvaa jauhautumistapaa, jossa kuitu katkeaa todennäköisemmin.



KAAVIO 11: Vetolujuuden ja repäisylujuuden jauhautumistavan kehityskäyrät. (Ryti N. 1998, 49. muokattu)

- Jauhatuksen määrän suuruuden mittana käytetään puhtaan jauhatusenergian ominaislukua, joka on ilmaistu kaavassa (3) ja kaaviossa 12.
- Jauhatuksen tavan mittana käytetään ominaissärmäkuormaa, joka on esitetty kaavassa (4).

Niilo Rytin mukaan kokeelliset tulokset osoittavat, että esitetty mittalukujärjestelmä toteuttaa yllä mainitut lainmukaisuudet ainoastaan tietyin rajoituksin. Tämä selittää, että ominaissärmäkuormateoriaa on silti pidettävä parhaana nyt käytettävissä olevana jauhinten vertailuperusteena. (Ryti N. 1998, 49–50.)

## 6.2 Ominaissärmäkuormateoria

Käytetyin teoria teollisuudessa ja tehdasolosuhteissa on ominaiskuormateoria. Teoria perustuu oletukseen, että jauhatus syntyy pelkästään teräsärmistä, jolloin jauhatuksen lopputulos on riippumaton käytetyistä jauhimista. Ominaiskuormateorian avulla voidaan

yksinkertaistaa jauhatustapahtumaa: jauhatusprosessia pystytään kuvaamaan kahdella parametrilla, joista toinen identifioi jauhatuksen määrää (EOK) ja toinen jauhatustapaa (OSK). (Lumiainen 2000, 92; KnowPap 2018.)

### 6.2.1 Jauhatus- ja hukkateho

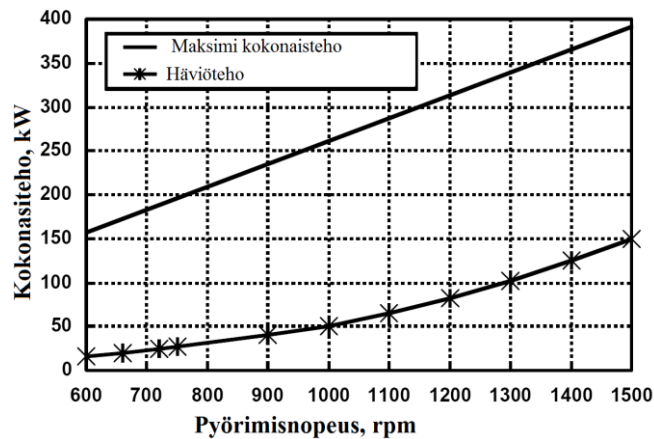
Jauhatusteorioilla on jauhatustehon jakamismekanismi, jonka mukaan jauhatusteho voidaan jakaa puhtaaseen jauhatustehoon ja hukkatehoon eli häviötehoon. Puhdas jauhatusteho on se osa tehon kulutuksesta, joka vie jauhatusta eteenpäin eli kuituja rasittava teho. Jauhimesta häviöteho voidaan mitata ajamalla jauhinta vedenkuormalla, kun teräaukko on avoimessa positiossa.

Häviöteho  $P_n$  [kW] voidaan laskea kaavan (2) mukaisesti. Häviöteholla on eksponentiaalinen kasvu jauhimen kierrosnopeuden  $n$  [1/s], ulkohalkaisijan  $d$  [mm] ja jauhatusvakion  $k$  kanssa. (Lumiainen 2000, 92; KnowPap 2018)

$$P_n = k * n^{2,8} * d^{4,5} \quad (2)$$

Kaaviossa 12 alla on esitetty erään kartiojauhimen häviötehon riippuvuus pyörimisnopeudesta. Seuraamalla tehohäviön käyrää huomataan, että esimerkiksi kierrosnopeuden ollessa 1300 rpm jauhimen häviöteho on 100 kW. Tämä osoittaa, että on käytettävä sähkömoottoritehoa 340 kW, jonka perusteella kyseisessä jauhimessa esimerkinmukaisen kierrosnopeuden mukaan jauhatustehon maksimiarvo on 240 kW. Lisäksi kaavion 12 perusteella voidaan laatia kaava (3), jossa puhdas jauhatusero  $P_e$  [kW] on kokonaistehon  $P_t$  [kW] ja häviötehon  $P_n$  [kW] erotus. (Lumiainen 2000, 92–93.)

$$P_e = P_t - P_n \quad (3)$$



KAAVIO 12: Erään kartiojauhimen häviöiden riippuvuus pyörimisnopeudesta (Lumiainen 2000, 92. muokattu)

### 6.2.2 Ominaisrämäkuorma (OSK) ja ominaiskulutus (EOK)

Ominaisrämäkuorma OSK eli jauhatuksen intensiteetti on energiamäärä, jonka kuitukimput vastaanottavat jauhatustapahtumassa roottorin särmältä staattorin särmälle. Kuituihin kohdistuneiden jauhatuskujen intensiivisyyttä määritetään kaavan (4) mukaisesti, jonka yksikkö on [J/m]. (Lumiainen 2000, 92; Koskenhely 2007, 115.)

Ominaiskuormaan vaikuttaa teräsärmien leikkausnopeus, joka perustuu kaavaan (5). Toisin sanoen jauhimen terien leikkausnopeus  $L_s$  [km/s] on staattorin harjojen lukumäärään  $Z_{st}$ , roottorin harjojen lukumäärään  $Z_r$ , teräsärmien kokonaispituuden  $l$  [km] ja kierrosnopeuden  $n$  [1/s] välinen tulo. (Koskenhely 2007, 115–116.)

$$OSK = \frac{P_e}{L_s} \quad (4)$$

$$L_s = Z_{st} * Z_r * l * n \quad (5)$$

Yhtälöiden (3) ja (4) perusteella voidaan havaita jauhimen terien geometrian vaikutusta sekä mitata jauhimen kuormitettavuustason suuruus saavutettaessa haluttu jauhatusintensiteetti. Yleensä pyörimisnopeuden vakiotilassa jauhatusintensiteetin toteuttamiseen terät ovat kapeita ja ne on asetettu tiheämmin, sekä niitä voidaan kuormittaa korkeammalla kuormitusalueella kuin leveitä teriä, joiden teräharjat on asetettu harvemmin. (Koskenhely 2007, 115–116.)

Jauhimen ohjauksessa ominaiskulutus eli EOK on esitetty kaavassa (6). Jauhimen kuormitusta säädetään massan virtauksen ja sakeuden mukaan, jonka perusteella käytetään nimitystä EOK-säätö (energian ominaiskulutuksen mukainen säätö).

$$EOK = \frac{P_e}{F * C}, \quad (6)$$

jossa EOK on energian ominaiskulutus [kWh/t],  $F$  on massan virtaus [l/min] ja  $C$  on massan sakeus [kg/m<sup>3</sup>].

EOK-säädön tavoitteena on pitää kuituihin osoitettua jauhatuksen määrää vakiona, jonka mukaan se reagoi virtauksien muutoksiin. Virtauksen pienentyessä jauhatusteho laskee, jolloin teräväli aukeaa. Vastaavasti virtauksen kasvaessa jauhatusteho nousee eli teräväli pienenee. EOK-tasoa säädetään jauhatustuotannon muuttuessa, jotta jauhatusintensiteetti toteutuu mahdollisimman pienillä vaihteluilla. (Koskenhely 2007, 117.)

Kuten aiemmin todettu, jauhatusenergia voidaan selvittää jauhatusintensiteetin avulla, mutta se ei anna tietoa, miten kuidut vastaanottavat jauhatusenergian. Lisäksi mekanismissa ei ole huomioitu muita jauhatustulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten jauhatussakeus, terien kunto, jauhimen teräväliden suuruus, terien ja urien leveys sekä terien leikkauskulma. Kuituihin kohdistuvan rasituksen ja hallinnan intensiteetti on vaivaton menetelmä, jota käytetään kattavasti paperin ja kartongin tuotannossa. (Lumiainen 2000, 93.)

### 6.3 Ominaispintakuormateoria

Ominaispintakuormateoria perustuu ominaiskuormateoriaan ja huomioi jauhimen terien leveyden vaikutusta jauhatustulokseen. Teorian oletuksena on jauhatusenergian siirtyminen iskun aikana kuituihin, eikä ainoastaan teräsärmältä teräsärmälle jauhatustapahtuman yhteydessä. Teoria pohjautuu ominaissärmäkuormateoriaan ja jauhatustavan (OPK) laskentaan. (Lumiainen 2000, 94; KnowPap 2018.)



### 6.3.1 Ominaispintakuorma (OPK) ja jauhatusmäärä (EOK)

Ominaispintakuorma eli jauhatustapa (OPK) on työstetty yllä mainitusta kaavasta (4), johon on lisätty jauhatuskunpituuden vaikutus. OPK:n teoriassa kuituihin kohdistuu jauhatuksen määrä, joka muodostuu jauhatuskujen pituudesta sekä jauhatuskujen kappalemäärästä ja kovuudesta. Tästä voidaan todeta, että ominaispintakuormateorian mukaisessa EOK:n määrän laskutoimituksessa otetaan huomioon jauhatuksen intensiivisyys eri tavoin kuin ominaissärmäkuormateoriassa. (Lumiainen 2000, 94.)

Lauseiden (7–9) mukaan voidaan selvittää ominaispintakuormateorian vastaava energian ominaiskulutus EOK [kWh/t], jauhatuskujen määrä  $N_i$  [km/kg] ja ominaispintakuorma eli OPK [J/m<sup>2</sup>]. Tiettyjen ehtojen täytyessä yhtälöiden (7–9) perusteella voidaan ratkaista jauhatuskunpituus  $IL$  [m], ominaissärmäkuorma  $OSK$  [J/m], massavirtaus  $M$  [kg/s] ja jauhimen terien leikkausnopeus  $L_s$  [km/s]. (Lumiainen 2000, 94; KnowPap 2018)

$$EOK = N_i * OPK * IL \quad (7)$$

$$N_i = \frac{L_s}{M} \quad (8)$$

$$OPK = \frac{OSK}{IL} \quad (9)$$

OPK:ta laskiessa kaavasta (9) voidaan huomata, että ominaispintakuorma on jauhatuskunpituuden ja aiemmin mainitun ominaissärmäkuorman (jauhatusintensiiteetti) osamäärän tulos. Tämä tarkoittaa, että ominaispintakuorma kuvaa siirtyvän jauhatusenergian terän pinta-alaa kohti. Jauhatuskujen määrä, joka on esitetty yhtälössä (8), voidaan määrittää jauhinterien leikkausnopeuden ja jauhimen läpi virtaavan kuitumassavirtauksen osamäärän avulla. Jauhatuskujen määrä ei kuitenkaan evaluoi, kuinka paljon iskua yksittäiset kuidut ovat vastaanottaneet. (Lumiainen 2000, 94.)

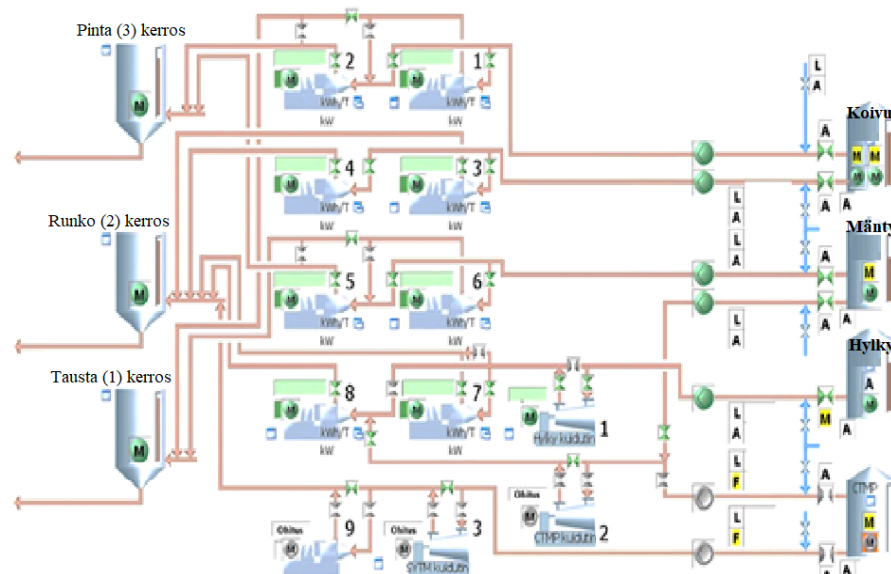
## 7 KOKEELLINEN OSUUS

### 7.1 Tarkoitus

Kokeellisessa osuudessa suoritetaan koeajo, jonka tarkoituksena on tutkia jauhatusprosessin vaikutusta reunasileyteen. Kohteena on löytää kolmikerroksiselle päällystämättömälle kartonkilajille energiatehokas ja sopiva jauhatusparametrien kombinaatio, joka optimoi kartongin reunasileyttä. Koeajossa mitatuista laatuarvoista tutkitaan tilastollisien analyysien avulla eri kerroksissa vuorottaisia jauhatusyhdistelmiä. Lisäksi ajetun koeajon avulla selvitetään mahdollisimman toimiva jauhatustapa eräälle kartonkilajille analysoimalla pintaominaisuuksien kehitystä jauhatuksen vaikutuksesta.

### 7.2 Tausta ja suunnittelu

Jauhatusjärjestelmä koostuu neljästä jauhatuslinjasta, joissa on kaksi sarjaan kytkettyä jauhinta. Kullakin linjalla on massasäiliöt, josta erilaatuiset massat pumpataan RF3-kartiotyyppisten jauhimien läpi. Jauhatettu massa kulkee kolmeen eri kerrokseen eli pintaan (3), runkoon (2) ja taustaan (1). Kuvassa 21 alla on esitetty jauhatusjärjestelmä, jolla koeajo on suoritettu.



## KUVA 21: Jauhatusjärjestelmä. (Stora Enso 2018a.)

Koeajon suunnittelussa käytettiin Wedge -ohjelmistotyökalua, jonka avulla pystytään systemaattisesti seuraamaan ja analysoimaan prosessin ja yksikköprosessiosien muutoksia sekä rajoittamaan häiriöitä ja mahdollisesti selvittämään niiden syntymiskohtia. (Savcor 2013, 7.). Wedge -työkalua käyttäen koeajoon määritettiin jokaiselle koepisteelle jauhinkohtaiset EOK:t, joissa otettiin huomioon ajatun kartonkilajin jauhatusvaihteluiden historiatietoja.

Alustavasti kokeeseen suunniteltiin yhdeksän koepistettä, jossa 0 eli referenssipiste on ajotilanne. Kyseisessä kartonkilajissa käytetään koivu-, mänty- (kuivattu) ja hylkymassaa. Koko ajon aikana hylkymassaprocentti pidettiin vakiona. Pisteessä neljä EOK:ta säädettiin koivumassan lisäksi myös hyllylle, jolloin seurattiin tarkasti reseptin hylkyprosenttia, ettei se poikkea vakiosta. Jauhimista (J1-J7) otettiin massanäytteet jokaisella koepisteellä konerullan vaihtuessa. Lisäksi kuivassa päässä valmistuneista konerullista otettiin kaksi ylimääräistä poikkiratanäytettä, joista tutkittiin sileyttä, karheutta sekä pinnanvaihtelua OptiTopo -mittauksen avulla. Koeajon toteutus suoritettiin yhdessä päivässä, ja sen kesto oli suunnilleen 10–12 tuntia.

Ajokoesuunnittelussa määritettiin myös näytteiden lukumäärä ja näytteenottoaika. Märässä päässä massojen näytteenotto tapahtui jauhimista J1–J7 jokaisen jauhatusmuutoksen jälkeen. Massanäytteet vietiin asianmukaisessa astiassa laboratorioon suotautumisvastus- eli SR-mittaukseen. Kuivassa päässä saadut valmiin kartongin poikkiratanäytteet vietiin laboratorioon Paperlab -testeihin, jossa yllä mainittuja sileyttä, karheutta ja pinnan epätasaisuutta tutkittiin PPS-, Bendtsen-, OptiTopo- ja Scarredness -mittausten avulla kartonkinäytteen pinta- ja taustapuolilta.

### 7.3 Menetelmät

Tutkittaessa jauhatuksen vaikutusta reunasileyteen, keskeiset mittausmenetelmät ovat massan jauhatusasteen mittaukset eli jauhatusasteen SR-luvun sekä kartongin pintaominaisuuksien mittausmenetelmät. Pintaominaisuuksien mittausmenetelmiin tässä työssä kuuluivat sileyttä, karheutta sekä pinnan vaihtelua (OptiTopo) ja epätasaisuutta (Scarredness) kuvaavia profiilimittaukset.

Työssä jauhatuksen ominaiskulutusenergian ja jauhatustason avulla on pyritty löytämään se tämän kartonkilajin massa, joka on kriittisin reunasileyden kannalta, sekä sen SR-luvun riippuvuutta EOK:n säädöstä. Lisäksi muiden massalaatujen jauhautuneisuudet on pyritty tarkistamaan ajettavan kartongin eri kerroksista. Pintaominaisuusmittauksien tuloksista on haettu keskiarvoiset ja rullakohtaiset yleisnäkymät kartonkinäytteiden pinta- ja pohjapuolilta, joiden avulla on havainnoitu reunasileyden kriittiset alueet.

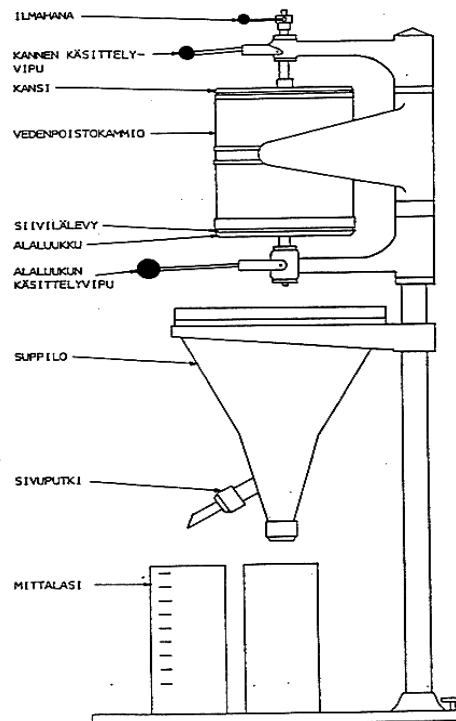
### 7.3.1 Jauhautuneisuuden mittaaminen

Suotautuvuuden mittaus kuuluu määrän pään perussuureiden mittauksiin, ja se on yksi kartonkikoneen kemian suureista. Märkäosan kemiaan kuuluu sellainen osa lyhyestä kierrosta, johon ei pystytä vaikuttamaan mekaanisilla asetuksilla, esimerkiksi perälaatikon asetuksilla. (Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 147.)

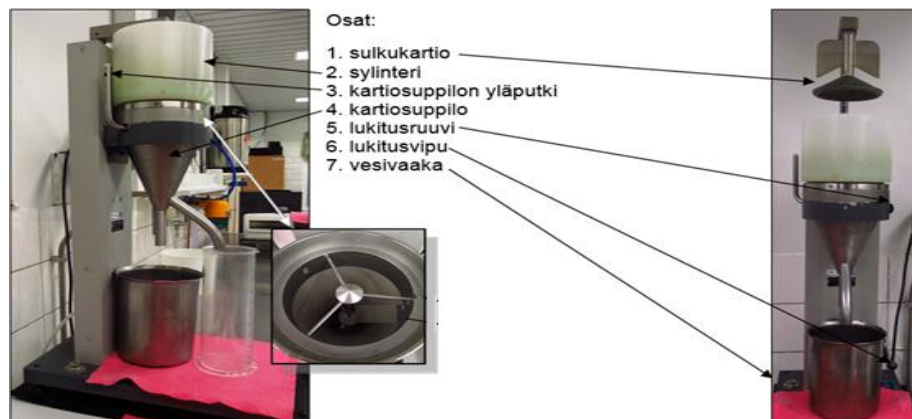
Suotautuvuutta voidaan analysoida laboratoriomittauksilla ja on-line-mittauksilla. On-line-mittalaitteiden toimintaperiaatteet perustuvat standardisoituihin laboratoriomittalaitteisiin, joista käytetyimmät ovat Schopper-Riegler ja Canadian Standard Freeness -testi. Laboratoriossa mitatut Schopper-Riegler- ja Canadian Standard Freeness -testit noudattavat myös standardisoituja menetelmiä. (KnowPap 2018; Stora Enso 2018c, 1.)

CSF- eli Canadian Standard Freeness -testiä käytetään massan suotautuvuuden eli freenessin määrittämiseen. Menetelmä noudattaa ISO 5267/2 -standardia, jossa CSF- lukua mitataan suotauttamalla yksi litra sulppua noin 0,3 % sakeudessa kaatamalla se laitteen kammioon, jonka pohjassa on sihti. Vesi poistuu sihdin ja sen päällä olevan suspension muodostaman kuitukerroksen läpi suppiloon, jonka pohjassa ja sivussa on putkiaukot. Sivuputkesta poistuneen veden määrää kertoo massan freeness-arvon millilitroina. Massasuspension arvoa tulkittaessa korkea freeness-arvo ilmoittaa alhaisesta suotautumisvastuksesta ja vastaavasti matala freeness-arvo kertoo korkeasta suotautumisvastuksesta. Kuvassa 22 on CSF- laitteen rakenne. (Stora Enso, 2018b, 1-3; Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. 2006, 150.)

Vanhin suotautuvuusmittaus Schopper-Riegler -testi eli SR on hyvin samanlainen kuin CSF-testi. Laboratorio-olosuhteissa mittaus toimii ISO 5267/1 -standardin mukaan, jossa yksi litra massasulppua noin 0,2 % sakeudessa kaadetaan sylinteriin. Massasulppu kulkee sylinterin ja kammion pohjassa olevaan kartiosuppiloon. SR-laitteen kartiosuppilossa on kaksi aukkoa, kuten CSF-testilaitteistossa, mutta SR-laitteen kartiosuppilossa sivuputki on pidempi kuin CSF-laitteistolla. Mittauksen tuloksena saadaan millilitramäärä vettä, joka poistuu SR-sivuputkesta. SR-luvun käänteinen käyttäytyminen CSF-lukuun osoittaa, että mitä isompi SR-luku on, siitä suurempi suotautumisvastus massalla on. Kuvassa 23 on esitetty tärkeimmät SR-laitteiston osat. (Levlin, J-E. & Söderhjelm, L. 1999, 51; Stora Enso, 2018b, 2.)



KUVA 22: CSF- laite. (Stora Enso, 2018b, 3.)

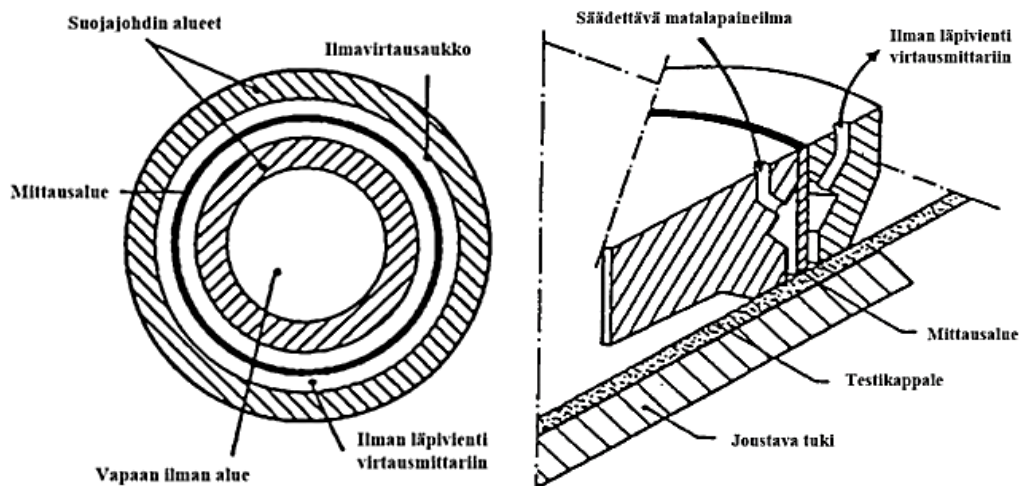


KUVA 23: SR- laitteiston pääkomponentit. (Stora Enso 2018c, 3.)

### 7.3.2 Sileyden mittaaminen

Menetelmä ISO 8791-4:2007, Parker Print Surface (PPS) sileys mitataan määritetyissä olosuhteissa, kun metallinen mittapäarengas (kuva 25) painetaan näytteen pintaa vasten. Näytekappaleeseen kohdistuu OVS- mittapään metallirengas (kuva 24), jonka läpi säädettävä matalapaineilma siirtyy mitta-alueeseen ja poistuu virtausmittariin analysoitavaksi. Toisin sanoen mittauksessa ilmavirtaus muunnellaan mikrometreiksi.

PPS- menetelmä antaa enemmän tietoja mikroskaalassa kuin Bendtsen-karheusmittaus. PPS-mittaus voidaan suorittaa Autoline-, PaperLab-laitteistolla tai manuaalisesti.

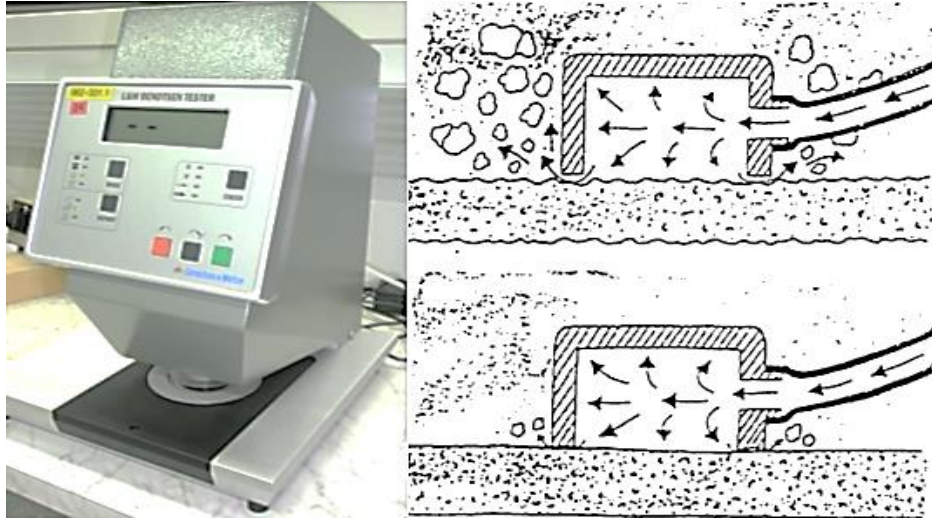


KUVA 24: OVS-mittapään rakenne (vas.) ja PPS-mittauksen periaate (oik.). (Stora Enso 2017, 21.)

### 7.3.3 Karheuden mittaaminen

Karheusmittaus eli Bendtsen-metodi ISO 8791-2:2013 [ml/min], voidaan määrittää ilmavirtauksen avulla, jossa näytteen pinta ja metallinen mittausrengas painetaan toisiaan vasten tietyissä olosuhteissa. Karheus mitataan arkin molemmilta puolilta ja testi tehdään joko Autoline-, PaperLab- tai manuaalisella mittalaitteella (kuva 25). Sileämpi pinta viittaa pienempään ilmavuotoon ja tämä tarkoittaa, että näytteen pinnan epätasaisuuden

arvo on pienempi. Ilmavirtauksen vuotomenetelmän periaate on esitetty kuvassa 25 oikealla.



Kuva 25: Karheuden mittauslaitteisto (vas.) ja ilmavirtausmittauksen periaate (oik.). (Stora Enso 2017, 20.)

### 7.3.4 OptiTopo- ja Scarredness-mittaus

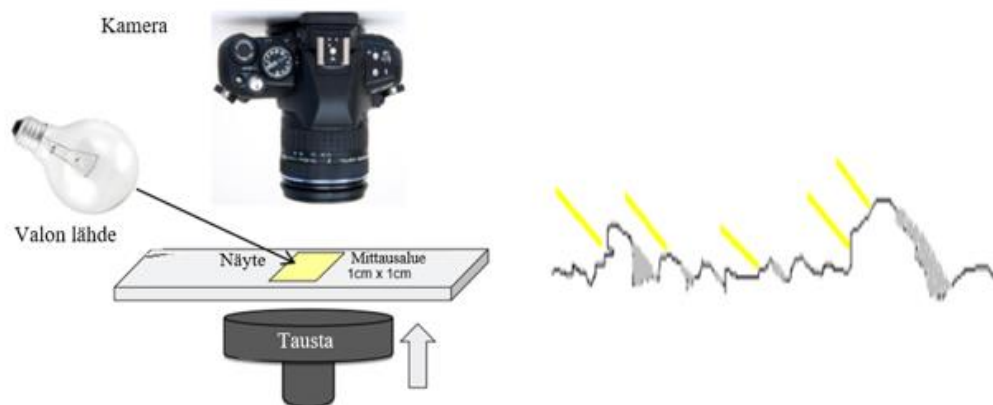
L&W OptiTopo on kartongin pinnan epätasaisuuden ja painettavuuden ennustamiseen tarkoitettu mittauslaite, joka on nopeampi ja edullisempi verrattuna perinteisiin optisiin menetelmiin näytepinnan epätasaisuuden mittaamiseksi. Topografian avulla mittauksessa tutkitaan karheuden kanssa korreloivia kartongin pinnan poikkeamia (OSD) ja kraattereiden määrää. OSD-arvo kuvaa pinnanvaihtelua mikrometreinä, kun kraattereita kuvataan prosentteina.

Mittauksen periaate voidaan nähdä kuvasta 26, jossa matalalla kulmalla kartonkinäytteen pintaa altistetaan eri aallonpituuksien valoille. Kamera ottaa vastakkaisilta sivuilta kuvia ja lähettää niitä analysoitavaksi ohjelmaan. Analyysissä ohjelma yhdistää näytepinnan kraattereiden syvyyden ja sen mukaisen aallonpituuden, että tuloksena tulisi pintatopografinen tutkittavan pinnan profiili.



KUVA 26: L&W OptiTopo-laite (vas.) ja mittauksen periaate (oik.) (Stora Enso 2017, 23.)

Scarredness-indeksi ( $\mu\text{m}$ ) eli pinnan epätasaisuutta kuvaava pintaprofiili-indeksi mitataan poikkiratanäytteistä Autoline-, ja PaperLab-laitteistolla. Näytteen pintaa altistetaan LED-valolle tietyssä kulmassa ja mittausalueen yläpuolella sijoitettu kamera ottaa kuvia valaistusta näytteestä kuvan 27 mukaisesti. Valon heijastuksesta näytteen pinnan korkeammat alueet näkyvät vaaleampina kuin matalat alueet (kuva 27 suurennettu mittakaava oik.). Scarredness-indeksi kuvaa määrää, kokoa, muotoa ja syvyyttä näillä alueilla. Mittaus tehdään kone- ja poikkisuunnassa, mikä kertoo kartongin sileydestä ja painettavuudesta.



