

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Chemical Engineering

Tuomo Tuikka

KRAFTLAINERIN LUJUUSOMINAISUUKSIEN KEHITTÄMINEN

Tarkastajat: TkT Arto Laari
DI Atso Laakso
Ohjaajat: TkT Arto Laari
DI Atso Laakso

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
Insinööritieteiden korkeakoulu
Kemiantekniikka

Tuomo Tuikka

Kraftlainerin lujuusominaisuuksien kehittäminen

Diplomityö

2020

96 sivua, 47 kuvaa, 3 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: TkT Arto Laari
DI Atso Laakso

Hakusanat: aaltopahvi, laineri, puristuslujuus, taguchi-menetelmä, vetojäykkyys

Lainerin lujuudella on merkittävä vaikutus aaltopahvipakkauksen lujuuteen. Työn tavoitteena oli tutkia Taguchi-menetelmää hyödyntäen, miten kraftlainerin lujuusominaisuuksiin pystytään parhaiten vaikuttamaan. Lisäksi tavoitteena oli muodostaa vaikutusmatriisi perustuen kokeessa saatuihin vasteisiin.

Työn kirjallisuusosa etenee asiakaslähtöisesti alkaen aaltopahvipakkauksen ominaisuuksista ja edeten aaltopahvin valmistamisen kautta laineriin sekä sen tärkeimpiin lujuusominaisuuksiin. Kirjallisuusosassa esitellään aaltopahvipakkauksen suorituskyvyn kannalta keskeisimmät tekijät, joihin lainerin ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa. Rainanmuodostukseen liittyen avataan työn kannalta olennaisimmat vaiheet, joissa pystytään parhaiten vaikuttamaan muodostuvan lainerin lujuusominaisuuksiin. Lisäksi käydään läpi työn kannalta keskeisimpiä lainerin rakenteeseen liittyviä ominaisuuksia.

Työn kokeellinen osa etenee teollisen koesuunnittelun esittelyn kautta teollisen mittakaavan Taguchi L12 -kokeen suunnitteluun, suorittamiseen ja tulosten analysointiin. Koeohjelmaan valittujen yhdentoista tekijän vaikutuksia vasteiksi valittuihin laatuominaisuuksiin tutkittiin määrittämällä koepisteiden poikkiratanäytteistä kaikki Valmet PaperLab -mittalaitteelta saatavat mittaukset sekä käsimitoituksina tehdyt formaatiot ja z-suuntaiset lujuusominaisuudet. Massanäytteiden analysointiin käytettiin Metson kajaaniFS300- ja PulpExpert -mittalaitteita.

Tutkituista vasteista havaittiin, että tulokset tukivat hyvin teoriaa ja valituista tekijöistä lujuusominaisuuksiin pystyttiin vaikuttamaan parhaiten tiheyteen, kuitujen sitoutumiskykyyn ja kuituorientaatioon vaikuttavilla tekijöillä. Tuloksista havaittiin myös, että poikkisuunnan eri kohdille saadaan erilaisia vasteita.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Chemical Engineering

Tuomo Tuikka

Development of kraftliner strength properties

Master's thesis

2020

96 pages, 47 figures, 3 tables and 4 appendices

Examiners: D.Sc. (Tech.) Arto Laari
M.Sc. (Tech.) Atso Laakso

Keywords: compression strength, corrugated board, linerboard, taguchi method, tensile stiffness

Strength properties of linerboard has significant impact for the corrugated box strength properties. The purpose of the thesis was to research by utilizing Taguchi method how to impact best kraftliner strength properties. Based on the obtained responses, another goal was to create affect matrix.

The literature part of the thesis starts with a customer orientated approach from properties of corrugated boxes and breaking through to linerboard strength properties via corrugated board manufacturing. In the literature part the most important properties affecting to corrugated box performance are introduced and it is discussed how linerboard replies to these effects as a part of corrugated board. Concerning the linerboard manufacturing the ways how to affect forming web structure and its properties in a best way is discussed.

The experimental part of the thesis proceeds via design of experiments to planning, conducting and analyzing the results of industrial scale Taguchi L12 trial. Impacts of the selected inputs to quality properties as the responses were evaluated by analyzing the paper samples with Valmet PaperLab -analyzer and pulp samples with both Metso kajaaniFS300 and PulpExpert -measuring devices. Manual measurements were also carried out to determine formation and z-directional strength values of paper samples.

Of the researched responses it can be notified that the obtained responses supported well theoretical information and of the selected factors the best way to affect strength properties was found by affecting to density, inter-fibre bonding properties and fibre orientation. Also cross direction variation in responses and quality properties of the sheet was found.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Stora Enso Oyj:n Varkauden pakkauskartonkitehtaalle liittyen kraftlainerin lujuusominaisuuksien kehittämiseen. Työn tekemisen aikana pääsin oppimaan paljon uutta aaltopahviteollisuuden arvoketjusta ja teollisten kokeiden suorittamisesta. Tästä oppimisprosessista ensisijaiset kiitokset menevät työtäni yhtiön puolelta ohjanneelle DI Atso Laaksolle, mutta myös koko Varkauden pakkauskartonkitehtaan avuliaille ihmisille ja hienolle työilmapiirille. Yliopiston puolelta tahdon kiittää työtäni ohjannutta TkT Arto Laaria.

Varkaudessa kiitos kuuluu myös tuotantolinjan johdolle ja operaattoreille koeajosuunnitteluihin osallistumisesta sekä koeajojen toteuttamisesta. T&K-organisaatiolle kiitokset lukuisista hyvistä vinkeistä työn tekemisen aikana. Laboratorion henkilöstölle kiitokset korvaamattomasta avusta koeajojen tulosten määrittämisessä.

Opintojen sovittaminen yhteen työn ja perhe-elämän kanssa sai välillä tuntumaan, kuin kellossa olisi ollut vähemmän tunteja. Tästä yhteensovittamisesta ja mahdollistamisesta iso kiitos kuuluu puolisololleni ja vastapainoa opiskeluille antaneelle tyttärelleni. Osittaisista aikataulullisista haasteista huolimatta opiskelut toivat uudenoppimisen kautta intoa myös työntekoon.

Kempeleessä 04.05.2020,

Tuomo Tuikka

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT.....	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	9
KIRJALLISUUSOSA.....	11
2 LAINERIT OSANA AALTOPAHVIPAKKAUSTA	11
2.1.1 Aaltopahvin valmistus ja jalostus	12
2.1.2 Aaltopahvipakkauksen lujuuden muodostuminen	13
3 LAINEREILTA VAADITTAVIA OMINAISUUKSIA	17
3.1 Puristuslujuus.....	17
3.2 Vetojäykkyys ja kimmomoduuli.....	20
3.3 Puhkaisulujuus	21
3.4 Z-suuntainen lujuus.....	22
3.5 Vetolujuus	23
3.6 Muita tärkeitä ominaisuuksia.....	23
4 LAINERIN RAKENTEEN MUODOSTUMINEN.....	25
4.1 Kuidut ja kuituominaisuudet.....	25
4.1.1 Jauhatuksen vaikutus kuituominaisuuksiin.....	26
4.1.2 Kuituvaurioiden vaikutus massan ja paperin ominaisuuksiin.....	27
4.1.3 Kuitujen sitoutuminen.....	28
4.2 Rainanmuodostus.....	29
4.2.1 Kerrostuminen ja huopautuminen.....	31
4.2.2 Materiaalin jakautuminen tason- ja z-suunnassa	32
4.3 Osarainojen adheesio	33
4.4 Märkäpuristusmekanismi.....	34
4.5 Kuivatuskutistuman ja sisäisten jännityksien vaikutus lujuusominaisuuksiin	36
4.6 Kalanteroinnin vaikutus ominaisuuksiin	37
5 LAINERIN RAKENNE	38
5.1 Kuituverkon eri approksimaatiot	38

5.2	Z-suuntainen rakenne.....	40
5.3	Huokosrakenne	41
5.4	Formaatio	41
5.5	Tasonsuuntaisten ominaisuuksien anisotropia.....	42
5.6	Reologia ja viskoelastisuus	43
6	KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO	45
	KOKEELLINEN OSA	46
7	STORA ENSO OYJ VARKAUDEN TEHDAS	46
8	TAVOITTEET	48
9	TEOLLINEN KOESUUNNITTELU	49
9.1	Taguchi -koemenetelmä.....	49
10	TAGUCHI L12 KOEAJO	52
10.1.1	Kokeeseen valittujen tekijöiden esittely	53
10.2	Koeajon suoritusmenetelmät ja mittaukset	55
10.3	Koeajon vastekuvat ja pareto-diagrammit	57
10.4	Kuitututkimusten tulokset.....	74
10.5	Koeajon tulosten vertaaminen normaaliin tuotantoon	80
11	KOKEELLISEN OSAN YHTEENVETO.....	83
12	TYÖN YHTEENVETO JA KEHITYSEHDOTUKSET	86
	LÄHTEET	88
	LIITTEET	
	LIITE I: Koesuunnitelma	
	LIITE II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit	
	LIITE III: Koeajon SCT-profiilit	
	LIITE IV: Koeajon tuloksien vaikutusmatriisi	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset kirjaimet

A	pinta-ala [mm ²]
b	paperin neliömassa [g/m ²]
C	aaltopahvinvalmistuksen vaikutusta lujuteen kuvaava kerroin [-]
c	peittävyysaste [-]
E	kimmomoduuli [N/m ²]
F	taivuttava voima [N]
F_C	puristuskuormitus [N]
F_T	vetokuormitus [N]
l_0	alkuperäinen näytekkappaleen pituus [m]
l_1	taivutuspituus [m]
l_2	taivutuspituus 4-pistemenetelmässä [m]
l_f	kuitujen pituus [mm]
L_l	pituudella painotettu keskimääräinen kuidun pituus [mm]
n	kuitujen määrä [kpl]
S_b	taivutusjäykkyys [Nm]
S_{CD}	aaltopahvin poikkisuuntainen taivutusjäykkyys [Nm]
$SCT_{fluting}$	flutingin poikkisuuntainen puristuslujuus [N/m], [kN/m]
SCT_{liner}	lainerin poikkisuuntainen puristuslujuus [N/m], [kN/m]
S_{MD}	aaltopahvin konesuuntainen taivutusjäykkyys [Nm]
S_t	vetojäykkyys [N/m], [kN/m]
t	paperin paksuus [m]
Z	aaltopahvilaatikon ympärysmitta [m]
w	(alkuperäinen) näytekkappaleen leveys [m]
w_f	kuitujen leveys [mm]

Kreikkalaiset kirjaimet

α	flutingin aallosta riippuva vakio [-]
β_f	kuitujen neliömassa [g/m^2]
Δf	mitattujen voimatasojen muutos [N]
Δl	näytekappaleen pituuden muutos voimatasoilla Δf [m]
δ	taipuma [m]
ε	venymä [-]
σ_C	puristuslujuus [N/m], [kN/m]
σ_T	vetolujuus [N/m], [kN/m]

Lyhenteet

BCT	aaltopahvilaatikon puristuslujuustesti [N], [kN/m] (engl. box compression test)
CD	koneen poikkisuunta, ps (engl. cross direction)
DOE	koesuunnittelu (engl. design of experiments)
EOK	energian ominaiskulutus (engl. specific energy consumption, SEC)
ECT	reunalitistyslujuustesti [N/m] (engl. edge crush test)
MD	konesuunta (engl. machine direction)
OFAT	yksitekijäkoe (engl. one factor at time)
OSK	ominaissärmäkuorma (engl. specific edge load, SEL)
RBA	suhteellinen sitoutunut ala (engl. relative bonded area)
RCF	kierrätyskuitu (engl. recycled fiber)
SCT	puristuslujuusmittaus (engl. short span compression test)

1 JOHDANTO

Yhä enemmän globalisoituvaa sähköinen kaupankäynti, globaalit megatrendit ja kilpaillut markkinat asettavat uudenlaisia haasteita tuotteiden pakkauksille. Ei riitä, että ne ovat suorituskykyisiä suojaamaan tuotteen kuluttajalle asti, vaan niiden tulee olla myös ekologisesti kestäviä ja visuaalisesti houkuttelevia. Aaltopahvista valmistettavat monipuoliset, pääosin sekundääripakkauksina, mutta yhä enemmän primääripakkauksina käytettävät tuotteet täyttävät nykypäivän pakkauksen kriteerit loistavasti ja laineri osana aaltopahvia on ratkaisevassa roolissa näiden ominaisuuksien muodostamisessa.

Pakkaamistarkoitukseen käytetty paperi on patentoitu ensimmäisen kerran vuonna 1856 (Laamanen & Lahti 2008, s. 220). Maailmansotien jälkeen alkanut nopea teknologinen kehitys on aloittanut aaltopahvin tuotantomäärien nopean kasvun ja globaalit megatrendit, kuten ilmastonmuutos, luonnonvarojen niukkuus ja ympäristölähtöinen ajattelu ovat edelleen tätä kehitystä jatkaneet. Kevyt, helposti yksilöitävä, kustannustehokas, kierrätyskelpoinen ja uusiutuvista materiaaleista valmistettu pakkaus on hyvin kilpailukykyinen vaihtoehto fossiilisista materiaaleista valmistetuille pakkauksille.

Lainerin viskoelastinen rakenne ja hyvät lujuusominaisuudet ovat tärkeässä roolissa muodostamassa aaltopahvipakkauksen ominaisuuksia. Monet aaltopahvin ja aaltopahvipakkausten ominaisuuksista ovat täysin riippuvaisia lainerin ominaisuuksista ja tästä johtuen asiakasnäkökulmasta tärkeiden laatuominaisuuksien hallitseminen lainerin tuotannossa ja tuotekehityksessä on erityisen tärkeää.

Työn kirjallisuusosan tavoitteena oli kerätä tietoa aaltopahvipakkauksen arvoketjusta aina lainerin valmistamisesta ja rakenteen muodostumisesta valmiiseen aaltopahvipakkaukseen asti; mitä hyvältä aaltopahvipakkaukselta vaaditaan. Kirjallisuusosassa lähestytään laineria ja sen tärkeimpiä ominaisuuksia ensin asiakasnäkökulmasta aaltopahvin ja aaltopahvipakkausten kautta. Aaltopahvin tuotantoprosessi ja tärkeimmät laatuominaisuudet käydään lyhyesti läpi, jotta voidaan ymmärtää laineri osana tätä kokonaisuutta. Aaltopahvista siirrytään lainerin määritelmään ja lainerin tärkeimpiin ominaisuuksiin, joita aaltopahvin arvoketjussa vaaditaan. Lainerin rakenteen muodostuminen ja muodostuneen lainerin olennaisimpia rakenteellisia ja fysikaalisia ominaisuuksia käydään läpi, että voidaan

ymmärtää niiden vaikutus lujuusominaisuuksiin ja lainerin käytettävyyteen osana aaltopahvia. Myös vaikutusmahdollisuuksia rainanmuodostukseen ja lujuusominaisuuksien kehittymiseen eri prosessivaiheiden aikana käydään läpi. Työssä käytetään käsitettä paperi kuvaamaan yleisesti kuitumateriaaleista valmistetun tuotteen rakennetta ja ominaisuuksia sen luontevuuden takia, vaikka työ keskittyykin kraftlaineriin.

Työn kokeellinen osa alkaa teollisen koesuunnitteluprosessin läpikäymisellä ja kokeellisen osan tärkeimpänä tavoitteena oli löytää pintaviiraosan modernisoinnin jälkeen monimuuttujakokeen avulla tekijöitä, joilla voidaan vaikuttaa tuotteen tärkeimpiin lujuusominaisuuksiin ja vähentää vaihteluita. Pintaviiraosalle asennettiin ennen työn aloittamista säädettävä vedenpoistokalusto, jolla pystytään hallitsemaan paremmin rainanmuodostusprosessia. Säädettävällä vedenpoistokalustolla pystytään vaikuttamaan rainanmuodostuksen kautta rainan rakenteeseen ja tätä kautta myös lujuusominaisuuksiin.

Lujuusominaisuuksia kehittämällä pystytään vaikuttamaan kraftlainerin laatuun ja tätä kautta edelleen sisäisten sekä ulkoisten asiakkaiden kokemaan laatuvaikutelmaan. Paremmilla lujuusominaisuuksilla pystytään myös differentoitumaan kilpailijoista kraftlainerin noin 35 miljoonan tonnin globaaleilla markkinoilla (SCA Investor Presentation 2020, s. 38). Tarjoamalla yhtä lujia, mutta alhaisemman neliömassan tuotteita mahdollistetaan myös alhaisempi hiilijalanjälki arvoketjussa. Tasaisempi laatu vähentää konelinjan sisäisiä hylkäyksiä ja asiakasreklamaatioita, kehittää tilaus- ja toimitusketjun hallintaa sekä tilausten toimitusvarmuutta. Laatukilpailukyky nostaminen vaikuttaa siten myös linjan tuotantotehokkuuteen, kustannuskilpailukykyyn ja tuotteen brändiarvoon.

Laadun kehittämisen lisäksi lujuusominaisuuksiin vaikuttavien tekijöiden paremman tunnistamisen myötä konelinjan kustannuskilpailukykyä on myös mahdollista saada kehitettyä. Tekijöiden paremmalla tunnistamisella pystytään optimoimaan raaka-aineiden annosteluita ja hakemaan sopivia kompromisseja eri vaikuttavien tekijöiden välille.

KIRJALLISUUSOSA

2 LAINERIT OSANA AALTOPAHVIPAKKAUSTA

Pakkaus voidaan määritellä hyvin monella tavalla. Tyypillistä pakkauksille kuitenkin on, että niiden tarve syntyy, kun tuote valmistetaan eri paikassa missä sitä tullaan käyttämään. Pakkauksen ensisijainen tehtävä on turvata tuotteen vaatima logistiikkaketju valmistuksesta aina loppukäyttäjälle asti kustannustehokkaasti koko arvoketjun osalta. (Auvinen & Lahtinen 2008, s. 286.)

Pakkaukset voidaan määritellä kolmeen eri kategoriaan perustuen niiden rooliin logistiikkaketjussa:

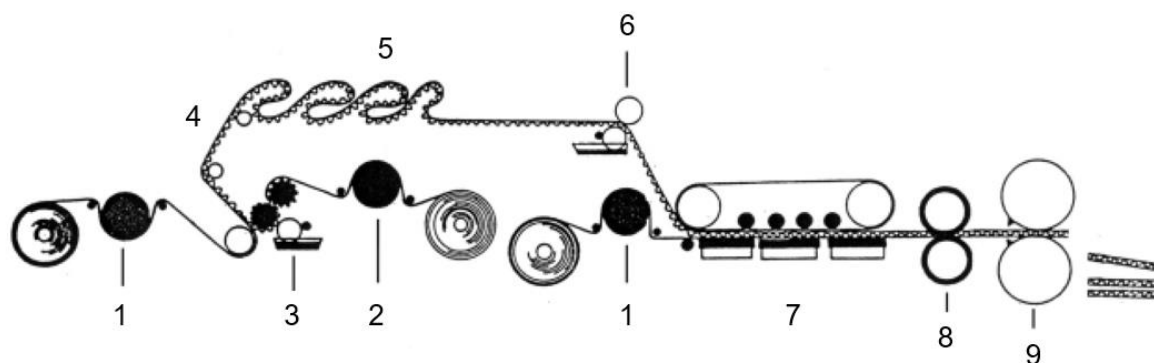
1. Primääri- eli kuluttajapakkaukset, joiden tehtävänä on suojata varsinaisia kuluttajatuotteita. Primääripakkaus on pakkausteollisuuden pienin yksikkömuoto.
2. Sekundääri- eli kuljetuspakkaukset, joiden tehtävänä on yleensä suojata ja kuljettaa suurempia määriä primääripakkauksia.
3. Tertiääri- eli bulkkipakkaukset, joiden tehtävänä on suojata ja kuljettaa isoja erinä sekundääripakkauksia tai varastoida suuria määriä tuotteita. (Carlsson & Hägglund 2012, s. 29.)

Aaltopahvipakkaukset ovat profiloituneet pakkausteollisuudessa perinteisesti sekundääripakkauksiin. Kuitupohjaisista pakkausmateriaaleista primääripakkauksiin mielletään perinteisesti esimerkiksi kuluttajapakkauksetkartonkina hyvin usein käytetty taivekartonki, mutta yhä enenevässä määrin aaltopahvipakkauksia näkyy myös primääripakkauksina niiden monikäyttöisyyden vuoksi. (Carlsson & Hägglund 2012, s. 29.)

Aaltopahvi on eräs maailman suosituimmista pakkausmateriaaleista sen tarjoamien monien etujen kautta, joihin voidaan lukea sen hyvä lujuus/paino -suhde, pinoamislujuus, iskunkesto, kierrätettävyys, räätälöitävyys ja visuaalinen näyttävyys. Aaltopahvipakkaukset vaativat räätälöitävyytensä takia paljon suunnittelua, että asiakastarpeet saadaan kohtamaan halutut tuoteominaisuudet. Arvoketju puunhankinnan ja valmiin aaltopahvipakkauksen välissä on pitkä. (Anonen & Mäkinen 2020; Laamanen & Lahti 2008, s. 220.)

2.1.1 Aaltopahvin valmistus ja jalostus

Aaltopahvipakkaukset muodostuvat pintakartongin (=laineri) ja aallotuskartongin (=fluting) muodostamasta aaltopahvista. Kuvassa 1 esitetään yksiaaltoisen aaltopahvin valmistuksen eri prosessivaiheet. Aallotuskartonki esilämmitetään ja kostutetaan höyryllä ennen aallotusyksikköä. Aallotuskartonkiin tehdään halutunlainen aaltomainen muoto aallotusyksiköllä ja samanaikaisesti toiselle puolelle sivellään liimaa. Aallotusyksikön toisen puolen rullauspukilta rullataan pintakartonkia, joka esilämmityssylinterin jälkeen puristetaan aallotuskartongin liimattuja aallonharjoja vasten. Näin saadaan muodostettua yksipuolinen aaltopahvirata. Tämän jälkeen yksipuoleinen aaltopahvirata menee ylösvetokuljettimen ja sillan kautta liimausyksikölle, jossa yksipuolisen aaltopahviradan aallonharjoille sivellään tärkkelysliimaa. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 33-52)



Kuva 1. Aaltopahvikoneen prosessivaiheet: 1. Pintakartonkien esilämmittimet, 2. Aallotuskartongin esilämmitin, 3. Aallottaja, 4. Ylösvetokuljetin, 5. Silta, 6. Liimausyksikkö, 7. Arina, 8. Pituusleikkuri, 9. Poikkileikkuri. (Mukaiillen Laakso & Rintamäki 2003, s. 33).

Samanaikaisesti aaltopahvikoneen kolmannelta rullauspukilta rullataan aaltopahvin toinen pintakartonki esilämmityssylinterille ja tämän jälkeen pintakartonki saatetaan yksipuolisen aaltopahviradan juuri liimattua puolta vasten arinaosalla. Arinaosalla muodostuu aaltopahvin lopullinen rakenne. Arinan jälkeen radasta leikataan reunanauhat pituusleikkurilla ja aaltopahvirata leikataan halutun kokoisiksi arkeiksi poikkileikkurilla. Valmistuneet aaltopahviarkit menevät tämän jälkeen vastaanottoon ja mahdolliseen väliavarastointiin sekä jalostukseen. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 33-52.) Laineri ja fluting ovat rullauspukeissa siten, että kartonkien poikkisuunta on myös aaltopahvikoneen poikkisuunta. Aaltopahvipakkauksessa aallot ovat aina pystysuunnassa ja aallotuskartongin poikkisuuntaisesta aallottamisesta johtuen lainerin poikkisuunta asemoituu flutingin aaltojen suuntaisesti. Erityisesti lainerin poikkisuuntaisten lujuusominaisuuksien maksimointi on

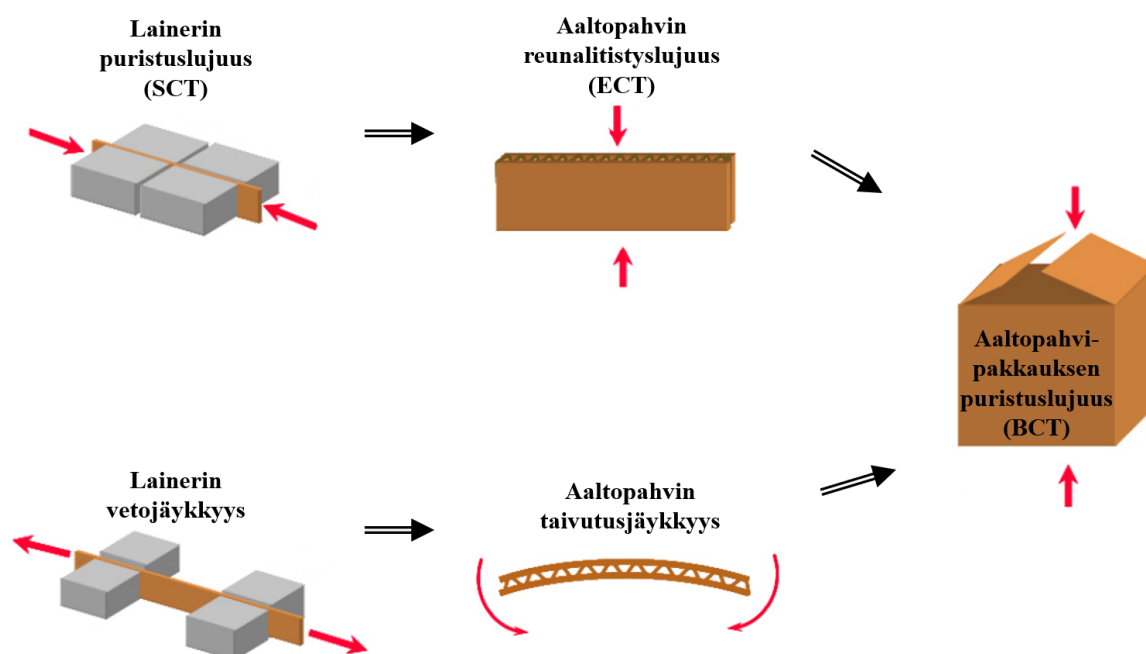
tärkeää, koska aaltopahvilaatikkoon kohdistuu suurempi rasitus aaltojen, ja näin ollen myös lainerin poikkisuuntaisesti.

Aaltopahvin jalostus käsittää kaikki ne aaltopahviksi valmistumisen jälkeiset työvaiheet, jotka tarvitaan valmiin tuotteen toimittamiseksi asiakkaalle. Kaksi tärkeintä jalostustyövaihetta ovat stanssaus ja painatus. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 63.) Stanssaus on menetelmä, jossa aaltopahviarkkia työstetään telojen tai tasopintojen välissä käyttäen aihikohtaisia taivutus- ja leikkausteriä aihion työstämistä varten. Stanssatuilla rakenteilla pystytään käyttämään koneellista pakkausta, mikä sekä nopeuttaa että helpottaa pakkaustyötä. Stanssatut rakenteet täyttävät lisäksi hyvin mittatarkkuusvaatimukset. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 78.)

Painatuksella saadaan aaltopahvipakkaukselle visuaalisuutta ja näyttävyttä. Hyvä painettavuus on kilpailukykytekijä, jolla pystytään tekemään tuote houkuttelevaksi sekä brändinomistajien että loppukäyttäjien silmissä ja luomaan lisäarvoa useaan arvoketjun vaiheeseen. Rotaatiomenetelmäinen fleksopainatus on eniten käytetty aaltopahvin painatusmenetelmä. Monimutkaisen painatusprosessin hyvän hallittavuuden lisäksi lainerin ominaisuudet ovat keskeisessä asemassa onnistuneen painotuloksen saavuttamisessa. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 63, 66.)

2.1.2 Aaltopahvipakkauksen lujuuden muodostuminen

Aaltopahvi on i-palkkimainen kerrosrakente, jossa runkona toimivan aallotuskartongin tehtävänä on pitää lainerit mahdollisimman etäällä toisistaan tehden rakenteesta lujan ja jäykän. Lainerin tärkeimmät ominaisuudet aaltopahvilaatikon puristuslujuuden kannalta ovat poikkisuuntainen puristuslujuus ja vetojäykkyys. Poikkisuuntainen puristuslujuus vaikuttaa aaltopahvin reunalitistyslujuuteen ja aaltopahvin reunalitistyslujuus aaltopahvipakkauksille tärkeään laatikon puristuslujuuteen. Lainerin vetojäykkyys vaikuttaa aaltopahvin taivutusjäykkyyteen ja aaltopahvin taivutusjäykkyys edelleen laatikon puristuslujuuteen. Laatikon puristuslujuudella on suora vaikutus aaltopahvipakkausten pinottavuuteen ja hyvä pinottavuus on aaltopahvipakkauksille olennainen elementti. (Carlsson & Hägglund 2012, s. 30-31.) Kuvassa 2 havainnollistetaan lainerin lujuusominaisuuksien vaikutusta aaltopahvin ja edelleen aaltopahvipakkauksen lujuusominaisuuksiin.



Kuva 2. Lainerin vaikutus aaltopahvipakkauksen lujuuteen (mukaillen Fellers 2007, s. 21).

Lainerin hyvillä lujuusominaisuuksilla taataan aaltopahvipakkausten arvoketjun hyvän käytettävyyden lisäksi hyvä ajettavuus sekä aaltopahvikoneella että jalostuskoneilla. Hyvien lujuusominaisuuksien on oltava korkeita myös siksi, että aaltopahvipakkauksen arvoketjun eri vaiheissa lujuutta voidaan menettää esimerkiksi lainerin kostumisen tai mekaanisen rasituksen seurauksena. (Anonen & Mäkinen 2020.)

Valmiita aaltopahvipakkauksia testaan erilaisin menetelmin, joilla saadaan mallinnettua aaltopahvipakkauksen käyttäytymistä tuotteen elinkaaren haastavissa olosuhteissa. Laatikon puristuslujuustesti on standardoitu menetelmä (TAPPI T 804 2006, s. 1), joka simuloi aaltopahvipakkauksille tärkeää pinottavuutta. Se kuvastaa sitä, minkälaisen kuorman pallein alin aaltopahvipakkaus kykenee ottamaan vastaan ilman vaurioitumista. Testissä laatikko puristetaan vertikaalisuunnassa kasaan ja testin on tarkoitus mallintaa alimman laatikon kestävä suurinta kuormitusta. Muita standardisoituja menetelmiä aaltopahvipakkauksen testaamiseksi ovat esimerkiksi laatikon pudotustesti ja laatikon tärytystesti. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 131-132.) Monessa tapauksessa kuitenkin käytetään aaltopahviarkkeja simuloimaan aaltopahvilaatikon lujuutta laatikkolujuuden mittaamisen suhteellisen aikaa vievän ja kalliin testausmenetelmän takia (Carlsson & Hägglund 2012, s. 40).

Laatikon puristuslujuuden määrittäminen on tärkeää pakkauksen teknisen suorituskyvyn selvittämiseksi, mutta myös siksi, että sitä kautta saadaan informaatiota pakkaussuunnittelun ja optimoinnin tueksi. McKeen kehittämän aaltopahvilaatikon puristuslujuuden kaavan avulla pystytään ennustamaan aaltopahvilaatikon lujuutta. Kaava yhdistää aaltopahvin geometrisen taivutusjäykkyyden sekä lainerin ja flutingin materiaaliominaisuudet. McKeen kaavan rajoituksena on kaavan epätarkkuus arvioitaessa laatikoiden lujuuksia, joiden lainereiden neliöpainot poikkeavat merkittävästi toisistaan tai laatikoiden läpät ovat huomattavasti toisistaan poikkeavan kokoisia. (Carlsson & Hägglund 2012, s. 43; Kajanto 2008, s. 244.)

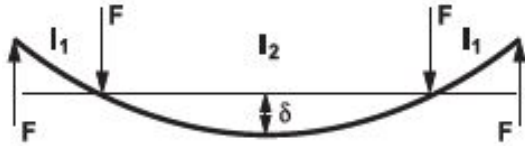
$$BCT = 2,028ECT^{\frac{3}{4}}(\sqrt{S_{MD}S_{CD}})^{\frac{1}{4}}\sqrt{Z} \quad (1)$$

missä,	BCT	aaltopahvilaatikon puristuslujuus [N], [kN/m]
	ECT	aaltopahvin reunalitistyslujuus [N/m]
	S_{MD}	aaltopahvin konesuuntainen taivutusjäykkyys [Nm]
	S_{CD}	aaltopahvin poikkisuuntainen taivutusjäykkyys [Nm]
	Z	aaltopahvilaatikon ympärysmitta [m]

Kaavassa 1 aaltopahvin taivutusjäykkyys määritetään geometrisena taivutusjäykkyytenä eli kone- ja poikkisuuntaisten ominaisuuksien tulo neliöjuurena. Mahdollisimman korkealla lainerin geometrisella vetojäykkyydellä pystytään vaikuttamaan positiivisesti aaltopahvin geometriseen taivutusjäykkyyteen. Hyvä geometrinen taivutusjäykkyys saavutetaan isotrooppisella rakenteella.

Taivutusjäykkyydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa muita kuin aksiaalisia ja tasonsuuntaisia voimia (Kajanto 2008, s. 230). Taivutusjäykkyys antaa aaltopahville sen rakenteellisen jäykkyyden ja aaltopahvin taivutusjäykkyys vaikuttaa aaltopahvilaatikon puristuslujuuteen (kuva 1). Aaltopahvin taivutusjäykkyyteen vaikuttaa lainerin vetojäykkyyden lisäksi merkittävästi aaltopahvin paksuus. Aallotuskartongin aaltotyyppi yhdessä lainereiden paksuuden kanssa määrittää aaltopahvin paksuuden, mutta aaltotyypillä on huomattavasti lainereiden paksuutta suurempi vaikutus aaltopahvin kokonaispaksuuteen.

Taivutusjäykkyyttä mitataan yleisesti joko taivutusmenetelmällä (2-, 3-, ja 4-pistetäivutus) tai resonanssimenetelmällä. Aaltopahvin taivutusjäykkyyden määrittämiseen käytetään paksuille lajeille soveltuvaan 4-pistemenetelmää (kuva 3). (Levlin 1999, s. 152-153.) Kaava 2 esittää 4-pistemenetelmän laskennan perustuen kuvaan 3 (ISO 5628 2019, s. 6-7).



Kuva 3. Taivutusjäykkyyden mittaaminen 4-pistemenetelmällä (mukaillen Levlin 1999, s. 153).

$$S_b = \frac{F \times l_1 \times l_2^2}{\delta \times 8 \times w} \quad (2)$$

missä,	S_b	taivutusjäykkyys [Nm]
	F	taivuttava voima [N]
	l_1	taivutuspituus [m]
	l_2	vapaa väli [m]
	δ	taipuma [m]
	w	näytekappaleen leveys [m]

Aaltopahvilaatikon lujuuden määrittämiseen kaavassa 1 käytetään aaltopahvin reunalitistyslujuutta. Aaltopahvin aaltojen suuntaisesti määritettävä reunalitistyslujuus kuvaa aaltopahvin suorituskykyä aaltopahvipakkauksissa. Aaltopahvin valmistusprosessissa tapahtuvaa vaikutusta lainerin ja flutingin lujuuksiin kuvataan vakiolla C, joka on yleensä 0,7. (Carlsson & Hägglund 2012, s. 39; Popil 2017, s. 97.)

$$ECT = C(\sum SCT_{liner} + \sum \alpha SCT_{fluting}) \quad (3)$$

missä,	ECT	aaltopahvin reunalitistyslujuus [kN/m]
	C	aaltopahvivalmistuksen vaikutusta lujuuteen kuvaava kerroin
	SCT_{liner}	lainerin puristuslujuus [kN/m]
	$SCT_{fluting}$	flutingin puristuslujuus [kN/m]
	α	flutingin aallosta riippuva vakio

3 LAINEREILTA VAADITTAVIA OMINAISUUKSIA

Lainerit, joita myös pinta- tai ulkopakkauskartongeiksi nimitetään, ovat erityisesti aaltopahviteollisuuden tarpeisiin käytettäviä erikoiskartonkeja. Lainereiden neliöpainot ovat tyypillisesti välillä 125-350 g/m². Lainerit koostuvat hyvin tyypillisesti kahdesta kerroksesta: pinnasta ja taustasta. Raaka-aineet kerroksissa vaihtelevat valmistettavan tuotesegmentin mukaan. Tuotteet, joiden raaka-ainepohjasta dominoivan osan muodostaa ensikuitu kutsutaan kraftlaineriksi ja kierrätyskuidun ollessa dominoiva raaka-ainekomponentti, tuotteet luokitellaan testlaineriksi. (Kiviranta 2000, s. 66-67.)

Testlainerit ja kraftlainerit luokitellaan edelleen useisiin alakategorioihin. Kraftlainerit jaetaan ruskeisiin kraftlainereihin ja valkopintaisiin sekä päällystämättömiin että päällystettyihin kraftlainereihin. Testlainereihin puolestaan kategorisoidaan ruskeat testlainerit, ensikuitupintaiset testlainerit, päällystämättömät valkopintaiset testlainerit, pilvilaineirit ja päällystetyt testlainerit. Testlainereita voidaan edelleen alakategorisoida lujuusluokkien mukaan. (Cepi ContainerBoard 2017, s. 6-11.) Ruskeilla kraftlainerilla molemmat kerrokset valmistetaan valkaisemattomasta massasta pinnan ollessa noin 30 % kokonaisneliömassasta ja taustan noin 70 % (Kiviranta 2000, s. 66-67).

White top kraftlainereita käytetään yleensä silloin, kun tuotteelta vaaditaan parempia painatusominaisuuksia ja visuaalista ulkonäköä. Pinnassa käytetään valkaistua sulfaattisellua ja pintakerros on yleensä sekoitus sekä havu- että lehtipuusellua. Lehtipuusellu antaa tuotteelle hyvän formaation ja havupuusellu lujuusominaisuudet. Pintakerroksessa käytetään usein myös täyteainetta antamaan tuotteelle paremman opasiteetin ja visuaalisen ulkonäön. Täyteaineen käyttö mahdollistaa myös tuotteen kustannusrakenteen optimoinnin. (Kiviranta 2008, s. 66-67.)

3.1 Puristuslujuus

Puristuslujuudella kuvataan sitä tasonsuuntaista puristuksen kestoa näytekappaleen leveyttä kohti, jonka näytekappale kestää ennen nurjahtamista. Puristuslujuutta mitataan SCT-menetelmällä kiinnittämällä näytekappale 0,7 mm etäisyydellä toisistaan olevien leukojen väliin. Testi suoritetaan tyssäämällä näytekappale leukojen välissä. Puristuslujuusmittauksen suorittamisen periaate on esitetty kuvassa 2. Puristuslujuus

mitataan varsin pieneltä alueelta, jolloin paperin rakenteesta johtuvaa vaihtelua vähennetään riittävällä toistojen määrällä. Yhtä luotettavana pidettävää mittaustulosta varten tarvitaan 20 mittauksen keskiarvo. Kaava 4 esittää puristuslujuuden mittauksen. (ISO 9895 2008, s. 1-4; Laakso & Rintamäki 2003, s. 129-130.)

$$\sigma_C = \frac{F_C}{w} \quad (4)$$

missä,	σ_C	puristuslujuus [N/m], [kN/m]
	F_C	puristuskuormitus [N]
	w	näytekappaleen leveys [m]

Puristuslujuutta pidetään yhtenä lainereiden tärkeimmistä ominaisuuksista, koska lainerin poikkisuuntainen puristuslujuus vaikuttaa merkittävästi aaltopahvilaatikon puristuslujuuteen. Lainerin puristuslujuuden ja vetolujuuden välisen suhteen merkitys korostuu erityisesti pitkälle viedyssä taivutuksessa ja nuuttauksessa, mitä esimerkiksi aaltopahvin jalostusprosessissa tapahtuu. Puristuslujuus on tyypillisesti noin kolmasosan vetolujuudesta konesuunnassa ja noin puolet vetolujuudesta poikkisuunnassa. (Kajanto 2008, s. 241, 246.) Lainerin puristuslujuuden määrittäminen on hyvin nopeasti tullut tärkeäksi määritettäessä esimerkiksi lainereiden tuotespesifikaatioita ja poikkisuuntaista SCT-indeksiä pidetään yhtenä lainereiden tärkeimmistä laatumäärittelyistä (Cepi ContainerBoard 2017, s. 6; Kajanto 2008, s. 241).