KUVA 27: Scarredness-mittauksen toimintaperiaate (vas.) ja näytteen pintaprofiili (oik.).



## 7.4 Suoritus

Koeajo ajettiin kartonkikoneen normaalin tuotannon aikana, ja sen avulla haettiin oikea jauhatuksen ajotapa eräälle kartonkilajille haluttujen ominaisuuden saavuttamiseksi. Jauhatuksen ajotapa säädettiin jauhimilla 1-7 kartongin eri kerroksille, jotka ovat merkitty (1), (2) ja (3) eli tausta-, runko- ja pintakerroksille. Lisäksi tutkittiin jauhatuksen vaikutusta kartongin reunasileyteen sekä yleisiin pintaominaisuuksiin, joissa on myös otettu huomioon aiemmin mainittu reunakutistuma.

Koeajon alussa jauhimista 1–7 otettiin massanäytteet eli referenssinäytteet, jotka kuvaavat ajotilannetta. Lisäksi jokaisesta koepisteestä otettiin massanäytteet jauhimista ja valmiista konerullista kaksi ylimääräistä poikkiratanäytettä PaperLab-testikoneistoa varten tutkittavaksi. Suunnitelman mukaan kolmikerroksiselle kartonkilajille muutoksia tehdään yksi kerros kerrallaan ja isommilla EOK-väleillä niin, että pinta-, runko- ja taustakerroksille tulisi kolme pistettä kerrosta kohti. Ensimmäisen koepistesarjan (pisteet 1–3) muutoksessa ilmeni, että operaattori 1, joka oli säätämässä suunniteltuja taustakerroksen jauhimen J1 ja J6 ominaiskulutusenergioita oli vahingossa muuttanut myös pintakerroksen jauhimen J2 ja J5 EOK:ta. Tilanteen edistyessä tehtiin hyödyllisiä havaintoja koivumassan suhteen. Koivumassan rajumman jauhatusmuutoksen yhteydessä (koepiste 1) kartongin loppukosteus oli hyvin korkea, sekä höyrypaineen laskiessa ajonopeus oli alhainen. Tämän seurauksena koepisteen 1 konerulla jätettiin vajaaksi ja siirryttiin seuraavan koepisteeseen.

Suunnitelmasta poiketen päätettiin käyttää tilannetta eduksi lisäämällä alkuperäiseen koeajosuunnitelmaan symmetrisesti laskevan koepistesarjan kartongin tausta- ja pintakerroksille. Koepistesarjassa (pisteet 9–12) otettiin huomioon aiemmin tehty koivumassan ominaiskulutusenergian muutos, jonka perusteella taustakerroksen koivua jauhatettiin pienemmällä muutoksella. Taulukossa 5 on esitetty parannettuja koepistekombinaatioita. Taulukossa myös näkyy askelmaiset jauhatusmuutokset, jossa koepistesarjat on keskitetty pinta- ja runkokerroksille. Tämä tarkoittaa, että poikkiratanäytteen tuloksia tutkiessa saadaan enemmän korreloivaa vaikutusta nimenomaan pinta- ja taustapuolille, mikä korostaa tämän työn tarkoitusta.

Taulukon 5 mukaan EOK-asetusarvoa muutettiin koeajon aikana joko nostamalla tai pienentämällä. Kuitujen liiallisen jauhautumisen estämiseksi ja kartonkituotannon

varmistamiseksi kokonaisen jauhatusjärjestelmän kokonaisenergian ominaiskulutuksen muutokset suoritettiin askelmaisesti, jotta koeajon muutokset eivät aiheuttaneet mahdollista haittaa tuotannolle. Jauhatuksen EOK-muutoksia ei tehty samanaikaisesti kartongin kaikille kolmelle kerrokselle, vaan pelkästään pinnalle ja taustalle eli (1) ja (3) kerroksille.

TAULUKKO 5: Jauhatuskoeajon parannettuja koepistekombinaatioita.

Massa	Koivu	Mänty	Koivu	Mänty	Koivu	Hylky
Kerros	Tausta (1)	Tausta (1)	Pinta (3)	Pinta (3)	Runko (2)	Runko (2)
Jauhin (Kerros)	J1(1)	J6(1)	J2(3)	J5(3)	J3(2) + J4(2)	J7(2)
Koepisteet	EOK, kWh/t	EOK, kWh/t	EOK, kWh/t	EOK, kWh/t	EOK, kWh/t	EOK, kWh/t
Referenssi (0)	28	158	30	150	19	14
1	40	170	40	170		
2	20	170	20	170		
3	20	130	20	130		
4					25	25
5					25	15
6					15	10
7			30	170		
8			20	170		
9			20	130		
10	30	170	20	130		
11	20	170	20	130		
12	20	130	20	130		

Pinta- ja taustakerroksien koivun jauhatusten (J1 ja J2) ominaiskulutuksien muutokset koepistesarjassa 1–3 pidettiin  $\pm 10$  kWh/t ja männyn  $\pm 20$  kWh/t referenssitilasta. Runkokerroksessa koivumassan jauhatuksessa (J3, J4) EOK-vaihtelua muutettiin  $\pm 5$  kWh/t ja hyllyn EOK-muutos kokonaisuudessaan oli +10 kWh/t ja -5 kWh/t myös referenssitilasta. Liitteessä 1 kuvassa 1 on esitetty pinta- ja taustakerroksen (J2, J5 ja J1, J6) EOK-trendien muutokset ajan funktiona, sekä samassa liitteessä kuvassa 2 on esitetty runkokerroksen (J3, J4 ja J7) ominaiskulutusenergian trendien vaihtelut. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty jauhinkohtaisesti koeajon aikana tehtyjä EOK-säädön muutoksia yhtenäisenä trendiviivana (kaavio 1) ja (kaavio 2).

## 7.5 Tulokset ja tulkinta

Koeajon tuloksia, kuten suotautuvuudet sekä osa kartongin poikkiratanäytteistä mitatuista sileyksistä ja karheuksista saatiin jo ajojen yhteydessä. Lisäksi loput tuloksista, kuten OptiTopo-, PPS- ja pintaprofiili-indeksien mittausarvot, toimitettiin viikon sisällä koeajon päättymisestä.

### 7.5.1 Suotautuvuusmittauksen tulokset

Ensimmäiset tulokset, jotka saatiin määränpään laboratoriosta, olivat SR-luvun suotautuvuudet. Massanäytteiden SR -luvun tulokset on esitetty liitteessä 2 taulukossa 1, jossa näkyy eri kerrosten suotautuvuusluvun vaihteluita jauhatusmuutosten yhteydessä. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että jauhatuksen EOK-muutos vaikuttaa suotautuvuuteen, mikä näkyy myös liitteestä 2 kaavioista 1 ,2 ja 3.

Taustakerroksen SR-luvun vaihtelut mitattiin koepistesarjoista 0–3 ja 10–12 ensimmäisestä ja kuudennesta jauhimesta. Kaavion trendit (Liite 2, kaavio 1) osoittavat, että koivumassan rajummassa jauhatuksessa suotautuvuus on korkea ja jauhatuksen laskiessa myös SR-luku laskee. Samanlaista riippuvuutta voidaan huomata mäntymassan jauhatuksen ja suotautuvuuden välillä. On kuitenkin otettava huomioon mänty- ja koivumassan kuiturakenteen muutos jauhatuksessa, joka voidaan päätellä SR-muutoksen suuruuden avulla. Mäntymassan SR-lukujen keskimääräinen muutos on 2,36 yksikköä ja koivumassan 2,50 yksikköä. Tästä seuraa, että mäntymassan SR-luvun muutos tapahtuu herkemmin kyseisissä koepistesarjoissa ja jauhatuskombinaatioissa.

Pintakerroksessa SR-muutokset osoittavat, että pistesarjojen 0–3 ja 7–12 koivumassan keskimääräinen muutos on 0,34 ja männyn 0,38 yksikköä. Tämän kartonkikerroksen muutokset näkyvät toisen ja viidennen jauhimen jauhatustrendien vaihteluina (Liite 2, kaavio 2), jotka ovat alle 0,5 SR-yksikköä.

Runkopuolella (J3, J4 ja J7) tälle kartonkilajille mäntymassan tilalle jauhettiin hylkyä, jonka SR-luku nousee ja laskee jauhatuksen kasvaessa ja pienentyessä, mutta jauhatuksen

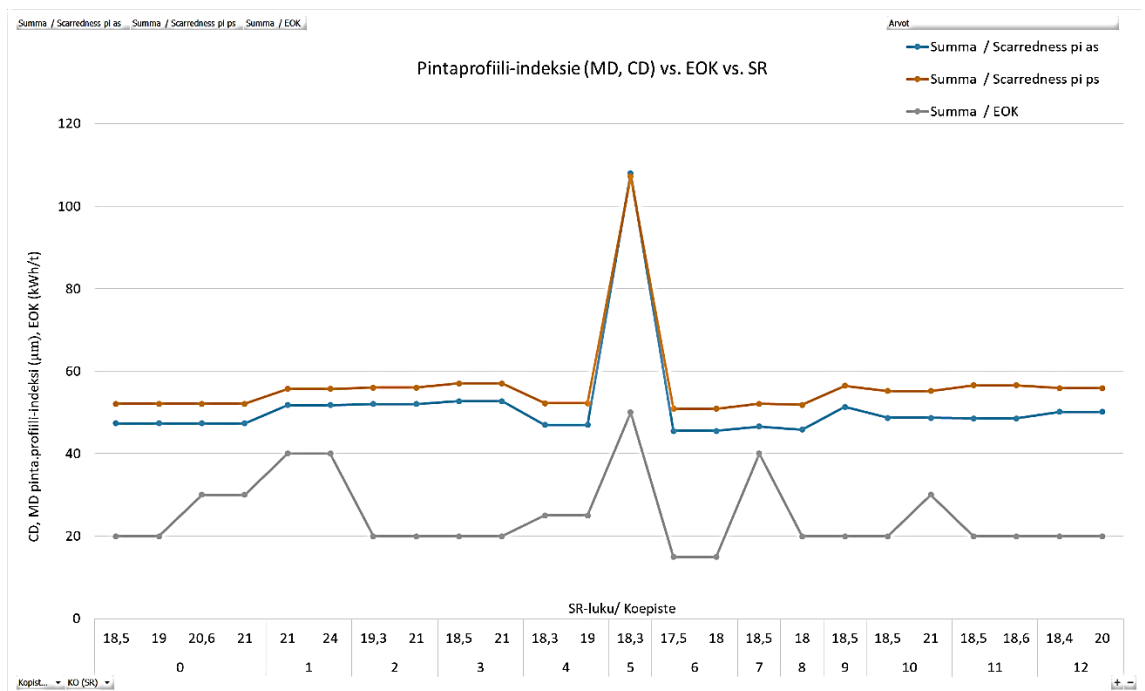
ominaiskulutuksen tasoissa arvoissa hylkymassan suotautuvuus vaihtelee noin 0,4 SR-yksikköä (Liite 2, kaavio 3). Koivumassan neljännen jauhimen SR-luku kasvaa ja pienenee hyvin pienillä muutoksilla koivun EOK:ta nostaessa ja laskiessa. Kolmannen jauhimen koivumassan SR -luku kasvaa jauhatusta nostaessa (muutos 0,5 yksikköä), mutta sitten pysyy melko samana tässä jauhatuskombinaatiossa (0, 4–6 koepistesarjassa).

Yhteenvetona voidaan tiivistää taulukkoon 6 kerroskohtaisesti koivu-, mänty- ja hylkymassojen suotautuvuuslukujen minimi-, maksimi- ja keskiarvotulokset. Keskiarvoisista tuloksista huomataan, että mänty ja hylkymassan suotautuvuusvastukset ovat korkeampia kuin koivun. Teoriatietojen mukaan tämä havainto osoittaa, että massalietteessä jauhetuilla kuiduilla on vaikutus suotautuvuusvastukseen.

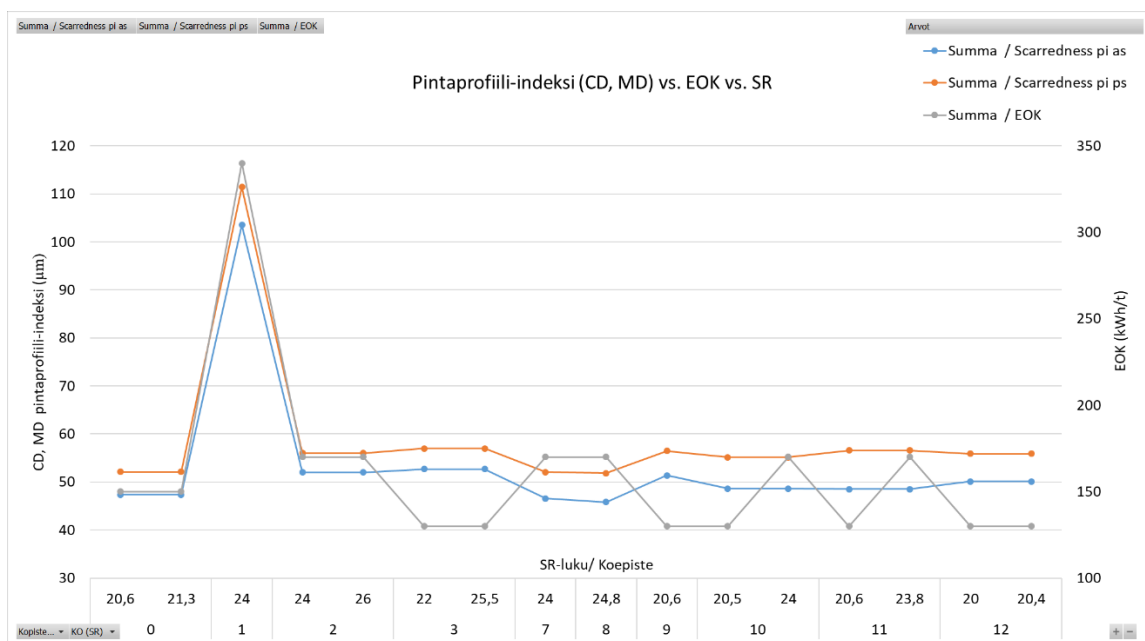
TAULUKKO 6: Kerroskohtaiset keskimmäiset SR-luvut erilaatuisille massoille.

Jauhin/ massa	Tausta (1)		Pinta (3)		Runko (2)		
	J1/ KO	J6/ MÄ	J2/ KO	J5/ MÄ	J5/ KO	J4/ KO	J7/ HY
SR-luvun minimiarvo	18,5	20,0	18,0	20,4	18,0	17,5	19,6
SR-luvun maksimiarvo	24,0	26,0	21,0	25,5	19,0	19,0	22,0
SR-luvun keskiarvo	20,3	22,9	19,4	22,6	18,4	18,3	20,6

Tässä työssä kartongin eri kerroksissa koivumassan suotautuvuuksien käyttäytymistä voidaan myös kuvata kaavion 13 avulla. Kaaviosta näkyvät poikkiratanäytteiden pinnan epätasaisuuden pintaprofiili-indeksit sekä jauhatuksen EOK -säätö SR-luvun funktiona. Lisäksi kaaviossa SR-luvun alla on konerullan (koepisteen) numerot. Esimerkiksi kuudennesta koepisteestä saadulla rullalla (6) koivumassojen suotautuvuuksien SR-luvut ovat 17,5 ja 18. Poikki- ja ajosuuntaiset pintaprofiili-indeksit ovat noin 46 ja 51 kartongin pinta- ja pohjapuolella. Samalla logiikalla kaaviosta 14 voidaan selvittää koeajon mäntymassan trendejä ja niiden riippuvuutta.



KAAVIO 13: Koivumassan pintaprofiili-indeksi (MD/CD) ja EOK (kWh/t) SR-luvun funktiona.



KAAVIO 14: Mäntymassan pintaprofiili-indeksi (MD/CD) ja EOK (kWh/t) SR-luvun funktiona.

Molemmat kaaviot osoittavat, että jauhatuksen energiaa nostaessa suotautuvuus kasvaa tiettyyn rajaan asti, jonka jälkeen se pysyy melko samana tai muuttuu pienellä vaihtelulla. Lisäksi koivumassan EOK:n ja SR-luvun alentamisen ja nostamisen vaikutuksesta

molempien puolien pintaprofiilit laskevat tai/ ja nousevat, osoittaen niiden välillä korrelaatiota.

### 7.5.2 Sileys- ja karheusmittausten tulokset

Kartongin pinnan sileyttä ja karheutta mitattiin PPS- ja Bendtsen-metodien avulla PaperLab-mittauslaitteistolla. Jokaisesta poikkiratanäytteestä ominaisuuksia mitattiin PaperLabin ohjelmalla, joka luotiin koeajoa varten. Ohjelman mittaustiheys on 18 cm koko poikkiradan pituudelta (560 cm), joten koeajon tuloksia saatiin seuraavista mittauksista:

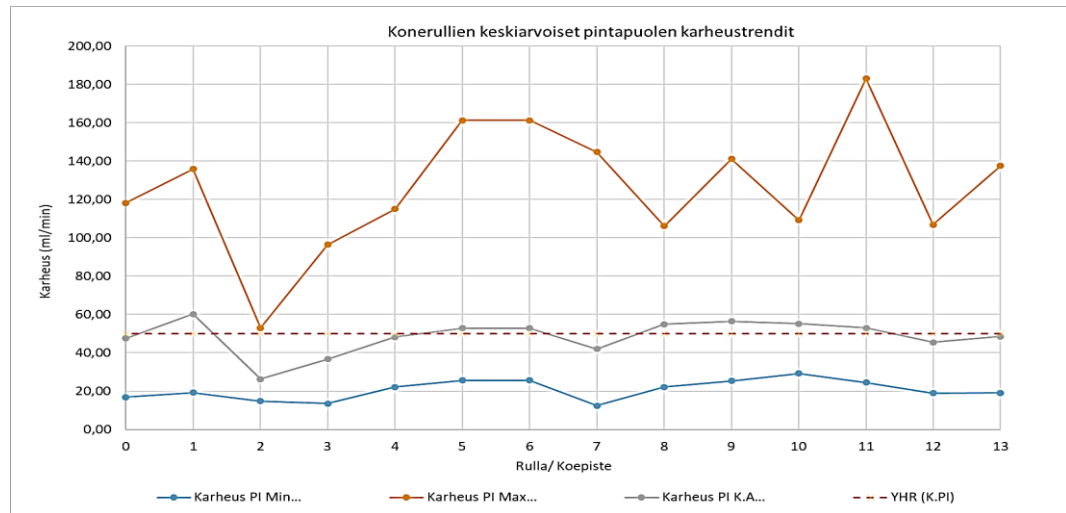
Karheus B ETU PINTA	Karheus B TAKA POHJA
Karheus B ETU POHJA	PPS 10 PINTA
Karheus B KESKI PINTA	PPS 10 POHJA
Karheus B KESKI POHJA	Scarredness-indeksi MD
Karheus B TAKA PINTA	Scarredness-indeksi CD

Liitteessä 2b (taulukot 1–13) on esitetty kaikista konerullista PaperLab-tulokset, jotka on tiivistetty taulukoihin tulkinnan helpottamiseksi. Jokaisella konerullalla on oma tunnusnumero, joka on merkitty koepistenumeroilla. Tulosten käsittelyssä alla oleviin taulukkoihin ja kaavioihin on tarkoituksenmukaisesti otettu konerulla 13 normaalin tuotannon varmistamisen kannalta koeajon päättymisen jälkeen.

Alustavasti tuloksista laskettiin poikkiratanäytteiden pinta- ja pohjapuolen karheuden keskiarvotuloksia, jotka on esitetty liitteessä 3. Sileyden (PPS) keskiarvo on laskettu automaattisesti laboratoriomittauksen yhteydessä. Koeajon konerullien karheuksien keskiarvotuloksista (taulukot 7 ja 8) spesifioitiin paras konerulla sekä pinta-, että pohjakarheuden kannalta. Tähän analyysiin käytettiin keskiarvojen minimi- ja maksimiarvojen periaatetta laatimalla niitä samoille kaavioille (kaaviot 15 ja 16), jossa viitearvo on merkattu ylähälytysrajana (YHR). Samalla menetelmällä määritettiin paras konerulla sileyden kannalta.

**TAULUKKO 7:** Poikkiratanäytteiden konerullakohtaiset pintapuolen keskiarvojen minimi- ja maksimit Bendtsen-karheudelle.

Rulla/ Koepiste	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Karheus PI Min (ml/min)	19,16	18,98	24,54	29,27	25,39	22,11	12,46	25,69	25,69	22,13	13,61	14,81	19,17	16,88
Karheus PI Max (ml/min)	137,56	106,86	183,09	109,25	141,18	106,22	144,73	161,28	161,28	115,04	96,42	52,94	135,92	118,19
Karheus PI K.A (ml/min)	48,60	45,43	52,92	55,19	56,42	54,95	41,99	52,80	52,80	48,28	36,79	26,31	60,26	47,57

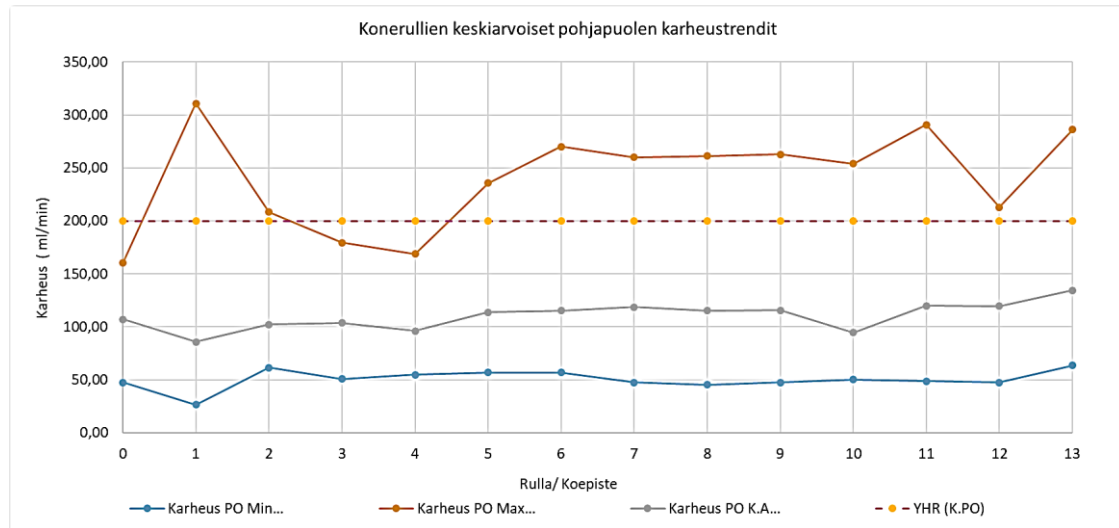


KAAVIO 15: Konerullien pintapuolen keskiarvojen minimi ja maksimi trendit Bendtsen-karheudelle.

Kaavion 15 perusteella voidaan päätellä, että konerullan 2 pintapuolen karheudet ovat parhaimmillaan, joka vastaa toisen koepisteen jauhatuskombinaatiota. Koepisteen jauhatusyhdistelmän ominaiskulutusenergian säätöjä tehtiin kartongin tausta- ja pintakerroksille (J1, J6 ja J2, J5), joissa koivumassan EOK oli 20 kWh/t ja männyn 170 kWh/t. Runkokerroksen koivu- ja hylkymassan (J3, J4 ja J7) jauhatuksen EOK-parametrit vastasivat tämän kartonkilajin reseptin ja ajotilanteen ohjearvoja. Vastaavasti konerullalla 1 karheuden keskiarvoluvut ovat keskivertoa huonompia, kuten myös rullilla 5 ja 6. Nämä rullat vastaavat koepisteitä 1, 5 ja 6, joista ensimmäisessä koepisteessä mäntymassan jauhatuksen EOK-arvo oli 170 kWh/t koivumassan ollessa 40 kWh/t molemmissa kerroksissa. Koepisteiden 5 ja 6 runkokerroksen hylky- ja koivumassojen jauhatuksen EOK:t olivat koivulle 25 kWh/t ja 15 kWh/t sekä hylkymassalle 14 kWh/t ja 10 kWh/t.

TAULUKKO 8: Konerullakohtaiset pohjapuolen keskiarvojen minimi ja maksimit Bendtsen-karheudelle.

Rulla/ Koepiste	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Karheus PO Min (ml/min)	63,51	47,42	48,76	50,10	47,42	45,40	47,42	56,80	56,80	54,79	50,77	61,50	26,63	47,42
Karheus PO Max (ml/min)	286,16	213,06	290,85	253,97	262,69	261,34	260,00	270,00	235,86	168,80	179,53	208,36	310,97	160,75
Karheus PO K.A (ml/min)	134,60	119,58	119,79	94,56	115,56	115,36	118,58	115,31	113,70	96,21	103,88	102,16	85,68	107,15

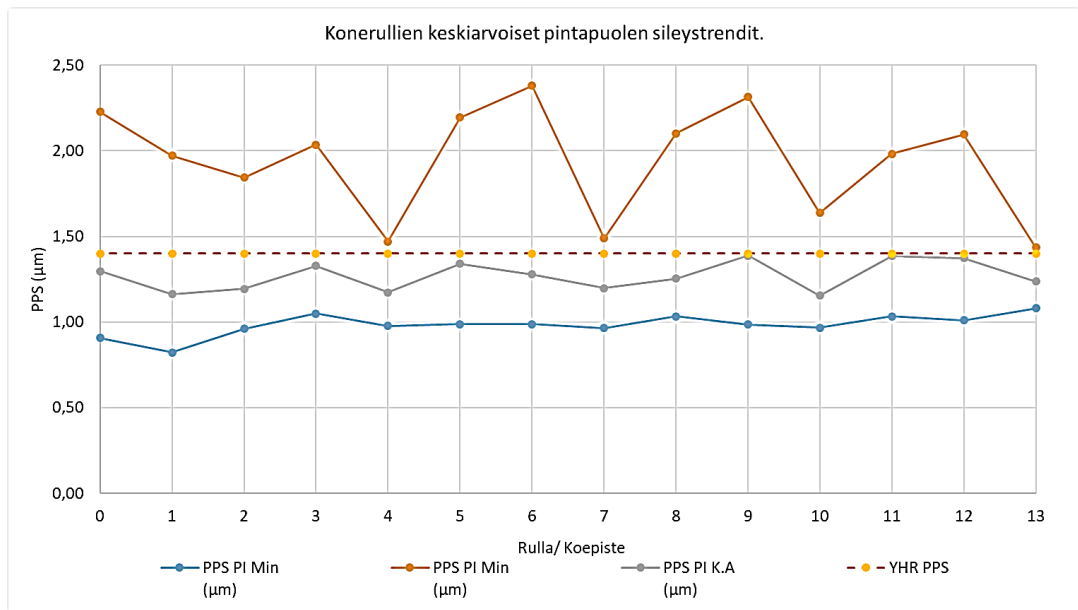


KAAVIO 16: Konerullien keskiarvoiset pohjapuolen keskiarvojen minimi ja maksimi trendit Bendtsen-karheudelle.

Pohjapuolen karheustrendien perusteella (kaavio 16) kaikki keski- ja minimiarvot ovat ylähälytysrajan alapuolella, mutta pienimmät karheusarvot saatiin konerullista 3 ja 4. Koepisteen 3 mukaan jauhatuksen säätöä tehtiin pinta- ja taustakerroksille, joissa koivu- ja mäntymassan jauhatuksen EOK-säädöt viittaavat fibrilloivaan jauhatustapaan. Koivumassoille EOK oli 20 kWh/t ja männylle 130 kWh/t, mutta runkokerroksen muutoksia ei tehty, vaan koivu- ja hylkymassaa säädettiin tämän kartonkilajin reseptin ja ajotilanteen ohjearvojen mukaisesti.

Sileystrendejä esitetään samalla menetelmällä kuin karheutta. Kaaviosta 17 nähdään pintapuolen keskiarvoiset sileystrendit, jotka pohjautuvat taulukon 9 keskiarvoisiin minimi- ja maksimilukuihin. Vastaavalla tavalla kaaviossa 18 on esitetty pohjapuolen sileystrendit sekä taulukossa 10 keskiarvoiset sileysluvut.

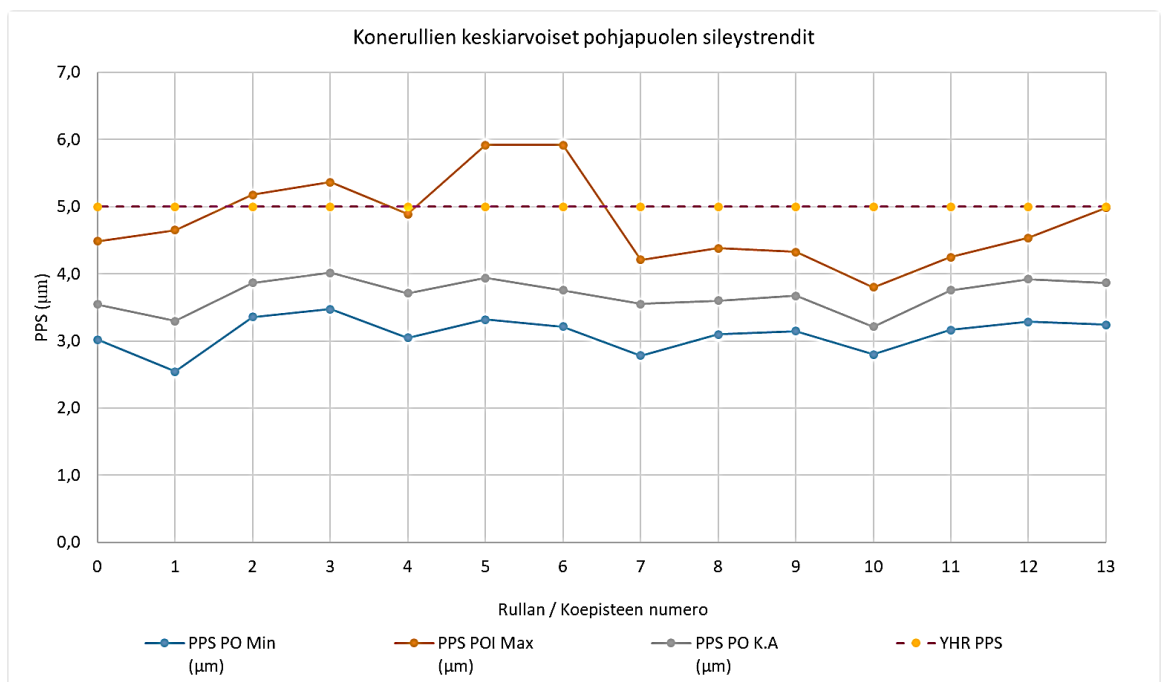




KAAVIO 17: Konerullien keskiarvoiset pintapuolen minimi ja maksimi trendit PPS-sileydelle.

TAULUKKO 9: Konerullakohtaiset pintapuolen keskiarvojen minimit ja maksimit PPS-sileydelle.

Rulla/ Koepiste	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
PPS PI Min (µm)	1,08	1,01	1,03	0,97	0,99	1,03	0,97	0,99	0,99	0,98	1,05	0,96	0,82	0,91
PPS PI Min (µm)	1,43	2,10	1,98	1,64	2,31	2,10	1,49	2,38	2,19	1,47	2,04	1,84	1,97	2,23
PPS PI K.A (µm)	1,24	1,37	1,39	1,16	1,39	1,25	1,20	1,28	1,34	1,17	1,33	1,19	1,16	1,30



KAAVIO 18: Konerullien keskiarvoiset pohjapuolen keskiarvojen minimi ja maksimi trendit PPS-sileydelle.

TAULUKKO 10: Konerullakohtaiset pohjapuolen keskiarvojen minimit ja maksimit PPS-sileydelle.

Rulla/ Koepiste	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
PPS PO Min ( $\mu\text{m}$ )	3,24	3,28	3,16	2,80	3,15	3,10	2,78	3,21	3,32	3,05	3,47	3,36	2,55	3,02
PPS POI Max ( $\mu\text{m}$ )	4,98	4,54	4,25	3,80	4,33	4,38	4,21	5,92	5,92	4,89	5,37	5,18	4,65	4,48
PPS PO K.A ( $\mu\text{m}$ )	3,87	3,92	3,76	3,21	3,67	3,60	3,55	3,75	3,94	3,71	4,02	3,87	3,29	3,55

Trendien perusteella parhaimmat pintapuolen sileysarvot löytyvät konerullasta 4. Tämän ja konerullan 10 laboratorioarvot mitattiin puutteellisesti, eli ei tiheennyillä ohjelmalla, joka oli tarkoitettu koeajon poikkiratanäytteille. (Liite 2b, taulukot 5 ja 11). Koska rullien 4 ja 10 sileyksmittaukset eivät olleet tiheennyttä, nämä rullat poistuivat vertailusta ja niiden tilalle tulivat konerullat 13, 7 ja 2. Jälkimmäisen rullan jauhatuseroimetrit on mainittu yllä, eli parhaiden karheusarvojen yhteydessä. Konerullan 7 EOK:ta säädettiin vain pintakerroksessa, jonka jauhatuksen ominaisenergian säädöt koivumassalle on 30 kWh/t ja männylle 170 kWh/t.

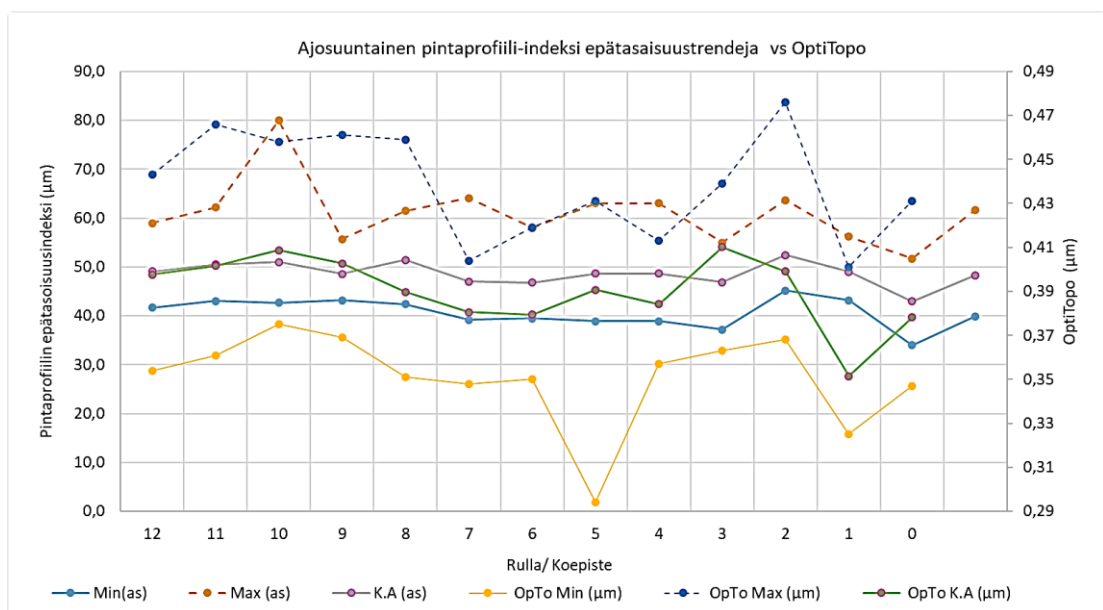
Pohjapuolella poikkiratanäytteiden sileyden tulokset osoittivat, että konerullia 3, 5 ja 6 lukuun ottamatta muut konerullat ovat viitearvon eli ylähälytysrajan alapuolella. Kaaviosta 18 voidaan myös huomata 2-konerullan viitearvon ylitys (0,18  $\mu\text{m}$ ).

### 7.5.3 Reunasileyden tulokset

Reunasileyden tuloksia tulkittaessa sileyden ja karheuden avuksi käytettiin lisämittauksia kuten pinnan vaihtelua kuvaavaa Optitopo-mittausta sekä poikkisuuntaista (CD) ja koneensuuntaista (MD) pintaprofiili-indeksejä. Liitteessä 4 (taulukot 1–4) on esitetty koeajon jokaisesta poikkiratanäytteistä mitatut pinnanvaihtelut  $\mu\text{m}$ :nä ja kraattereiden (1,5  $\mu\text{m}$ ) prosentiosuutena, sekä niiden minimi-, maksimi- ja keskiarvotulokset. Konerullien yleisiä pinnan vaihteluiden trendejä voidaan nähdä liitteestä 4 kaaviosta 1. Lisäksi samassa liitteessä kaaviossa 2 on esitetty pinnan vaihteluita kraattereiden ollessa (1,5  $\mu\text{m}$ ).

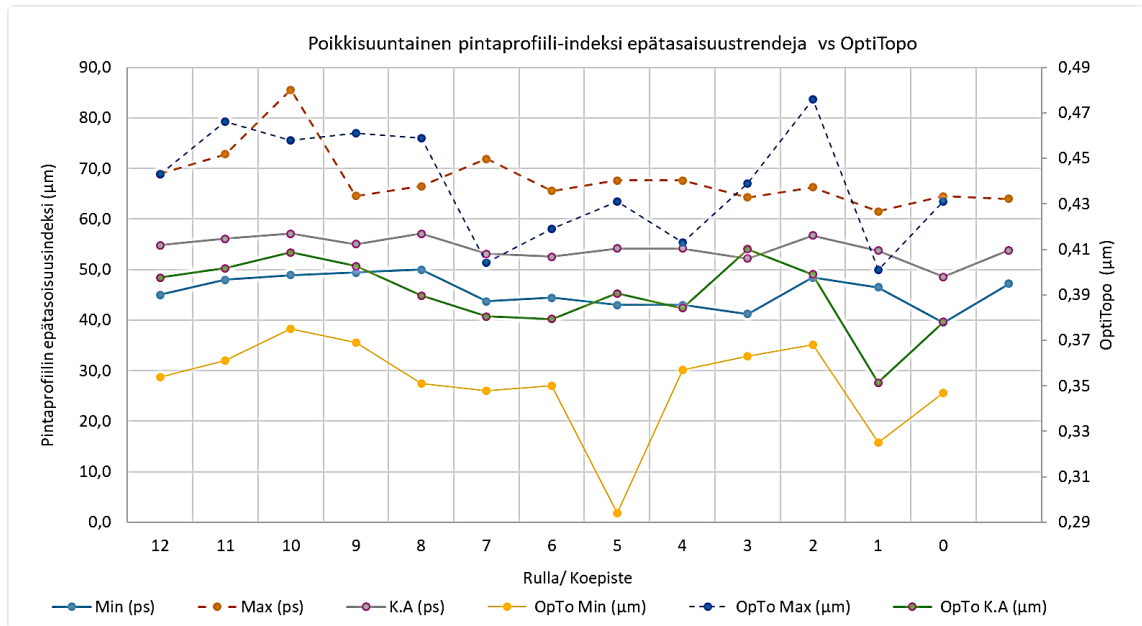
OptiTopo-mittauksen perusteella konerullien keskiarvoiset pinnanvaihtelut ovat 0,35–0,41 ( $\mu\text{m}$ ) välillä ja 1,5- $\mu\text{m}$  kraattereiden syvyysosuudessa vaihtelu on noin 0,04–0,10 %. Maksimiarvot kraattereiden mukaisesti ovat huomattavasti suurempia ja ne vaihtelevat 0,11–0,36 % välillä, koska kraattereiden syvyysluokka on hyvin pieni. Tämä tarkoittaa, että 1,5  $\mu\text{m}$  kraatterisyvyudessa kartongin pintojen vaihteluiden epätasaisuudet ovat helpommin havaittavissa prosentiosuutena.

Reunasileyden kuvaamiseen pinnan vaihteluiden lisäksi on otettava myös huomioon reunakutistuma, joka on käsitelty teoriaosuudessa (5.2.3 Reunasileys). Havainnollisesti kutistuma voidaan arvioida poikkisuuntaisesta (CD) pintaprofiili-indeksistä, mutta koneensuuntaista (MD) pintaprofiili-indeksistä voidaan myös käyttää hyödyksi. Liitteessä 2b kaavoissa 1 ja 2 on esitetty konerullakohtaisesti molempien CD- ja MD-pintaprofiilien minimi-, maksimi- ja keskiarvotuloksien trendit. Kaaviot kertovat konerullan CD- ja MD-suuntaisen pintaprofiili-indeksin arvon. Tämän arvon kasvaessa reuna- ja yleisen kutistuman mahdollisuus myös kasvaa, vastaavasti CD- ja MD-indeksi-arvon alentuessa mahdollinen kutistuma myös pienenee. Tässä tarkastelussa on hyvä ottaa huomioon pintatopografiset OptiTopo-tulokset. Näiden poikki- ja konesuuntaisten sekä yleisten pintaprofiilien mukaan voidaan löytää riippuvuudet pinnan vaihtelun ja epätasaisuusprofiilien välillä. Kaaviossa 19 ja 20 on esitetty pintaprofiilit ja niiden keskeiset korrelaatiot.



KAAVIO 19: Ajosuuntainen pintaprofiili-indeksi (koneen ajosuunta) ja OptiTopo vaihtelutrendejä.

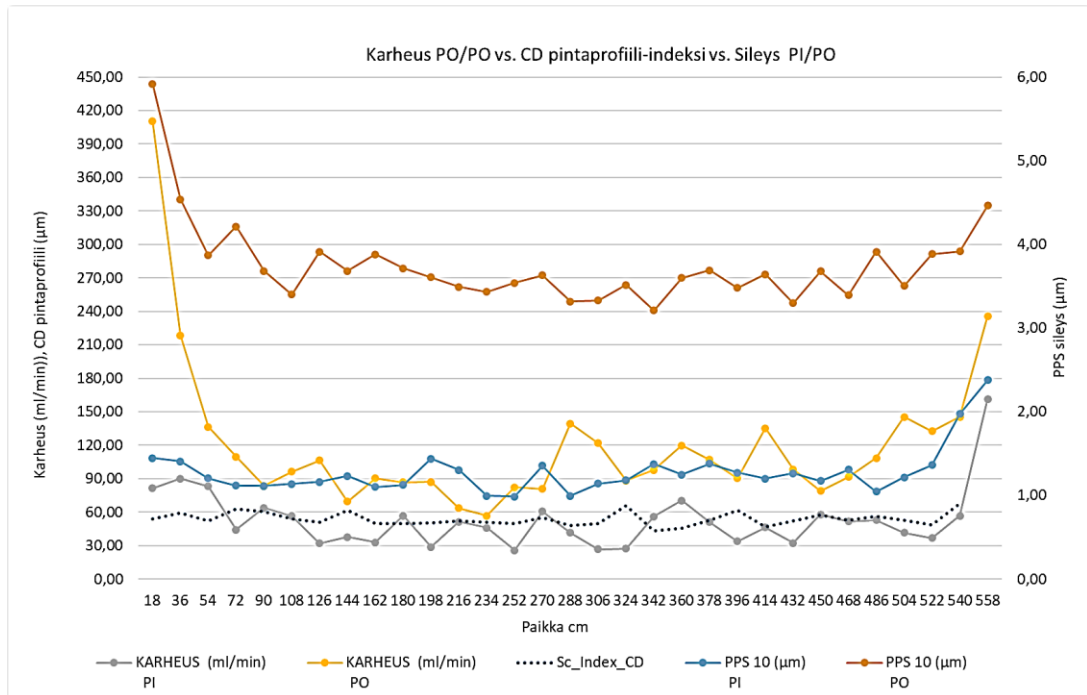
Kaaviossa katkoviivalla on merkitty konerullien pintatopografiset ja pintaprofiili-indeksien maksimitrendit. Ajosuuntaisilla profiili-indekseillä ja pintatopografisilla vaihteluilla (kaavio 19) on selkeä keskiarvotrendien korrelaatio, jolloin vaihtelut tapahtuivat samansuuntaisesti ja melko samanaikaisesti (koepisteet 4–12). Minimi- ja maksimiarvojen muutokset ovat hajanaisempia ja korreloivat vain tietyissä jauhatuskombinaatioissa ja koepistekohdissa.



KAAVIO 20: Poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi (koneen poikkisuunta) ja OptiTopo vaihtelutrendejä.

Poikkisuuntaisen pintaprofiili-indeksin ja pintatopografisen vaihtelun korrelaatio on huomattavasti suurempi kuin ajosuuntaisen indeksin ja pinnanvaihtelun (OptiTopo) välillä. Kaaviossa 20 konerullien 5 ja 11 piikit ovat pinta-alaltaan suurempia pintatopografisen minimiarvotrendillä ja poikkisuuntaisen profiili-indeksin maksimiarvotrendillä. Keskiarvotrendien tarkistaessa voidaan huomata, että pintaprofiili ja pintavaihtelut ovat riippuvaisia toisistaan ja ne molemmat vaikuttavat merkittävästi sileyteen ja karheuteen. Samalla tavalla on mahdollista tarkistaa poikkisuuntaisen pintaprofiili-indeksin korrelaatiota muihin pintaominaisuuksiin (Liite 5, kaaviot 14-17.). Lisäksi konerullien pinta- ja pohjapuolen sileyden ja karheuden riippuvuudet pintatopografisten vaihteluiden kanssa ovat esitetty liitteessä 5 taulukoissa 18-21.

Konerullakohtaista reunasileyttä voidaan myös tulkita käyttäen yhdistelmätrendejä, jossa poikkiratanäytteen pinta- ja pohjapuolen karheudet, sileydet sekä poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi on liitetty samalle graafille, kuten kaaviossa 21. Esimerkiksi konerullan 6 reunasileysvaihtelua voidaan helposti huomata trendien nousuna rainan etureunasta paikasta 90 cm paikkaan 18 cm ja paikasta 522 cm paikkaan 558 cm. Liitteessä 5 (kaaviot 1–13) on esitetty koeajon aikana ajetuista konerullista yhdistelmätrendejä reunasileyden havainnointiin ja tutkimiseen.



KAAVIO 21: Konerullan 6 yhdistelmätrendi.

#### 7.5.4 Jauhatuksen ja ominaisuuksien väliset matriisitulokset

Tulosten esittämisessä ja niiden tulkinnessa sekä johtopäätöksissä apuna käytettiin Wedge-työkalua, josta on saatu koeajon suorituksen ajasta korrelaatiomatriisitaulukko eri jauhimien jauhatusvaikutuksen tutkimiseen. Matriisitaulukon tulokset voidaan nähdä taulukosta 11, jossa näkyvät eri jauhimien sekä pinta- ja pohjapuolen sileyden ja karheusominaisuuksien riippuvuudet.

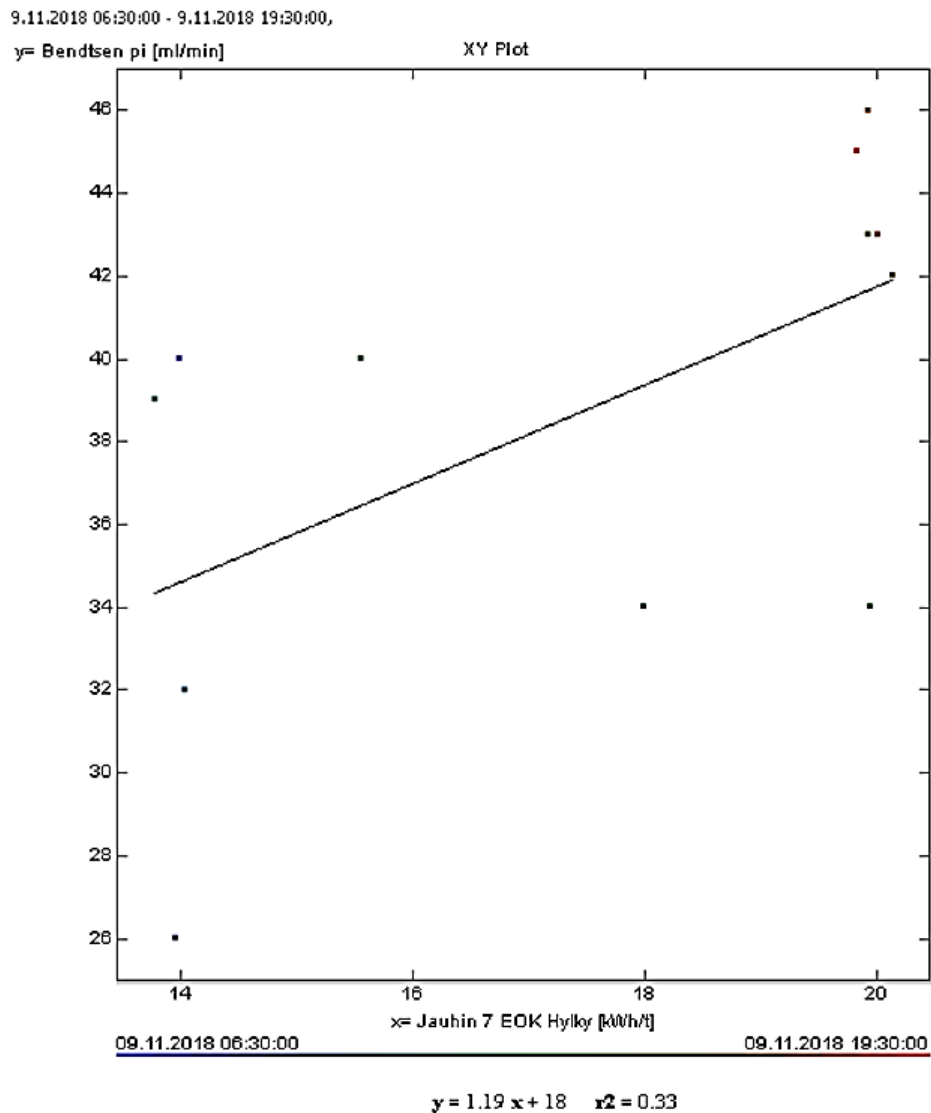
Wedgen matriisi ei ole täydellinen verrattuna koeajon tuloksiin, koska järjestelmään kirjatut poikkiratamittaukset oli suoritettu tavallisella ohjelmalla eli noin 32 cm mittaustiheydellä ja koeajon poikkiratanäytteiden mittaustiheys on 18 cm. Tästä

osatekijästä huolimatta matriisia hyödynnetään arvioidessa jauhatusten ja ominaisuuksien välistä riippuvuutta.

TAULUKKO 11: Koeajossa käytettyjen jauhimien (J1-J7) ja kartongin ominaisuuksien korrelaatiomatriisi.

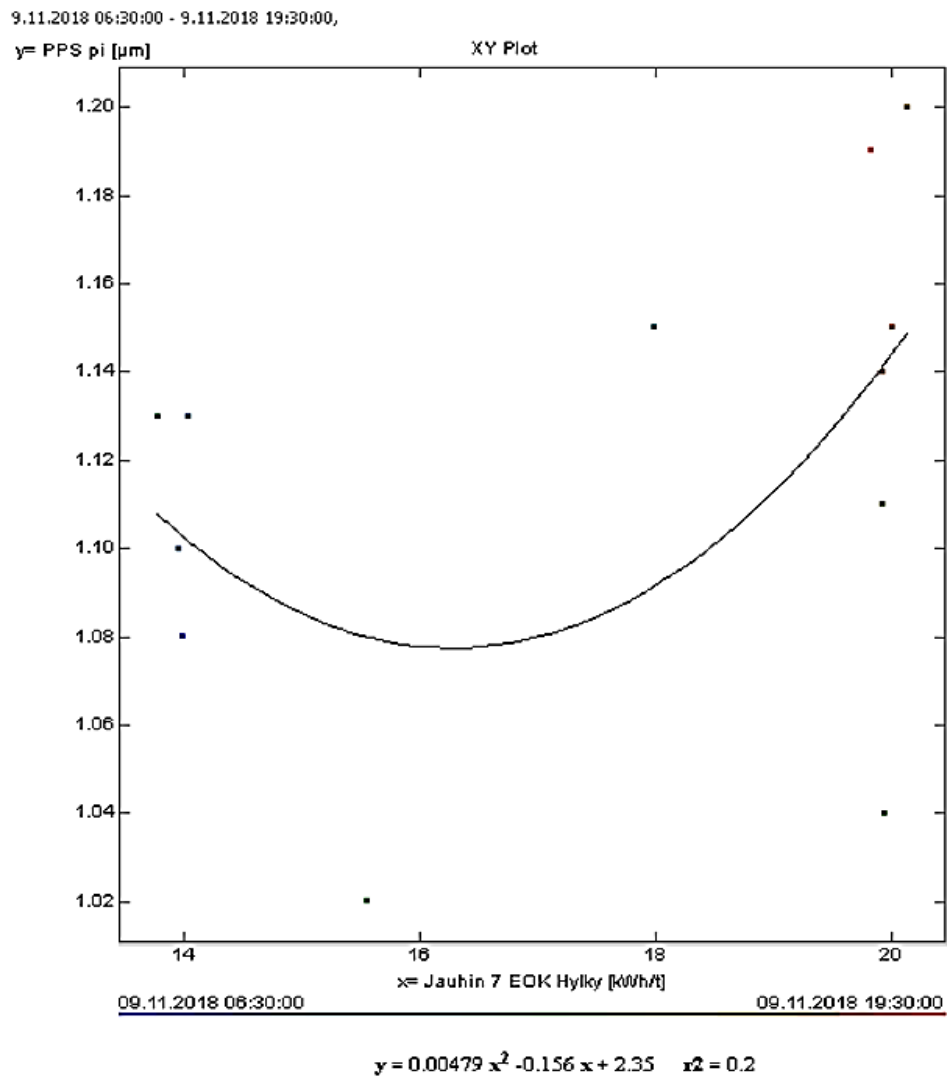
	J7 (2) HY	J1 (1) KO	J2 (3) KO	J3 (2) KO	J4 (2) KO	J5 (3) MÄ	J6 (1) MÄ	PPS PI	Bendtsen PI	PPS PO	Bendtsen PO
J7 (2) HY	1	0	-0,27	0,47	0,48	-0,2	-0,01	0,37	0,57	-0,11	-0,03
J1 (1) KO	0	1	0,7	0,13	0,12	0,42	0,27	-0,34	0,11	-0,51	0,19
J2(3) KO	-0,27	0,7	1	0,14	0,13	0,5	0,13	-0,39	-0,04	-0,3	0,1
J3 (2) KO	0,47	0,13	0,14	1	0,99	-0,03	-0,04	0,35	-0,04	0,29	0,06
J4 (4) KO	0,48	0,12	0,13	0,99	1	-0,03	-0,04	0,34	-0,07	0,29	0,02
J5 (3) MÄ	-0,23	0,42	0,5	-0,03	-0,03	1	0,28	-0,78	-0,24	-0,36	-0,03
J6 (1) MÄ	-0,01	0,27	0,13	-0,04	-0,04	0,28	1	0,02	0,48	-0,76	-0,29
PPS PI	0,37	-0,34	-0,39	0,35	0,34	-0,78	0,02	1	0,33	0,51	0,27
Bendtsen PI	0,57	0,11	-0,04	-0,04	-0,07	-0,24	0,48	0,33	1	-0,35	0,32
PPS PO	-0,11	-0,51	-0,3	0,29	0,29	-0,36	-0,76	0,51	-0,35	1	0,29
Bendtsen PO	-0,03	0,19	0,1	0,06	0,02	-0,03	-0,29	0,27	0,32	0,29	1

Matriisin mukaan runkokerroksesta löytyi hylkyjauhimen J7 sekä koivujauhimen J3 ja J4 välinen yhteys, joka vaikuttaa pintapuolen karheuteen. Hylkyjauhimen riippuvuus voidaan esittää koivujauhimen ominaiskulutusenergioiden funktiona liitteessä 6 kaaviossa 1 ja 2. Pintapuolen karheuden ja hylkyjauhimen keskinen riippuvuus on 0,57. Tämä tarkoittaa, että hylkyjauhimen jauhatuksen EOK:n vaikutus pintapuolen karheuteen on yli puolet verrattuna muihin järjestelmässä oleviin jauhimiin. Havainnollisesti jauhimien J7 ja ominaisuuksien välistä riippuvuutta on esitetty kaaviossa 22. Tässä kaaviossa pintapuolen karheus on hylkyjauhimen EOK:n funktiona. Lisäksi seitsemännen jauhimien ominaiskulutusenergian ja pintapuolen sileyden korreloivaa osuutta, joka on 0,37 voidaan nähdä kaaviosta 23.



KAAVIO 22: Pintapuolen karheus hylkyjauhimen (J7) EOK:n funktiona.

Kolmannen (J3) ja neljännen (J4) koivujauhimen lineaarisuutta (Liite 6, kaavio 3), jonka korreloiva osuus on 0,99, voidaan selittää sarjaan kytkennän lisäksi massojen samaan kerrokseen eli runkokerrokseen pumppaamisella. Molemmat jauhimet vaikuttavat yhtä paljon ja melko samalla voimakkuudella sileyteen pinta- ja pohjapuolilla. Lisäksi liitteessä 6 kaavioissa 4 ja 5 on esitetty pintapuolen sileys jauhimen J3 ja J4 EOK-funktiona.



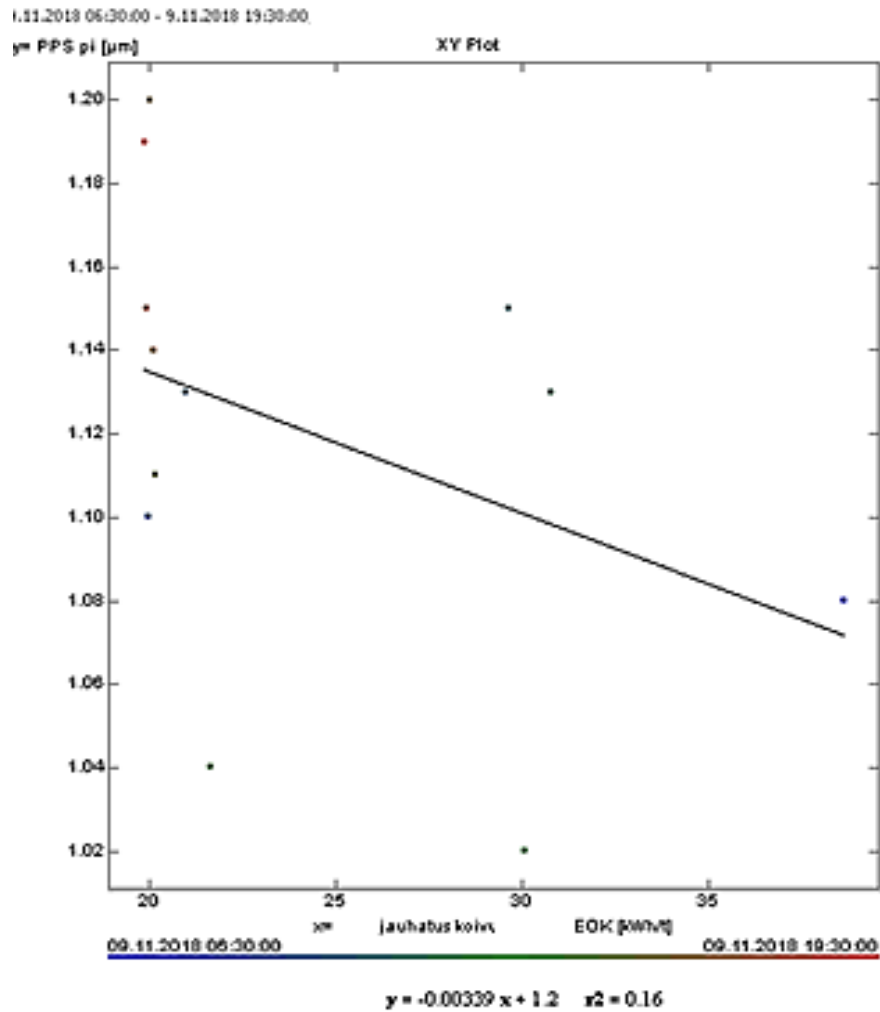
KAAVIO 23: Pintapuolen sileyshylkyjauhimen (J7) EOK:n funktiona.

Ensimmäisellä jauhimella J1, joka jauhaa koivumassaa kartongin taustakerrokseen on korreloiva yhteys toisen jauhimen J2 kanssa (Liite 6, kaavio 6). Nämä jauhimet on kytketty jauhatusjärjestelmässä sarjaan, sekä jauhimen J2 läpi koivumassaa menee kartongin pintakerrokseen. Molemmat jauhimet vaikuttavat pohjapuolen sileyteen, josta J1 korreloiva vaikutus on -0,51 ja J2 on -0,30. Liitteessä 6 kaavioissa 7 ja 8 on esitetty jauhinten EOK:n vaikutus sileysominaisuuteen. Lisäksi jauhimen J1 kanssa korreloi kuudes jauhin J6, joiden korrelaatiokerroin on 0,27 (Liite 6, kaavio 9). Mäntymassan jauhimen (J6) välinen riippuvuus pohjapuolen sileyden kanssa esiintyy negatiivisella korrelaatiolla, jonka kerroin on noin -0,78 (Liite 6, kaavio 10), sekä pintapuolen karheuden kanssa korrelaatiolla 0,48 (Liite 6, kaavio 11).