Paperin vaurioitumismekanismiksi puristuskuormituksen alaisena voidaan pitää seuraavia mekanismeja:

1. Kuitujen välisten sidosten vaurioituminen johtaen paperin paikallisiin murtumiin.
2. Kuitutasolla tapahtuva nurjahtaminen johtaen paperin taipumisefektiin.
3. Paperin pullistuminen vapaassa välissä johtaen sisäisen rakenteen vaurioitumiseen.

Paperin z-suuntaisella rakenteella ja palstautumislujuudella on myös merkittävä vaikutus puristuskuormituksen alaisena tapahtuviin vaurioitumisiin. Usein paperi palstautuu edellä kuvatuissa vaurioitumismekanismeissa ja z-suuntainen rakenne vaikuttaa palstautumiskohtaan. (Kajanto 2008, s. 247.)

Puristuslujuuteen vaikuttavat tekijät syntyvät pääosin kuitujen ja kuituverkoston ominaisuuksista, koska kuitujen puristuslujuus vaikuttaa myös paperin puristuslujuuteen. Pääosin puulajista ja kuiduttamismenetelmästä johtuvat kuitujen pituus, paksuus ja taipuisuus sekä kyky muodostaa sidoksia ovat merkittävässä osassa. Kirjallisuudesta löytyvillä tutkimuksilla on osoitettu kuitujen paksuuden vaikutuksen olevan suuri. Kuitujen pituudella on merkitystä, mutta lyhyempien kuitujen käyttö ei vaikuta puristuslujuuteen läheskään samassa suhteessa kuin paksuus. Myös kuitujen kiharuudella ja taitekohdilla on vaikutus puristuskuormituksen keston, koska kuituvauriot vähentävät nurjahtamisen kestoa. Monessa tapauksessa lopullinen kuituominaisuuksista aiheutuva vaurioitumismekanismi saa alkunsa mikroskooppisista mikrofibrillien vaurioista. (Kajanto 2008, s. 249-251.)

Kuituominaisuuksien lisäksi myös paperin tiheys, kuitujen väliset sidokset sekä niihin vaikuttavat jauhatus ja märkäpuristusmekanismi ovat merkittävässä roolissa puristuslujuuden muodostumisen kannalta. Jauhatuksella saatavat positiiviset vaikutukset puristuslujuuteen näkyvät samassa suhteessa kimmomoduulissa ja näiden vaikutuksien voidaan olettaa tulevan kimmomoduulin muuttumisen kautta. Kääntöpuolena tiheyttä kasvattavalla märkäpuristuksella aiheutetaan bulkin laskua, joka vaikuttaa negatiivisesti taivutusjäykkyyteen. Lainerin puristuslujuutta pystytään kasvattamaan tekemällä arkista tiiviimpi ja ohuempi heikentämättä oleellisesti aaltopahvin taivutusjäykkyyttä, koska aallotuskartongin aaltoprofiili on aaltopahvin paksuuden ja taivutusjäykkyyden kontrolloivin tekijä. (Kajanto 2008, s. 244; 249-252.)

Massaliimauksella saadaan aikaan positiivista vaikutusta puristuslujuuteen kuitujen jäykistymisen ja vahvempien sidosten kautta. Massaliimana käytetään yleisesti kuivalujuutta nostavaa massatärkkelystä, mutta myös synteettisiä kuivalujuutta nostavia liimoja. Massatärkkelyksen käytön ongelmana on, että tärkkelys absorboi kosteutta ja kosteissa olosuhteissa puristuslujuuteen massatärkkelyksellä saatu positiivinen vaikutus heikkenee oleellisesti kuitujen välisten sidosten heikentyessä kosteuden absorboitumisen seurauksena. Kuivatusosalla puristuslujuuden kehittymiseen pystytään vielä vaikuttamaan estämällä poikkisuuntaisen kuivatuskutistuman syntymistä. Kuivatuskutistumalla on kuitujen muodonmuutoksien kautta puristuslujuutta heikentävä vaikutus. (Kajanto 2008, s. 252.)

3.2 Vetojäykkyys ja kimmomoduuli

Vetojäykkyys on paperin ominaisuus, jolla kuvataan paperin elastista käyttäytymistä jännitys-venymäkäyrän elastisten muodonmuutoksien alueella. Elastista käyttäytymistä vastaava maksimivoima saavutetaan jännitys-venymäkäyrällä kohdassa, jossa käyrän lineaarisuus loppuu. Jännitys-venymäkäyrän lineaarisuuden loppuessa muodonmuutokset alkavat olla plastisia. Vetojäykkyys kuvaa hyvin paperin yleistä jäykkyyttä ja hyvällä vetojäykkyydellä parannetaan paperin jatkokäsiteltävyyttä. (Levlin 1999, s.151-152; T 494 om-01 2006, s. 3.)

Kimmomoduuli on vahvasti tiheys- ja materiaaliriippuvainen tekijä, joka vaikuttaa sekä lujuus- että jäykkyysominaisuuksiin (Niskanen 2012, s. 206.) Paperin kimmomoduulin muodostumisessa yksittäisten kuitujen ja kuituverkoston rooli on tärkeä. Kuitujen suuremmalla pituudella sekä leveydellä on positiivinen vaikutus kimmomoduuliin, kun taas kuituvauriot heikentävät kimmomoduulia kuitujen heikomman aktivoitumisen kautta (Niskanen 2012, s. 216). Brezinskin (1956) tutkimusten mukaan kimmomoduulia pystytään kasvattamaan märkäpuristusta lisäämällä, jolloin myös virumistaipumus vähenee. Lainerin eri kerrosten kimmomoduulilla voidaan vaikuttaa sekä lainerin että valmiin aaltopahvin taivutusjäykkyyteen. Vetojäykkyys määritetään vertaamalla vetokuormituskokeessa elastisen käyttäytymisen alueella kahdella eri kuormitusvoimalla tapahtunut näytekkappaleen pituuden muutos käyttäen kaavaa 5 (Levlin 1999, s. 143; T 494 om-01 2006, s. 2). Vetojäykkyyden määrittämisen periaate esitetään kuvassa 2.

$$S_t = \frac{\Delta f}{w} \times \frac{l_0}{\Delta l} \quad (5)$$

missä,	S_t	vetojäykkyys [N/m], [kN/m]
	Δf	mitattujen voimatasojen muutos [N]
	l_0	alkuperäinen näytekkappaleen pituus [m]
	w	alkuperäinen näytekkappaleen leveys [m]
	Δl	näytekkappaleen pituuden muutos voimatasoilla Δf [m]

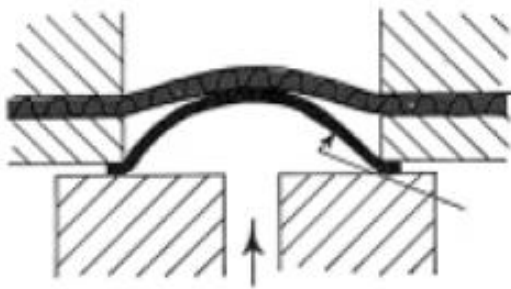
Vetojäykkyydellä ja kimmomoduulilla on yhteys, sillä vetojäykkyys saadaan kertomalla kimmomoduuli paperin paksuudella. Tiedettäessä vetojäykkyys ja paperin paksuus, kimmomoduuli voidaan laskea käyttämällä kaavaa 6 (Markström 1991, s. 15).

$$S_t = E \times t \quad (6)$$

missä,	S_t	vetojäykkyys [N/m], [kN/m]
	E	kimmomoduuli [N/m ²]
	t	paperin paksuus [m]

3.3 Puhkaisulujuus

Puhkaisulujuudella kuvataan sitä maksimilujuutta, jonka kartongin pinta kestää rikkoutumatta hydraulisen paineen alla, kun sitä kuormitetaan kohtisuorassa kartongin pintaan nähden joustavan kalvon välityksellä. Kalvo pullistuu hydraulisen paineen vaikutuksesta pullistaen samalla yläpuolisen näytekappaleen keskialuetta. Puhkaisulujuus määritetään mittauskohdan pienimmän murtovenymän mukaan sinä hydraulisena paineena, joka kalvon välityksellä on kohdistettu näytekappaleeseen. Puhkaisulujuuden yksikkönä käytetään kilopascaleita. (ISO 2759 2014, s. 1-2; Levlin 1999, s. 144.) Puhkaisulujuus on lainereille tärkeä ominaisuus, koska aaltopahvilaatikon puhkaisulujuus riippuu yksinomaan lainerin puhkaisulujuudesta. Puhkaisulujuus on suosittu sen helpon mittausmenetelmän takia (Mauranen 1983, s. 379). Puhkaisulujuuden suorittamisen periaate havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Puhkaisulujuusmittauksen periaatekuva (mukailen Laakso & Rintamäki 2003, s. 133).

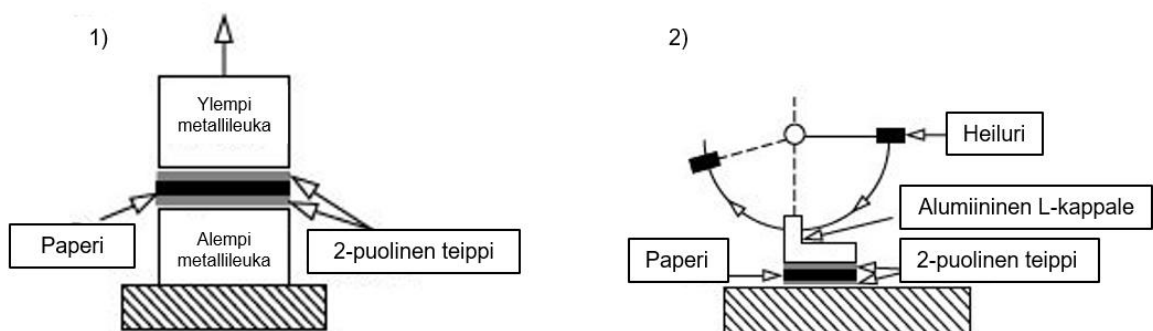
Puhkaisulujuuteen vaikuttavat sekä kone- että poikkisuuntaiset vetolujuudet ja murtovenymä. Puhkaisulujuuteen pystytään vaikuttamaan positiivisesti kasvattamalla vetolujuuksia sekä konesuuntaisen murtovenymän kestävyyttä (Fellers 2007, s. 36).

3.4 Z-suuntainen lujuus

Paperin z-suuntaisella lujuusmittauksella mitataan rakenteen kykyä kestää z-suuntaista vetokuormitusta. Z-suuntaiseen lujuusmittaukseen käytettävä terminologia (Scott Bond, z-suuntainen vetolujuus, palstautumislujuus, sisäinen lujuus ja kerrosten välinen lujuus) riippuu käytettävästä mittaamenetelmästä. Kerrosten välisestä lujuudesta puhutaan silloin, kun näytekkappale palstautuu eri kerrosten välistä. Näytekkappaleen palstautuessa heikoimman kerroksen sisältä puhutaan sisäisestä lujuudesta, jolloin kerrosten välinen lujuus on sisäistä lujuutta suurempi. Hyvää palstautumislujuutta tarvitaan jatkojalostusprosessien, kuten painatuksen takia. (Knowpap 2019e; Kajanto 2008, s. 253.)

Z-suuntaisessa vetolujuuden mittaamisessa testikappaleen molemmille puolille kiinnitetään kaksipuolinen teippi, minkä jälkeen teippiä puristetaan metallisilla leuoilla määrättyllä voimalla. Tämän jälkeen metalliset leuat vedetään toisistaan irti. Kohta, jossa näytekkappale palstautuu on näytteen tasonsuuntaa vasten kohtisuorassa tarvittava voima kilopascalina näytekkappaleen palstautumiseksi. (ISO 15754 2009, s.1; Kajanto 2008, s. 255-256.)

Palstautumiseen tarvittava energia pinta-alayksikköä kohden (J/m^2) voidaan mitata Scott Bond -mittausmenetelmällä. Tässä menetelmässä näytekkappaleen molemmille puolille kiinnitetään kaksipuolinen teippi. Yläpinnalle teippiin kiinnitetään L-kirjaimen muotoinen alumiinikappale ja alapuolen teipistä näytekkappale kiinnittyy metalliseen alasimeen. L-kirjaimen muotoiseen metallikappaleeseen kohdistetaan heiluriliike, jolloin näytekkappale palstautuu joko kerrosten välistä tai heikoimmasta kerroksesta. (ISO 16260 2016, s.1-2; Kajanto 2008, s. 255-256.) Kuva 5 havainnollistaa z-suuntaisen lujuuden ja sisäisen lujuuden mittaamenetelmät.



Kuva 5. Z-suuntaisen vetolujuuden (1) ja sisäisen lujuuden (2) mittaamenetelmät (mukaiillen Kajanto 2008, s. 256).

3.5 Vetolujuus

Vetolujuudella tarkoitetaan suurinta tason suunnassa tehtävää vetokuormitusta, jonka näytekappale kestää ennen kuin rakenne rikkoutuu murtumalla. Vetolujuus kuvastaa paperin yleistä lujuustasoa sekä laajasti monia mekaanisia ominaisuuksia. Vetolujuus lasketaan kaavalla 7 (ISO 1924-2 2008, s. 6; Levlin 1999, s. 142).

$$\sigma_T = \frac{F_T}{w} \quad (7)$$

missä,	σ_T	vetolujuus [N/m], [kN/m]
	F_T	vetokuormitus [N]
	w	näytekappaleen leveys [m]

Paperin rakenne on tasonsuunnassa epähomogeeninen ja rakenteen paikalliset epäjatkuvuuskohtat tai kuitujen välisten sidosten asteittainen vaurioituminen, johtavat tasonsuuntaisessa vetokuormituksessa rakenteen murtumiseen, kun venymä on riittävän suuri (Alava & Niskanen 2008, s. 205, 209-211.) Kuitujen ominaisuudet ovat ratkaisevassa asemassa vetolujuuden muodostamisessa. Pitkät kuidut muodostavat enemmän kuitusidoksia ja kuituverkoston parempi sitoutuminen kasvattaa paperin vetolujuutta. Kuituvaurioiden seurauksena paperin vetolujuus laskee. Runsas kuitujen kihartuneisuus vähentää vetolujuutta kuitusidosten helpomman murtumisen seurauksena. Myös kuidun pituusmassalla (mg/m) on vaikutusta. Pituusmassa vaikuttaa kuitujen muokkautumiskykyyn ja yksittäisen kuidun lujuuteen. (Knowpap 2019g; T494 om-01 2006, s. 2.)

Vetolujuussuhde (MD/CD) kuvastaa kone- ja poikkisuuntaisten vetolujuuksien suhdetta. Panthai et al. (2017) ovat tutkimuksessaan todenneet, että optimaalisella vetolujuussuhteella pystytään kasvattamaan lainerin mikrovenymää ja vaikuttamaan tätä kautta positiivisesti taittomurtuman kestoan.

3.6 Muita tärkeitä ominaisuuksia

Muista lujuusominaisuuksista lainerin taivutusjäykkyys yhdessä ympäristön suhteellisen kosteuden kanssa ovat tärkeitä tekijöitä aaltopahvin pyykkilautakuvion muodostumisen kannalta, kuten Wendler (2006) on todennut tutkimuksessaan. Pyykkilautakuvio muodostuu, kun laineri painuu aallotuskartongin harjojen välisiin avoimiin väleihin. Pyykkilautakuvio

aiheuttaa epätasaista painatustulosta. Taivutusjäykkyys antaa lainerille lisäksi sen rakenteellista jäykkyyttä (Kajanto 2008, s. 230).

Lainerin tasaisella poikkisuuntaisella kosteusprofiililla on iso vaikutus aaltopahvin valmistusprosessissa. Epätasainen kosteusprofiili voi aiheuttaa ajettavuusvaikeuksia aaltopahvi- ja jalostuskoneelle sekä vinoumaa aaltopahviarkkiin. Epätasainen kosteusprofiili vaikuttaa myös liimautuvuuteen aaltopahvin valmistuksessa. (Kiviranta 2000, s. 65-66.)

Pintaan liittyvät ominaisuudet liittyvät lainerin liimautuvuuteen aaltopahvin valmistuksessa. Liimautuvuutta kuvastaa esimerkiksi ilmanläpäisy, absorptio-ominaisuudet ja pinnan sileyys sekä karheus. Pinnan sileyttä ja karheutta pidetään ilmanläpäisyä parempana kuvastamaan liimausominaisuuksia, koska ilmanläpäisy kuvastaa koko rainan ilmanläpäisyä ja liiman imeytyminen kartonkiin ei ole z-suunnassa tasaista johtuen kerroksien erilaisesta rakenteesta ja ominaisuuksista. (Laakso & Rintamäki 2003, s. 129.) Pinnan sileydellä ja karheudella on lisäksi olennainen vaikutus lainerin painettavuuteen.

Ilmanläpäisyllä on myös tärkeä rooli aaltopahvin jalostuksessa ja aaltopahvipakkausten käsittelyssä. Aaltopahvin valmistuksessa ja jalostuksessa tai valmiiden pakkausten käsittelyssä käytetään imukuppeja aaltopahviarkkien ja -pakkausten käsittelyyn. Lainerin liian suuri ilmanläpäisy voi aiheuttaa nostettavien artikkeleiden putoamista, kun imukupit eivät saa muodostettua pitoon tarvittavaa alipainetta. Tämä voi aiheuttaa häiriöitä tuotantolinjojen käytettävyyteen sekä rahallisia menetyksiä materiaalihävikin seurauksena. (Anonen & Mäkinen 2020.)

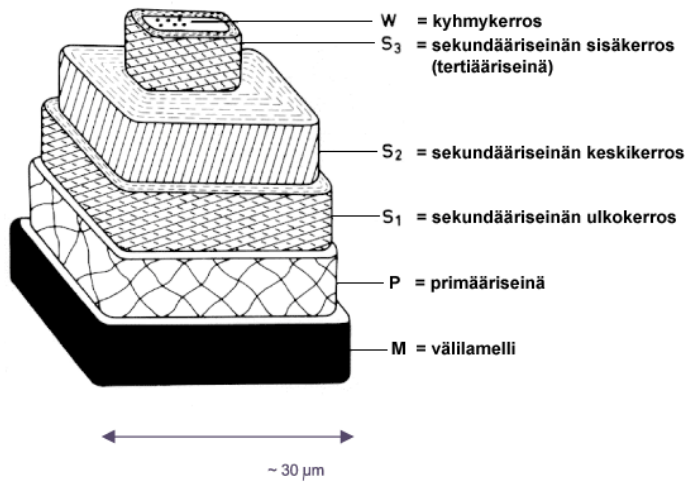
4 LAINERIN RAKENTEEN MUODOSTUMINEN

4.1 Kuidut ja kuituominaisuudet

Puukuitu on yksittäisten kuitujen muodostamasta kuituverkostosta koostuvan paperin tärkein raaka-aine ja kuituominaisuudet vaikuttavat olennaisesti muodostuvan paperin rakenteen lujittumiseen (Sirviö 2008, s. 61). Puussa kuidut ovat sitoutuneina toisiinsa lujasti ja ovat sellaisenaan, jäykkinä ja huonosti sitoutuvina paperinvalmistukseen soveltumattomia. Puun rakenteesta kuidut irrotetaan joko kemiallisesti tai mekaanisesti kuiduttamalla. Kemiallisessa kuidutuksessa puukuituja sitova ligniini liuotetaan kemikaalien ja lämmön avulla kuitujen irrottamiseksi ja mekaanisessa kuidutuksessa kuidut irrotetaan mekaanisen rasituksen välityksellä. (Knowpap 2019b.)