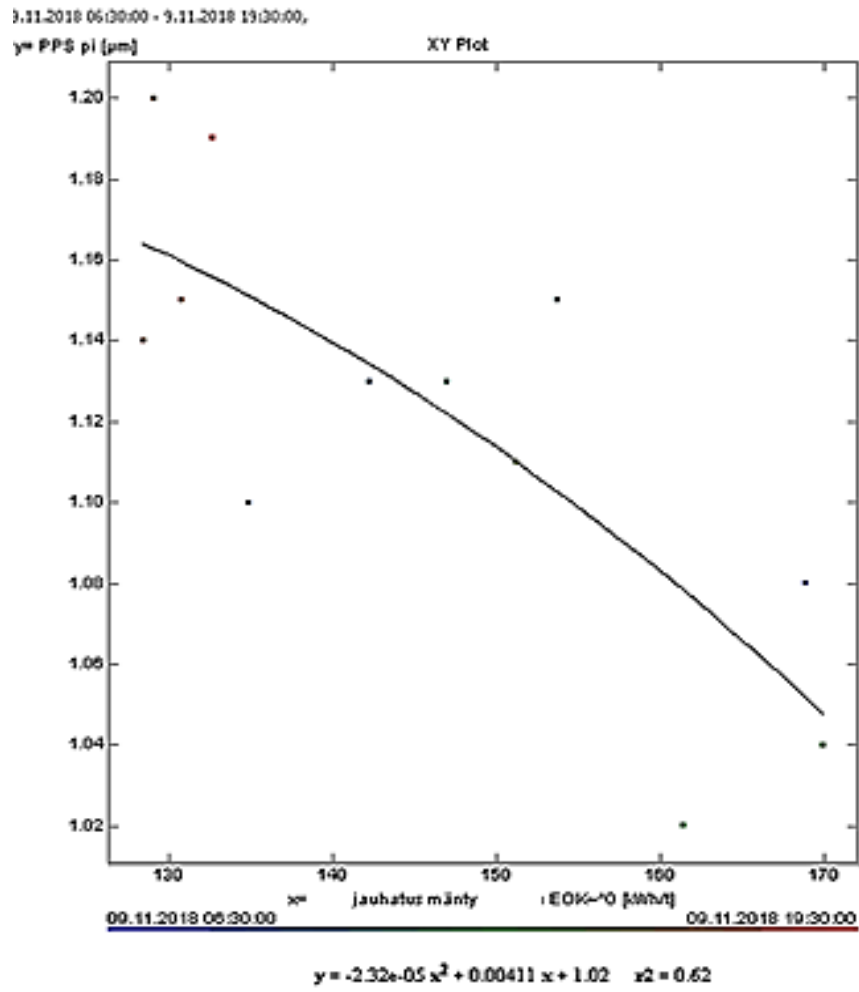
Toisen koivujauhimen ja viidennen mäntymassan jauhimen EOK-parametrit, jotka säädetään kartongin pintakerroksen optimointiin korreloivat keskenään. Jauhinten välinen



korrelaatiokerroin on 0,50 (Liite 6, kaavio 12) eli tässä kerroksessa mänty- ja koivumassan jauhatuksen vaikutus toisiinsa on yhtä paljon, mutta viidennen mäntymassan jauhimen (J5) vaikutus pintapuolen sileyteen on isompi toiseen jauhimeen verrattuna. Kaaviossa 24 ja 25 on esitetty jauhimen J2 ja J5 pintapuolen sileyden ja jauhatuksen EOK:n riippuvuus.



KAAVIO 24: Pintapuolen sileys koivujauhimen (J2) EOK:n funktiona.



KAAVIO 25: Pintapuolen sileys mäntymassajauhimen (J5) EOK:n funktiona.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koeajossa tutkittiin jauhatuksen vaikutusta kartongin reunasileyteen ja muihin pintaominaisuuksiin. Koeajossa havaittiin, että toisen koepisteen jauhatuskombinaation valmistuneesta konerullasta sileys- sekä karheusarvot olivat parhaimmillaan. Tässä jauhatuskombinaatiossa koivu- ja mäntymassan jauhinten ominaisenergian muutokset ovat kartongin tausta- ja pintakerroksessa, mutta runkokerroksessa ei ole EOK:n muutossäätöä. Kartongin pinta- ja taustakerroksen EOK-muutokset ovat symmetrisiä koivu- ja mäntymassoille, joilla jauhatustavat ovat keskenään käänteisiä. Tämä tarkoittaa, että koeajon jauhatuskombinaatioista koivumassalle paras jauhatustapa on fibrilloiva ja männylle katkova kartongin pinta- ja pohjapuolella. Taulukkoon 12 on koottu koeajossa tutkittujen jauhatustapojen vaikutukset kartongin pintaominaisuuksiin. Taulukon merkinnät ++, +, --, - ja 0 tarkoittavat merkittävää positiivista, positiivista, merkittävä negatiivista, negatiivista vaikutusta ja ei olennaista vaikutusta kyseiseen ominaisuuteen.

TAULUKKO 12: Jauhatustavan vaikutukset kartongin pinta- ja pohjapuolen sileys- ja karheusominaisuuksiin.

Vaikutus ominaisuuksiin						
Kr.	Jauhatustapa KO	Jauhatustapa MÄ / HY	Karheus PI	Karheus PO	PPS 10kg PI	PPS 10k g PO
0	Ajotila eli referenssi		0	+	-	+
1	Katkova	Katkova	--	--	--	--
2	Fibrilloiva	Katkova	++	+	+	++
3	Fibrilloiva	Fibrilloiva	+	++	-	-
4	Ajotila	Katkova (HY)	-	0	++	++
5	Fibrilloiva	Katkova (HY)	--	-	-	--
6	Fibrilloiva	Fibrilloiva (HY)	--	-	--	--
7	Ajotila	Katkova	0	-	++	+
8	Fibrilloiva	Katkova	--	-	-	+
9	Fibrilloiva	Fibrilloiva	--	0	-	+
10	Ajotila	Fibrilloiva	--	0	++	++
11	Fibrilloiva	Fibrilloiva	--	0	-	+
12	Fibrilloiva	Fibrilloiva	0	-	-	0

Jauhatustavan lisäksi koeajossa havaittiin jauhatuksen ominaiskulutusenergiämäärän vaikutusta valmiin kartongin pintaominaisuuksiin, jonka todetaan oleva tärkeä jauhatussäädössä. Koeajon jauhinten ominaisenergian (EOK kWh/t) säädön vaikutukset näkyivät valmiin kartongin ominaisuuksissa taulukon 13 mukaisesti. Taulukon merkinnät (++) +, (--) - ja +/- tarkoittavat (merkittävää) positiivista, (merkittävää) negatiivista ja tietyissä viitearvoissa positiivista vaikutusta, joka on merkitty soluihin. Jälkimmäisessä +/- merkinnän tulkinnassa on otettava huomion koeajossa tehtyjä havaintoja, että liiallinen ja liian vähäinen jauhatus huonontaa ominaisuutta. Tämä havainto on hyvin merkittävä kartongin ajettavuuden, painatettavuuden sekä lopputuotteen laadun kannalta.

Ajetun kartonkilajin jauhatuksessa merkittävämmäksi massaksi todettiin koivumassa, koska valmistusreseptin mukaan koivumassan prosentuaalinen osuus verrattuna muihin massoihin on yli 60. Toisin sanoen jauhatettu koivumassa vaikuttaa enemmän kartongin ominaisuuksiin, mikä voi selittää taulukon 13 viitearvojen suuruuden.

TAULUKKO 13: Jauhatuksen vaikutus pintaominaisuuksiin (J1-J7).

Jauhin (Kerros)	Kartongin ominaisuuksia							
	KARHEUS (ml/min) PI		KARHEUS (ml/min) PO		PPS 10 (ml/min) PI		PPS 10 (ml/min) PO	
J7(2) HY	-	+	+/- (15-18)	-	+/- (16-18)	-	++	--
J1(1) KO	+	-	+/- (25-35)	-	+	-	+	-
J2(3) KO	+/- (25-35)	-	+/- (25-35)	-	+	-	+	-
J3(2) KO	++	--	+	-	+	-	-	+
J4(2) KO	+	-	+/- (25-35)	-	+	-	+/- (25-35)	-
J5(3) MÄ	+/- (145-155)	-	+	-	+	-	+	-
J6(1) MÄ	-	+	+	-	+/- (145-155)	-	++	--
EOK	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓

Teoriatietojen perusteella jauhatuksen vaikutus pintaominaisuuksiin on suurilta osilta positiivinen eli jauhatusta nostessa sileys paranee ja karheus alenee. Koeajon saaduista tuloksista havaittiin melko samanlaista systematiikkaa, jossa sileys paranee jauhatuksen

nostaessa ja karheus pienenee. Käytännössä havaittiin, että pohjapuolen sileys ja pintapuolen karheus vaikuttavat käänteisesti toisiinsa. Merkittävimmän pohjasileyden paranemisen yhteydessä jauhimessa J7(2) ja J6(1) pintapuolen karheus huononee jauhatuksen edistyessä. Jauhimessa J3(2) ominaisuudet käyttäytyivät käänteisellä tavalla. Lisäksi poikkeuksena on reunasileys, joiden arvot on esitetty liitteessä 5. Ajetuista konerullista havaittiin kriittisen reunasileyden alueet kartongin poikkiradan vasemmalta ja oikealta puolelta, jotka on esitetty taulukossa 14. Keskiarvoisesti poikkiradan oikealta reunalta eniten karhea alue on noin 82,5 cm leveä ja vasemmalta reunalta se on noin 58,1 cm leveä. Sileämpi reuna on konelinjan käyttöpuolella ja hoitopuolella reuna on karheampi.

TAULUKKO 14: Konerullien vasemman ja oikean reunan kriittiset alueet.

←Koko poikkiradan pituus on 560 cm→													
Koepiste/ Konerulla	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vasen reunan alue (cm)	72	126	10	72	108	72	108	72	108	108	108	108	90
Oikea reunan alue (cm.)	432	432	558	522	486	522	522	522	432	522	432	486	504

Kartongin pinnan vaihtelua ja epätasaisuutta voidaan esittää mitatuista poikkisuuntaisista pintaprofiili-indekseistä ja pinnanvaihtelu arvojen avulla. Koeajon tuloksista ilmenevä korrelaatio sileyden ja karheuden kanssa on esitetty tiivistettynä taulukossa 15. Taulukon merkinnät ++ ja + tarkoittavat merkittävää ja vähemmän merkittävää korrelaatiota kyseiseen ominaisuuteen.

TAULUKKO 15: Poikkisuuntaisten profiili-indeksien ja pinnan vaihteluiden korrelaatiot kartongin pinta- ja pohjapuolen Bendtsen-karheuden ja PPS-sileyden kanssa.

Ominaisuus	CD pintaprofiili-indeksi (μm)	Pinnan vaihtelu (OptiTopo) (μm)
PI Karheus (ml/min)	+	+
PO Karheus (ml/min)	++	+
PI Sileys (μm)	+	++
PO Sileys (μm)	++	++

Johtopäätöksien teossa otettiin huomioon teoriatietoja, joiden perusteella kartongin pintaominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sopivalla jauhatuksella, mikä havaittiin myös koeajon tuloksista. Jauhatuksen vaikutusta kuituihin ja kartongin reuna- ja sileysominaisuuksiin sekä niiden vaihteluun voidaan hallita seuraaviin keinoin:

- Käyttämällä oikeaa kuiturakenteen mukaista jauhatustapaa, joka voi olla fibrilloiva, katkova tai niiden yhdistelmä
- Jauhatuksen määrällä eli muun muassa jauhatuskokien lukumäärällä ja niiden energiatasoilla
- Käyttämällä viira- ja puristinosalla sileämpiä viiroja ja huopia
- Optimoimalla formaatiota, että rainan reunapaksuus olisi tasaisempi
- Kuivatuksessa minimoimalla koko rainan kutistuminen löytämällä puristushuoville sopiva kireys.

## 9 PARANNUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Edellisissä luvuissa selvitettiin jauhatuksen ominaisenergian säädön vaikutusta puukuituihin ja valmiin kartongin pinta- ja pohjapuolen pintaominaisuuksiin. Tässä kappaleessa on esitetty mahdollisia parannustoimenpide-ehdotuksia, jotka havaittiin koeajon aikana ja kartongin poikkiratanäytteitä tutkiessa.

Poikkiradan kriittisen reunasileyden määrittämisessä on ilmennyt, että reunasileyden radan vasemmalla ja oikealla reuna-alueella on erisuuruinen. Toimenpiteiksi reunasileyden ja muiden ominaisuuksien parantamiseksi jatkotutkimuksilla on mahdollista selvittää ilmiön luonnetta, jotta löydetään oikea jatkotoimenpide ongelman ratkaisemiseksi. Lisäksi tilastollisen analyysin yhteydessä todettiin, että ajettavalla kartongilla pintapuolen karheus on käänteinen pohjapuolen sileydelle tietyissä jauhatuskombinaatioissa. Ominaisuuksien riippuvuutta sekä jauhatusjärjestelmän jauhinten vaikutusta niihin on mahdollista selvittää myös jatkotutkimuksilla.

Aiemmin Pagen teorian avulla oli todettu kuivatuksen vaikutus kuituverkostoon ja yksittäisiin kuituihin kuivatusprosessissa. Reunasileyden ja kutistuman hallitsemiseksi yksi keino on perälaatikon hallintasuureiden optimointi. Tässä yhteydessä on syytä huolehtia perälaatikoiden puhtaanapidosta ja virtauspintojen kiillotuksesta, joka voidaan suorittaa mekaanisesti tai elektrolyyttisesti. Jälkimmäisen käsittelyn mukaan pintojen pienet piikit syöpyvät pyöreäharjaisiksi, jolloin virtauspinnat ovat tasaisempia. Lisäksi märkäpuristuksessa voidaan valita materiaaliltaan sileämpiä puristinhuopia, jotka eivät jätä markkeerausta kartonkiin.

Poikkisuuntaisista pintaprofiili-indekseistä on selvinnyt, että profiilit korreloivat muiden pintaominaisuuksien kanssa. Jatkotutkimuksissa nämä ominaisuudet ja niiden riippuvuuden tarkempi selvittäminen voidaan asettaa tavoitteiksi. Tutkimuksissa voidaan selvittää ominaisuuksien korrelaatioiden systematiikkaa ja rajoittavia tekijöitä, joiden avulla on mahdollista hallita haluttuja pintaominaisuuksia. Konesuuntaisilla pintaprofiili-indekseillä arvot ovat matalampia kuin poikkisuuntaisilla indekseillä. Tässä parannustoimenpiteiksi voidaan todeta viirojen vaihtamista sileämpiin. Näiden ominaisuuksien paraneminen vaikuttaa kartongin pinnan vaihteluihin, joka todettiin poikkiratojen OptiTopo-mittauksista.

Lisäksi yksi tärkeämmistä toimenpide-ehdotuksista on uuden koeajon jatkotutkimus. Tutkimuksessa kuivatun massan sijaiseksi on otettava lajin mukaista männyn selluputkimassaa ja järjestettävä uusi koeajo. Uudessa koeajossa jauhatuksen säädöt (EOK) on asetettava tämän lopputyön parhaan jauhatustavan ja jauhatuskombinaation mukaisesti sekä suorittaa koeajo pidemmällä aikavälillä, jolloin saadaan toistuvampia tuloksia.

Konesuuntaisilla pintaprofiili-indekseillä arvot ovat matalampia kuin poikkisuuntaisilla indekseillä. On syytä tutkia näiden profiilien välistä eroa jatkotutkimuksilla sekä niiden vaikutusta haluttuihin ominaisuksiin. Lisäksi pintaprofiili- ja OptiTopo-mittausten tuloksista on todettu merkittävä korrelaatio OptiTopon ja sileyden välillä, mikä on näkynyt myös pintaprofiili-indeksien trendeissä. Tätä havaintoa on hyvä myös tutkia tarkemmin, jotta voi ratkaista sileyden ongelmia.



## 10 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkoituksena oli selvittää jauhatuksen vaikutusta reunasileyteen. Työn tavoitteena oli löytää päällystämättömälle kartonkilajille jauhatusyhdistelmä EOK-säädön mukaan hylky- koivu- ja mäntymassalle. Teoriatietojen avulla eri massalaatujen tarkastelussa sopivan jauhatuksen löytämisessä otettiin huomioon kuitujen rakenne sekä jauhatuksen vaikutus puukuituihin ja valmiin kartongin ominaisuuksiin.

Työn koeajo suoritettiin normaalin tuotannon aikana. Koeajon avulla haettiin kolmekerroksiselle kartongille oikea jauhatustapa ja tutkittiin pinta- ja pohjapuolen sileys- ja karheusarvot. Lisäksi selvitettiin, miten kartongin eri kerroksissa EOK-säädön jauhatuskombinaatiot vaikuttavat pintaominaisuuksiin. Merkittävimmi tekijöiksi EOK:n jauhatuksen säädössä on osoittautunut koivu- ja mäntymassan katkova jauhatustapa, jolloin sileysarvot olivat keskivertoa huonompia. Pintapuolen karheus on tuloksien perusteella heikompi kuin pohjapuolella. Samalla systematiikalla reunasileys on pintapuolella heikompi kuin pohjapuolella. Tämä johtuu kartongin pintapuolen tiukemmista vaatimuseroista pintaominaisuuksille ja reunasileydelle.

Reunasileyden määrittämiseksi koeajon tuloksia poikkiradasta tiheämmin kuin normaalisti, eli 18 cm välein. Tuloksien tarkastelussa ilmeni, että poikkiradan keskiarvoiset kriittiset reunasileysalueet vasemmalta puolelta ovat 82,5 cm ja oikealta reunalta noin 58,1 cm. Lisäksi ajettavalle kartonkilajille työn avulla tarkistetuista tuloksista löydettiin reunasileyden kannalta sopiva jauhatuksen kombinaatio.

Jauhatuskombinaatioissa EOK-säätöjä tehtiin kartongin pinta- ja taustakerroksille, jolloin runkokerroksen parametrit pysyivät referenssissä. Koeajon tuloksista todettiin, että koivumassan fibrilloivan ja mäntymassan katkovan jauhatustavan jauhatusyhdistelmässä pintaominaisuudet ja reunasileys kehittyivät paremmin.

## LÄHTEET

Arjas A. 1971. Tehdasjauhimen toiminnan arviointi. INSKO Puumassa- ja paperiteollisuuden täydennyskoulutuspäivät. Helsinki, Moniste 22-70 osa 2.

Heikkurinen A. 1999. Single fiber properties. Teoksessa: Levlin, J-E. & Söderhjelm, L. Papermaking Science and Technology: Pulp and Paper Testing. Jyväskylä: Gummerus Printing. s. 19–37.

Hägglom-Ahnger U. & Komulainen P. (2003). Kemiallinen metsäteollisuus: 2, Paperin ja kartongin valmistus (3. tark. p. - 5.p. 2006.). Helsinki: Opetushallitus.

J&L Fiber Services. 1999. Optimization of low consistency disc refiners s.1-4 [verkkodokumentti]. Päivitetty 3/2007. [Viitattu 22.10.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.jlfiberservices.com/pdf/vol2\\_no1.pdf](http://www.jlfiberservices.com/pdf/vol2_no1.pdf)

Ebeling K. 1983. Jauhatuksen vaikutus puukuituihin. Teoksessa: Arjas A. Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, toinen täysin uudistettu painos, III Paperin valmistus osa 1, Turku. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y, s. 67 – 99.

KnowPap 2018. 19.0. AEL / Proledge Oy. Tuotantoprosessit. [Viitattu 25.11.2018] [http://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/knowpap.htm](http://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/knowpap.htm). Saatavilla rajoitetusti.

Komulainen P. 2015. Fiber and Pulp Characteristics for Papermaking [verkkoesitys]. Päivitetty 20/8/2015. [Viitattu 04.10.2018]. Saatavissa verkkosivuilta: <https://www.slideshare.net/Peeke/fiber-and-pulp-characteristics-for-papermaking-5187751>

Koskenhely, K. 2007. Refining of chemical pulp fibres. Teoksessa: Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology: Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Second Edition. Jyväskylä: Gummerus Oy s. 94–139

Lappalainen J.T. 2004. Paperi- ja kartonginvalmistusprosessin mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi, Copyright, VVT Publications. Espoo. 149 s.

Levlin J-E. 1982. Armeerausmassan jauhatuksen tavoitteet. Levlin J-E (toim.), Paperimassan valmistus. Helsinki, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus INSKO 2 osa, 7 s.

Levlin J-E. 1983. Tärkeimmät kuituraaka-aineet ja niiden paperitekniset ominaisuudet. Teoksessa Arjas A. Suomen Paperi -Insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja toinen täysin uudistettu painos, 3 Paperin valmistus osa 1. Turku. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y, s.27-46.

Loijas Marko. 2014. Jauhatuskoulutus Stora Enso. Valkeakoski. Valmet Technologies, Inc.

Lumiainen J. 1998. Refining of chemical pulp [verkkodokumentti]. Päivitetty 1998. [Viitattu 7.11.2018]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://turbulence-initiated.sites.olt.ubc.ca/files/2013/01/1998-Lumiainen-Ch4.pdf>

Lumiainen J. 1989. Jauhatus paperin valmistuksessa. Valkeakoski. METSKO metsäteollisuuden koulutuskeskus. Suns defibrator Jylhä Oy. 21 s.

Lumiainen J. 2000. Refining of chemical pulp, Gullichsen J. & Paulapuro H. (toim.), Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Helsinki, Fapet Oy, s. 87 – 122.

Parason machinery LDT. 2012. Fine bar technology in refining system for pulp & paper [verkkoesitys]. Päivitetty 7/5/2012. [Viitattu 06.11.2018]. Saatavissa verkkosivuilta: <https://www.slideshare.net/parasonymachinery/finebartechbologyparasonymachinerycom>

Retulainen, E., Niskanen, K. & Nilsen, N. 1998. Fibers and bonds. Teoksessa: Niskanen K. Papermaking Science and Technology: Paper Physics. Jyväskylä: Gummerus Printing. s. 55–87

Ryti N. 1998. Paperitekniiikan perusteet, 13- painos. Espoo. Tekijä ja Otatieto Oy, 169 s.

Savcor Forest Oy, 2013. Savcor Wedge käyttöopas. Imatra. 173 s.

Sepsilva Ltd Oy. 1997. M-504 Hienopaperin valmistus. 2. Muunnettu painos. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy. 140 s.

Sirviö J. 2008 Fibres and bonds, Niskanen K. (toim.), Paper physics, 2nd edition. Helsinki. Finnish Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy. s. 60 – 92.

Sjöström L, Laine J. & Blademo Å. 2000. Release of organic substances from bleached sulphate pulps during slushing and refining, Nordic Pulp and Paper Research Journal, 15(5), s. 469 – 475.

Stora Enso. 2018. Consumer Board. Imatra mills. Sisäinen raportti, 1 s.

Stora Enso .2018a. Consumer Board. Imatra mills. DNA-sanoma kaavio 1.

Stora Enso .2018b. Consumer Board. Imatra mills. Laatupalvelut. Määrittäsohje: Massan Freenes, 4 s.

Stora Enso. 2018c. Consumer Board. Imatra mills. Laatupalvelut. Määrittäsohje: Jauhatusasteen määrittäys SR, 5 s.

Stora Enso. 2017. Consumer Board. Imatra mills. Testing metodts for boards and flexible packaging papers, 43 s.

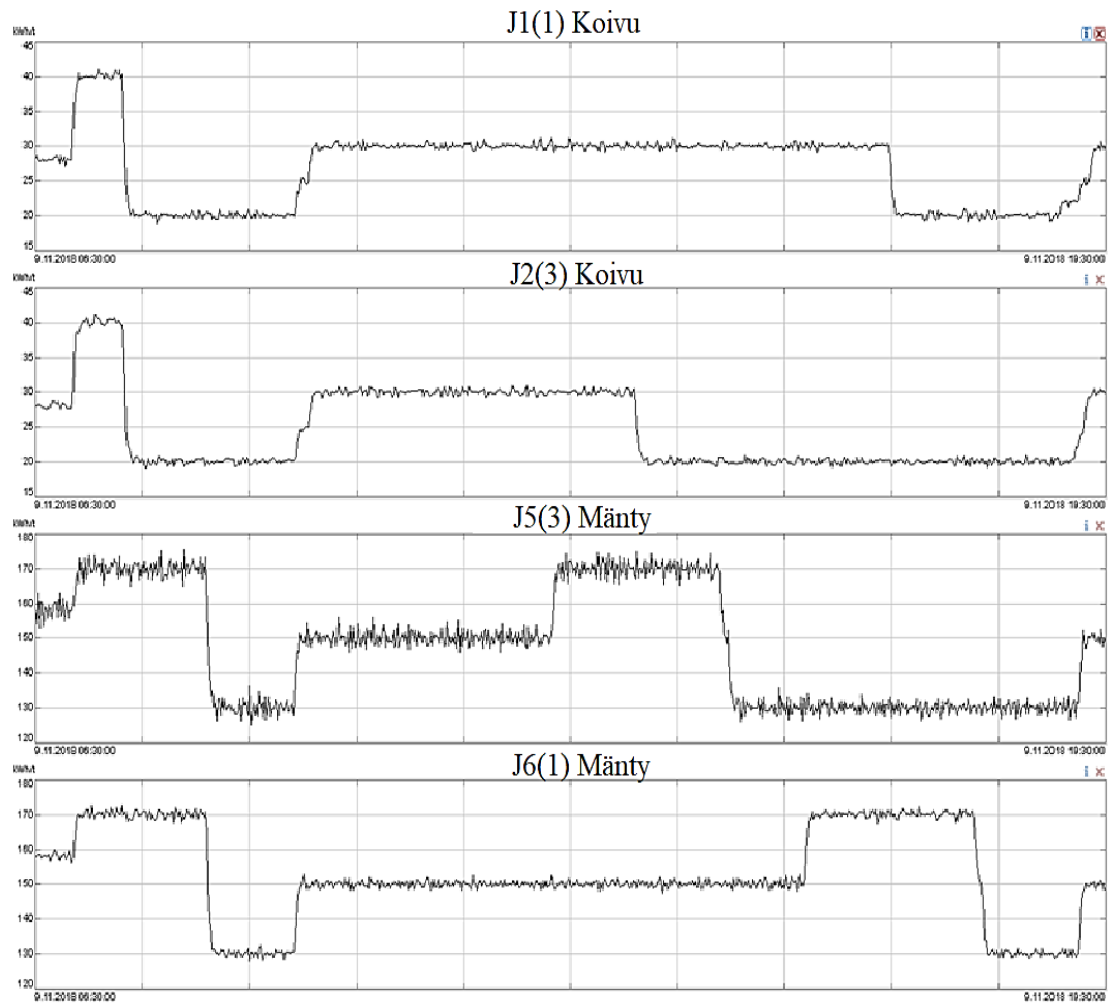
Syrjänen A. & Oivanen, 1983. Jauhimet. Teoksessa: Arjas, A. Suomen Paperiinsinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, toinen täysin uudistettu painos, III Paperin valmistus osa 1. Turku: Turun Sanomat Oy, s. 453–468

Vahlroos S. 2005. Kuivaamattoman sellun kemiallinen ominaisuuksien hallinta. Diplomityö, Oulun Yliopisto, Oulu. 107 s.

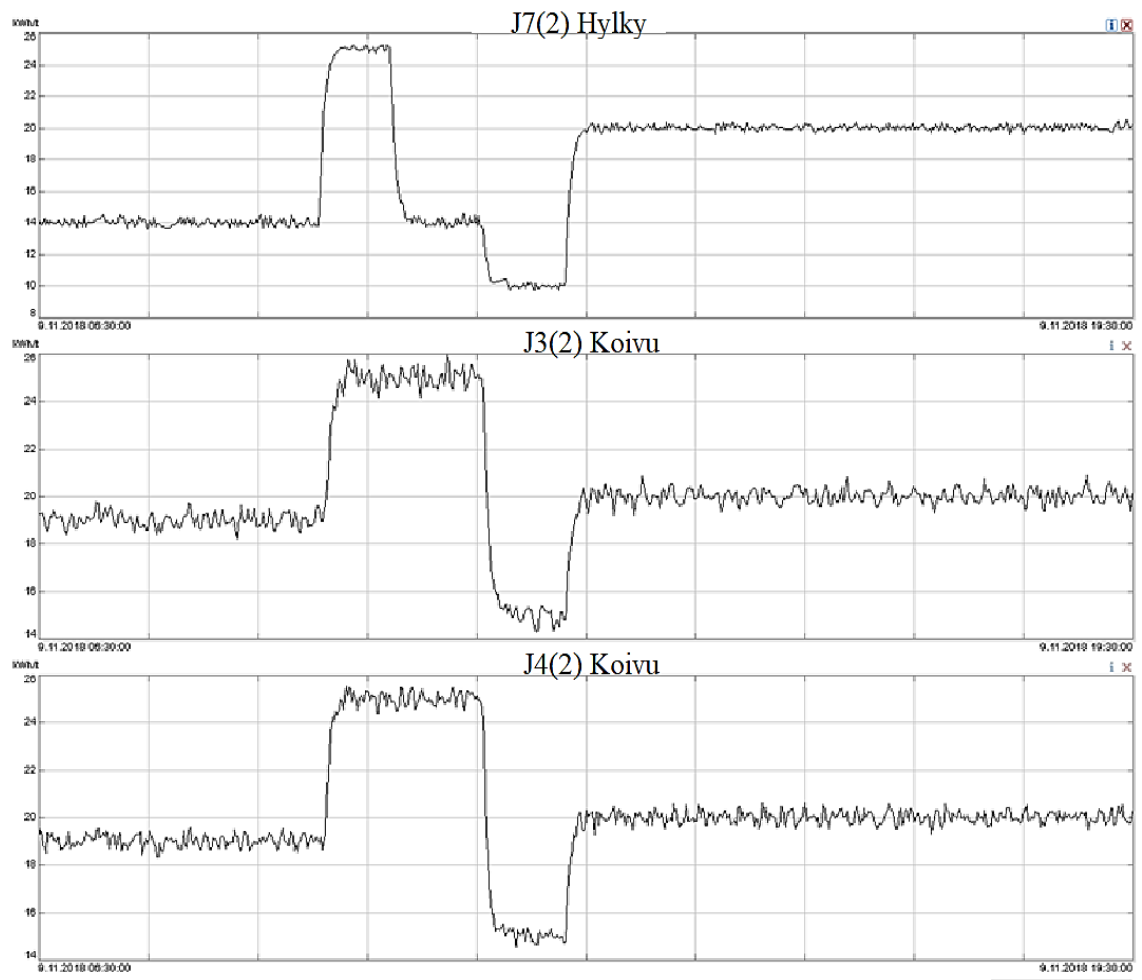
Wang X. 2006. Improving the papermaking properties of kraft pulp by controlling hornification and internal fibrillation, Dissertation for the degree of Dr. (Tech.), Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu. Helsinki. 46 s.

## LIITTEET

Liite 1. Jauhatuksen ominaisenergian säädön muutokset koeajon aikana.

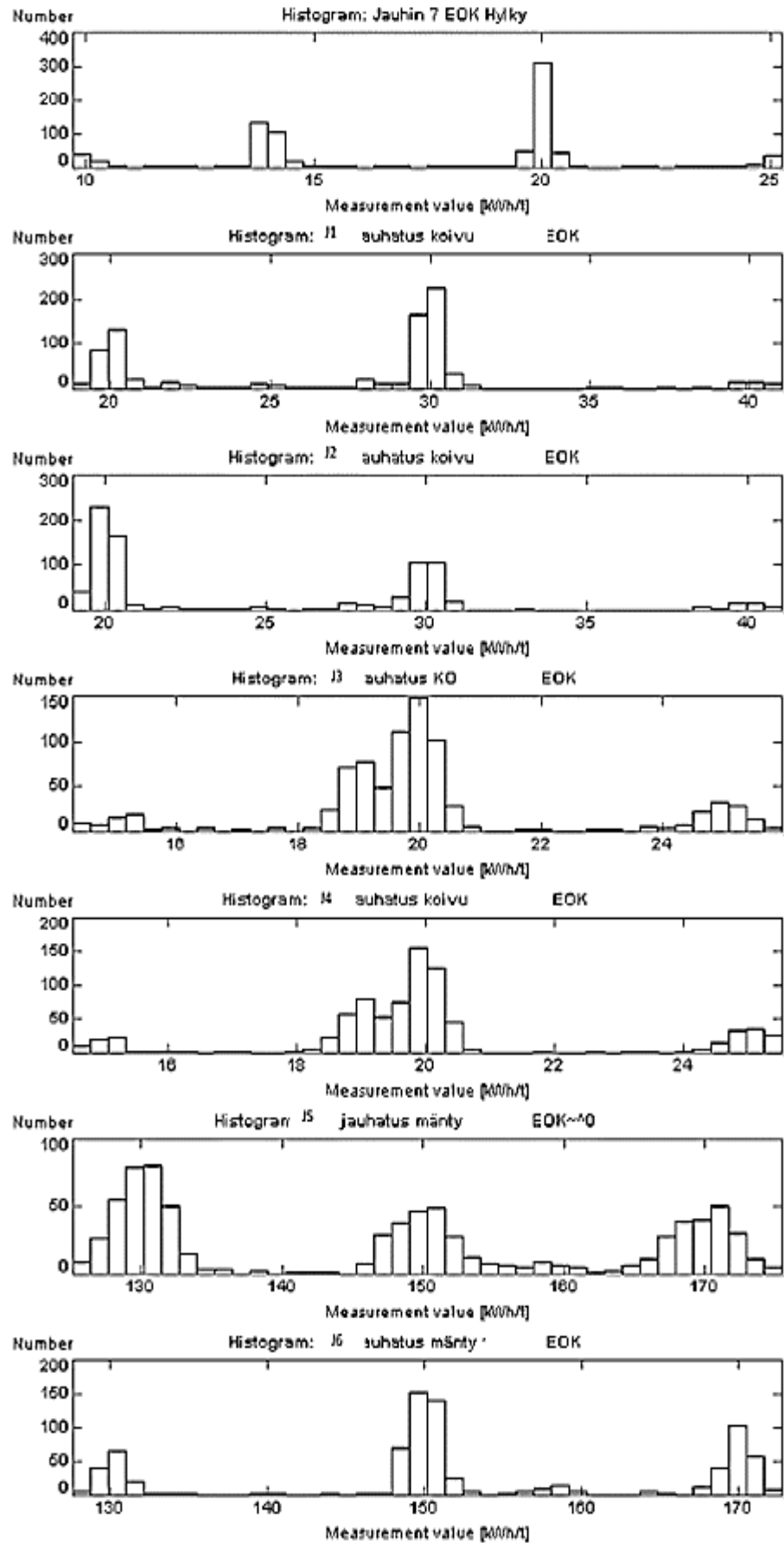


KUVA 1: Pinta- ja taustakerroksen mänty- ja koivumassan EOK- säädön (kWh/t) muutokset ajan funktiona.



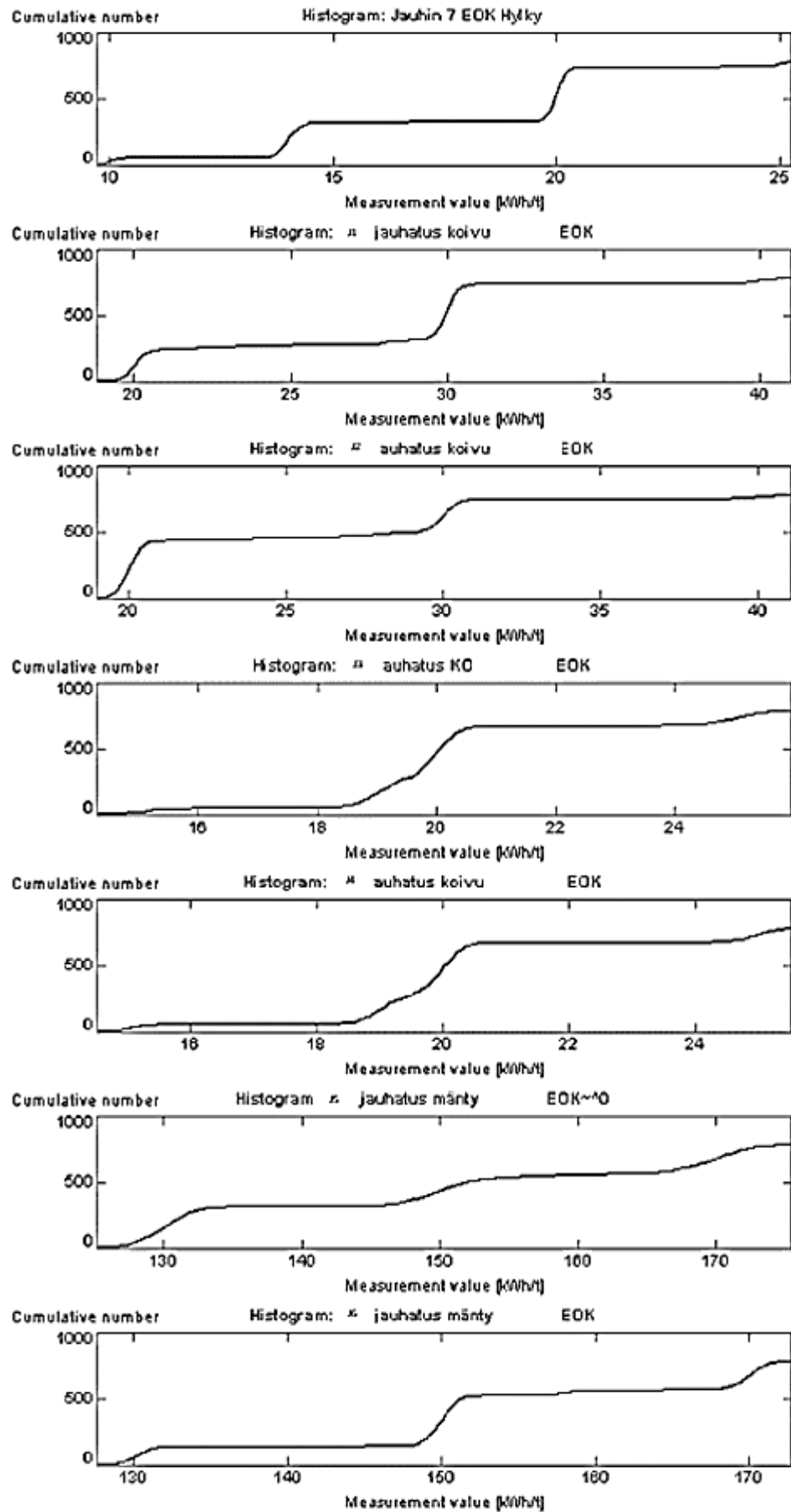
KUVA 2: Runkokerroksen mänty- ja hylkymassan EOK- säädön (kWh/t) muutokset ajan funktiona.

9.11.2018 06:30:00 - 9.11.2018 19:30:00



KAAVIO 1: Jauhinkohteiset EOK-säädön (kWh/t) muutokset histogrammina.

3.11.2018 06:30:00 - 9.11.2018 19:30:00



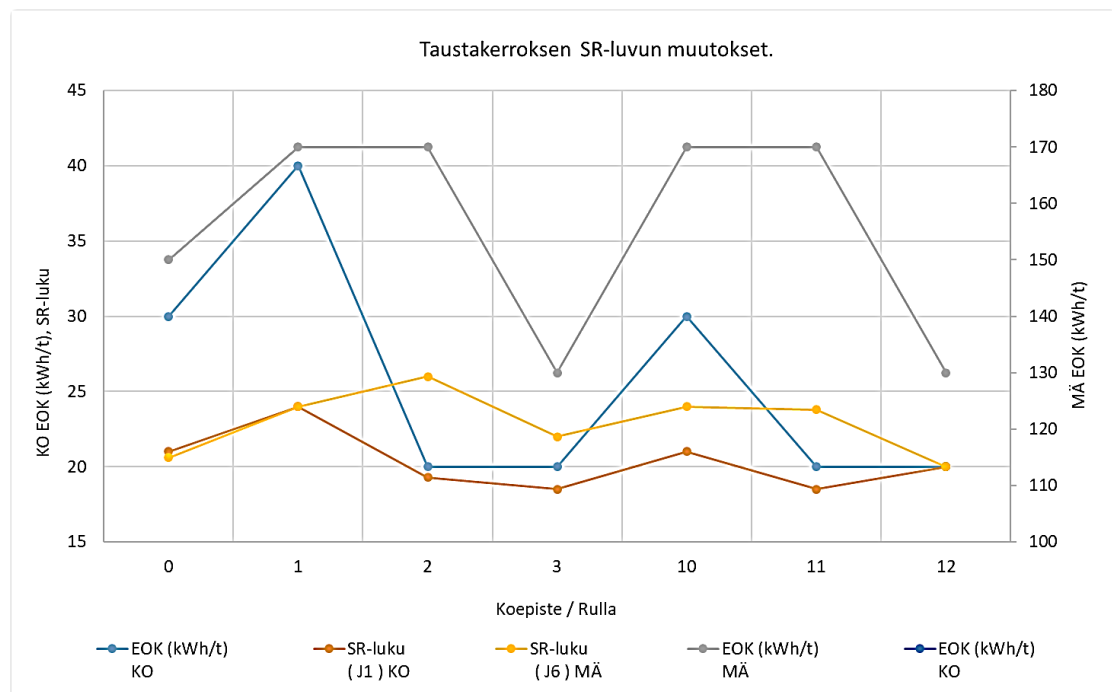
KAAVIO 2: Jauhinkohteiset EOK-säädön (kWh/t) muutokset trendiviivana.



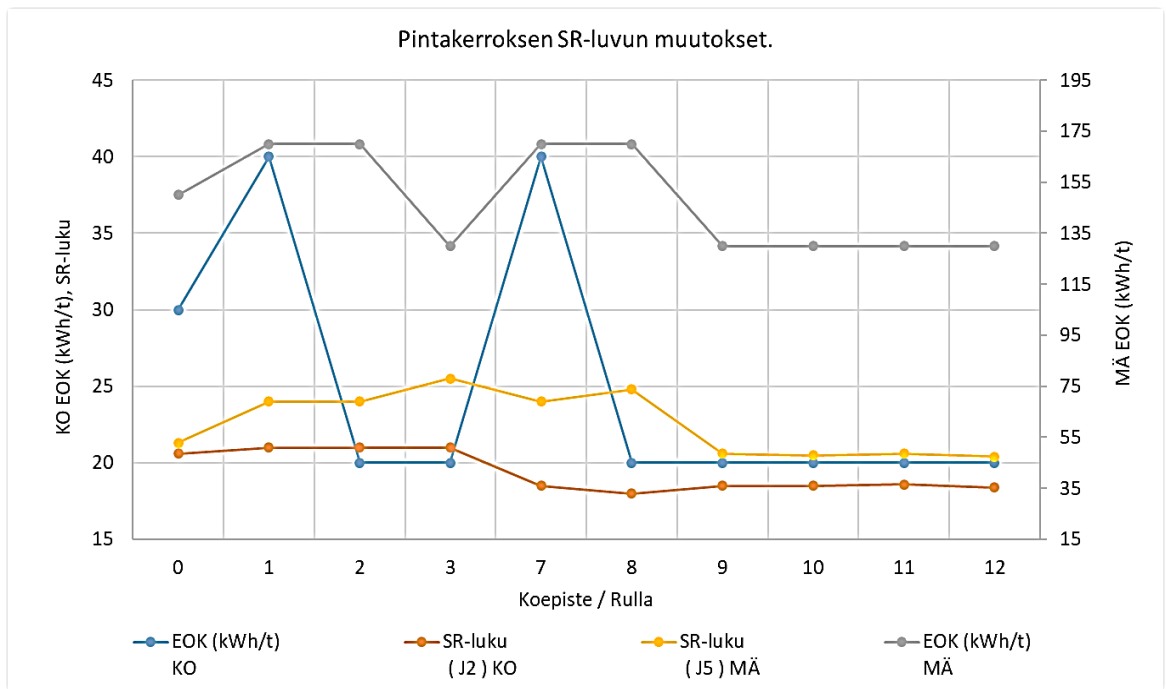
## Liite 2. Massanäytteiden SR-luvun tulokset.

TAULUKKO 1: SR-luvun tulokset eri kerroksissa.

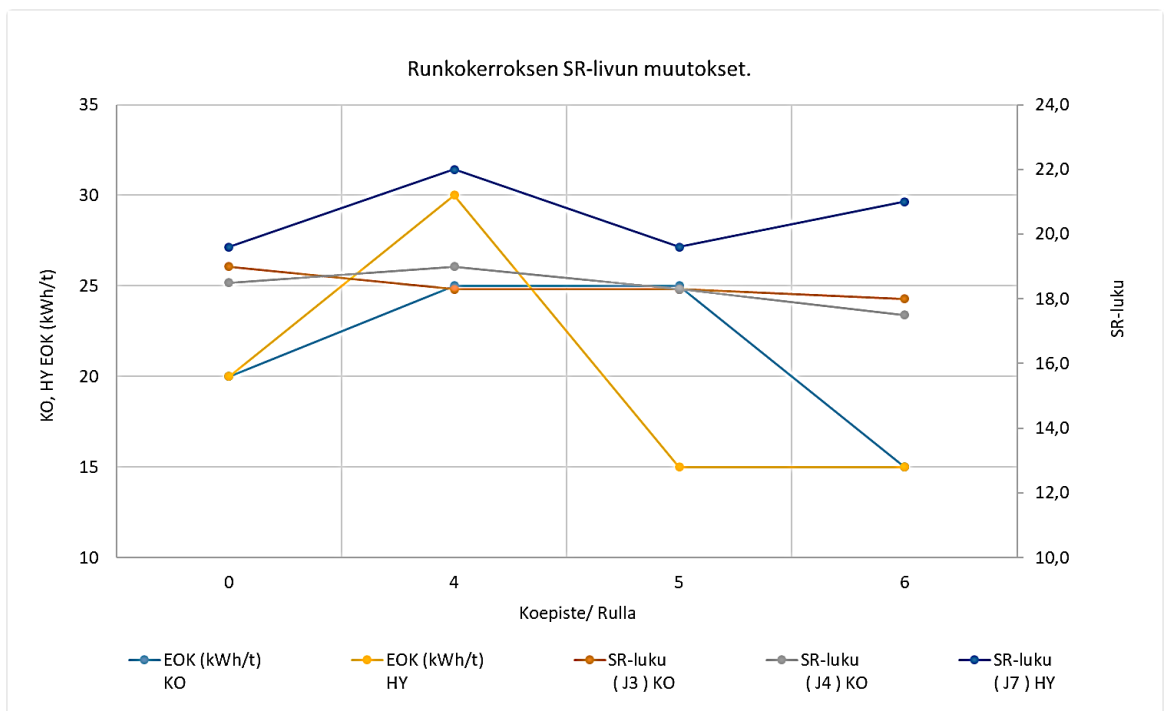
Kerros	Tausta (1)		Pinta (3)		Runko (2)	
	Koivu	Mänty	Koivu	Mänty	Koivu	Hylky
Jauhin	(J1)	(J6)	(J2)	(J5)	(J3 / J4)	(J7)
Koepisteet	SR-luku	SR-luku	SR-luku	SR-luku	SR-luku	SR-luku
Referenssi (0)	21,0	20,6	20,6	21,3	19,0 / 18,5	19,6
1	24,0	24,0	21,0	24,0		
2	19,3	26,0	21,0	24,0		
3	18,5	22,2	21,0	25,5		
4					18,3 / 19,0	22,0
5					18,3 / 18,3	19,6
6					18,3 / 17,5	21,0
7			18,5	24,0		
8			18,0	24,0		
9			18,5	20,6		
10	21,0	24,0	18,5	21,0		
11	18,5	23,8	18,6	20,6		
12	20,0	20,0	18,4	20,4		



KAAVIO 1: Koepistesarjojen 0–3 ja 10–12 taustakerroksesta mitatut SR-luvun tulokset.



KAAVIO 2: Koepistesarjojen 0–3 ja 7–12 pintakerroksesta mitatut SR-luvun tulokset.



KAAVIO 3: Koepisteiden 0 ja 4–6 runkokerroksesta mitatut SR-luvun tulokset.

Liite 2b. Konerullien PaperLab-tulokset. (Taulukot 1-15 poistettu julkisesta versiosta)

TAULUKKO 1: Rullan 0 tulokset.

TAULUKKO 2: Rullan 1 tulokset.

TAULUKKO 3: Rullan 2 tulokset.

TAULUKKO 4: Rullan 3 tulokset.

TAULUKKO 5: Rullan 4 tulokset.

TAULUKKO 6: Rullan 5 tulokset.

TAULUKKO 7: Rullan 6 tulokset.

TAULUKKO 8: Rullan 7 tulokset.

TAULUKKO 9: Rullan 8 tulokset

TAULUKKO 10: Rullan 9 tulokset.

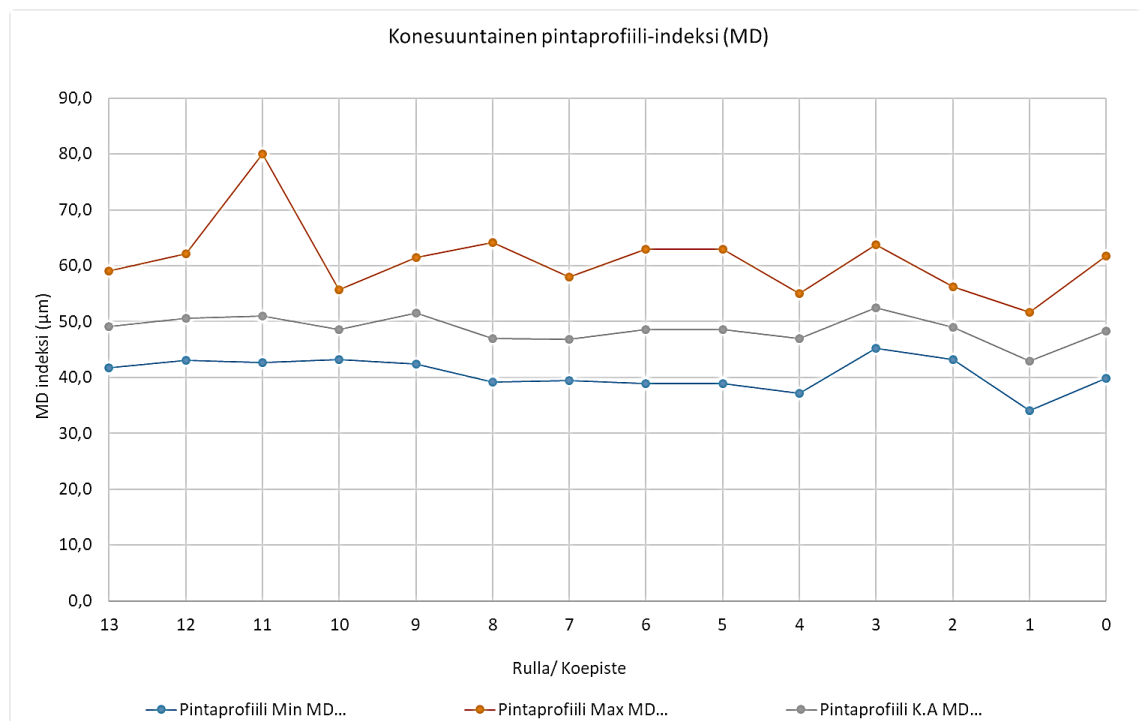
TAULUKKO 11: Rullan 10 tulokset.

TAULUKKO 12: Rullan 11 tulokset.

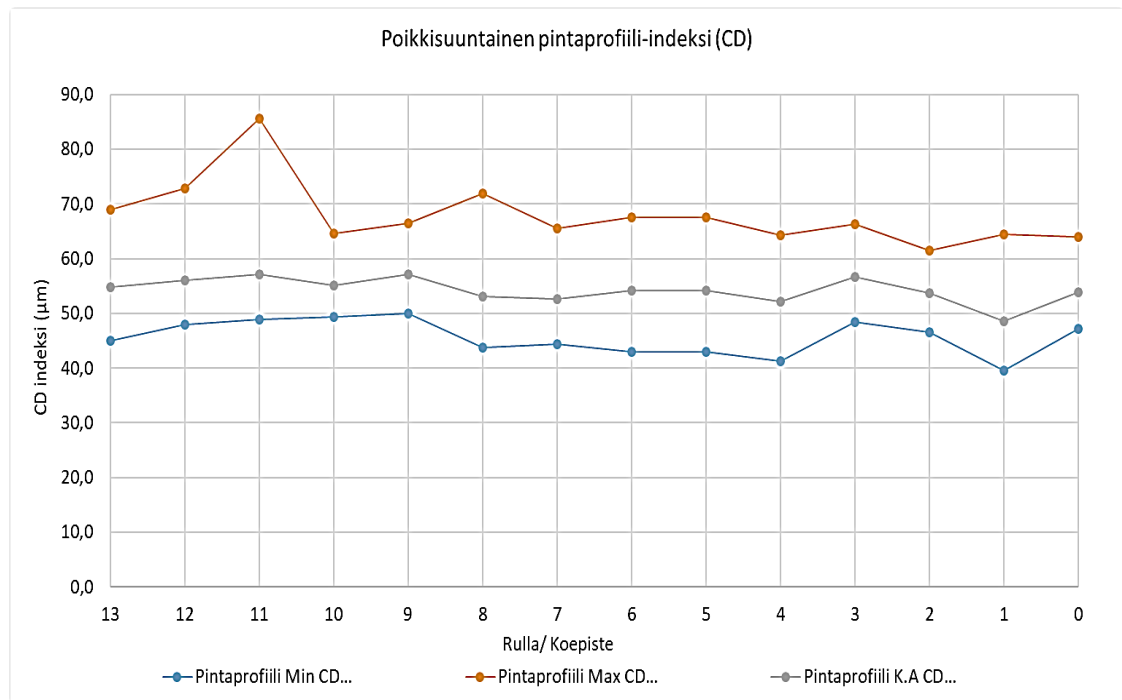
TAULUKKO 13: Rullan 12 tulokset.

TAULUKKO 14: Ajosuuntaiset pintaprofiili-indeksit (MD).

TAULUKKO 15: Poikkisuuntaiset pintaprofiili-indeksit (CD).



KAAVIO 1: Konerullien keskiarvoiset kartongin pinnan epätasaisuuden keskiarvojen minimi ja maksimi trendit MD pintaprofiili-indekseille.



KAAVIO 2: Konerullien keskiarvoiset kartongin pinnan epätasaisuuden keskiarvojen minimi- ja maksimitrendit CD pintaprofiili-indekseille.

Liite 3. Poikkiratanäytteiden keskiarvoiset pinta- ja pohjapuolen tuloksia. (Poistettu julkisesta versiosta)

TAULUKKO 1: Poikkiratanäytteiden keskiarvoisen pintapuolen karheuden tuloksia.

TAULUKKO 2: Poikkiratanäytteiden keskiarvoisen pohjapuolen karheuden tuloksia.

Liite 4. Poikkiratanäytteiden OptiTopo-mittauksen konerullakohtaisia tuloksia. (Taulukot 1,3 poistettu julkisesta versiosta)

TAULUKKO 1: OptiTopo-mittausten tulokset mikrometreinä.

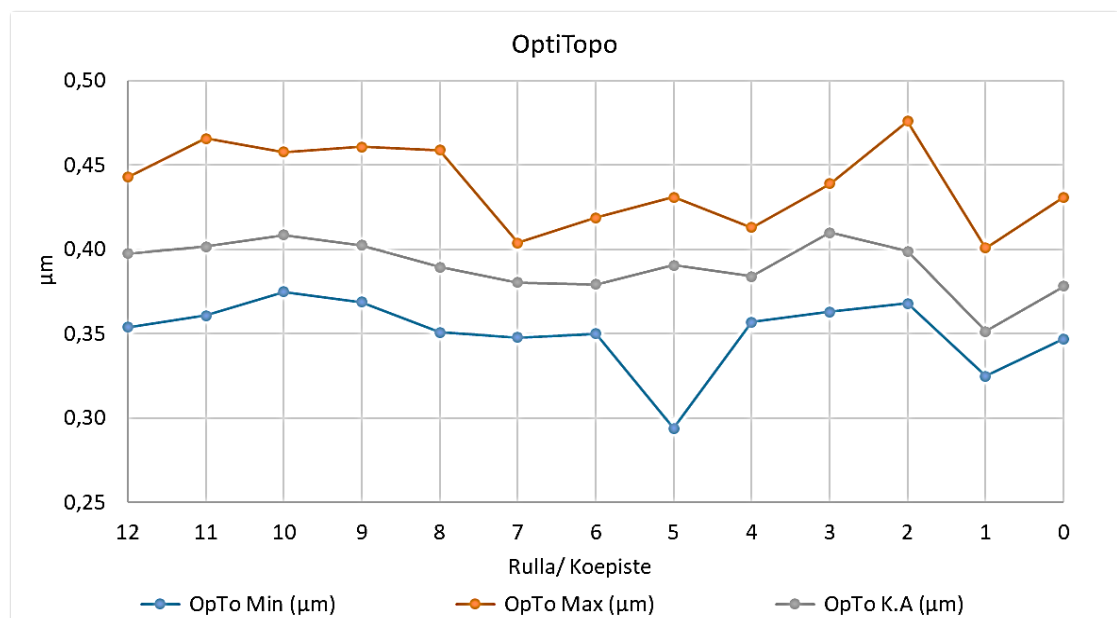
TAULUKKO 2: Konerullien OptiTopo-mittauksen minimi-, maksimi- ja keskiarvotulokset.

Konerulla	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
OpTo Min ( $\mu\text{m}$ )	0,35	0,36	0,38	0,37	0,35	0,35	0,35	0,29	0,36	0,36	0,37	0,33	0,35
OpTo Max ( $\mu\text{m}$ )	0,44	0,47	0,46	0,46	0,46	0,40	0,42	0,43	0,41	0,44	0,48	0,40	0,43
OpTo K.A ( $\mu\text{m}$ )	0,40	0,40	0,41	0,40	0,39	0,38	0,38	0,39	0,38	0,41	0,40	0,35	0,38

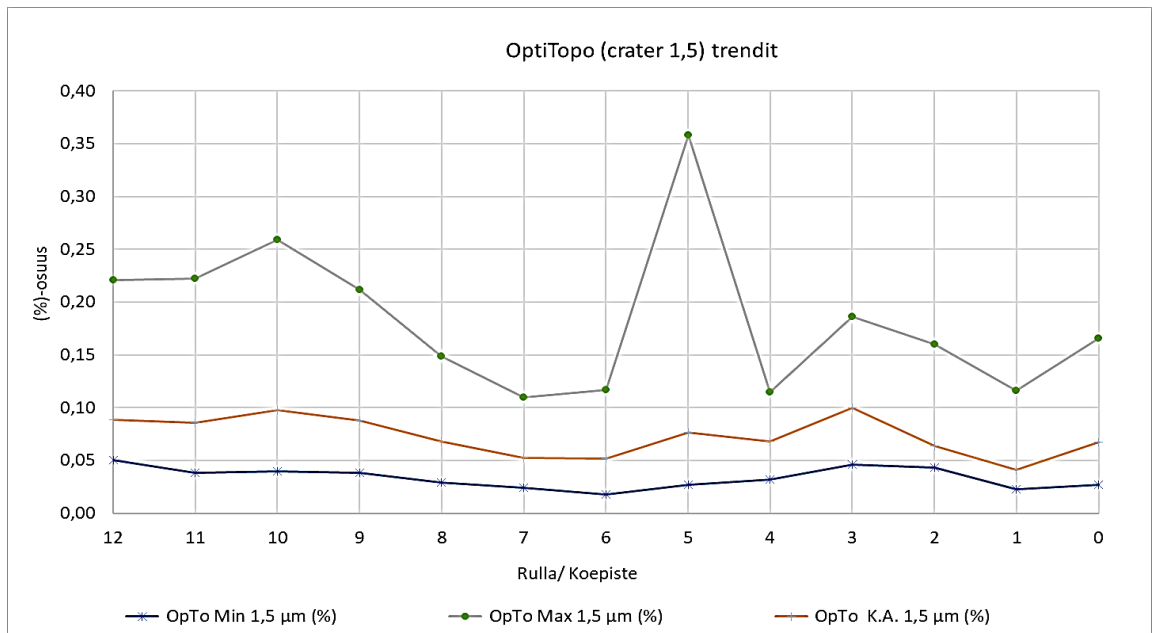
TAULUKKO 3: OptiTopo (1,5  $\mu\text{m}$  crater) -mittausten tulokset prosenttiosuutena.

TAULUKKO 4: Konerullien OptiTopo-mittauksen minimi-, maksimi- ja keskiarvotulokset kraattereiden 1,5  $\mu\text{m}$ . syvyysosuudella.