Kuva 6 esittää yksittäisen kuidun rakennetta. Soluseinäjä koostuu runkona toimivasta selluloosasta ja selluloosasta muodostuneiden mikrofibrillien välisen amorfisen aineen muodostavista hemiselluloosasta ja ligniinistä. Fibrillit kiertävät kuidun pituusakselia tietyllä fibrillikulmalla antaen kuiduille aksiaalisen vetolujuuden ja kimmomoduulin. Korkean fibrilloitumiskulman kuitujen murtovenymä on suurempi, mutta vetolujuus ja kimmomoduuli heikommät, kuin pienemmän fibrilloitumiskulman omaavilla kuiduilla. (Sirviö 2008, s. 61, 76.)

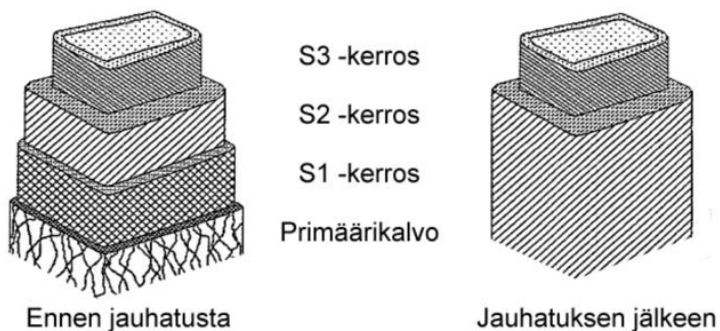
Sekundääriseinän keskikerros paksuimpana kerroksena dominoi kuidun mekaanisia ominaisuuksia ja S_2 -kerroksen fibrillikulmalla on merkittävä vaikutus kuidun ja paperin lujuusominaisuuksiin. Kuitudimensioilla on suuri vaikutus muodostuvan paperin rakenteellisiin- ja lujuusominaisuuksiin. Kuidun pituudella on vaikutusta ennen kaikkea lujuusominaisuuksiin ja kuidun leveydellä ja kuituseinämän paksuudella kuitujen luhistumistaipaisuuteen ja jäykkyyteen. (Knowpap 2019a; Sirviö 2008, s. 61.) Lainerin valmistuksessa käytettävien valkaisemattomien skandinaavisten mäntykuitujen pituus on noin 2,1 mm ja leveys noin 30-37 μm (Sirviö 2008, s. 65).



Kuva 6. Kuidun soluseinän rakenne (Knowpap 2019a).

4.1.1 Jauhatuksen vaikutus kuituominaisuuksiin

Jauhatus on rainanmuodostuksen ja koko paperinvalmistuksen eräs tärkeimmistä yksikköprosesseista, koska jauhatuksella saadaan muutettua kuituominaisuuksia haluttuun suuntaan kohdistamalla kuituihin mekaanista rasitusta jauhimien terien välityksellä. Jauhatuksen avulla valmistettavalle tuotteelle haluttuja ominaisuuksia pystytään hallitsemaan kuituominaisuuksien muuttumisen kautta. Lujuusominaisuuksiin jauhatus vaikuttaa parantamalla kuitujen sitoutumiskykyä muokkaamalla kuitujen soluseinämää, lisäämällä kuitujen taipuisuutta ja aiheuttamalla sekä ulkoista että sisäistä fibrillaatiota. Kuitujen rakenteen muokkaamisen seurauksena kuidut turpoavat, mikä lisää kuitujen sitoutumispinta-alaa. Jauhatuksella kuituja saadaan suoristettua, mutta kuitujen pituus lyhenee. Kuitujen katkeilusta sekä soluseinämän rakenteen avautumisesta johtuen jauhatuksessa syntyy hienoainesta, mikä tekee paperin rakenteesta tiiviimmän. (Koskenhely 2007, 94-101.) Kuva 7 havainnollistaa jauhatuksen vaikutuksia kuituihin.



Kuva 7. Jauhatuksen vaikutus kuituihin (Knowpap 2019c).

Saavutettuun jauhatustulokseen vaikuttaa jauhettavan massan lisäksi lukuisa määrä eri tekijöitä. Jauhatustuloksen kannalta olennaisimpia tekijöitä ovat jauhatustapa ja jauhatuksen määrä. Jauhatustavalla kuvataan, onko jauhatusta intensiteetiltään varovaista eli fibrilloivaa vai rajua eli katkovaa. Jauhatuksen määrällä kuvataan kuituihin kohdistettavaa jauhatusenergiaa, jolla vaikutetaan massan jauhautumisasteeseen. (Jokisalo & Salomäki 1983, s. 422-423.) Jauhatusprosessin hallintaan ja kuvaamiseen käytettävistä teorioista tunnetuin on ominaissärmäkuormateoria, joka kuvaa jauhatusta kahdella parametrilla. Jauhatuksen määrän kuvaamiseen käytetään energianominaiskulutusta (EOK) ja jauhatustavan kuvaamiseen ominaissärmäkuormaa (OSK). Ominaissärmäkuormateoria perustuu olettamuksiin, että osa jauhimien käyttämästä energiasta kuluu tyhjäkäyntiin ja jauhatusvaikutus tapahtuu pääosin kuitujen joutumisesta teräsärmien väliseen kontaktiin. (Jokisalo & Salomäki 1983, s. 424-425.)

Jauhettavan massan kappaluvulla on suuri vaikutus jauhatustulokseen. Nordström (2014) on osoittanut, että lainereiden valmistuksessa käytettävien korkeakappaisten massojen kappaluvun laskemisella pystytään vaikuttamaan massojen jauhautuvuuteen. Kappaluvun laskemisella pystytään vaikuttamaan jauhatuksessa tarvittavan energian kulutukseen ja säilyttämään paremmin kuidunpituutta sekä vähentämään arkin kutistumista.

4.1.2 Kuituvaurioiden vaikutus massan ja paperin ominaisuuksiin

Kuituvaurioilla tarkoitetaan eri prosessivaiheiden kuitujen rakenteeseen aikaansaamia vaurioita. Kuituvaurioita ovat kihartuneisuus, kinkit eli kuitujen jyrkkään kulmaan taittuneet polvekkeet ja dislokaatiot sekä mikrokompresiot eli kuitujen soluseinien sijoiltaanmenot. Kuituvauriot heikentävät kuitujen kimmomoduulia, vetolujuutta ja murtovenymää. Erityisesti aksiaalissuuntaiset kuituvauriot johtavat paperin alhaisempaan vetolujuuteen ja kimmomoduuliin. Kuituvauriot aiheuttavat jännitys-venymäkäyttäytymiseen epälineaarisuutta. Esimerkiksi kiharoitusasteella voi olla vaikutusta jännitys-venymäkäyrän lineaarisuuteen ja kuituverkoston muodostumiseen. (Sirviö 2008, s. 75-76.)

Kuitujen kihartuneisuus muuttaa paperin sisäisten jännitysten jakaumaa, minkä seurauksena kihartuneisuus heikentää puhkaisulujuutta, jäykkyyttä ja puristuslujuutta (Barbe et al. 1985, s. 218). Hellävaraisella jauhatuksella edistetään kuitujen turpoamista ja pystytään vaikuttamaan kuituvaurioihin vähentävästi suoristamalla kihartuneita kuituja, kun taas

korkeaintensiteettisellä jauhatuksella mahdollisesti aiheutetaan kuitujen polvekkeiden muodostumista, lisätään kuitujen kihartuneisuusastetta sekä aiheutetaan dislokaatioita. (Sirviö 2008, s. 77.)

4.1.3 Kuitujen sitoutuminen

Kuitujen sitoutuminen perustuu molekyylitason sitoutumismekanismeihin (kemialliset sidokset selluloosamolekyylien välillä, molekyyliden väliset van der Waalsin sidokset ja polymeeriketjujen kietoutuminen) sekä kuitujen välisiin sidoksiin. Sidosten muodostumisen kannalta merkittävimpänä tekijänä pidetään vetysidosten muodostumista. Sidoksia muodostuu myös vetysidosta heikompien van der Waalsin voimien vaikutuksesta ja polyelektrolyyttien avulla kuitujen välille voi muodostua sidosvoimaltaan vahvimpia, selluloosaketjujen sisäiseen koheesioon vaikuttavia kovalenttisia sidoksia. Ensiksi muodostuvat sidokset pitävät kuituverkoston kasassa ja seuraavat sidokset alkavat muodostamaan paperille rakenteellista jäykkyyttä. (Aaltonen & Nordman 1983, s. 176; Sirviö 2008, s. 82-84.)

Kuitujen väliset sidokset muodostuvat asteittain paperin kuiva-ainepitoisuuden noustessa. Aluksi kuidut lähentyvät kolloidisten vuorovaikutusten sekä fibrillien mekaanisten yhteenliittymisen seurauksena, kun vesi poistuu paperista. Ulkoinen fibrillaatio edesauttaa sidosten muodostumista saaden kuitujen pinnat lähemmäksi toisiaan. Hienoaines auttaa arkin lujittumista ja sidosten muodostumista suuren ominaispinta-alansa ansiosta. Kuitusidoksien ja myöhemmin valmiin paperin lujuus muodostuu sitoutuneesta pinta-alasta ja sidosten lujuudesta. Kuitusidosten lujuudesta puhuttaessa viitataan usein murtolujuuteen. Kuitusidosten lujuuden mittaukseen käytetään myös tasonsuuntaa vasten mitattavaa paperin palstautumisenergiaa. Kuitusidosten lujuutta mitattaessa ei voida olla täysin varmoja, että katkeaminen tapahtuu sitoutuneita pintoja pitkin. Käyttäen oletusta, että sidosluku on suoraan verrannollinen sidospinta-alaan, voidaan sidosluku määrittää edellä mainittujen tekijöiden suhteen. (Aaltonen & Nordman 1983, s. 176; Sirviö 2008, s. 84, 86-87.)

Sekä fysikaalisella että kemiallisella sorptiolla on retention lisäksi merkittävä vaikutus rainan z-suuntaiseen anisotropiaan ja lujuusominaisuuksien muodostumiseen. Kuitujen ja hienoaineksen vesisuspensiossa saama negatiivinen pintavaraus saa aikaan kuitujen kiinnittymistä toisiinsa estäviä repulsiivoimia, jotka saavat aikaan hienoainesretention

heikentymistä. Viiran päälle muodostuva kuituverkosto ei pysty pelkästään mekaanisesti estämään hienoainesta menemästä kuituverkoston läpi ja mekaanisen retention tukemiseksi käytetään polyelektrolyyttejä. Polyelektrolyyttien vaikutus perustuu negatiivisten hiukkasten repulsiovoimien neutraloitumisen seurauksena mahdollisuuden saaville attraktiivoimille ja sillanmuodostumisteoriaan perustuvalla flokkuloitumiselle. (Arvela 1983, s. 258-264.) Retentioaineita käytetään yksittäin tai eri komponenttien yhdistelmänä. Usein käytettyjä komponentteja ovat polyakryyliamidit ja polyeteeni-imiinit, kationinen tärkkelys ja silika (Laine 2007, s. 38).

Paperin kastumisen seurauksena lujuus huononee veden toimiessa kuitusidoksien välisiä vetysilloja purkavana polaarisenä liuottimena. Märkälajuutta voidaan parantaa vahvistamalla olemassa olevia kuitujen välisiä sidoksia, suojaamalla kuitusidoksia vedeltä ja muodostamalla vedelle vähemmän herkkiä kemiallisia kovalenttisia sidoksia. Märkälajuutta parantavina tuotteina käytetään monia synteettisiä polyelektrolyyttejä, kuten esimerkiksi polyamideja ja polyamiineja. (Krogerus 2007, s. 90-92; Lipponen 1983, s. 304.) Kuitujen välisten sidosten lisääminen parantaa paperin kuivalujuutta. Tunnetuin ja käytetyin kuivalujuutta parantava lisäaine on kationinen tärkkelys. Tärkkelyksen kuivalujuutta parantava liimaava vaikutus perustuu sen kykyyn muodostaa vetysidoksia runsaan hydroksyyliiryhmämääränsä kautta. Kuivatuksen aikana vesimolekyylit katoavat ja tärkkelyksen sekä kuitujen tai muiden paperinvalmistuskomponenttien välille muodostuu vetysidoksia, mikä rajoittaa kuitujen liikkumista suhteessa toisiinsa sekä lisää näin myös paperin jäykkyyttä. Tärkkelyksen käyttö parantaa erityisesti z-suuntaisia lujuusominaisuuksia, mutta sillä on vaikutusta myös vetolujuuteen ja vetolujuuden kautta puhkaisulujuuteen. Muita tunnettuja kuivalujuutta parantavia tuotteita ovat akryyliamidi- ja polyvinyyliamiinipolymeerit. (Krogerus 2007, s. 79-80, 85-86, 88-89; Laine 2007, s. 39-40.)

4.2 Rainanmuodostus

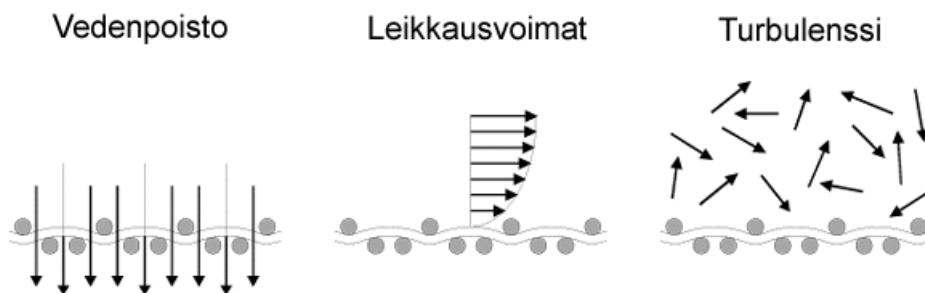
Rainanmuodostuksen lähtökohtana on, että perälaatikon huuliaukosta viiralle tuleva huulisuihku on mahdollisimman homogeeninen virtausnopeuden ja sakeuden osalta koko koneen poikkisuunnassa. Sulppuun kohdistetaan perälaatikossa turbulenssia, jolla flokkirakennetta ja flokkien tiheyttä pyritään hajottamaan hyvän formaation saavuttamiseksi. Turbulenssitaso kasvatamalla flokkeja pystytään hajottamaan, mutta liian kova turbulenssi alkaa aiheuttamaan formaation heikentymistä. Liian kovalla

turbulenssitilalla viiraosalla alkaa muodostumaan satunnaisia virtaushäiriöitä, jotka aiheuttavat paperiin neliömassavaihtelua. Massasulpun purkamisessa viiralle, perälaatikon huulen vaak- ja pystyliikkeillä sekä viiran- ja huulisuihkun välisellä nopeuserolla on merkittävät vaikutukset muodostuvan rainan ominaisuuksiin. Huulisuihkun- ja viiran välisellä nopeuserolla edesautetaan massasulpun tasaista leviämistä viiralle, mutta aiheuttaen samalla kuitujen konesuuntaista orientoitumista ja paperin ominaisuuksien anisotropiaa. Huulen pystyliikkeellä voidaan vaikuttaa viiralle purkautuvaan sulpun määrään sekä perälaatikon sakeuteen ja huulen vaakaliikkeellä hallitaan huulisuihkun iskukohtaa sekä vaikutetaan initiaalivedenpoistoon. Rauhallinen initiaalivedenpoisto edesauttaa hyvän retention sekä tasaisemman z-suuntaisen rakenteen muodostumista. (Aaltonen, Pfaler & Ryti 1983, s. 551-554; Gustafsson & Niskanen 2012, s.23-24; Niskanen & Pakarinen 2008, s. 27-29.)

Rintatelan ravistimella pystytään parantamaan paperin formaatiota ja vaikuttamaan tasonsuuntaisten ominaisuuksien anisotropiaan. Poikkisuunnassa halutulla amplitudilla sekä taajuudella värähtelevä rintatela saa viiraan aikaan poikkisuuntaisen värähtelyliikkeen, joka aiheuttaa nopeuseroja märkäviiran päälle muodostuneen kuituverkoston ja sen päällä vapaana olevan sulppukerroksen välille. Nopeuserot aiheuttavat leikkausvoimia kuituflokkeihin ja pienentävät näin keskimääräistä flokkikokoja. Poikkisuunnassa tapahtuva liike saa kuituja orientoitumaan enemmän poikkisuuntaisesti ja tasonsuunnassa poikkisuunnan lujuusominaisuuksien parantuessa arkista muodostuu enemmän neliömäinen. (Aaltonen et al. 1983, s. 569.)

Viiraosalla vesi poistuu kahdella erilaisella mekanismilla. Ennen vesirajaa vedenpoisto tapahtuu paine-eron vaikutuksesta kuituverkoston kapillaareissa ja vesirajan jälkeen rainan läpi kulkevan ilmavirran vaikutuksesta. Vedenpoistoon ja turbulenssin hallintaan käytetään nopeuden vaikutuksesta jättöpuolelle tyhjän kehittäviä sekä viiran kanssa pienen kulman ja mahdollisen kuormituksen muodostavia foililistoja, alipaineettomia tai matalan alipaineen foililistalaatikoita ja rainan avoimeen pintaan alipaineen seurauksena imuvaikutuksen aikaan saavia rainaa tiivistäviä märkäimulaatikoita. Vedenpoistokalustolla rainaan aiheutetaan mikroturbulenssia, jolla pystytään rikkomaan mahdollisesti perälaatikosta tulevia flokkeja sekä estettyä rainan liian aikaista huopautumista. (Aaltonen, Pfaler, Ryti 1983, s. 566-570.)

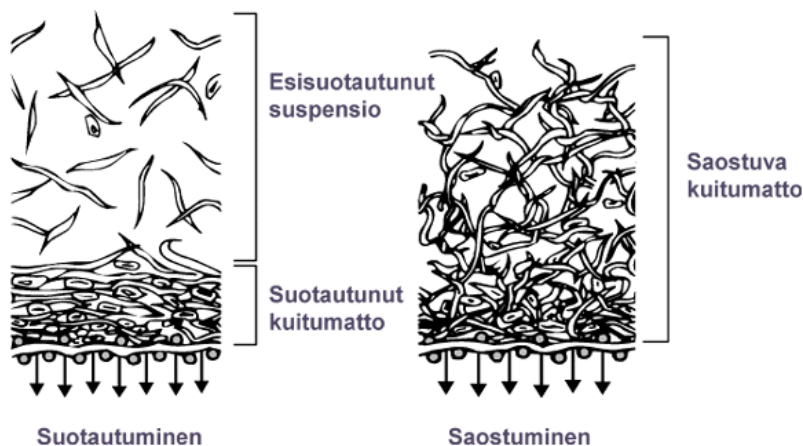
Foililistoina käytetään sekä kiinteitä, että säädettäviä listoja. Säädettävällä vedenpoistokalustolla pystytään hallitsemaan paremmin vedenpoistoa ja viiraosan turbulenssia painovoiman, listakulmien ja -korkojen sekä alipaineen avulla. Vedenpoistokaluston säädettävyyden ansiosta muodostuvan rainan rakenteeseen pystytään vaikuttamaan sekä tason- että z-suuntaisen orientaation kautta niin kauan, kun kuidut ovat liikkumiskykyisiä kuituverkostossa. (Aaltonen, Pfaler, Ryti 1983, s. 566-568; Pruitt 2008, s. 33-35.) Kuvassa 8 on havainnollistettu rainanmuodostuksessa rainaan kohdistuvia voimia.



Kuva 8. Rainanmuodostuksessa vaikuttavat hydrodynaamiset voimat (Knowpap 2019f).

4.2.1 Kerrostuminen ja huopautuminen

Massasulpun vedenpoistotapa rainanmuodostuksessa vaikuttaa erityisesti z-suuntaiseen rakenteeseen ja myöhemmin tuotteen ominaisuuksiin. Vedenpoistotapaan vaikuttavat monet prosessitekniset asiat, kuten jauhausaste ja sakeus, mutta myös käytettävällä teknologialla on suuri vaikutus. Vedenpoistoa voi tapahtua sekä suotautumalla että saostumalla (kuva 9). Vedenpoisto on harvoin joko suotautumista tai saostumista, vaan yleensä se on näiden kahden tavan yhdistelmä. (Aaltonen 1983b, s. 143-144.)



Kuva 9. Suotautuminen ja saostuminen (Knowpap 2019f).

Puhtaassa suotautumisessa viiran päälle muodostuu kuituverkosto, jonka päälle yksittäiset kuidut laskeutuvat. Suotautumalla muodostuneesta kuitususpensiosta voidaan erottaa erikseen viiran päälle jo suotautunut kerros sekä sen päälle muodostuva, lähes vakiosakeuksinen kerros. Vesi poistuu puhtaassa suotautumisessa koko rakenteen läpi pohjalla olevan kuituverkoston parantaessa retentiota. Suotautumalla muodostuvan rainan rakenne on kerrosmainen. Suotautumisen edetessä kuitususpensiosta viiran päälle muodostuva ainekerros paksunee ja lisää suotautumisvastusta sekä suotautumiseen tarvittavaa aikaa. (Aaltonen 1983b, s. 134, 143-144.)

Puhtaassa saostumisessa viiran päälle ei muodostu yhtenäistä kuituverkosta ja kuitususpensio on z-suunnassa sakeudeltaan lähes homogeeninen. Saostumalla muodostunut raina saa huopautuneen, vahvasti z-orientoituneen rakenteen, jossa on runsaasti arkin rakenteen läpi ulottuvia kuituja. Huopautuneen rakenteen z-suuntaiset lujuusominaisuudet ovat paremmat johtuen kuitujen z-suuntaisesta sekoittumisesta kerrosten välille. Huonoon retention johtava puhdas saostuminen ei käytännössä ole paperikoneella mahdollista, koska kuitususpension sakeus on riittävän suuri muodostamaan yhtenäisen kuituverkoston viiran päälle. Puhtaaseen saostumiseen viiraosan turbulenssin pitäisi lisäksi olla koko rainanmuodostusalueella niin suuri, että se pystyisi estämään kuitumaton muodostumisen saostumalla. Suotautuvan massasulpun sakeus on yleensä riittävä kuituverkoston muodostumiseen, jolloin muodostuvassa saostumistilanteessa kuitususpensiosta voidaan erottaa alimpana oleva viiran päälle suotautumalla muodostunut kuitukerros, osittain ankkuroitunut vähäisen suotautumisvastuksen siirtymäkerros ja pinnassa oleva vapaa, lähes perälaatikkosakeudessa oleva kerros. (Aaltonen 1983b, s. 143-144.)

Puhtaan saostumisen ja suotautumisen rajoitteista johtuen vedenpoistoa tapahtuu sekä suotautumalla että saostumalla, suotautumisen ollessa pääasiallinen vedenpoistotapa. Tutkimusten mukaan tuotantomittakaavassa valmistetun paperin rakenne on enemmän kerrostunut kuin huopautunut (noin 20 %) sekarakenne. (Aaltonen 1983b, s. 143-144.)

4.2.2 Materiaalin jakautuminen tason- ja z-suunnassa

Kuitususpensio jakautuu tason suunnassa tarkasteltuna aina satunnaisesti suotautumisen ja saostumisen aikana. Kuitujen suuri pituus suhteutettuna paperin paksuuteen ja z-suuntaiseen orientaatioon korostavat entisestään satunnaisuudesta aiheutuvaa epätasaisuutta.

Kuitususpensio on myös yleensä varsin epähomogeeninen ja kuidut eivät yleensä ole irrallaan vaan esiintyvät monesti flokkeina. Epähomogeeninen, paljon flokkeja sisältävä kuitususpensio saa aikaan epätasaisen tasonsuuntaisen rakenteen. Flokkien muodostumista pystytään parhaiten vähentämään sakeustasoa laskemalla. Suotautumisvaiheessa olevan kuitususpension homogeenisuuteen sekä tasonsuuntaiseen tasaisuuteen vaikuttavat eniten homogeenisuus huulisuihkussa, huulisuihkun ja viiran välinen nopeusero ja viiralla vallitseva turbulenssi. (Aaltonen 1983b, s. 144-145.)

Paperi valmistetaan kooltaan ja muodoltaan epähomogeenisesta sekä epäsymmetrisestä materiaalista, joten paperin z-suuntainen rakenne on aina vähintään jossain määrin epähomogeeninen, vaikka valmistus tapahtuisi ideaaliolosuhteissa tasaisen z-suuntaisen rakenteen saavuttamiseksi. Käytettävien raaka-aineiden lisäksi epähomogeenisuutta paperin rakenteeseen luo sen valmistusprosessi. Edellä kuvatut vedenpoistotavat; suotautuminen ja saostuminen aiheuttavat molemmat rakenteen z-suuntaan epätasaisuutta ja ovat merkittävimpiä tekijöitä z-suuntaisen hieno- ja täyteainejakauman tasaisuuteen. Hieno- ja täyteaineet pääsevät liikkumaan suhteellisen vapaasti muodostuneessa kuituverkostossa siihen suuntaan, johon vedenpoistoa rainasta tapahtuu. Vedenpoistosuunnan vaikutus z-suuntaiseen jakaumaan on vähäinen rainanmuodostuksessa tapahtuvaan suotautumiseen ja saostumiseen verrattuna, mutta sillä pystytään kuitenkin vaikuttamaan oleellisesti muodostuvan paperin ominaisuuksiin. (Aaltonen 1983b, s. 146-147.)

4.3 Osarainojen adheesio

Monikerrosrajien kerrostamiseen käytetään kolmea eri menetelmää: perälaatikkokerrostamista, viiran päälle kerrostamista ja erikseen muodostettujen osarainojen yhdistämistä. Monikerrosrajien kerrosten välisellä sitoutumisella eli adheesiolla on suuri vaikutus muodostuvan rainan lujuusominaisuuksiin, erityisesti kerrosten väliseen palstautumislujuuteen. Osarainojen yhdistämisen aikana kerrosten välille muodostuvat vetysillat saavat aikaan kerrosten välisen sitoutumisen. Kerrosten välinen tarvittava kosketus saavutetaan märkäpuristuksella ja kerrosten välisen riittävän alhaisen vesifilmin myötä, koska pintajännitysvoima on kääntäen verrannollinen pintojen väliseen etäisyyteen. (Puusta paperiin M-506 1997, s. 45, 240-241.)

Kerrosten väliseen sitoutumiseen vaikuttaa erityisesti jauhatustaso, hienoaineksen z-suuntainen jakauma ja osarainojen kuiva-ainepitoisuus. Yhdistettävien osarainojen liitospintojen hienoaineksen määrä on tärkein kerrosten väliseen lujuteen vaikuttava tekijä. Hienoaines sijaitsee kuitujen välissä päästen muodostamaan pintajännityksen voimaa lisääviä siltoja. Liitospintojen alhaisen hienoainestason aiheuttamaa alhaista kerrosten välistä lujutusta pystytään kompensoimaan spraytärkkelyksen käytöllä. Rauhallisella initiaalivedenpoistolla voidaan parantaa hienoainesretentiota ja vaikuttaa positiivisesti osarainojen väliseen adheesioon. Liian korkeilla märän alueen vetoeroilla märkäpuristuksessa tapahtuu kerrosten välistä liukumaa, koska kerroksien kimmokertoimet ovat yleensä erilaiset. (Norman 2007, s. 278; Puusta paperiin M-506 1997, s. 240-241.)

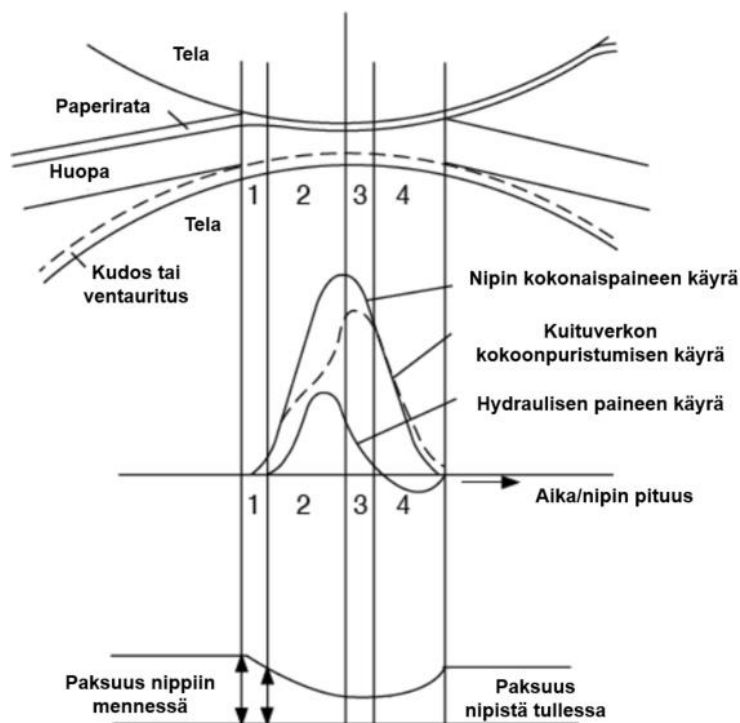
4.4 Märkäpuristuskonkaniemi

Märkäpuristuksella vaikutetaan sekä tuotantoprosessin tehokkuuteen että muodostuvan rainan laadullisiin ominaisuuksiin. Märkäpuristuskonkaniemin vaikutuksesta rainan märkälujuus ja tiheys kasvavat, bulkki heikkenee ja edellä mainittu monikerrosrajien kerrosten välinen adheesio kasvaa. Märkäpuristuskonkaniemi aiheutuu paperin kokoonpuristumisesta nipissä. Campbellin esittämän Terzaghin periaatteen mukaan nipin kokonaispuristusvoimaan vaikuttavat kuituverkostossa tapahtuvan veden virtausvastuksen luoma hydraulinen paine ja nipin aiheuttama rakenteellinen paine. (Paulapuro 2008, s. 344, 347.)

Nilssonin ja Larssonin mukaan nipitapahtuma voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen. Nämä vaiheet on esitetty kuvassa 10.

1. Ensimmäisessä vaiheessa nipin sulkeutuessa telojen välittämä rakenteellinen paine vaikuttaa sekä puristinhuovassa että rainassa kimmoisien voimien välityksellä hydraulisten voimien vaikutusten ollessa vielä vähäistä.
2. Vaiheessa kaksi raina kyllästyy vedellä, koska rakenteellisen paineen seurauksena ilma on poistunut. Hydraulinen paine alkaa kasvamaan, kun veden virtaus siirtyy rainasta vähäisemmän hydraulisen paineen vaikutuksen alasta puristinhuopaa kohti. Huopa kyllästyy vedellä ja ylimääräinen vesi poistuu telapinnoitteiden urituksiin ja/tai sokeaporauksiin. Kokonaispuristusvoima saavuttaa maksimiarvonsa vaiheen kaksi lopussa juuri ennen nipin geometrista keskikohtaa.

3. Vaiheessa kolme kokonaispuristusvoima alkaa laskemaan nipin laajentuessa, mutta kokoonpuristuminen jatkuu siihen asti, kunnes nestegradietti on telaan päin suuntautuva. Kolmannen vaiheen lopussa raina saavuttaa korkeimman kuiva-ainepitoisuutensa.
4. Neljännen vaiheen alussa puristinhuopa ja raina eivät enää ole veden kyllästämiä ja rainan kuiva-ainepitoisuus on korkeimmillaan, mutta nipin laajenemisen seurauksena huovasta rainaan imeytyvä vesi saa aikaan rainan jälleen kastumista. (Knowpap 2019d.)



Kuva 10. Märkäpuristusmekanismin vaiheet (mukaiillen Paulapuro 2008, s. 347).

Märkäpuristusmekanismi vaikuttaa paperin rakenteeseen ja ominaisuuksiin muuttuvien tiheyden, z-suuntaisen tiheysjakauman ja pinnan sileyden kautta. Näiden seurauksen muuttuvat myös monet muut ominaisuudet, kuten esimerkiksi rakenteen z-suuntaiset lujuusominaisuudet ja taivutusjäykkyys. Puristusvoiman vaikutuksesta paperin keskimääräinen tiheys kasvaa ja lisäksi vaikutetaan z-suuntaiseen tiheysjakaumaan. Tiheyden kasvu on suurinta paperista poistuvan veden suuntaan. Puristusvoiman seurauksena kasvanut tiheys vaikuttaa myös kuitujen lähentymiseen ja sitoutumiseen johtaen pysyviin muodonmuutoksiin. Näiden muodonmuutosten seurauksena rainan rakenteen lujuus kehittyy ja se vaikuttaa lujuuden kehitykseen myös kuivumisen aikana.

Märkäpuristusmekanismin kannalta kuituominaisuuksilla on iso vaikutus ja ratkaisevia rainan ominaisuuksia ovat permeabiliteetti, kokoonpuristuvuus ja kapillaarinen rakenne. (Paulapuro 2008, s. 350; 361-362; 364-365.)

4.5 Kuivatuskutistuman ja sisäisten jännityksien vaikutus lujuusominaisuuksiin

Ennen kuivatusosaa ja kuivatusosan alussa paperin lujuuden määrittelevät pääosin kuitujen fysikaalisista ominaisuuksista ja arkin geometriasta riippuvat, sekä kuituja yhteensitovat pintajännitysvoimat. Kuiva-ainepitoisuuden nouseminen ja pintajännitysvoimien vaikutuksesta aiheutunut kuitujen läheneminen johtaa vetysidosten syntymiseen ja paperin lujuusominaisuuksien voimakkaaseen kehittymiseen. (Aaltonen 1983a, s. 155.)

Rainanmuodostuksessa kuitujen satunnaisuuteen perustuvasta asettumistavasta ja paperin rakenteen epähomogeenisuudesta johtuen kuidut ovat rakenteessa sekä rakenteen tason- että paksuuden suunnassa sekoittuneena. Kuivumisen aikana kuituverkosto kutistuu ja kuitujen risteymäkohdissa muodostuu kokoonpuristumista ja tyssääntymistä. Kuidut pysyvät risteymäkohdissa kiinni toisissaan ja kutistuvat pituussuuntaan. Kuitujen kutistuminen muodostuu eri lailla kutistuvien vapaiden ja sitoutuneiden kuitusegmenttien yhteisvaikutuksesta. Kuitujen suuremmasta konesuuntaisesta orientoitumisesta johtuen kuitujen risteymäkohdissa vaikuttavat tyssäävät voimat vaikuttavat enemmän poikkisuuntaisesti orientoituneihin kuituihin ja aiheuttavat kuivatuskutistumaa enemmän poikki- kuin konesuunnassa. (Aaltonen 1983a, s. 155; Levlin, Nordman & Visti 1983, s. 697; Sirviö 2008, s. 78-79.)

Paperin kutistumistaipaisuuteen eniten vaikuttavat tekijät ovat kutistumistaipumuksen suuruuden ja kuivumisjännityksen jakautumisen määrittävät kuitujen sitoutuneisuus sekä orientoituminen. Herkkyys kuivatuskutistumataipaisuudelle lisääntyy tiheyden kasvaessa korkeamman jauhatusasteen seurauksena, koska jauhatuksessa tapahtuu kuitujen poikittaista kutistumaa lisäävää kuituseinämän avautumista (Niskanen 2012, s. 210). Kuivumisjännityksen suuruus on riippuvainen kuivumisnopeudesta. Paperiin kohdistetaan kuivatusosalla ajettavuuden takia konesuunnassa vetojännitys, mikä vähentää konesuuntaista venymää. Kuivatuskutistuman estäminen venytyksellä kasvattaa paperin vetolujuutta ja kimmomoduulia venytyksen suunnassa mitattuna ja murtotyö heikkenee. Vetolujuuden ja venymän kasvaessa paperin puhkaisulujuus kasvaa. Poikkisuuntaisiin

rainan ominaisuuksiin pätevät samat lainalaisuudet, mutta poikkisuuntaisiin ominaisuuksiin käytännössä ainoa vaikutusmahdollisuus on rainaan pintapainetta aiheuttava kuivatusviiran kireys. (Alava & Niskanen 2008, s. 190; Levlin, Nordman & Visti 1983, s. 705, 715-720.)

Venymän kasvattaminen vaikuttaa lisäksi paperin dimensiostabiliteettiin. Paperin kuituverkoston kosteuden muuttuessa tasapainotilan saavuttamiseksi vallitsevan ympäristön kanssa, kuidut joko turpoavat tai kutistuvat. Kuitujen pituusmassan muuttuminen aiheuttaa paperiin merkittäviä, rakennetta sekä taso- että paksuussuunnassa rasittavia sisäisiä jännitteitä, joista osan paperi pystyy viskoelastisena rakenteena relaxoimaan, mutta osa aiheuttaa pysyviä plastisia muodonmuutoksia. Tämä paperin käyttäytyminen kuvaa sen dimensiostabiliteettia. (Ketoja 2008a, s. 320.)

4.6 Kalanteroinnin vaikutus ominaisuuksiin

Kalanteroinnilla parannetaan erityisesti pintaominaisuuksia, mutta vaikutetaan samalla paperin tiheyteen ja paksuuteen. Tavoiteltavat pintaominaisuudet pyritään saavuttamaan mahdollisimman vähäisellä kalanteroinnilla, koska kalanteroinnin aiheuttama tiheyden nousu johtaa tiheyden käänteisarvon bulkin heikentymiseen. Bulkin heikkeneminen vaikuttaa negatiivisesti jäykkyyteen. Viira- ja puristinosilla käytettävä teknologia aiheuttaa monesti toispuoleisuutta. Se puoli paperista, jonka suuntaan vedenpoisto on suurempi, tulee tiiviimmäksi, kun kuituverkoston läpi kulkeva hienoaines tiivistää rakennetta pinnasta. Kalanteroinnilla voidaan rajoitetusti vaikuttaa toispuoleisuuteen. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 27-29.)

5 LAINERIN RAKENNE

5.1 Kuituverkon eri approksimaatiot

Paperin rakennetta voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata kaksiulotteisella satunnaisesti muodostuneella kuituverkostolla, joka koostuu suorista vakiopituuisista osista, joilla ei ole leveyttä. Kaksiulotteisen kuituverkoston rakenne vaikuttaa suurimpaan osaan paperin tasonsuuntaisista mekaanisista ominaisuuksista, kuten kirjallisuudesta löytyvillä tutkimuksilla on todettu. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 14.)