Konerulla	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
OpTo Min 1,5 $\mu\text{m}$ (%)	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
OpTo Max 1,5 $\mu\text{m}$ (%)	0,22	0,22	0,26	0,21	0,15	0,11	0,12	0,36	0,12	0,19	0,16	0,12	0,17
OpTo K.A. 1,5 $\mu\text{m}$ (%)	0,09	0,09	0,10	0,09	0,07	0,05	0,05	0,08	0,07	0,10	0,06	0,04	0,07

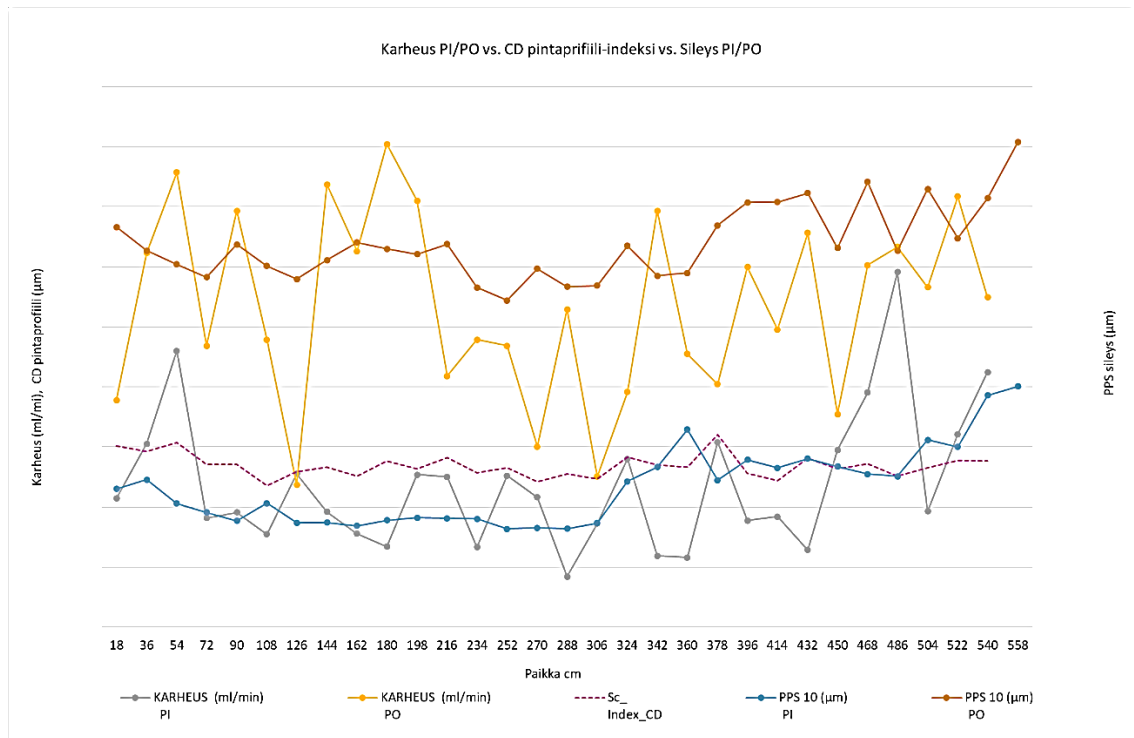


KAAVIO 1: Konerullien keskiarvoiset kartongin OptiTopo-mittauksen pinnan vaihteluiden keskiarvojen minimi- ja maksimit trendit.

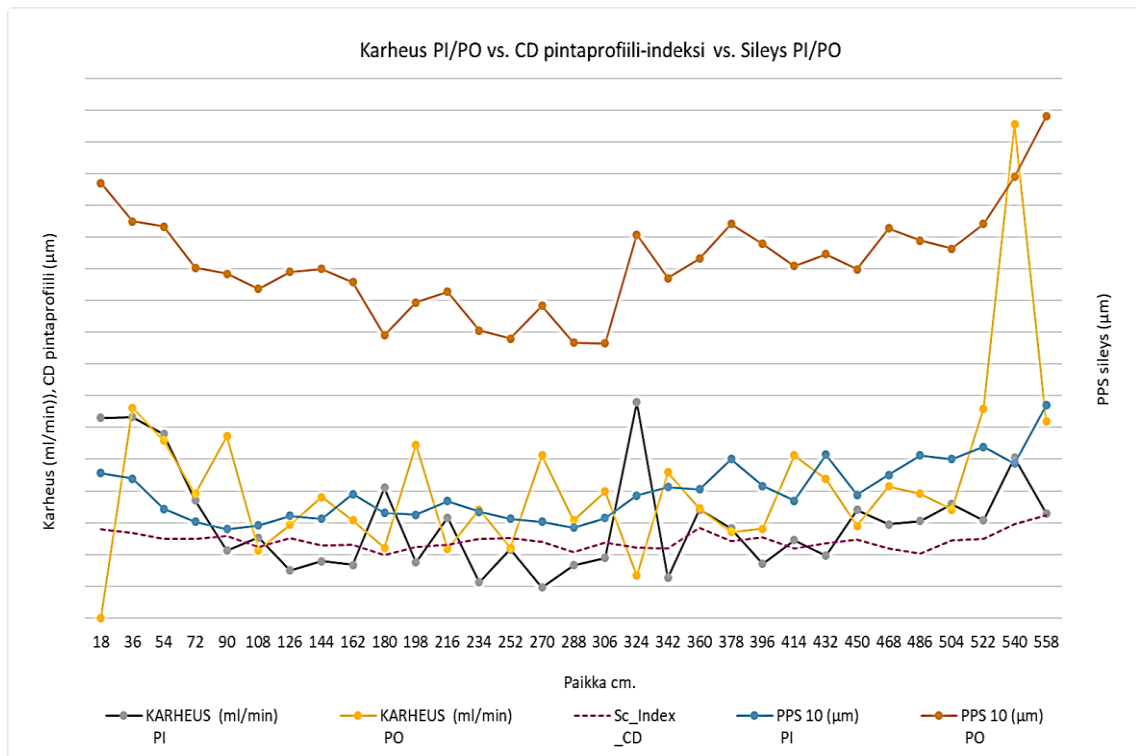


KAAVIO 2: Konerullakohtaiset minimi- ja keskiarvon OptiTopo-mittauksen trendit kraattereiden 1,5 µm. syvyysosuudella.

## Liite 5. Konerullakohtaiset yhdistelmätrendit reunasileyden havainnointiin.

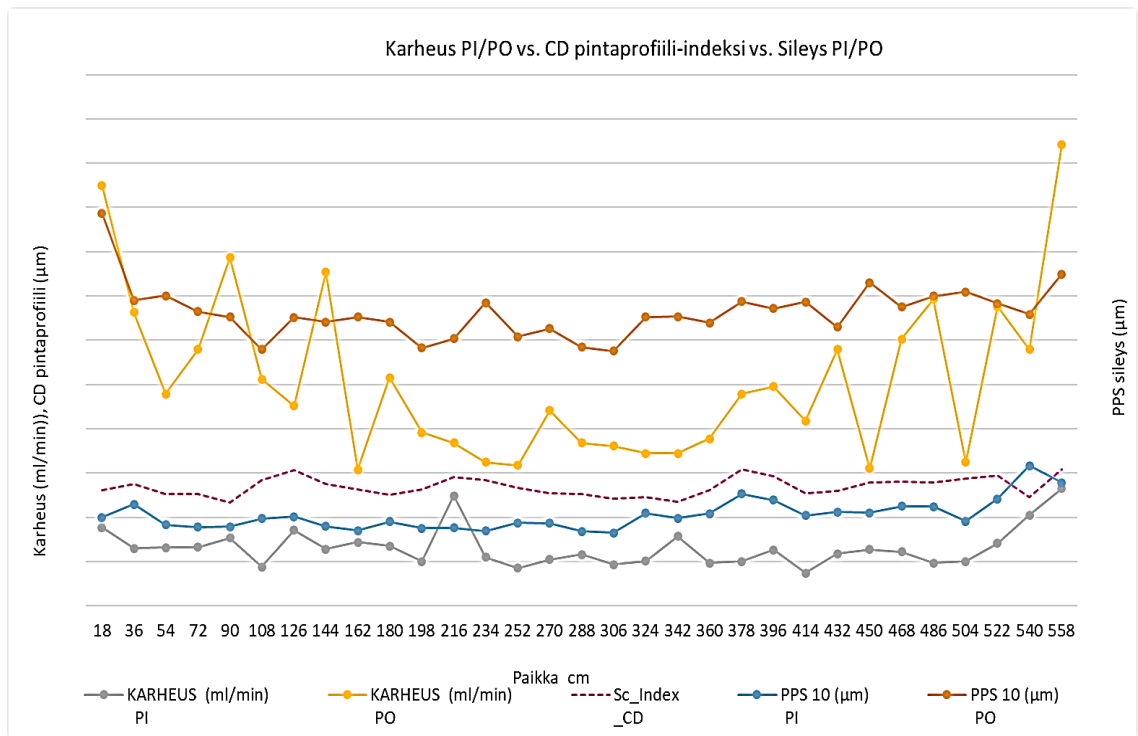


KAAVIO 1: Konerullan 0 yhdistelmätrendit.

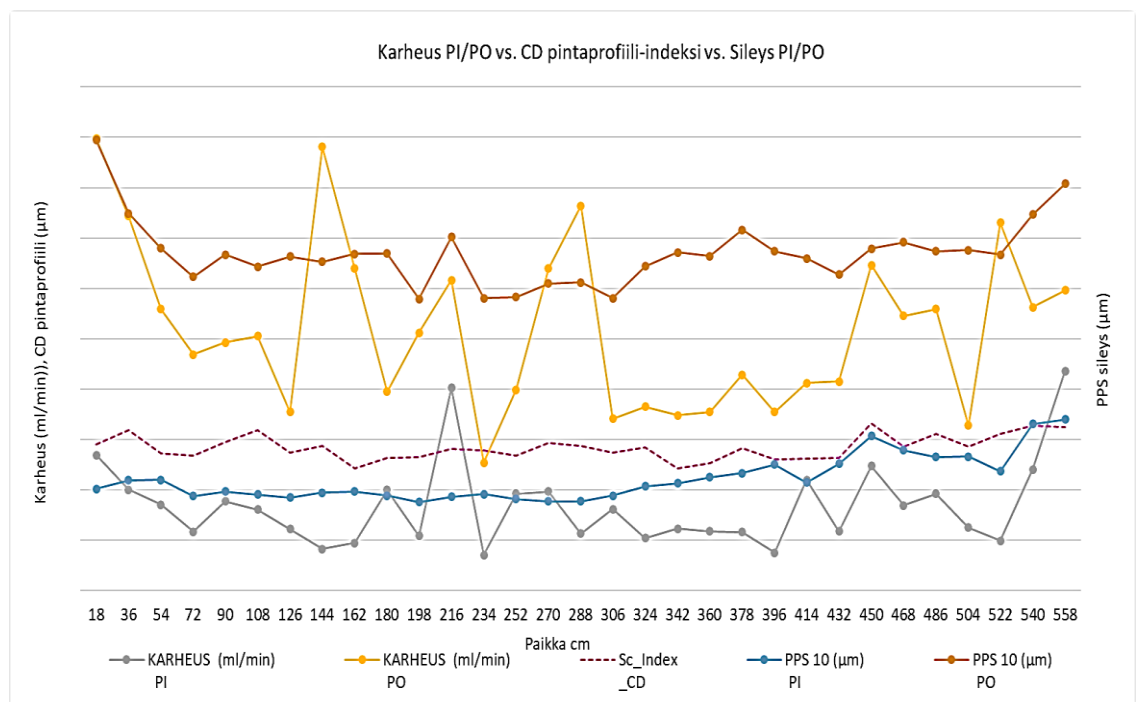


KAAVIO 2: Konerullan 1 yhdistelmätrendit.

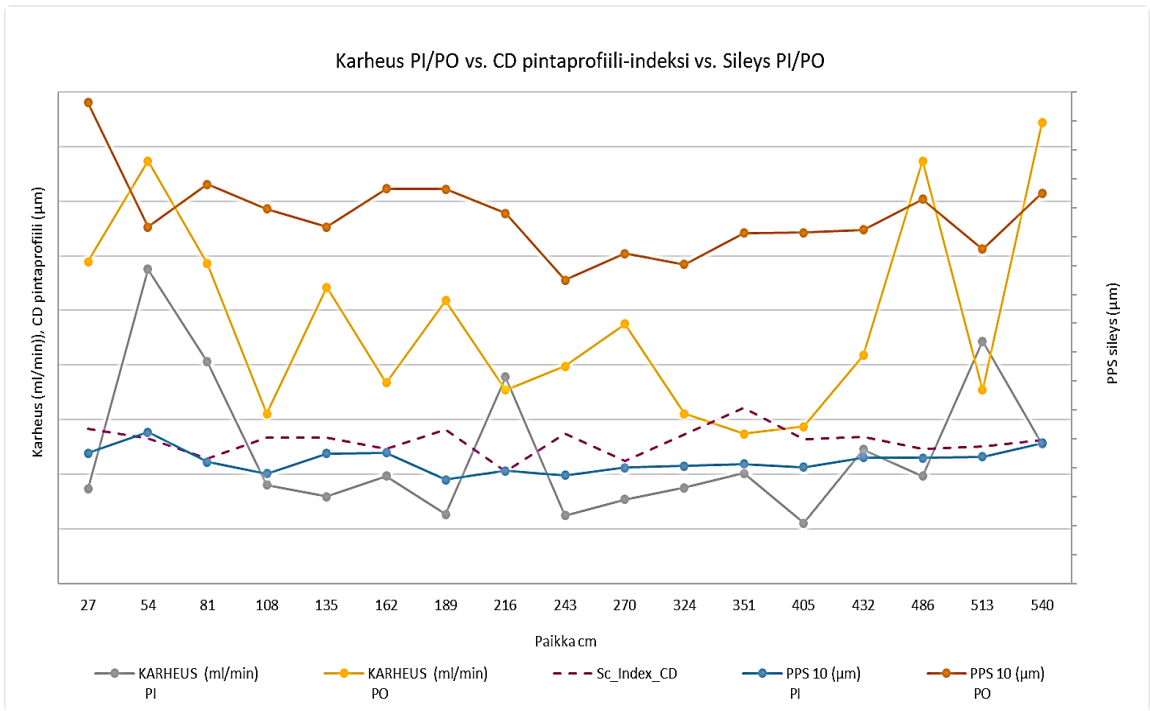




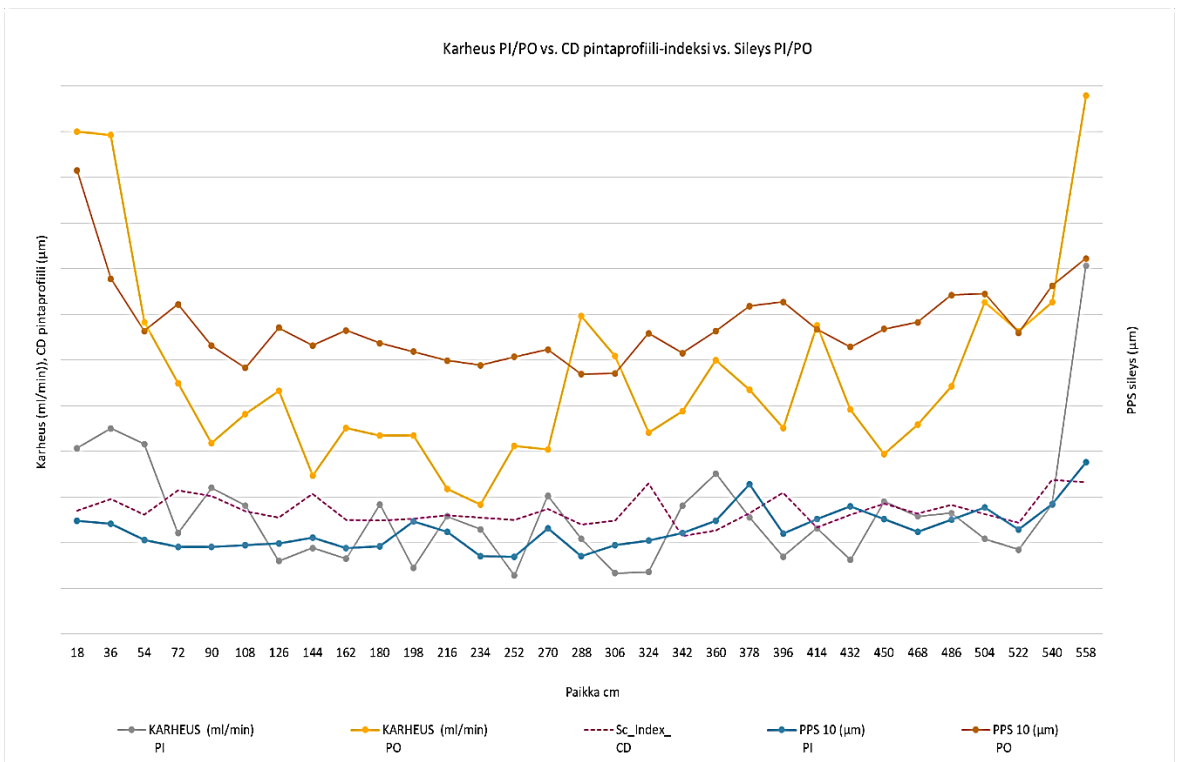
KAAVIO 3: Konerullan 2 yhdistelmätrendit.



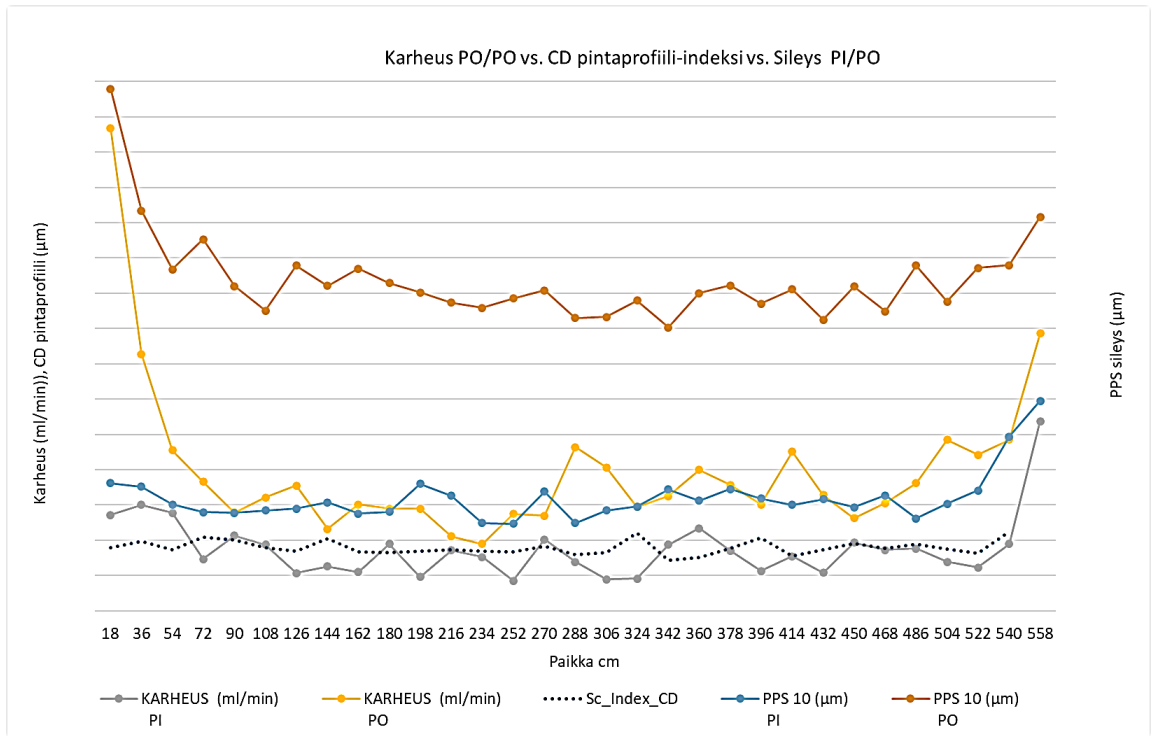
KAAVIO 4: Konerullan 3 yhdistelmätrendit.



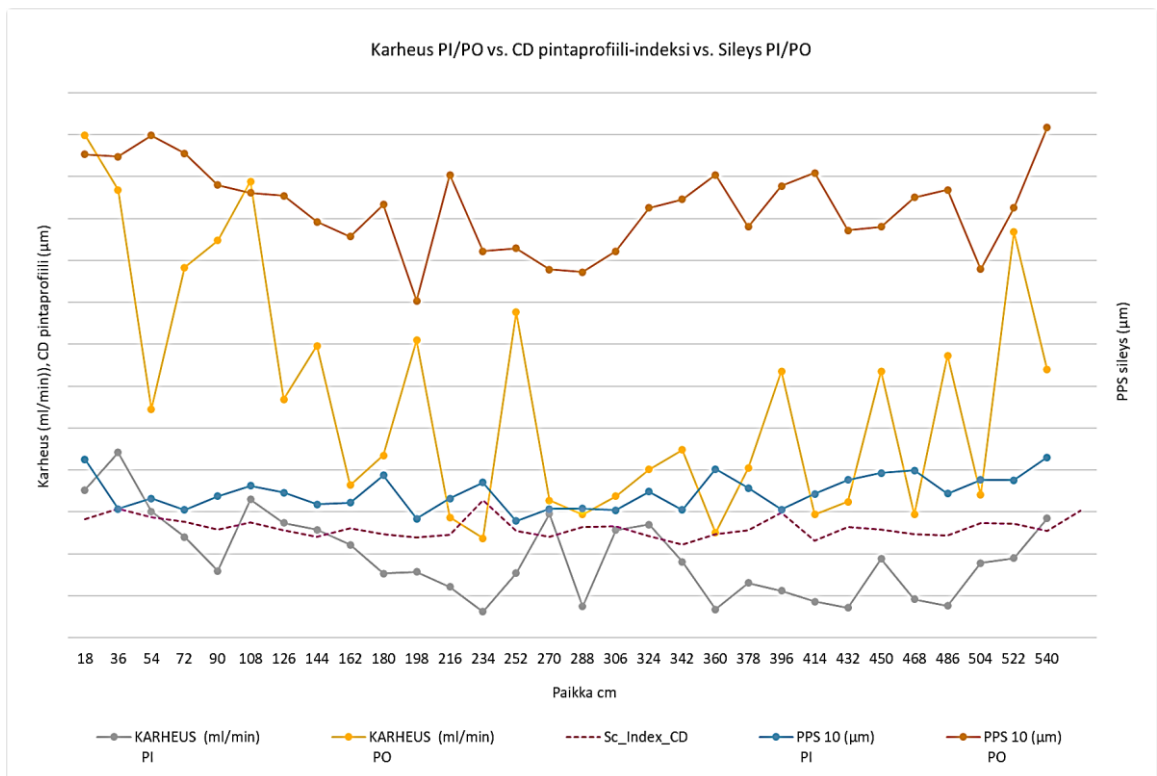
KAAVIO 5: Konerullan 4 yhdistelmätrendit.



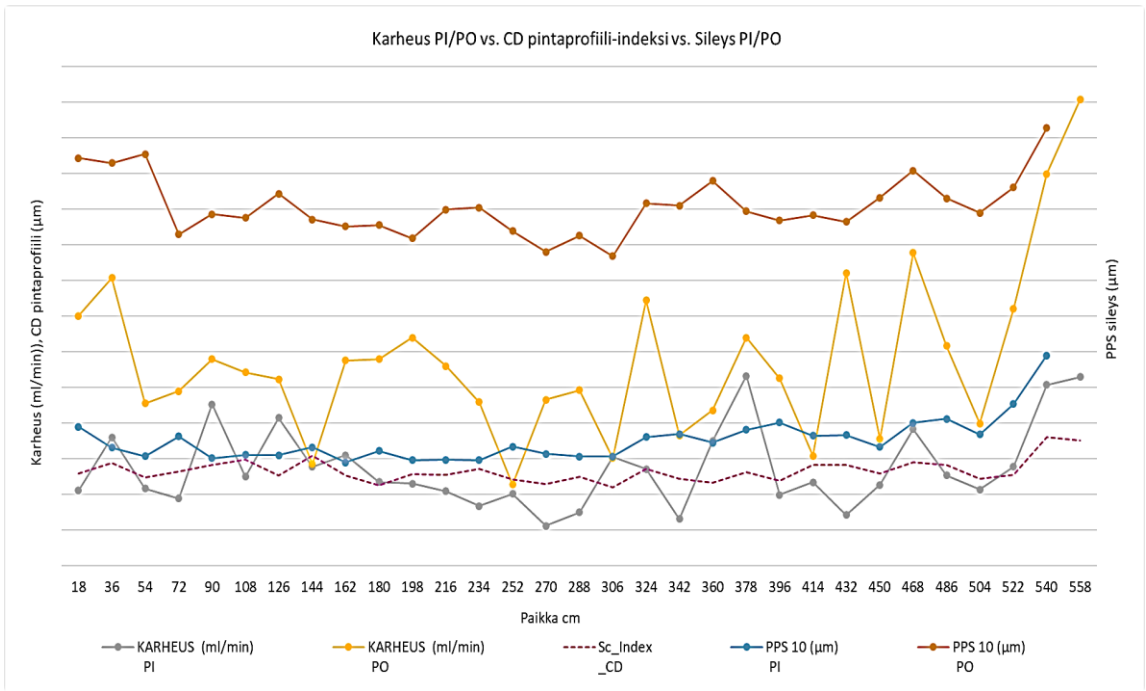
KAAVIO 6: Konerullan 5 yhdistelmätrendit.



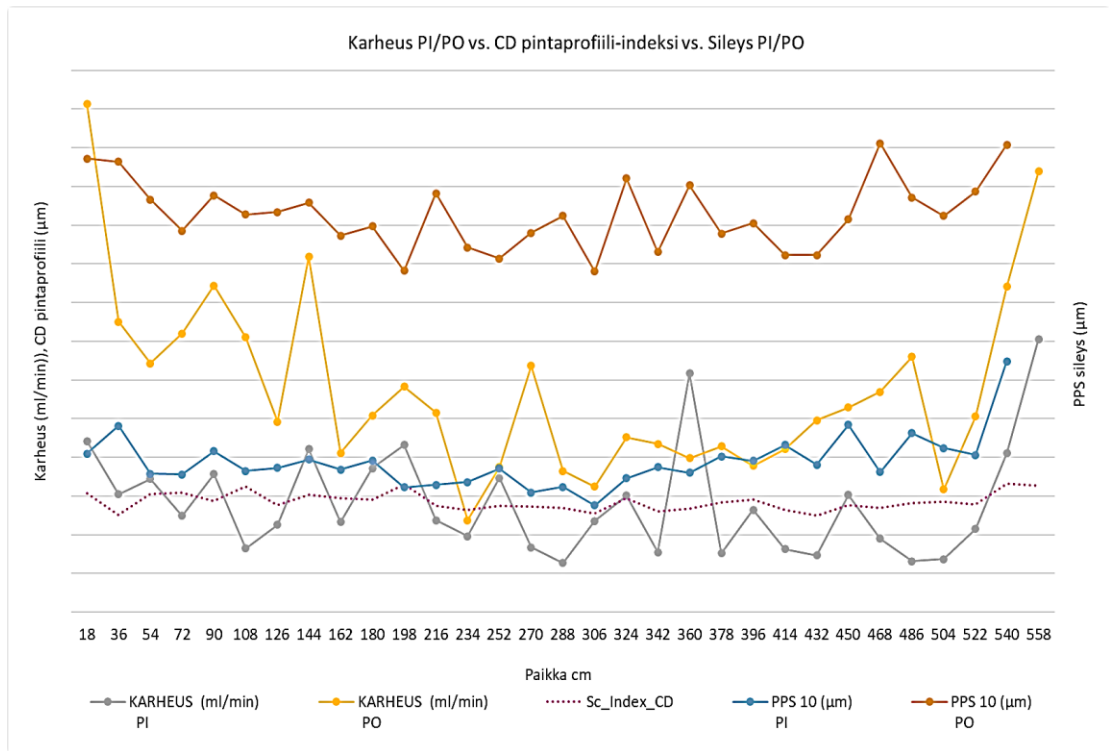
KAAVIO 7: Konerullan 6 yhdistelmätrendit.



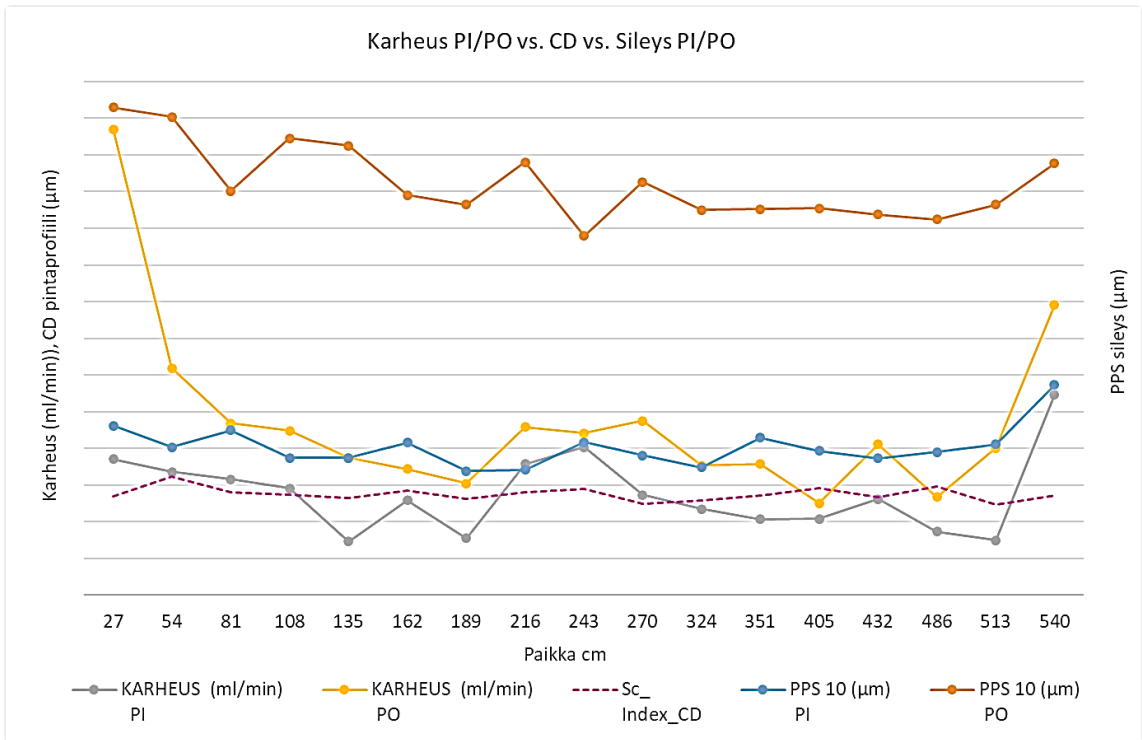
KAAVIO 8: Konerullan 7 yhdistelmätrendit.