Paperin peittävyyttä pidetään parhaana käsitteenä kuvaamaan kaksiulotteista kuituverkostoa neliömassan sijaan, koska monet paperin ominaisuudet ovat neliömassasta riippuvaisia. Peittävyys määrittää yksiselitteisesti kaksiulotteisen satunnaisen kuituverkoston rakenteen, kun kuituominaisuudet ovat vakiot. Peittävyysasteella saadaan myös selville rainan kuituverkostokerroksien määrä, kun rakenteen kuituverkostokerrokset ovat samanlaisia. Kaava 8 esittää, miten peittävyysaste c voidaan laskea n määrälle tietyn pituuden ja leveyden kuituja pinta-alayksikköä kohti. Peittävyys voidaan määrittää myös kuitujen neliömassan ja paperin neliömassan suhteena. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 14.)

$$c = \frac{nl_f w_f}{A} = \frac{b}{\beta_f} \quad (8)$$

missä,	c	peittävyysaste
	n	kuitujen määrä [kpl]
	l_f	kuitujen pituus [mm]
	w_f	kuitujen leveys [mm]
	A	pinta-ala [mm ²]
	b	paperin neliömassa [g/m ²]
	β_f	kuitujen neliömassa [g/m ²]

Kuituverkoston kuitujen välisellä sitoutuneisuusasteella ja kytkeytyneisyydellä on vaikutus paperin mekaanisiin ominaisuuksiin. Sitoutuneisuusasteen kasvaessa myös paperin vetolujuus kasvaa. Kaksiulotteisen kuituverkoston approksimaation avulla pystytään määrittämään suhteellinen sitoutunut pinta-ala, jolla saadaan selville sitoutuneisuusaste

jakamalla kuitujen sitoutunut pinta-ala kuitujen kokonaispinta-alalla. Kaksiulotteisessa kuituverkostossa paksuussuunnassa ei ole vapaata tilaa, vaan kuidut ovat sitoutuneet toisiinsa jokaisessa kuitujen risteymäkohdassa ja suhteellisesti sitoutunut pinta-ala annetaan peittävyysasteena c . Kuitujen kokonaispinta-ala on tällöin $2cA$. A kuvastaa koko arkkia ja kerroin kaksi kuitujen kahta eri pintaa, jotka kuiduilla on kaikissa kohdissa peittävyysasteen ollessa nolasta poikkeava arvo. Edellä mainittujen perusteella sitoutumaton pinta-ala on tällöin $2A \cdot (1 - e^{-c})$ ja suhteellinen sitoutunut pinta-ala voidaan määrittää kaavasta 9. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 17-18.)

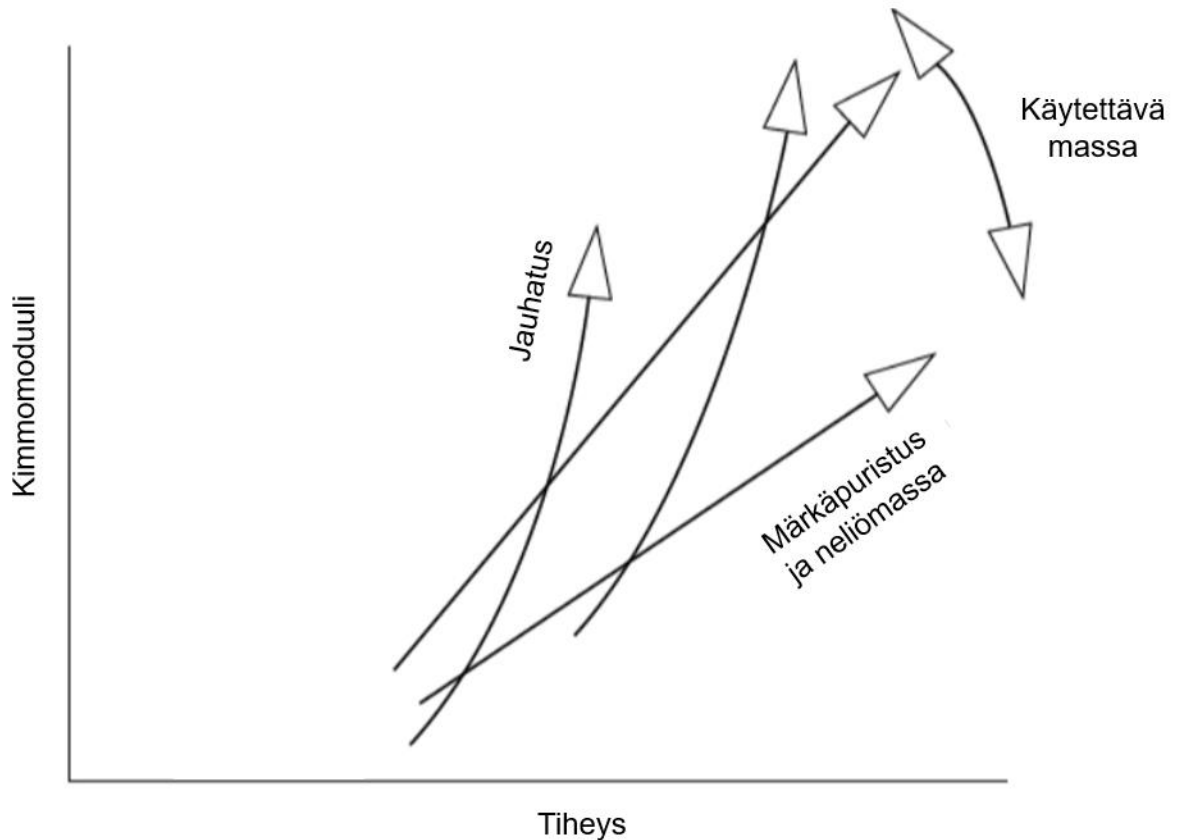
$$RBA = \frac{2cA - 2A \cdot (1 - e^{-c})}{2cA} = 1 - \frac{1}{c}(1 - e^{-c}) \quad (9)$$

missä,	RBA	suhteellinen sitoutunut pinta-ala
	A	pinta-ala [mm^2]
	c	peittävyysaste
	e	Neperin luku

Muodostuvan kuituverkoston ominaisuuksia dominoi kaksiulotteinen tasomainen rakenne, koska kuidut ovat huomattavasti pitempiä kuin paperin paksuus. Tästä huolimatta kolmiulotteisen kuituverkoston huokoinen rakenne on tärkeä paperin ominaisuuksien kannalta. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 12). Kaksiulotteisen kuituverkoston approksimaatio on paperin alhaisesta paksuudesta johtuen hyvä kuvaamaan rakennetta, mutta paperin z-suuntainen huokoinen rakenne on tärkeässä roolissa monien ominaisuuksien kannalta. Paperin rakenne vaikuttaa kaikkiin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten jäykkyys- ja lujuusominaisuuksiin, mutta myös optisiin ominaisuuksiin. Kolmiulotteisen kuituverkoston approksimaatio ei ole yhtä pitkälle kehittynyt kuin kaksiulotteisen kuituverkoston approksimaatio, koska paperi koostuu pitkistä ja suhteellisen ohuista kuiduista ja z-suuntaista rakennetta ei voida pitää homogeenisenä. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 19-20.)

Paperin yleistä rakennetta luonnehtivat neliömassan lisäksi tiheys ja paksuuden määrittävä arkin pintojen välinen etäisyys. Paperin tiheys määritetään neliöpainon ja paksuuden suhteena. Bulkki on tiheydelle käänteinen arvo, kuvaten paperin ominaistilavuutta.

(Niskanen & Pakarinen 2008, s. 20; Nordman 1983, s. 395.) Tiheydellä on merkittävä vaikutus kimmomoduulin ja sitä kautta lujuusominaisuuksien muodostumiseen (Niskanen 2012, s. 206). Tiheyden vaikutusta kimmomoduuliin ja tiheyteen vaikuttavia tekijöitä havainnollistetaan kuvassa 11.



Kuva 11. Tiheyteen vaikuttavat tekijät ja kimmomoduulin riippuvuus tiheydestä (mukaillen Alava & Niskanen 2008, s. 194).

5.2 Z-suuntainen rakenne

Paperin z-suuntainen rakenne on yleensä kerrostumalla ja huopautumalla muodostunut sekarakenne, kuten kappaleessa 4.2.1 on esitetty. Paperivalmistuksessa käytettävät kuidut ovat keskimäärin huomattavasti pitempiä kuin paperin paksuus, mistä johtuen kuidut asettuvat pääosin tasonsuuntaisesti. Korkeammilla sulpun sakeuksilla helpommin muodostuva huopautunut rakenne antaa paperille paremmat z-suuntaiset lujuusominaisuudet kuin alhaisella sakeusalueella muodostuva kerrostunut rakenne. Huopautuneessa rakenteessa paksuussuunnassa tapahtuva kuitujen kietoutuminen vaikuttaa z-suuntaisiin lujuusominaisuuksiin positiivisesti. Z-suuntainen rakenne antaa paperille tiettyjä ominaispiirteitä, jotka riippuvat kerroksellisesta tasonsuuntaisesta kuituorientaatiosta paperin paksuussuunnassa ja kuitusegmenttien z-suuntaisesta orientoitumisesta.

Kerrokselliseen tasonsuuntaiseen kuituorientaatioon vaikuttavat massasulppu ja rainanmuodostusosalla vaikuttava turbulenssi sekä leikkausvoimat. Kuitusegmenttien z-suuntainen orientaatiokulma näkyy käytännössä paperin z-suuntaisissa lujuusominaisuuksissa. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 47-50.)

5.3 Huokosrakenne

Rainanmuodostuksen aikana kuidut eivät enää tietyssä pisteessä kykene jäykkyydeltään taipumaan riittävästi täyttääkseen rakenteeseen jääviä avoimia tiloja. Tämä avoin tila muodostaa huokosverkoston, jonka kokoa kuvataan huokostilavuudella. Huokosten määrä rakenteessa kasvaa lineaarisesti neliömassan sekä peittävyuden kanssa ja huokokset jakautuvat rakenteeseen epätasaisesti. Huokosverkoston tilavuus sekä yksittäisten huokosten muoto ja koko vaihtelevat, ollen suuresti riippuvaisia kuituverkoston rakenteeseen vaikuttavista tekijöistä. Paperin rakenteen tiheyttä nostavat tekijät, joista merkittävimpinä jauhatus, märkäpuristus ja kalanterointi, saavat aikaan kuituverkostossa olevien huokosten keskimääräisen koon pienenemistä ja huokosten häviämistä sekä huokossädejakauman hajonnan pienenemistä. Huokosverkostolla on olennainen rooli moneen paperin ominaisuuteen, kuten ilmanläpäisykykyyn, liimaukseen ja painatukseen. (Aaltonen & Nordman 1983, s. 200-203; Niskanen & Pakarinen 2008, s. 23-24.)

5.4 Formaatio

Rainanmuodostuksen aikana paperinvalmistuksessa käytettävät kuidut, katkeilleet kuidut, mahdollisesti käytettävä täyteaine sekä lisäaineet asettuvat satunnaisesti muodostumassa olevan kuituverkoston päälle. Tämä aiheuttaa sen, että paperin rakenteeseen syntyy pienimittakaavaista neliömassavaihtelua. Tätä vaihtelua nimitetään formaatioksi. Syynä vaihteluun ovat yksittäisten kuitujen asemoitumisen sattumanvaraisuuden lisäksi kuitujen väliset vuorovaikutukset, flokkaantuminen sekä hydrodynaamiset voimat. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 27-29.) Epätasainen neliömassajakauma vaikuttaa paperin rakenteeseen monella tavalla. Paperin pinnan epätasaisuus voi aiheutua erityisesti monikerroslajeilla tapahtuvasta epätasaisesta kuivatuskutistumasta korkeimman neliömassan omaavassa osarainassa. Painopinnan epätasaisuus aiheuttaa ongelmia erityisesti tuotteille, joille painopinta sekä visuaalisuus ovat tärkeitä tekijöitä. Heikko formaatio myös lisää monien paperin laatuominaisuusmittauksien keskihajontaa, erityisesti jos määrittäminen tehdään pieneltä alueelta. (Niskanen & Pakarinen 2008, s. 27-29.)

5.5 Tasonsuuntaisten ominaisuuksien anisotropia

Anisotropialla tarkoitetaan paperin tasonsuuntaisten ominaisuuksien sekä rakenteen eroavaisuuksia kone- ja poikkisuunnassa. Massasulpun tasaisen jakautumisen saavuttamiseksi viiralle käytetään viiran ja huulisuihkun välillä nopeuseroa, mikä saa aikaan nopeuseron myös jo muodostuneen kuituverkoston ja sen päällä suotautuvan massasulpun välille. Tämä nopeusero muodostaa leikkausvoimakentän, joka orientoi kuituja enemmän kone- kuin poikkisuuntaan johtaen kuituorientaatioon. Kuituorientaatio on ensimmäinen anisotropian osatekijä ja estää paperiin muodostumasta isotrooppista, kuitujakaumaltaan tasaista rakennetta. Kuituorientaation lisäksi anisotropiaan vaikuttaa merkittävästi kuivatuskutistuma. Nämä kaksi tekijää määrittävät valmiin paperin tasonsuuntaisten ominaisuuksien anisotropian ja vaikuttavat moniin paperitekniisiin ominaisuuksiin, kuten lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin, reologiaan ja dimensiostabiliteettiin. (Gustafsson & Niskanen 2012, s. 23; Niskanen & Pakarinen 2008, s. 13.) Kuivatuskutistuma on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.5.

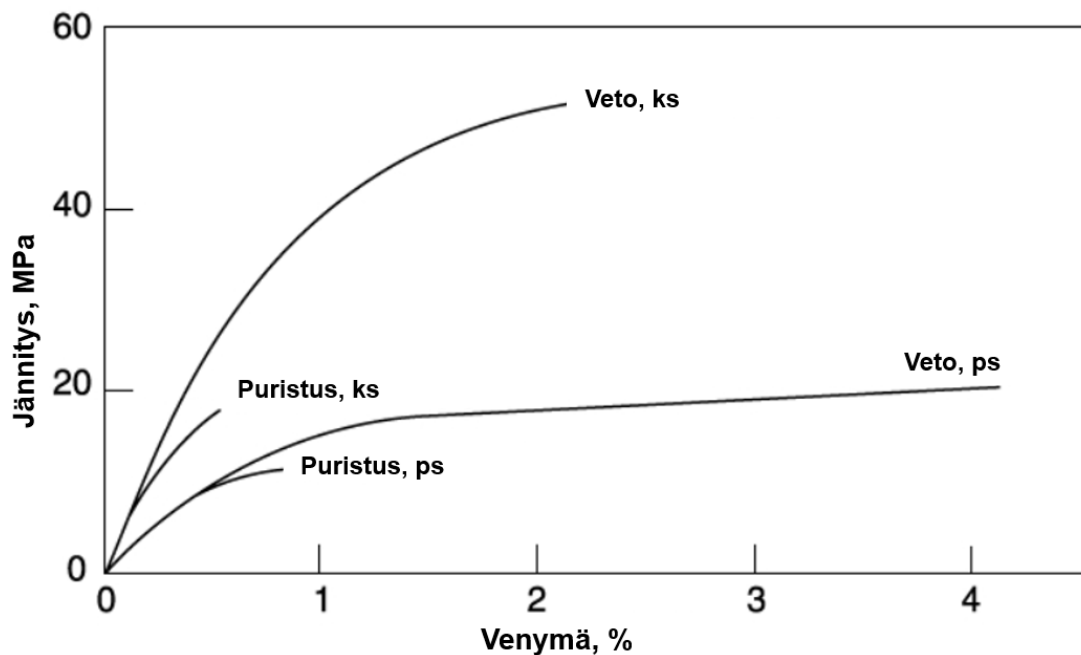
Anisotropia ei ole pelkästään haitallinen ilmiö, koska joissain tapauksissa pelkästään tietyllä tason suunnalla voi olla merkitystä esimerkiksi jatkojalostusprosessin kannalta ja anisotropiaa voidaan valmistusprosessin aikana rajatusti optimoida haluttuun suuntaan prosessiteknisin keinoin, mutta tällöin kone- ja poikkisuuntien ominaisuuksien suhde ei säily samana. Lähtökohtaisesti kun esimerkiksi poikkisuuntaisia ominaisuuksia parannetaan, on otettava huomioon konesuuntaisten ominaisuuksien heikkeneminen. Anisotropian vaikutus eri ominaisuuksiin voi olla erilainen ja vaikutus riippuu lisäksi anisotropian syntymismekanismeista. (Aaltonen 1983a, s. 166-167.)

Mahdollisimman isotrooppisella rakenteella saavutetaan hyvät geometrisen keskiarvon lujuusominaisuudet. Geometrinen keskiarvo saadaan kone- ja poikkisuuntaisten lujuusominaisuuksien tulon neliöjuuresta, $\sqrt{MD \times CD}$. Lujuusominaisuuksien geometrinen keskiarvo on riippumaton kuituorientaatiosta. (Fellers 2007, s. 43; Gustafsson & Niskanen 2012, s. 10; Levlin, Nordman & Visti 1983, s. 720.)

5.6 Reologia ja viskoelastisuus

Paperi on viskoelastinen materiaali, jonka viskoelastinen käyttäytyminen johtuu kuituseinämien rakenteessa kiteisten ja amorfisten alueiden sekoittuneisuudesta. Hemiselluloosa ja ligniini dominoivat paperin viskoelastista rakennetta pehmentäen sitä. Suurin vaikutus paperin viskoelastiseen käyttäytymiseen on massalajilla ja sen käsittelyllä. Paperin reologia kuvastaa sen käyttäytymistä rasituksen alaisena. Reologista käyttäytymistä kuvataan vetokuormituskokeesta tehtävällä jännitys-venymäkäyrällä. (Ketoja 2008b, s. 296-300.) Kaavassa 5 käytetty termi $\frac{l_0}{\Delta l}$ kuvaa venymää ε . Venymän riippuvuus materiaaliin kohdistetusta rasituksesta voidaan selittää Hooken lailla. Kuormituksen lisäksi paperin venyvyyteen vaikuttaa olennaisesti sen kimmomoduuli. (Markström 1991, s. 14.)

Jännitys-venymäkäyrän perusteella paperi ei ole lineaarisesti elastinen materiaali, koska sen jännitys-venymäkäyrä ei ole lineaarinen ja osa syntyneestä venymästä on palautumatonta. Venyminen on palautuvaa käyrän elastisella alueella. Elastisten materiaalien jännitys-venymäkäyrä on myös lineaarinen kuormitussuunnasta riippumatta, mutta paperin anisotropiasta johtuen kone- ja poikkisuuntien käyttäytyminen on erilaista. Kuva 12 esittää paperin käyttäytymisen jännitys-venymäkäyrällä sekä puristuksessa että vedossa. Kuvasta havaitaan jännitys-venymäkäyttyymisen olevan kuormitussuunnasta riippuvaista ja jännitys-venymäkäyrän epälineaarisen osuuden olevan hyvin lyhyt (Kajanto 2008, s. 246).



Kuva 12. Esimerkki kartongin jännitys-venymäkäyrästä kone- ja poikkisuuntaisessa puristus- sekä vetokuormituksessa (mukaiillen Kajanto 2008, s. 246).

Paperin vetokuormituskokeet osoittavat, että vaikutukset paperin rakenteeseen ovat osittain välittömästi palautuvia ja osittain plastisia. Kuormittamisen jälkeen osa muodonmuutoksista on kimmoisia palautuen välittömästi, osa kimmoisista muodonmuutoksista palautuu ajan funktiona ja osa muodonmuutoksista ylittävät myötörajan ja jäävät pysyviksi eli plastisiksi. Mitä suurempi kuormitus paperiin kohdistuu ja suuremmaksi venymä muodostuu, niin sitä suurempi osa muodonmuutoksista jää plastisiksi. (Ketoja 2008b, s. 296-300.)

Kuormitettaessa paperia vakiosuuruisella kuormituksella, se venyy ajan funktiona eli viruu. Virumisessa tapahtuu kuituseinämän fibrillien liukumisen seurauksena plastinen muodonmuutos sitä hitaammin, mitä pienempi kuormitus on. Virumista tapahtuu siihen asti, että paperi katkeaa. Relaksaatio kuvastaa miten paperiin aiheutettu jännitys palautuu ajan funktiona. Viruminen, erityisesti puristusviruminen, on tärkeä ominaisuus pakkauskartonkilajeille. Pakkaukset ovat usein pinottuna päällekkäin pitkiä aikoja ja pakkaukset voivat pitkän virumisen seurauksena vaurioitua, vaikka laatikon puristuslujuuden kesto ei ylitettäisikään. Virumisaste lisääntyy merkittävästi, mikäli ilmankosteus nousee ja suhteellisen ilmankosteuden vaihtelut ovat virumiselle suotuisia. (Ketoja 2008b, s. 303-306.)

6 KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO

Kirjallisuusosa on rakennettu aaltopahvipakkauksesta ja sen lujuuden muodostumisesta alkaen niin, että lainerin lujuusominaisuudet linkittyvät aaltopahvipakkauksen lujuuden muodostumiseen.

Pääosin sekundääripakkauksina käytettävien aaltopahvipakkausten puristuslujuuteen vaikuttavista ominaisuuksista lainereilla pystytään vaikuttamaan aaltopahvin reunalitistyslujuuteen ja taivutusjäykkyyteen. Lainerin poikkisuuntainen puristuslujuus vaikuttaa aaltopahvin reunalitistyslujuuteen ja poikkisuuntainen vetojäykkyys aaltopahvin taivutusjäykkyyteen. Aaltopahvin taivutusjäykkyyteen vaikuttaa lisäksi merkittävästi aaltopahvin paksuus ja paksuuden muodostava, lainerit toisistaan mahdollisimman etäällä pitävä aallotuskartonki. Pintakartonkina toimiva laineri vaikuttaa myös aaltopahvipakkauksen puhkaisulujuuteen.

Kraftlaineriksi nimitetään lainerikartonkia, jonka kuituraaka-ainepohjasta dominoivan osan muodostaa neitseellinen kuitu. Lainereiden tärkeimpiä lujuusominaisuuksia ovat poikkisuuntainen puristuslujuus, poikkisuuntainen vetojäykkyys, puhkaisulujuus ja rakenteen z-suuntaiset lujuusominaisuudet. Rakenteellisista ominaisuuksista lainereiden käytettävyyteen merkittävimpiä tekijöitä ovat lainerin z-suuntainen rakenne, viskoelastinen käyttäytyminen jännitys-venymäkäyrällä ja anisotropia. Anisotropiaa hyödyntämällä voidaan optimoida lainereille tärkeimpiä lujuusominaisuuksia. Isotrooppisella rakenteella saavutetaan hyvät geometrisen keskiarvon lujuusominaisuudet. Z-suuntainen rakenne vaikuttaa sekä osarainojen adheesioon että z-suuntaisiin lujuusominaisuuksiin.

Lainerin lujuusominaisuuksien muodostumisen kannalta yksittäisten kuitujen ominaisuudet ja sitoutumiskyky ovat tärkeässä asemassa. Valmistusprosessin aikana jauhatuksella, kuitujen välistä sidostenmuodostamiskykyä parantavalla kemialla, viiraosan hallinnalla, kuituorientaatiolla, märkäpuristuksella ja kuivatuskutistuman hallinnalla pystytään vaikuttamaan parhaiten muodostuvan lainerin tärkeimpiin ominaisuuksiin.

KOKEELLINEN OSA

7 STORA ENSO OYJ VARKAUDEN TEHDAS

Varkauden tehtaan historia ulottuu 1830-luvulle asti, jolloin teollinen toiminta on alkanut sahaustoiminnoilla. Sanomalehtipaperin tuotanto on alkanut vuonna 1921 ja sulfaattiselluloosan sekä hienopaperin valmistus vuonna 1980. Tehtaalla on ollut enimmillään toiminnassa neljä paperikonetta ja yksi hylsykartonkikone. Vuonna 2015 tehtaan viimeisen toiminnassa olleen paperikoneen tuotantosuunta on muutettu hienopaperista ulkopakkauskartonkeihin eli kraftlainereihin. Nykyisin tehdasalueella toimii Stora Enso Oyj Packaging Materials -divisioonaan kuuluva pakkauskartonkitehdas ja Stora Enso Oyj Wood Products -divisioonaan kuuluvat saha ja LVL-tehdas. (Stora Enso 2019.)

Pakkauskartonkitehdas käsittää sellutehtaan ja kartonkikoneen aputoimintoineen. Sellutehtaalla valmistetaan männystä sekä osittain sahakkeen kautta tulevasta kuudesta korkeasaantoista valkaisematonta selluloosaa ja tehtaan kartonkikoneella kraftlainereita ja white top -kraftlainereita. Tehtaan kartonkikoneen tuotantokapasiteetti on 390 000 tonnia vuodessa. (Stora Enso 2019.)

Kartonginvalmistuksen pääraaka-aineena taustakerrokseen käytetään integroidun sellutehtaan massaa ja kierrätyskuitua. Massa valmistetaan sellutehtaalla jatkuvatoimisella keittoprosessilla ja kuidutetaan keiton jälkeen puskukuiduttimella. Lisäksi viimeisen lajitteluvaiheen rejekti kuidutetaan. Kraftlainerin tuotannossa valkaisematon massa jauhetaan ensin kolmen rinnakkain kytketyn läpivirtaavan kartiojauhimen läpi, minkä jälkeen pintaan menevä massa jauhetaan vielä kahdella kartiojauhimella. Näiden lisäksi käytetään tärkkelystä lisäämään kuivalujuutta ja vaikuttamaan myös retentioon sekä lisäksi retentio- ja säätökemikaaleja.

Koneen viiraosa koostuu kahdesta hybridiformerista, joista molemmille massasulppu syötetään laimennussuhdesäädetyillä perälaatikoilla. Taustaviiraosalla on kuituorientaation ja turbulenssin hallintaan rintatelan ravistin ja formerilla vettä poistetaan ylöspäin neljäkammioisella imulaatikolla. Pintaviiraosalla turbulenssia hallitaan sekä korkeus- että kulmasäädettävällä vedenpoistokalustolla ja formerilla yläpuoliseen vedenpoistoon on kolmekammioinen imulaatikko. Molemmilla viiraosilla alapuolista vedenpoistoa

tehostetaan sekä aiheutetaan rainaan leikkausvoimia kahden letkukuormitteisen kuormituslistaparin avulla. Osarainat yhdistetään pintapuolilta käyttäen kerrosten välisen lujuuden parantamiseksi spraytärkkelystä, minkä jälkeen on vielä alipaineellisia vedenpoistoelementtejä ennen rainan siirtämistä pick-up -huovalla puristinosalle.

Puristinosa on 3-nippinen keskitelapuristin, joista ensimmäisen nipin muodostaa ylätelana toimiva puristinimutela ja alatelana toimiva bombeerattava tela. Toisen nipin muodostavat puristinimutela ja keskitela, kolmannen nipin ollessa kenkätelan ja keskitelan muodostama kenkänippi. Kuivatusosalla on kaikkiaan seitsemän kuivatusryhmää, joista kaksi ensimmäistä on yksiviiravientisiä ns. slalom-ryhmiä ja loput viisi ovat kaksiviiravientisiä. Kuivatusosan lopussa ennen rullainta on öljykierrolla varustetulla termotelalla oleva konekalanteri rainan sileyden hallintaan.

Valmistuneet konerullat leikataan asiakasrulliksi heti kartonkikoneen perässä olevalla kantotelaleikkurilla. Asiakasrulliksi leikkaamisen jälkeen rullat pakataan ja ne siirretään varastoon odottamaan lähetystä asiakkaille sekä maantie- että rautatiekuljetusten toimiessa logistisena ratkaisuna.

8 TAVOITTEET

Tärkeimpien lujuusominaisuuksien hallinta on tärkeässä roolissa kraftlainereiden valmistuksessa. Kokeellisen osan tavoitteena oli todentaa jo tunnistettujen tekijöiden vaikutusta lujuusominaisuuksien hallinnassa sekä löytää tuotantoprosessista uusia tekijöitä, joilla pystytään vaikuttamaan tuotteen lujuusominaisuuksien saavuttamiseen, lujuusominaisuuksien kehittämiseen ja vaihtelun vähentämiseen. Tavoitteena oli myös tunnistaa tekijöitä, joiden vaihtelu on vähäinen, koska myös niiden tekijöiden paremmalla tunnistamisella pystytään kehittämään prosessia. Saatujen tulosten perusteella oli tavoitteena muodostaa vaikutusmatriisi havainnollistamaan, minkä tekijöiden avulla pystytään parhaiten vaikuttamaan lujuusominaisuuksiin.

Työhön sisällytettiin yksi laaja koeajo, jonka tutkimusmenetelmänä käytettiin Taguchi-menetelmää. Tärkeimmiksi ominaisuuksiksi määriteltiin poikkisuuntainen puristuslujuus, vetojäykkyys, puhkaisulujuus, Scott Bond sekä z-lujuus. Näitä laatuominaisuuksia on myös käsitelty työn kirjallisessa osassa.

Aiemmin on tiedostettu, että lujuusominaisuuksiin aiheutuu kausittaista vaihtelua muuan muassa puukemiasta johtuvista syistä. Tehdasintegraatin sellutehtaalta putkimassana tulevan sulfaattiselluloosan tuotantoprosessissa mahdollisesti tapahtuvat vaihtelut tulevat herkästi näkyviin kartonkikoneella. Nämä, sekä muut kontrolloimattomat häiriötekijät ja kontrolloimattomat ympäristötekijät rajattiin ulkopuolelle ja valittavat tekijät keskitettiin kartonkikoneen alueelle.

9 TEOLLINEN KOESUUNNITTELU

Teollisella koesuunnittelulla pystytään tutkimaan helposti muuttujien (input) vaikutusta toisten muuttujien (output) vasteisiin. Koemenetelmä pitää sisällään useita erillisiä kokeita, joissa tehdään koesuunnitelman mukaisia muutoksia muuttujiin. Samanaikaisesti kerätään haluttua mittausdataa, jotta muuttujille saadaan määritettyä halutut vasteet. DOE-menetelmän avulla pystytään tunnistamaan valittujen muuttujien vaikutukset haluttuihin vasteisiin ja näiden pohjalta optimoimaan prosessiolosuhteita. (Minitab LLC 2019a.)

Teollisen koesuunnittelun avulla pyritään erottamaan olennainen epäoleellisesta ja tätä kautta saamaan parannusta aikaan esimerkiksi asiakastyytyvyyteen, tuotantotehokkuuteen ja tuotantoprosessien kustannustehokkuuteen. Tavoitteena sekä tuloksena voi olla esimerkiksi parantunut prosessin materiaalitehokkuus, vähentynyt prosessivaihtelu, laatuominaisuuksissa pääseminen tavoitetasolle, vähentynyt tuote- tai prosessikehitykseen käytetty aikapanos tai vähentyneet kokonaiskustannukset. (Montgomery 2013, s. 8.) Teollisessa koesuunnittelussa käytetään asiakastarpeita, tieteellistä tietoa ja insinööritietoa tutkimus- ja kehitystoiminnan työkaluina, jotta prosessin ulostulona saadaan korkealaatuinen, halutut spesifikaatiot täyttävä ja kustannustehokkaasti valmistettu tuote (Karjalainen 1992, s. 10-11).

9.1 Taguchi -koemenetelmä

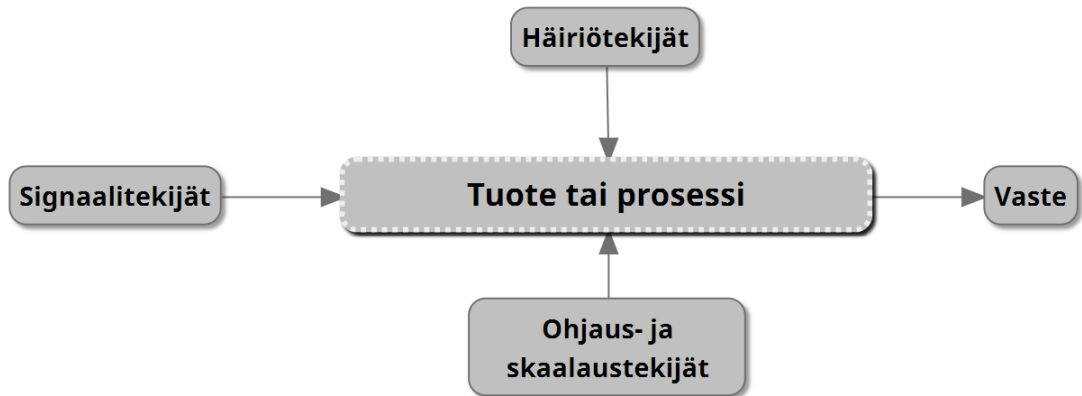
Taguchi -menetelmä on tehokas ja systemaattinen tuotteiden tai prosessien kehitykseen käytetty koemenetelmä. Monesta muusta laatufilosofiasta poiketen Taguchi -menetelmässä laatuun vaikutetaan minimoimalla tuotteen tai prosessin ominaisuuksien vaihtelua. Menetelmä muodostuu eri suunnitteluvaiheista ja niitä yhdistävästä laatufilosofiasta. Suunniteltujen kokeiden avulla selvitetään prosessien tai tuotteiden tasaisuuteen ja laatuun vaikuttavat tekijät ja mahdollistetaan niiden optimointi. Taguchi filosofia perustuu kolmeen eri konseptiin:

1. Laatu pitää suunnitella tuotteeseen tai prosessiin.
2. Laatu saavutetaan parhaiten vähentämällä tavoitetasosta poikkeavaa vaihtelua. Prosessit pitää suunnitella siten, että ne ovat immuuneja ympäröiville kontrolloimattomille muuttujille.
3. Laatukustannukset pitää mitata poikkeamana. (Roy 2010, s. 10.)

Laadulla kuvataan kykyä täyttää asiakastarpeet ja odotukset (Juran & Godfrey 1998, s. 20-21) sekä sen olevan käänteisesti verrannollista vaihteluun (Montgomery 2009, s. 6). Laatuparannus taas on vaihtelun vähentämistä (Montgomery 2009, s. 7) ja laaduttomuus on keskiarvopoikkeamaa markkinoiden tarpeesta tai valmistusprosessissa ilmenevää poikkeamaa (Piirainen 2014, s. 80). Edellä kuvattuihin laadun määritelmiin nojaten Taguchi-menetelmä kytkeytyy hyvin vahvasti laadunparantamiseen ja laadunparannuksen seurauksena muodostuvaan lisäarvoon parempina tuoteominaisuuksina sekä prosessien parempana käytettävyytenä. Laatua mitataan suorituskykyindekseillä, joilla kuvataan, kuinka hyvin suunniteltu laatu kyetään täyttämään (Piirainen 2014 s. 82).

Aiemmin kuvattujen konseptien toteutumiseksi Taguchi -menetelmässä käytetään kolmevaiheista toteutusprosessia, sisältäen systeemisuunnittelun, parametrisuunnittelun ja toleranssisuunnittelun. Systeemisuunnitteluvaiheessa pyritään tunnistamaan sopivat tasot suunniteltaville tekijöille sekä määritetään sopivat tuoteominaisuudet ja prosessiparametrit perustuen olemassa olevaan teknologiaan ja prosesseihin. Parametrisuunnittelu keskittyy systeemisuunnitteluvaiheen tuloksien mukaiseen testaukseen ja kombinaatioiden etsimiseen, jotka tuottavat parhaan mahdollisen laadun tutkittavalle tuotteelle ja/tai prosessille. (Roy 2010, s. 12.) Parametrisuunnitteluvaiheessa tekijät jaetaan neljään eri ryhmään, joiden vaikutus tuotteen ja prosessin suunnitteluun havainnollistetaan kuvassa 13:

1. Signaalitekijöihin, joilla käyttäjä ohjaa prosessia haluamansa ulostulon mukaan.
2. Ohjaustekijöihin, jotka ovat suunnittelijan asettamia parametriarvoja. Ohjaustekijät pyritään optimoimaan parhaalle mahdolliselle tasolle käyttäen kriteerinä esimerkiksi stabiilisuutta tai robustisuutta.
3. Skaalaus- eli tasotekijöihin, joilla säädetään haluttu yhteys signaalitekijän ja ulostulon välille.
4. Häiriö- eli kohinatekijöihin, jotka ovat prosessiin tai tuotteen laatuun häiriöitä aiheuttavia kontrolloimattomia tekijöitä. (Karjalainen 1989, s. 48.)



Kuva 13. Tuotteen ja prosessin suunnitteluun vaikuttavat tekijät (mukaillen Karjalainen 1989, s. 49).

Toleranssisuunnittelu keskittyy parametrisuunnitteluvaiheen jälkeiseen optimointiin. Tuotteeseen tai prosessiin vaihtelua aiheuttavien tekijöiden toleransseja tiukennetaan laatuvarian vähentämiseksi. Toleranssivaiheessa laatuvarian vähentämiseksi syntyy hyvin usein kustannuksia esimerkiksi parempien raaka-aineiden tai kehittyneemmän tuotantoteknologian hankinnan seurauksena. (Roy 2010, s. 12-13.)

Taguchi -menetelmässä käytetään koesarjaa, joka muodostuu erilliskokeista. Koesuunnittelussa käytetään ortogonaalimatriisia, jossa tekijät ovat toisistaan riippumattomia. Koesuunnittelu ja laadunkehitys Taguchi-menetelmällä perustuu sopivan tekijän ja tason yhdistelmään, jolla suorituskyvyn vaihtelua saadaan vähennettyä sekä tekijöiden tasojen optimointiin sellaisiksi, joilla suorituskyky tuodaan tavoiteltavalle tasolle. (Roy 2010, s. 5.) Koesuunnittelun avulla voidaan lisäksi löytää kohinamuuttujia ja mahdollistaa kohinamuuttujien vaikutuksen vähentäminen tuotteeseen tai prosessiin sijoittamalla niitä ortogonaalisiin koematriiseihin kontrolloitavien muuttujien lisäksi (Minitab LLC 2019c; Roy 2010, s. 6). Ortogonaalimatriisia käyttämällä saavutetaan merkittäviä etuja verrattuna esimerkiksi yksitekijäkokeisiin (OFAT, one factor at time) (Montgomery 2013, s. 4). Ortogonaalimatriisien suurimpana etuna ovat kyky käsitellä suurta yhtäläisessä asemassa olevaa tekijämäärää, luotettavien ja hyvin toistettavissa olevien tulosten saaminen ja tekijäyhdistelmien vaikutusten todentaminen (Karjalainen 1989, s. 55). Esimerkiksi verrattuna yhdentoista tekijän 12 erilliskoetta sisältävään L12 -matriisiin kokeeseen, OFAT -menetelmällä tarvittaisiin 2048 ($=2^{11}$) erillistä koetta samojen asioiden selvittämiseksi

10 TAGUCHI L12 KOEAJO

Koeajon suunnittelussa mukailtiin hyvin pitkälle Karjalaisen (1992, s. 54) esittämää mallia Taguchi-ongelmanratkaisumenettelyn kulkuprosessista. Karjalaisen esittämä prosessi pitää sisällään vaiheet: ongelma-kohteen määrittely, tavoitteen määrittely, ohjaus- ja häiriötekijöiden sekä tasojen määrittely, kokeen suunnittelu, kokeiden suoritus ja datan kerääminen, datan analysointi ja tulosten tulkinta. Ensimmäisenä tunnistettiin tuotteen ongelma, johon haluttiin parannusta ja tämän jälkeen asetettiin tavoitteet. Yhtenä olennaisena tavoitteena oli, että kokeen aikana syntyvä tuotanto säilyy tuotespesifikaatioiden mukaisena.