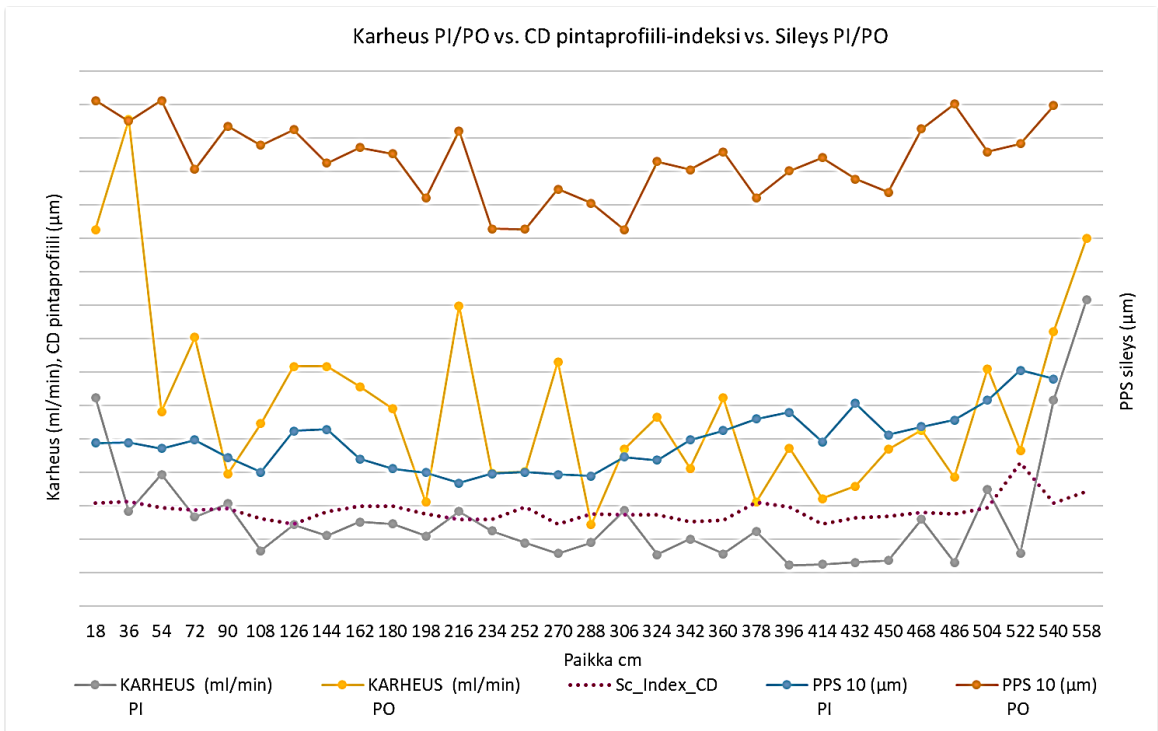
KAAVIO 9: Konerullan 8 yhdistelmätrendit.



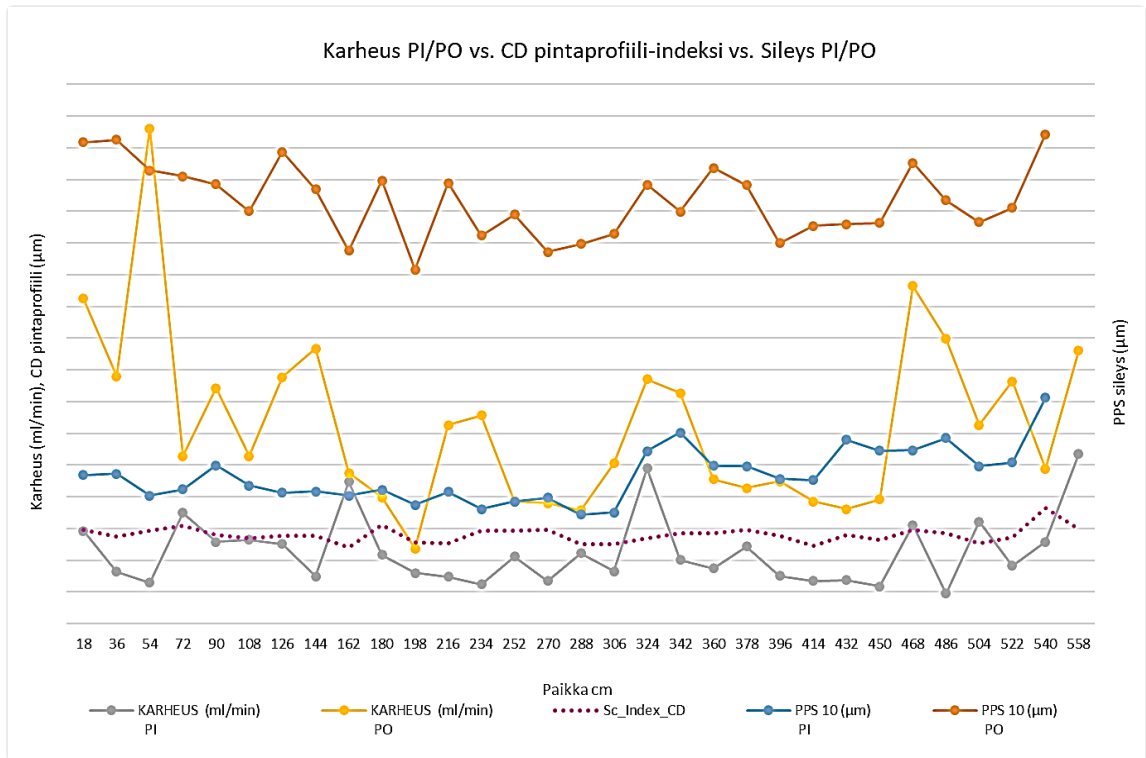
KAAVIO 10: Konerullan 9 yhdistelmätrendit.



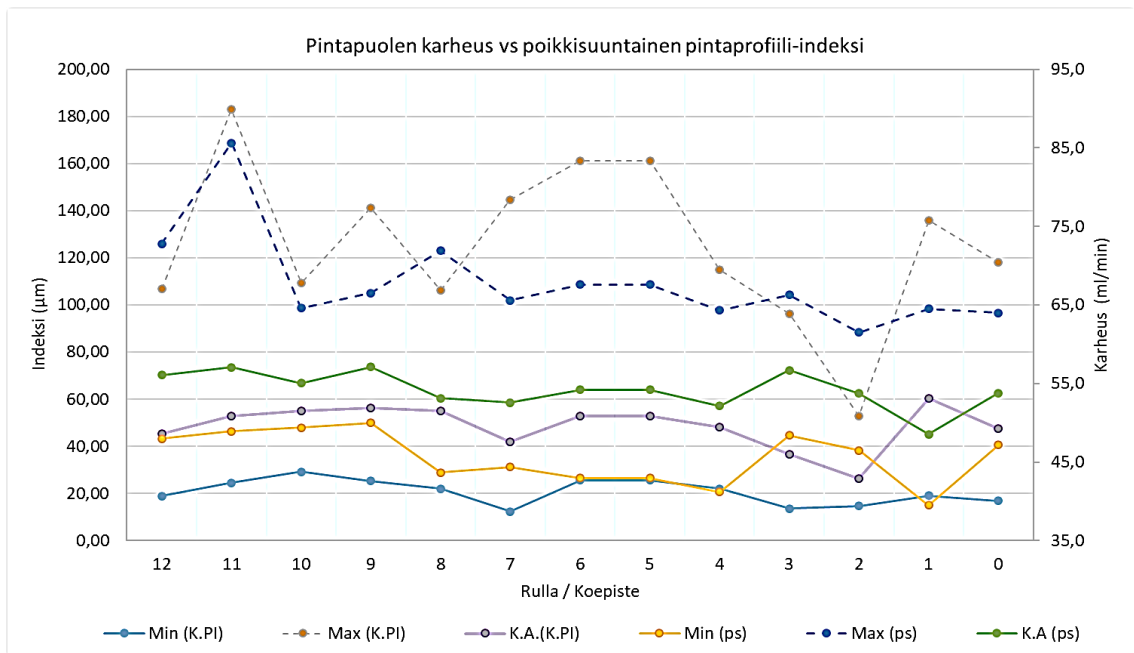
KAAVIO 11: Konerullan 10 yhdistelmätrendit.



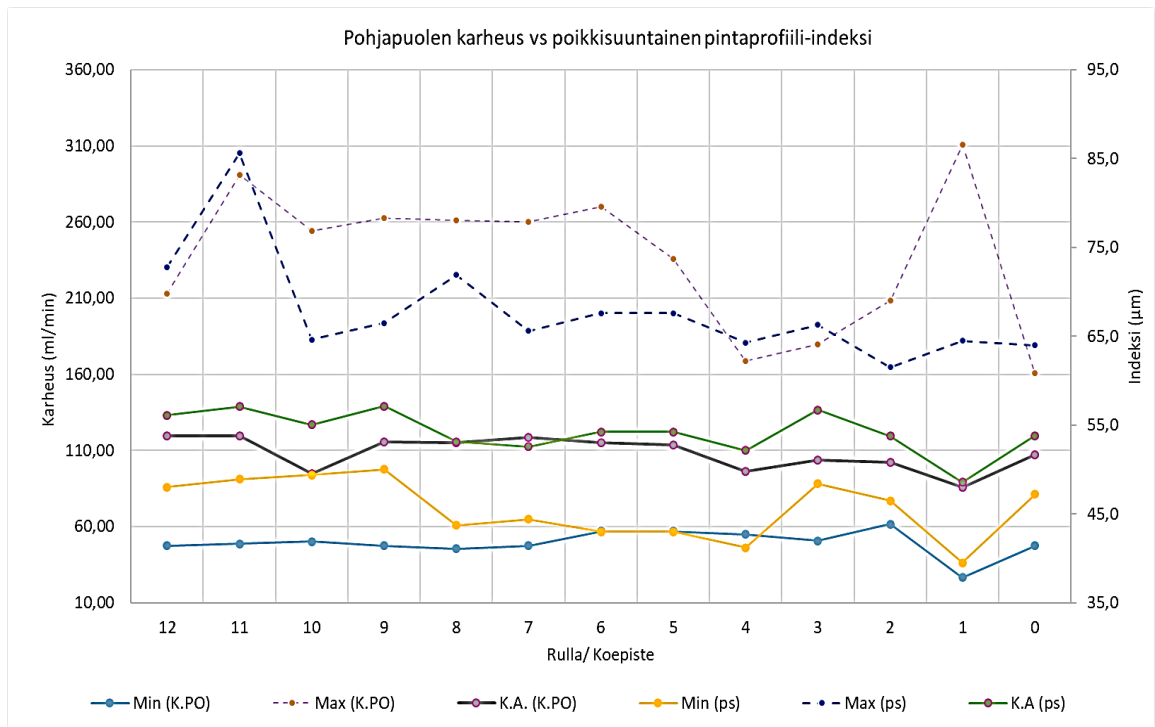
KAAVIO 12: Konerullan 11 yhdistelmätrendit.



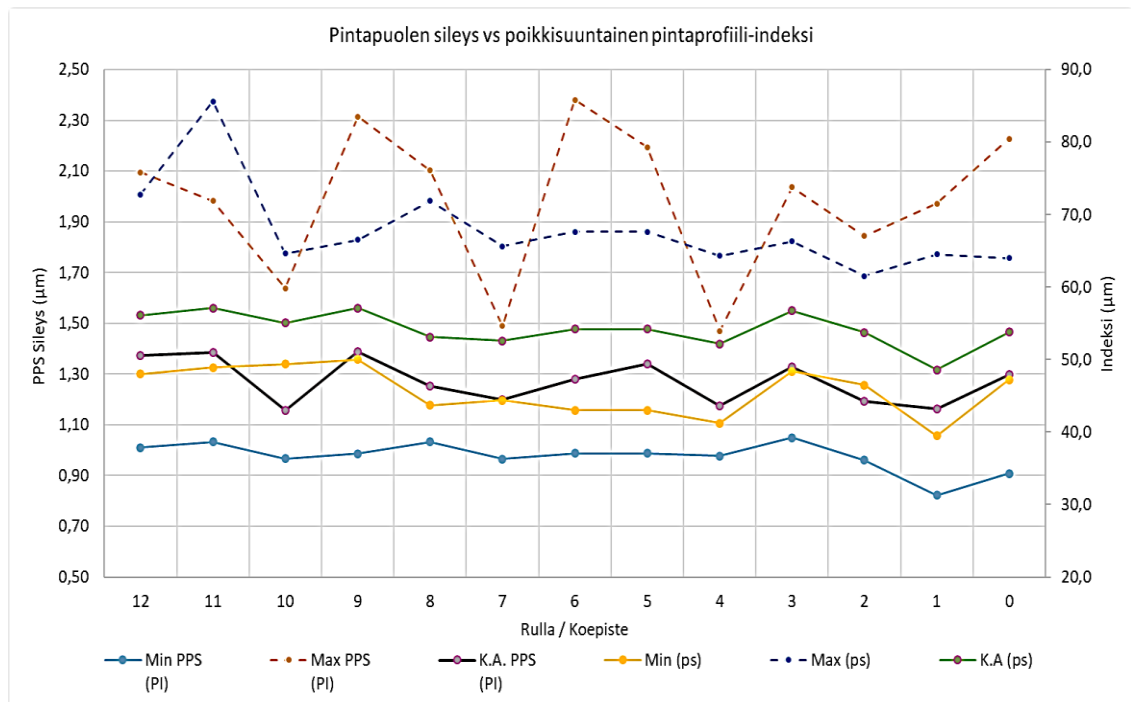
KAAVIO 13: Konerullan 12 yhdistelmätrendit.



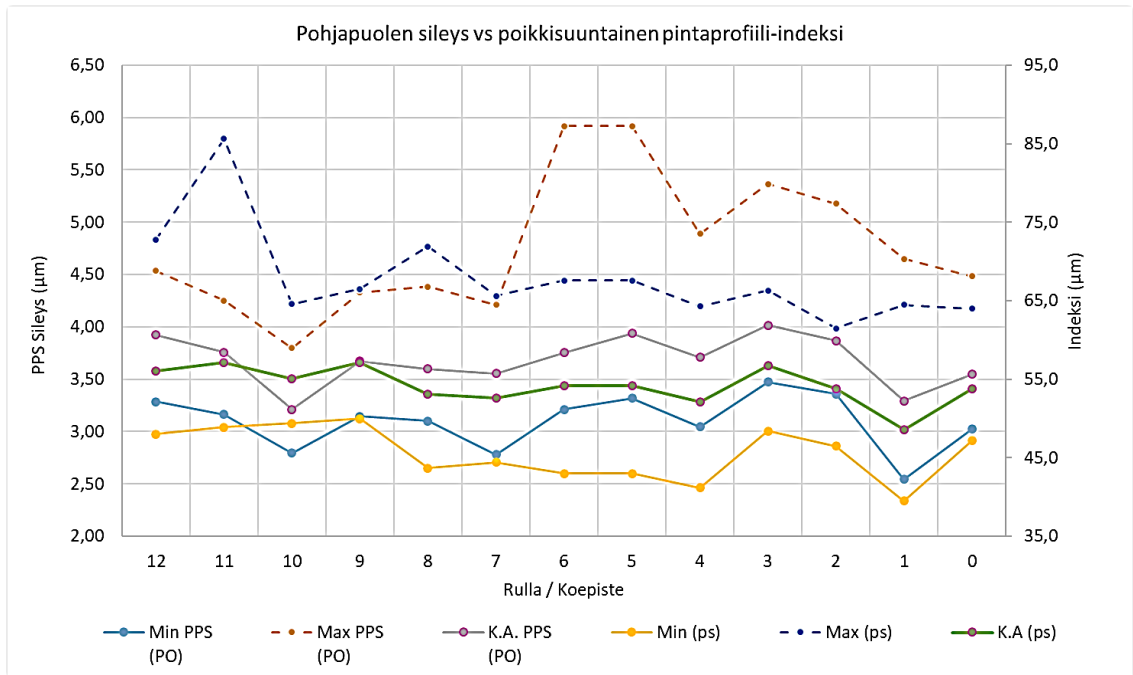
KAAVIO 14: Pintapuolen karheus vs. poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))



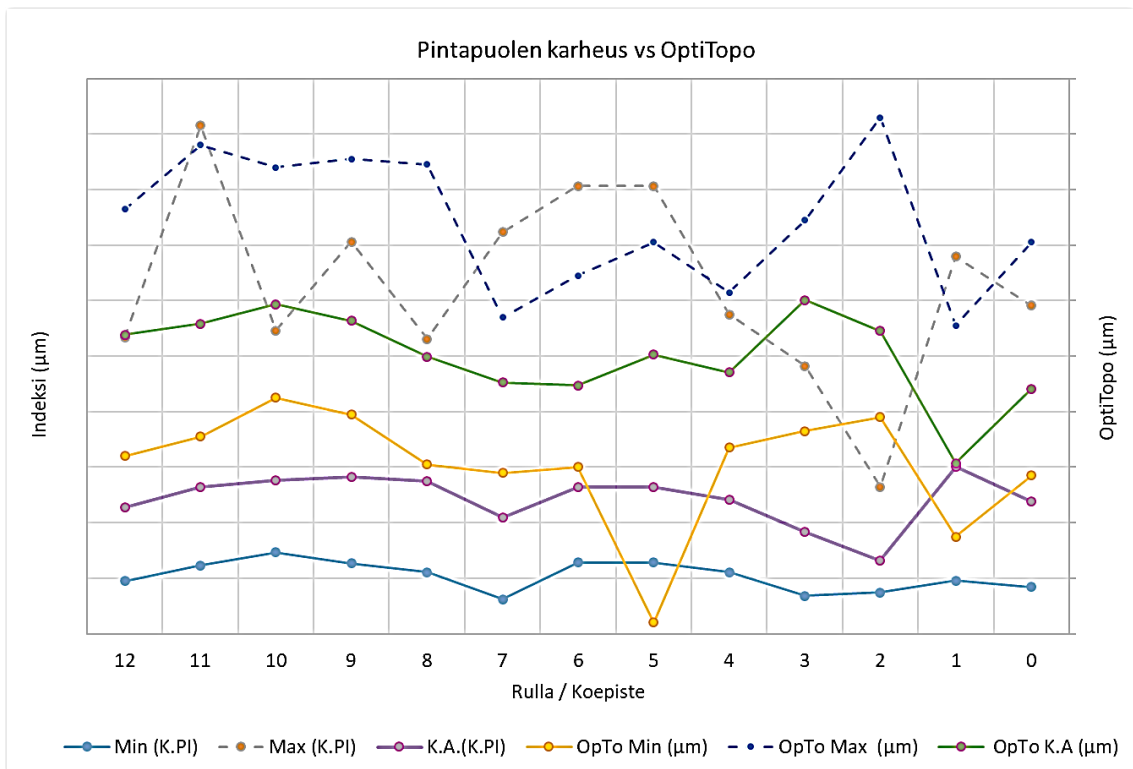
KAAVIO 15: Pohjapuolen karheus vs. poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))



KAAVIO 16: Pintapuolen sileys vs. poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

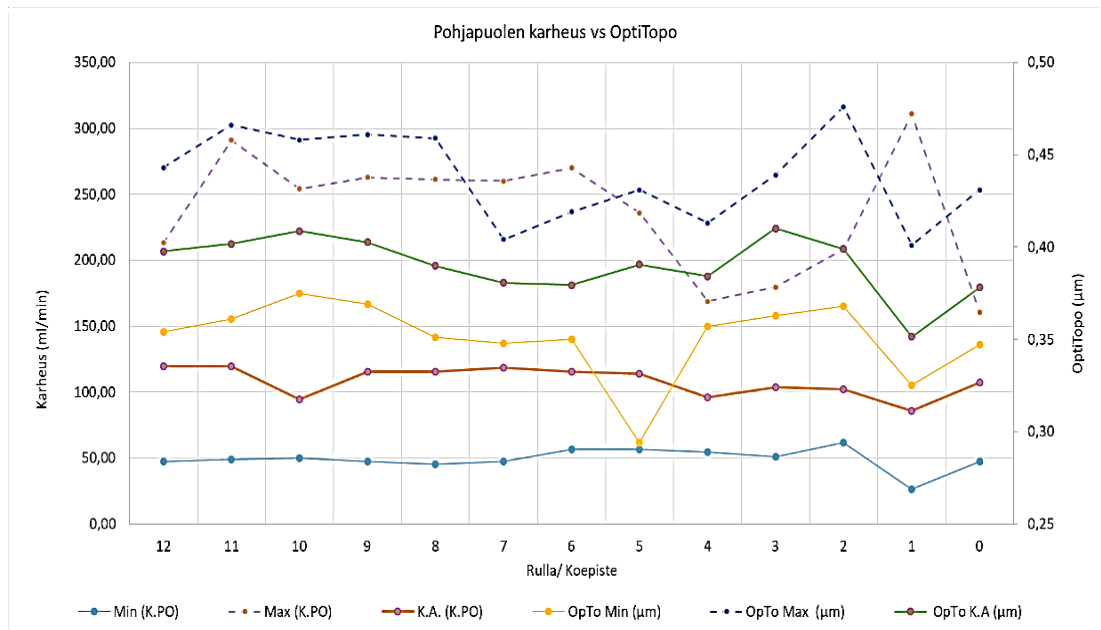


KAAVIO 17: Pohjapuolen sileys vs. poikkisuuntainen pintaprofiili-indeksi. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

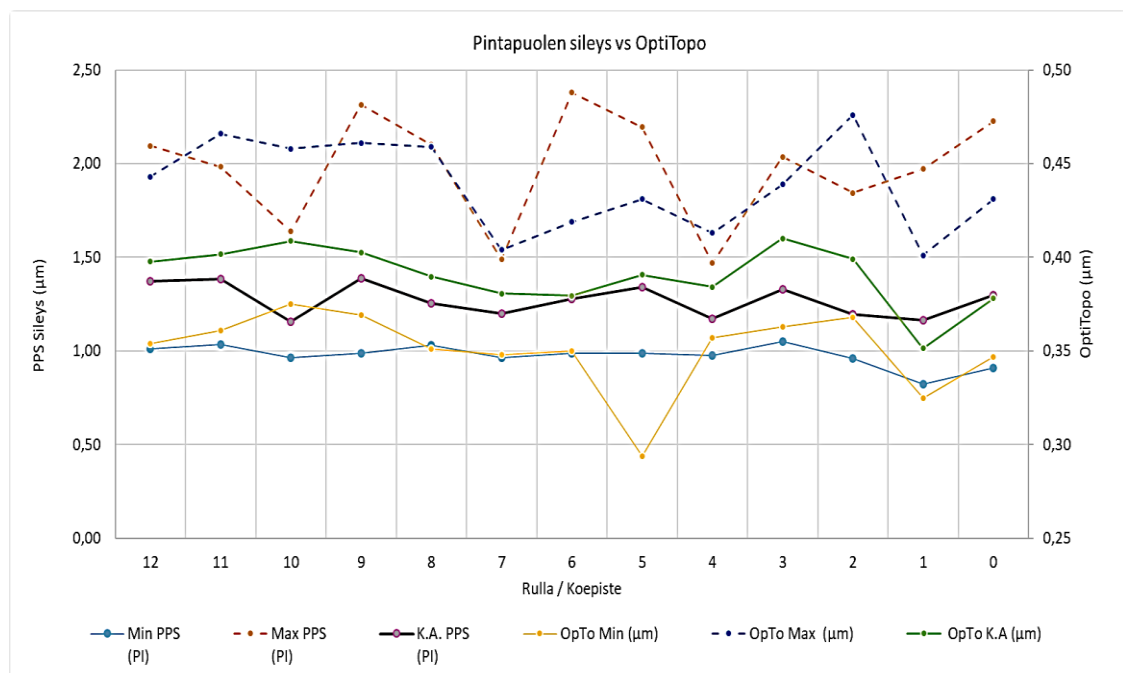


KAAVIO 18: Pintapuolen karheus vs. OptiTopo. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

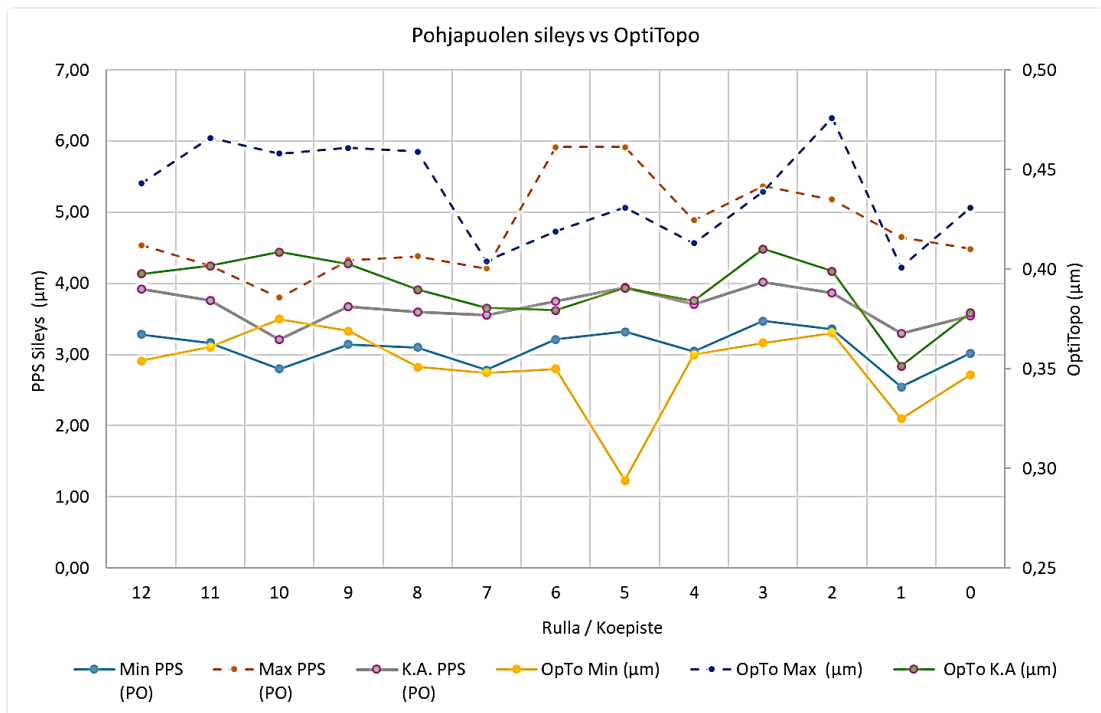




KAAVIO 19: Pohjapuolen karheus vs. OptiTopo. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

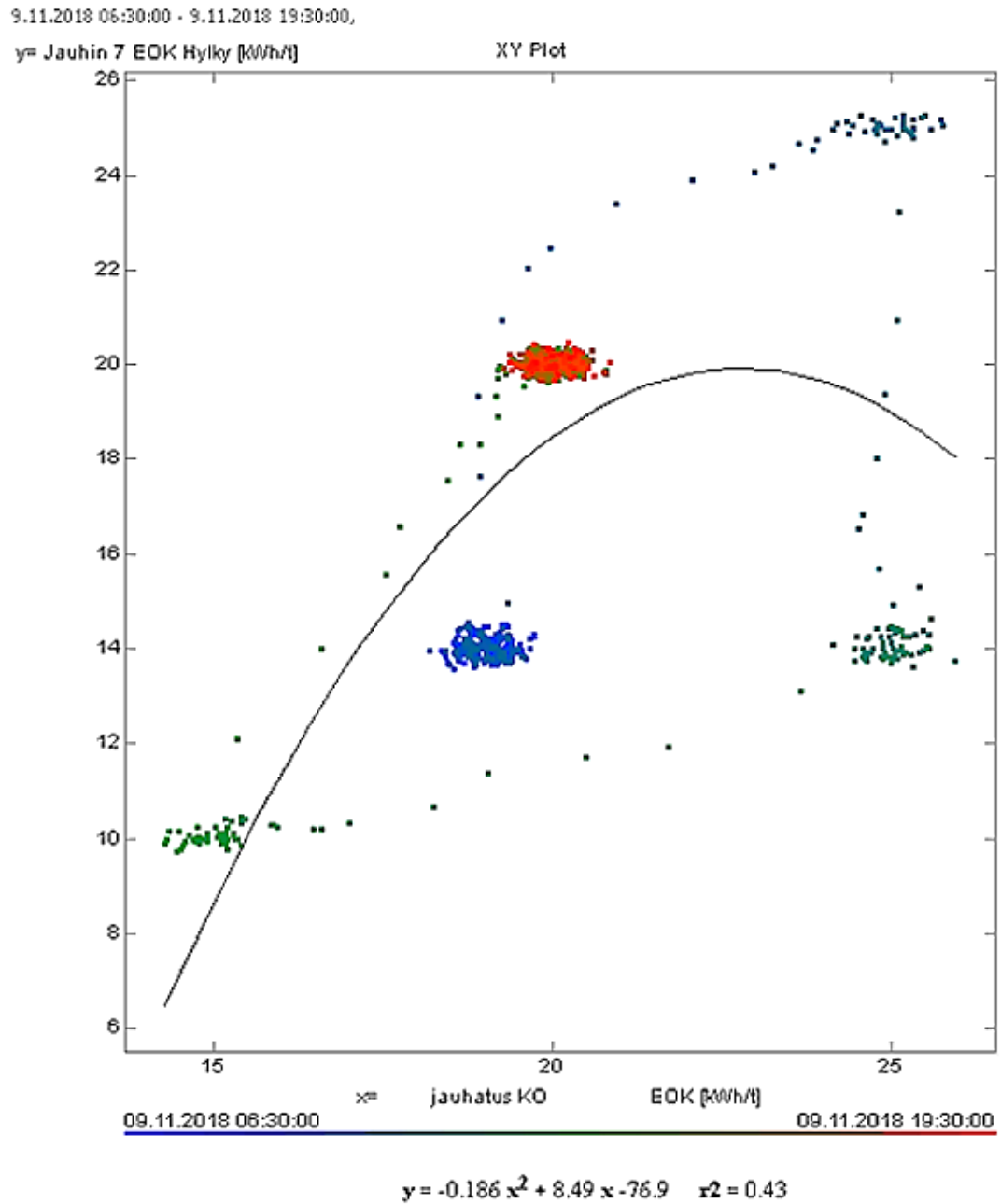


KAAVIO 20: Pintapuolen sileys vs. OptiTopo. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi- (Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

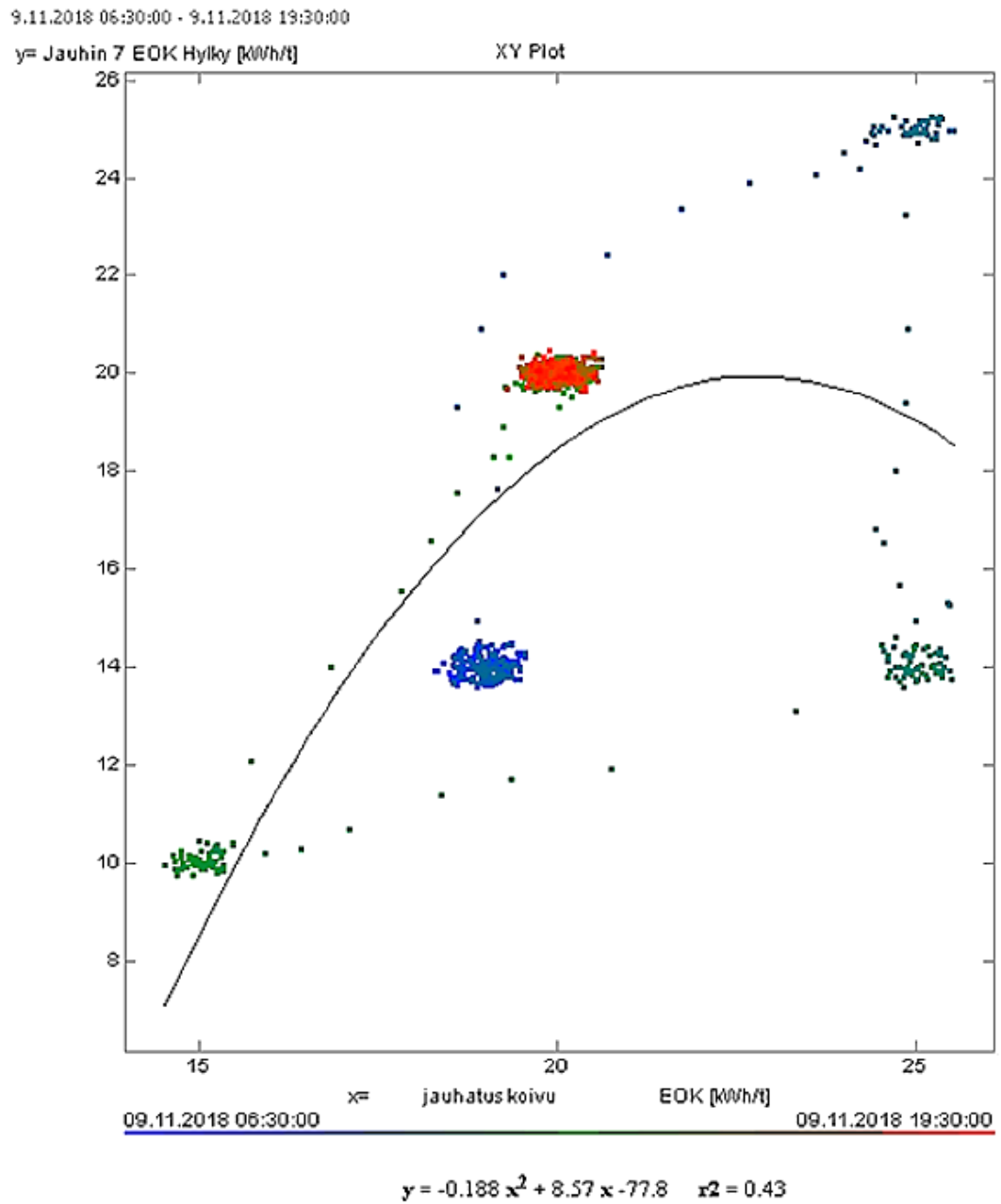


KAATIO 21: Pohjapuolen sileys vs. OptiTopo. (Keskiarvoiset minimi-(Min), maksimi-(Max) ja keskiarvotrendit (K.A))

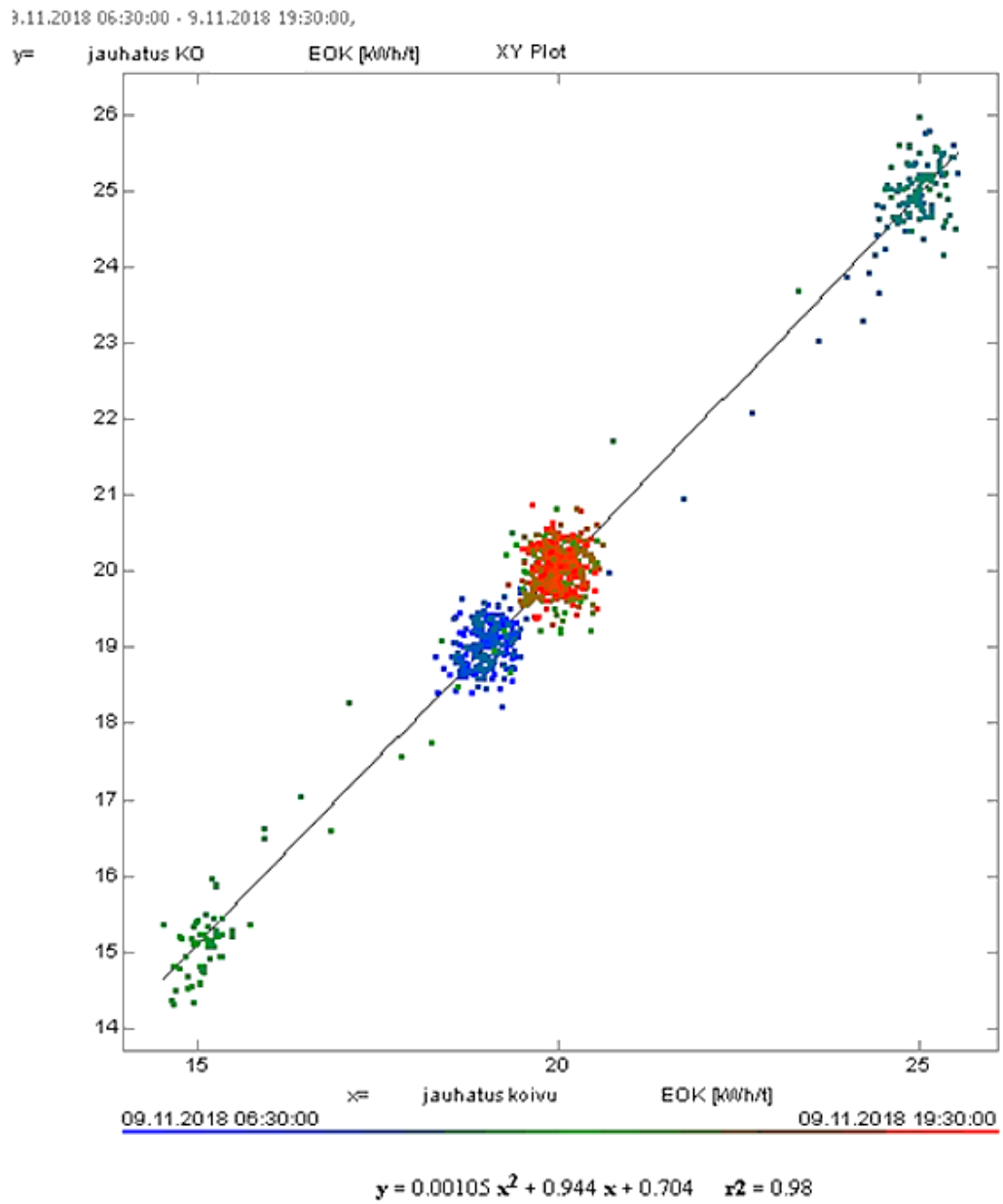
Liite 6. Koeajon matriisimukaiset jauhinten väliset riippuvuudet sekä ominaisuuksien käyttäytyminen jauhatuksen edistyessä.



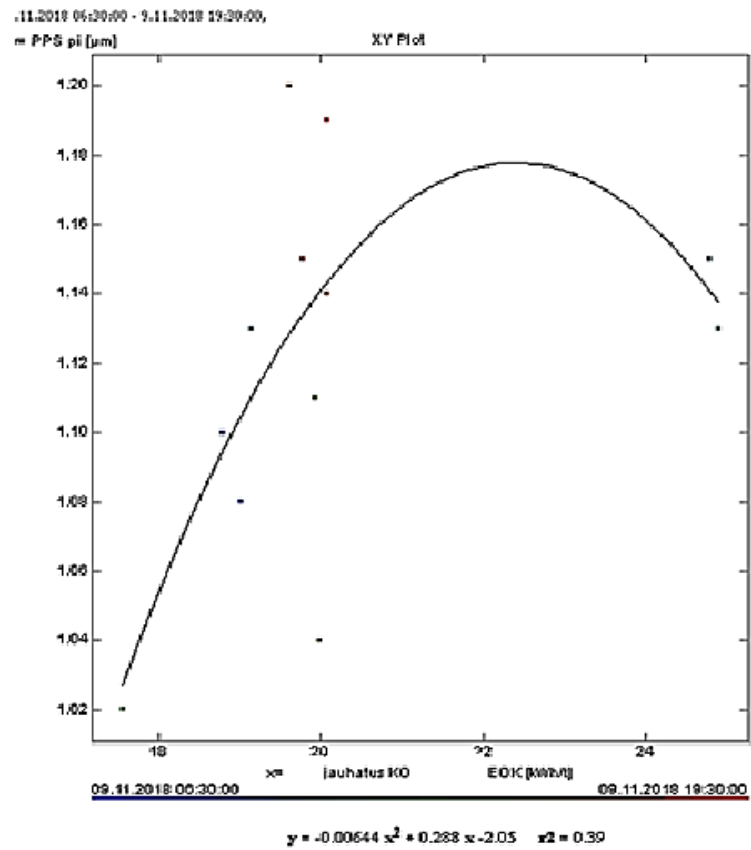
KAAVIO 1: Koivujauhimen J3(2) ja hylkyjauhimen J7(2) välinen riippuvuus.



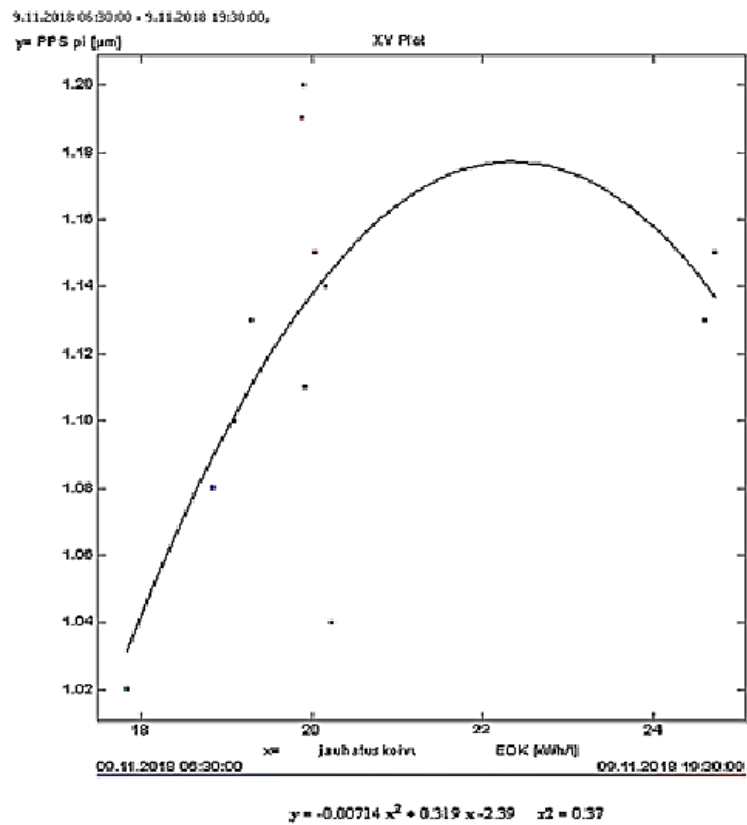
KAAVIO 2: Koivujauhimen J4(2) ja hylkyjauhimen J7(2) välinen riippuvuus.



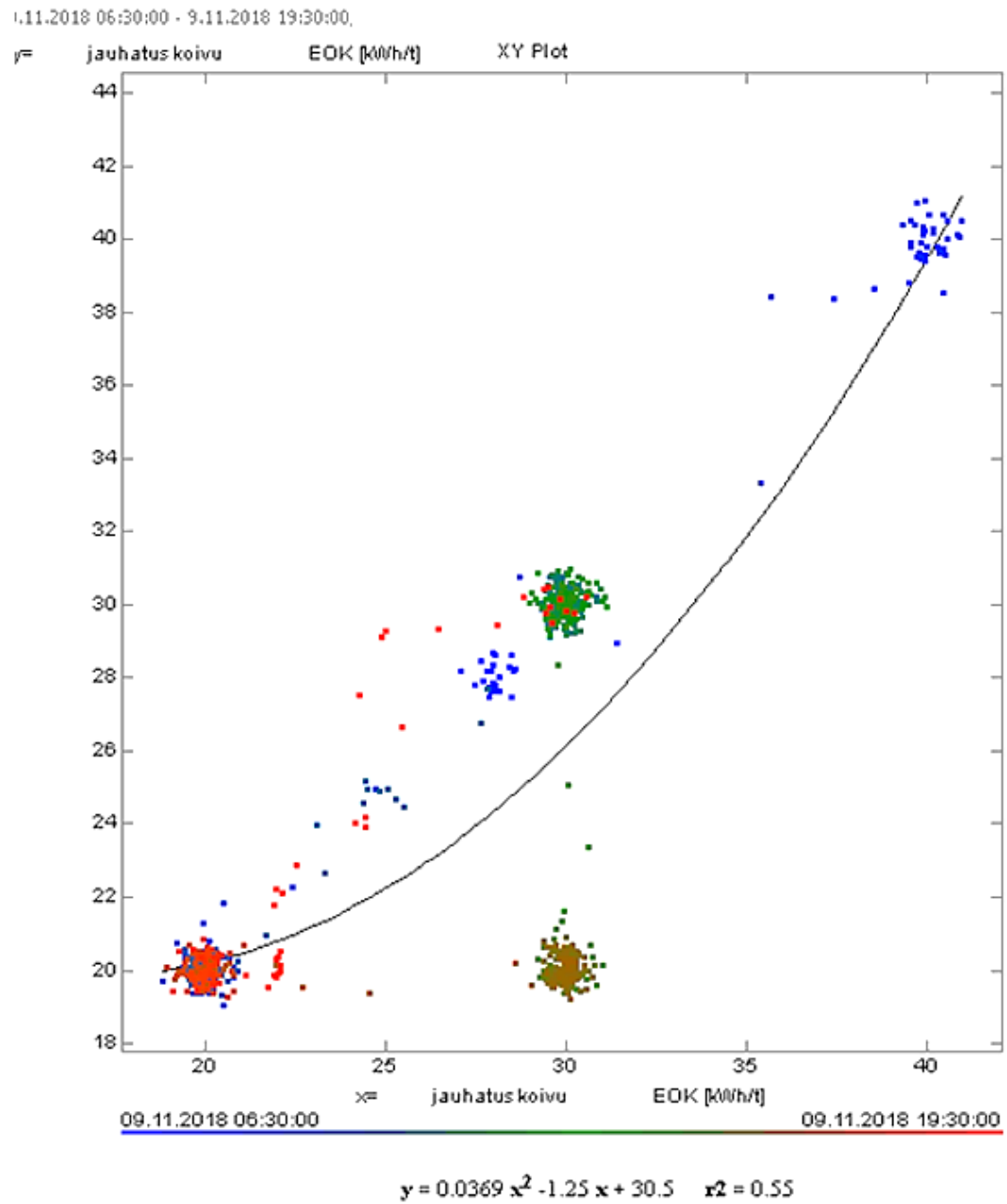
KAAVIO 3: Koivujauhien J3(2) ja J4(2) välinen riippuvuus.



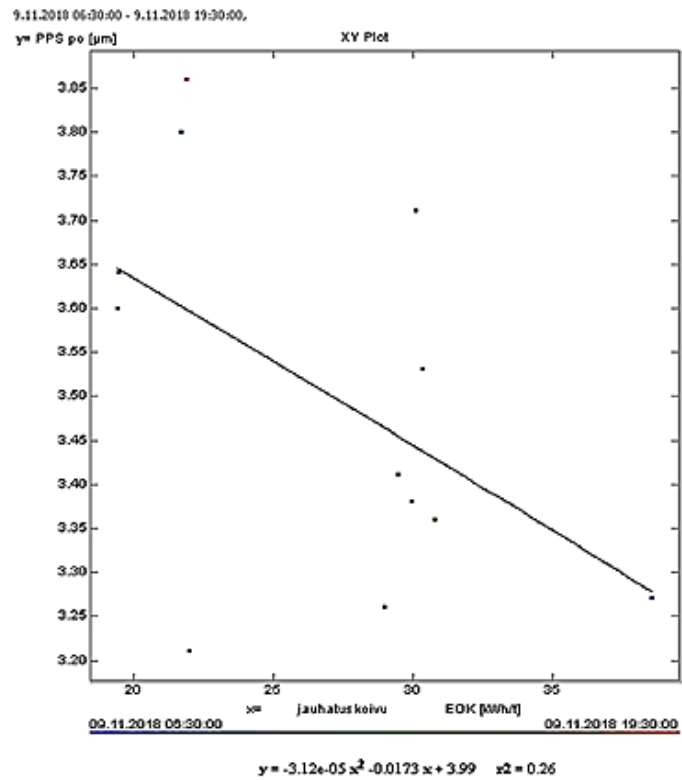
KAAVIO 4: Pintapuolen sileys koivujauhimen J3(2) EOK:n (kWh/t) funktiona.



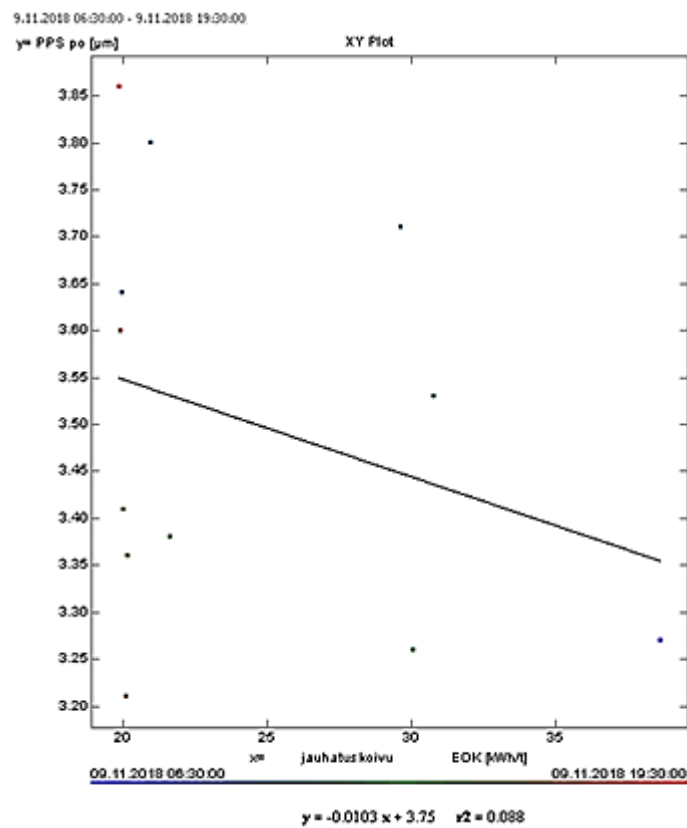
KAAVIO 5: Pintapuolen sileys koivujauhimen J4(2) EOK:n (kWh/t) funktiona.



KAAVIO 6: Koivujauhimen J1(1) ja koivujauhimen J2(3) välinen riippuvuus.

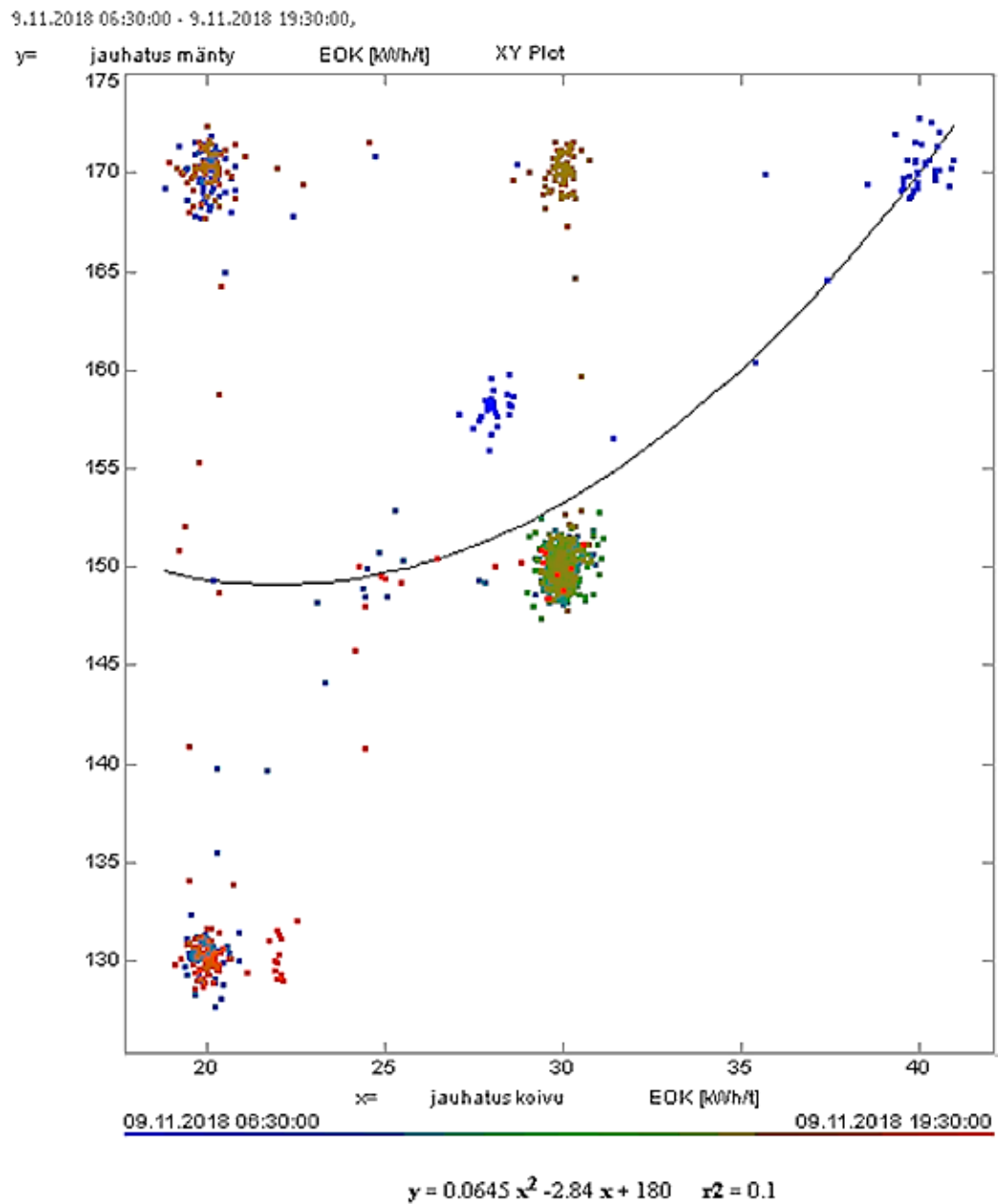


KAAVIO 7: Pohjapuolen sileys koivujauhimen J1(1) EOK:n (kWh/t) funktiona.

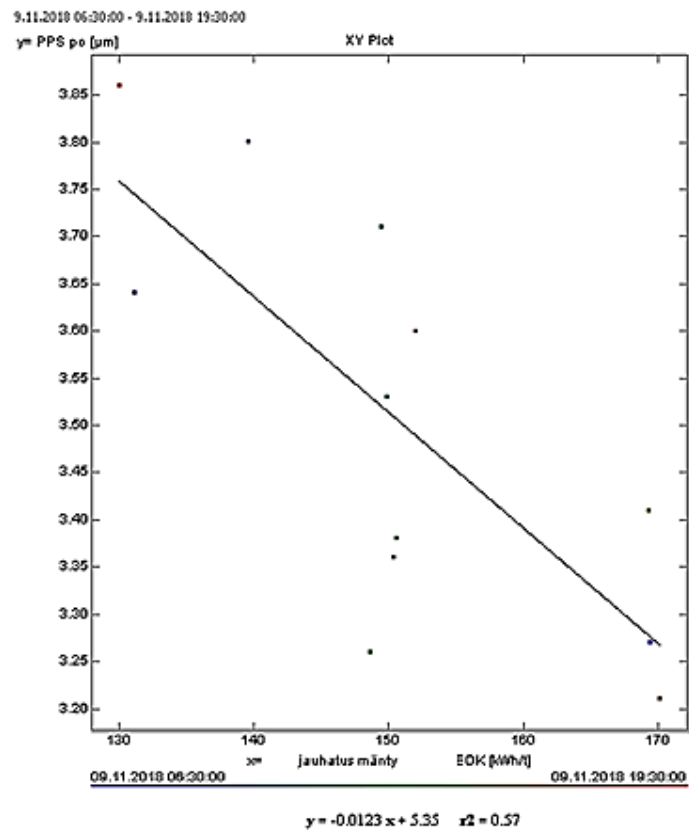


KAAVIO 8: Pohjapuolen sileys koivujauhimen J2(3) EOK:n (kWh/t) funktiona.

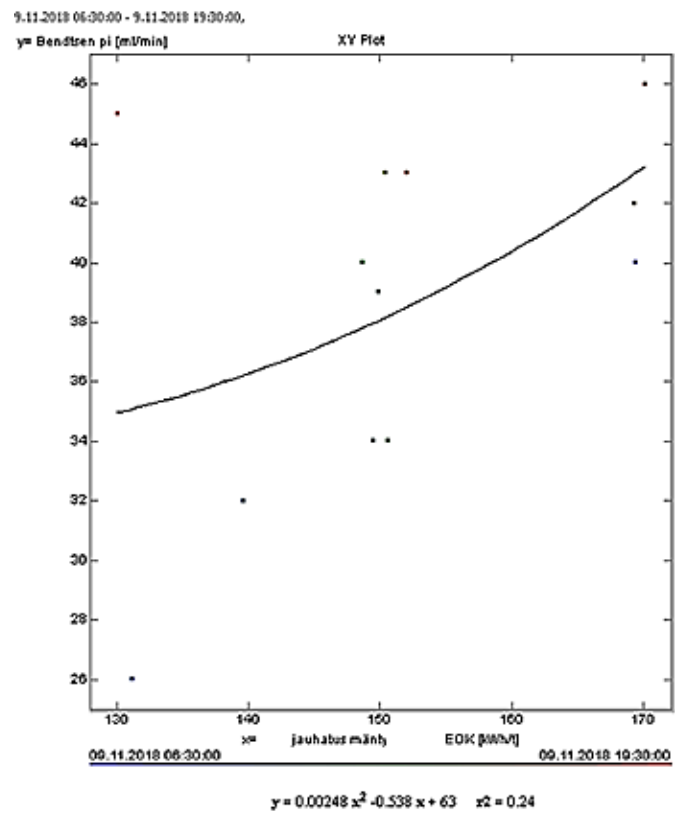




KAAVIO 9: Koivujauhimen J1(1) ja mäntyjauhimen J6(1) välinen riippuvuus.

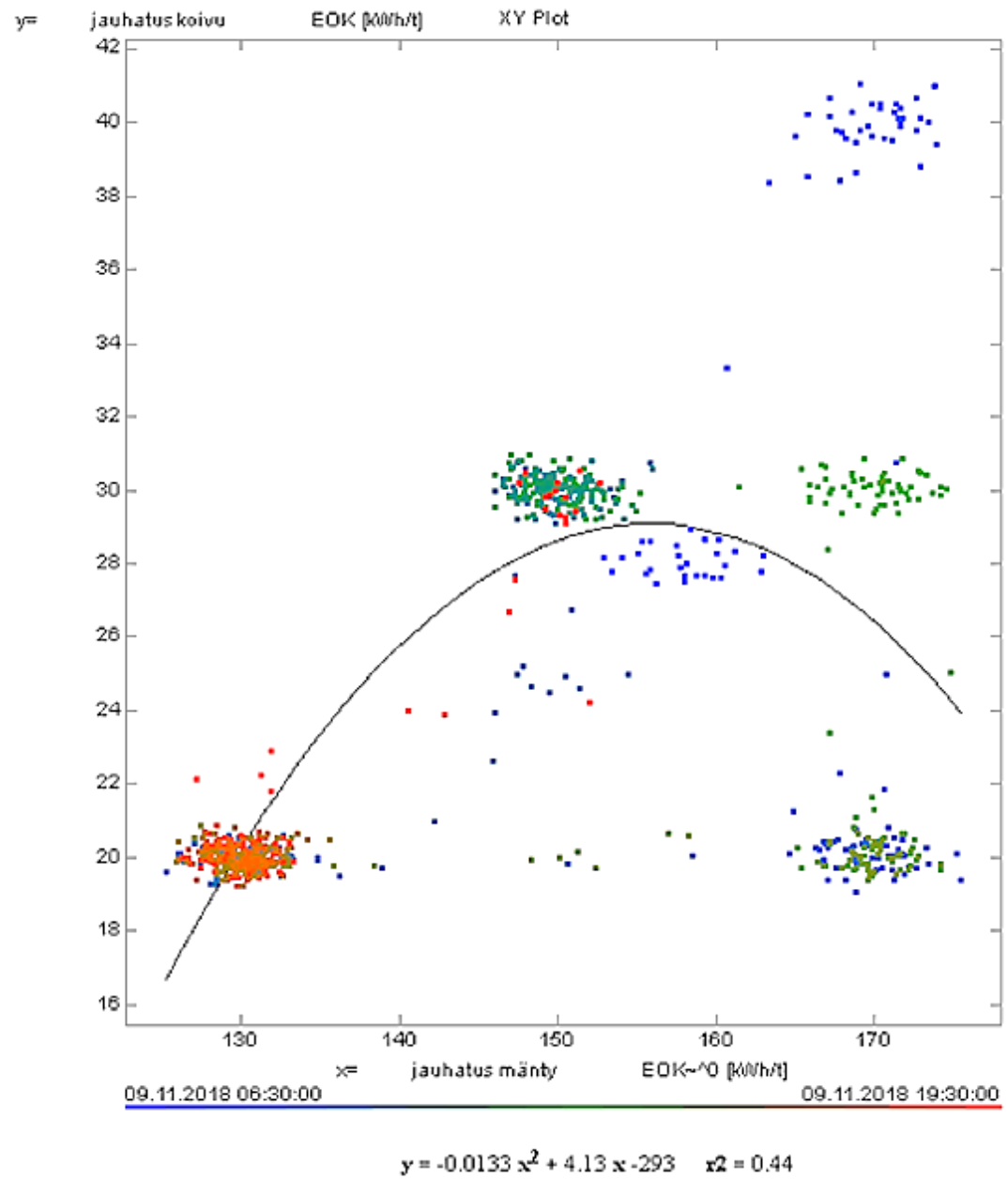


KAAVIO 10: Pohjapuolen sileys mäntyjauhimen J6(1) EOK:n (kWh/t) funktiona.



KAAVIO 11: Pintapuolen karheus mäntyjauhimen J6(1) EOK:n (kWh/t) funktiona.

9.11.2018 06:30:00 - 9.11.2018 19:30:00,



KAAVIO 12: Koivujauhimen J2(3) ja mäntyjauhimen J5(2) välinen riippuvuus.