Seuraavaksi prosessia jatkettiin aivoriihillä, joissa keskityttiin listaamaan mahdollisia muuttujia ja niiden tasoja. Tässä vaiheessa oli mukana tuotantolinjan johto, tutkimus- ja kehitystoiminnan henkilöstöä, laboratorion henkilöstöä ja lisäksi muuttujista käytiin keskustelua operaattoreiden kanssa. Muuttujien valinnassa rajoitteita asetti se, että vain osa muuttujista voi olla hitaasti läpi tulevia koeohjelman keston sovittamiseksi kartonkikoneella ajettavaan tilauksen keston. Tekijöiden tasot valittiin sellaisiksi, että ne olivat toteuttamiskelpoisia sekä yksittäisinä muutoksina että myös osana jokaista erilliskokeiden yhdistelmää. Tekijöiden tasojen valinta tulee tarkastella aina sekä tekijäkohtaisesti että erilliskoekohtaisesti. Tekijöiden tasot pyrittiin asettamaan toteuttamiskelpoisuutensa lisäksi riittävän kauaksi toisistaan selkeiden vasteiden saavuttamiseksi.

Aivoriihien aikana päätettiin koematriisiksi 2-tasoinen L12, mikä ohjasi tekijöiden ja niiden tasojen määrittelyä aivoriihissä. 2-tasoisessa L12 koematriisissa yksi koe sisältää kaksitoista erillistä koetta, yksitoista tekijää sekä jokainen tekijä saa kaksi eri arvoa. Kuvassa 14 esitetään esimerkki 12 erilliskoetta sisältävästä L12-ortogonaalimatriisista, jossa on 11 tekijää (A-L) ja jokainen näistä tekijöistä saa kaksi tasoa (1 ja 2). Mitä lähempänä tekijä on matriisin vasenta reunaa, sitä vähemmän siihen tehdään muutoksia koesarjan aikana. Koesuunnittelussa tulee pyrkiä asettamaan hitaasti läpitulevat muutokset mahdollisimman vasempaan reunaan koesarjan kokonaiskeston lyhentämiseksi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Kuva 14. Esimerkki L12 ortogonaalimatriisista.

10.1.1 Kokeeseen valittujen tekijöiden esittely

Suoritettuun kokeeseen valittiin seuraavat tekijät:

- 1. Taustamassan jauhatuksen EOK.** Taustamassan jauhatuksen EOK valittiin ensimmäiseksi muuttujaksi, koska pääraaka-aineena käytettävä korkeakappainen sellu muodostaa merkittävän osan sekä koko tuotteen että taustakerroksen raaka-ainepohjasta ja taustakerros on neliömassaltaan pintakerrosta suurempi. Kuituraaka-aineen erilaisella jauhatuksella pystytään siis vaikuttamaan merkittävästi koko tuotteen ominaisuuksiin. Taustajauhatuksesta muuttuvaksi parametriksi valittiin EOK erityisesti sen takia, että muuttujaa on huomattavan paljon helpompi kontrolloida kuin massan jauhatusasteesta kertovaa SR-lukua.
- 2. Pintamassan jauhatuksen EOK.** Pintamassan jauhatuksen EOK:n valinta muuttujaksi perustui pitkälti samoihin syihin. Pintakerroksen raaka-aineena koeajettavalla lajilla käytetään pelkästään oman sellutehtaan sellua ja pintakerroksen kuituspension erilaisella käsittelyllä arvioitiin pystyttävän vaikuttamaan muodostuvan rainan rakenteeseen sekä valmistuvan tuotteen laatuun.
- 3. RCF osuus taustakerroksesta.** Kierrätyskuidun osuus taustakerroksesta valittiin muuttujaksi, koska suuremmalla kierrätyskuidun määrällä arvioitiin olevan lujuuksia heikentävä vaikutus. Kierrätyskuitu sisältää kierrätyskuitulajista riippuen tietyn osuuden päällystettyjä kartonkeja, jotka nostavat tuotteen tuhkapitoisuutta ja heikentävät lujuusominaisuuksia.
- 4. Silika pintaan ja taustaan.** Kartonkikoneella käytetään anionista silikaa eli piioksidia sekä tukemaan retention toimintaa että helpottamaan vedenpoistoa.

Aiempiin kokemuksiin peilaten retention ajaminen erilaisella komponenttien suhteella vaikuttaa rainan tiheyteen. Silikan määrää muuttamalla pystytään rainan tiheyden lisäksi vaikuttamaan retention ja vedenpoistoon.

5. **Pinnan s/v -nopeusero.** Pintaviiraosan sulppusuihkun ja viiran välinen nopeusero valittiin muuttujaksi, koska linerille poikkisuuntaiset lujuusominaisuudet ovat aaltopahvin rakenteen kannalta olennaisia. Nopeuseroa muuttamalla pystytään vaikuttamaan kuituorientaatioon ja tätä kautta muodostuvan rainan rakenteeseen ja edelleen laatuominaisuuksiin.
6. **Taustan s/v -nopeusero.** Taustaviiraosan sulppusuihkun ja viiran välinen nopeusero valikoitui muuttujaksi samoista syistä, kuin pinnan suihku-viira -nopeusero.
7. **Taustan massatärkkelyksen määrä.** Massatärkkelys on kartonkikoneella käytettävä ainoa kuivalujaliima ja sen määrällä pystytään vaikuttamaan tuotteen lujuusominaisuuksiin sidosten muodostamisen kautta. Juuri taustakerroksen massatärkkelys valittiin muuttujaksi taustakerroksen dominoivan osuuden takia suhteessa pintakerrokseen.
8. **Spraytärkkelyksen määrä.** Pinta- ja taustakerroksien välisen adheesion lisäämiseksi käytetään sumutettavaa tärkkelyslietettä. Spraytärkkelyksellä oletetaan olevan vaikutus kerrosten väliseen sitoutumiseen ja sitä kautta erityisesti kerrosten väliseen palstautumislujuuteen. Spraytärkkelyksen vaikutus lujuusominaisuuksien hallintaan haluttiin todentaa.
9. **3-puristimen viivakuorma.** Kokemusten ja teorian mukaan vielä suhteellisen alhaisessa kuiva-aineessa tehtävällä märkäpuristuksella pystytään vaikuttamaan rainan tiheyteen ja lujuusominaisuuksiin. Kenkäpuristimen märkäpuristusmekanismin vaikutus lujuusominaisuuksiin haluttiin todentaa.
10. **Taustaviiraosan rintatelan ravistimen iskunpituus.** Taustaviiraosalla käytetään ravistinkoneikkoa muodostamaan epäkeskomassaparien avulla halutun amplitudin ja taajuuden mukainen ravistusliike perälaatikon jälkeen olevalle rintatelalle. Ravistusliike vaikuttaa kuituorientaatioon ja turbulenssin muodostumiseen rainanmuodostuksessa. Ravistimen iskunpituus valittiin muuttujaksi kuituorientaatioon vaikuttamisen tutkimiseksi.
11. **Taustaviiraosan rintatelan ravistimen iskuntaajuus.** Ravistimella pystytään säätämään myös amplitudin taajuutta. Iskuntaajuuden vaikutus haluttiin myös tutkia edellä mainituista syistä johtuen.

Tekijöiden valinnan jälkeen käynnistyi koeohjelman suunnittelu. Koeohjelma suunniteltiin hyödyntäen Minitab-ohjelmiston DOE-valikon alta löytyvää Taguchi-menetelmää. Tekijät sijoitettiin koeohjelmaan edellä mainittuun järjestykseen niiden estimoitujen läpimenoaikojen mukaan eli kauanko muutoksien tekemisestä menee siihen, että vaikutukset ovat tulleet täysimääräisenä kartonkikoneen rullaimelle. Koeohjelman valmistumisen jälkeen ohjelma katsottiin läpi kokeen suorittavien henkilöiden kanssa, että myös he kokivat muuttujien tasot sekä yhdistelmät toteuttamiskelpoisena. Kokeen aikana syntyvä tuotanto haluttiin pitää tuotespesifikaatioiden mukana, koska tuotanto meni tilauksiin ajo-ohjelman mukaisesti. Tämän jälkeen koeohjelman toteuttaminen hyväksyttiin vielä linjajohdolla.

Kokeen suunnittelun jälkeen siirrytään suorittamisvaiheeseen esivalmisteluineen. Teollisessa kokeessa häiriötekijöitä on paljon ja kokeen suorittamisen ajaksi kaikki vakioitavissa oleva tulee vakioida virheiden välttämiseksi. Koeohjelma tulee pystyä suorittamaan mahdollisimman tarkkaan suunnitelman mukaan tulosten virheellisen tulkinnan välttämiseksi. Myös mittauksen tekemisessä tulee olla tarkkana virheiden välttämiseksi.

10.2 Koeajon suoritusmenetelmät ja mittaukset

Koeajo suoritettiin 21.11.2019 – 22.11.2019 välisenä aikana. Koe toteutettiin 225 g/m² kraftlainerilla. Kokeen aloitushetken mukainen tilanne vakioitiin muiden kuin kokeeseen valittujen muuttujien osalta ja koeohjelma käytiin vielä läpi operaattoreiden kanssa aloitushetkellä. Tämän jälkeen koe käynnistettiin operaattoreiden toimesta aloittamalla valittujen tekijöiden tasomuutokset. Yksityiskohtainen koeajosuunnitelma on liitteenä I.

Jokaista erilliskoetta kohden ajettiin kolme konerullaa, joista kaksi ensimmäistä oli aina siirtymäkonerullia muutoksien läpimenoajan takia ja kolmas konerulla oli varsinainen koekonerulla. Ensimmäisestä siirtymävaiheen konerullasta otettiin poikkiratanäyte ja arkki keskeltä Scott Bond -mittausta varten, jotta voitiin varmistua tuotteen pysyvän spesifikaatioiden mukaisena. Kolmannen konerullan pinnasta otettiin viisi poikkiratanäytettä sekä arkki keskeltä jokaisessa koepisteessä. Lisäksi koeohjelman aikana otettiin massanäytteitä, koska koeohjelmassa tehtiin jauhatusmuutoksia. Massanäytteet otettiin sekä tausta- että pintamassasta alhaisemmilla ja korkeammilla EOK-tasoilla.

Koevaiheen poikkiratanäytteistä yksi ajettiin Valmet PaperLab- mittalaitteella kokeen aikana. Mittalaite antaa tuotteesta merkittävän määrän erilaisia laatumäärytyksiä. Tämä poikkiratanäyte toimi samalla käynninaikaisena laadunvarmistuksena. Lisäksi arkista määritettiin palstautumislujuus.

Kolme muuta poikkiratanäytettä ajettiin myöhemmin PaperLab:lla. Poikkiratanäytteitä otettiin kolme kappaletta myöhemmin mitattavaksi. Poikkisuunta jaettiin kolmeen osaan, jolloin jokaiselle alueelle (etu-, keski- ja takareunan alue) tuli yhdestä poikkiratanäytteestä 7 yksittäistä mittaustulosta, kun PaperLab mittaa koko poikkisuunnasta 21 yksittäistä mittaustulosta. Kolmen poikkiratanäytteen tulokset alueittain (etu-, keski- ja takareunan alue) yhdistämällä yhdelle alueelle saatiin 21 mittaustulosta ja standardin vaatimukset täytettyä. Standardi edellyttää 20 yksittäisen mittauksen keskiarvoa yhtä luotettavan pidettävää mittaustulosta varten.

SCT-mittauksista tehtiin myös koekohtaiset profiilit poikkisuuntaisen SCT-profiilin selvittämiseksi (liite III). Lisäksi koeajon jälkeen poikkiratanäytteistä tehtiin formaatio- ja palstautumislujuusmittaukset. Koeajon aikana otetuista massanäytteistä määritettiin kuituominaisuudet kajaaniFS300 -mittalaitteella ja massan lujuusarvot vetolaitteella.

Taulukko 1. Kuitu- ja massaominaisuuksien mittaamiseen käytetyt standardit

Käytetty standardi:	Mitattu ominaisuus:
ISO 5267/1	SR°
-	Kuidun pituuspainotettu pituus, kuidun leveys, kuidun kiharuus ja kuidun polvekeindeksi
ISO 1924-2/3	Käsiarkkien vetolujuus ja vetojäykkyys

Taulukko 2. Kraftlainerin lujuusominaisuuksien mittaamiseen käytetyt standardit

Käytetty standardi:	Mitattu ominaisuus:
ISO 9895	SCT
ISO 1924-2	Vetojäykkyys
ISO 2759	Puhkaisulujuus
TAPPI T 569, ISO 16260	Scott Bond
ISO 15754	Z-lujuus

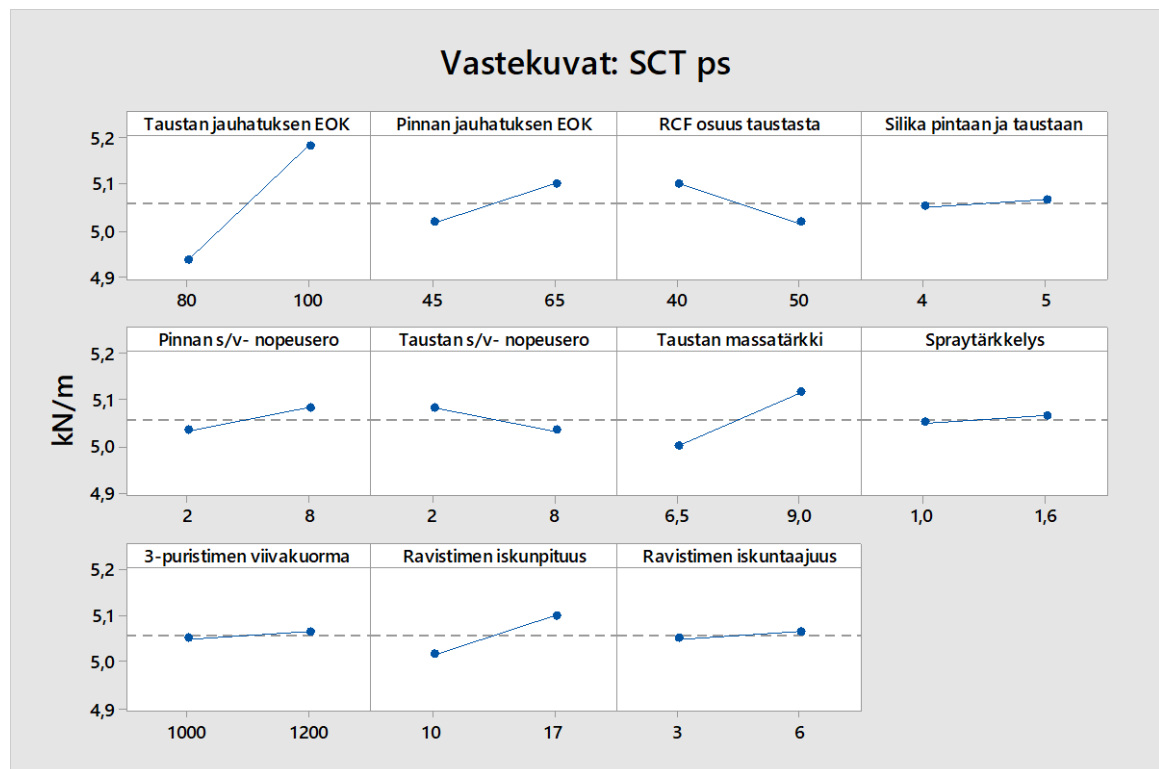
10.3 Koeajon vastekuvat ja pareto-diagrammit

Koeohjelman suorittamisen ja mittausten tekemisen jälkeen tehtiin kokeesta saadun datan analysointi. Koeajon mitatuista vasteista tehtiin Minitab-ohjelmistolla jokaiselle mitatulle laatuominaisuudelle vastekuvat, varianssianalyysi ja varianssianalyysin avulla pareto-diagrammit. Vastekuvilla saadaan hyvin selville eri tekijöiden vasteiden suunta ja suuruus ja pareto-diagrammeilla muuttujien vaikuttavuus. Pareto-diagrammien avulla saadaan selville hyvin eri muuttujien selittävyysaste. Vastekuvan ja pareto-diagrammin yhteisellä tulkinnalla saadaan kattavasti tietoa siitä, mihin tekijöihin kannattaa keskittyä ja mitkä ovat robusteja muutosten suhteen. Seuraavaksi esitetään tulokset tärkeimpien laatuominaisuuksien osalta ja muut tulokset on sisällytetty työn liitteeseen II.

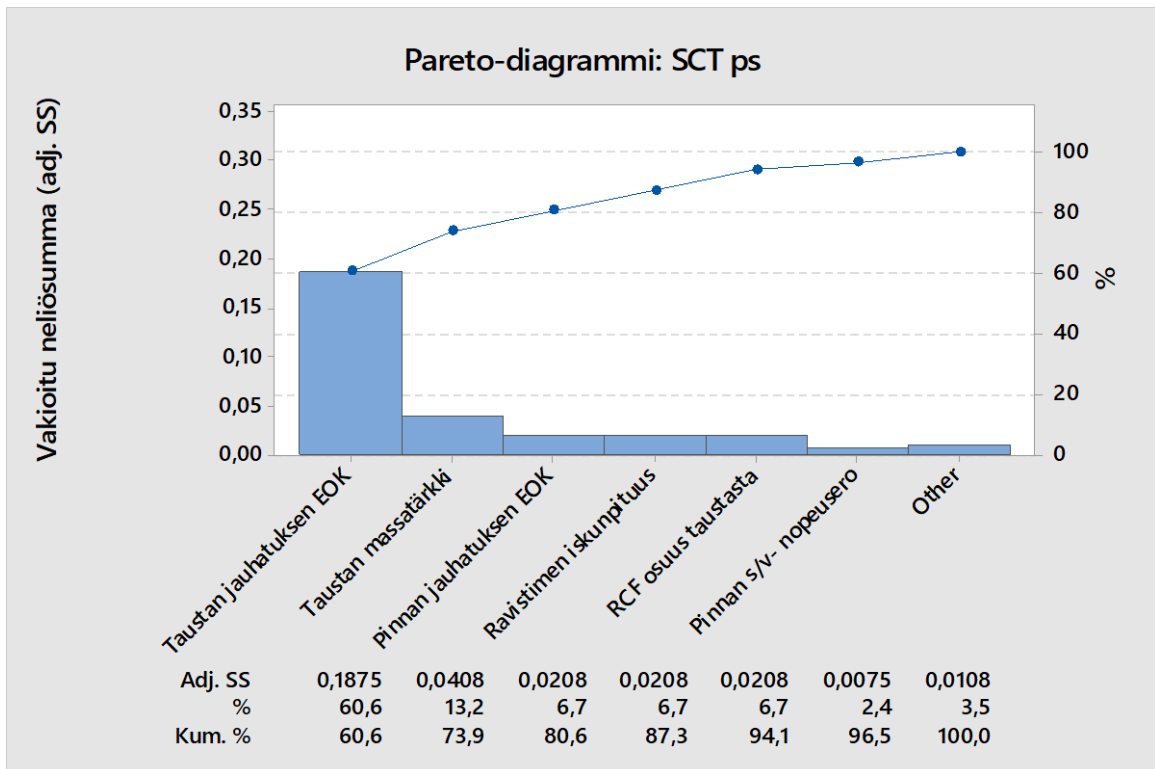
SCT:n osalta määritettiin vastekuvat ja pareto-diagrammit sekä kokeen aikana mitatulle käynninaikaiselle koko poikkisuunnan laaduntarkkailunäytteelle että kokeen jälkeen määritetyille etu-, keski- ja takareunan alueille. Kuvasta 15 huomataan, että poikkisuuntaiselle puristuslujuudelle saavutetaan paras vaste taustan jauhatuksen korkeammalla EOK:lla. 20 kWh/t EOK-lisäyksellä saavutetaan noin 0,3 kN/m positiivinen vaikutus, mitä voidaan pitää kohtuullisena suhteutettaessa se ajossa olleen lajin tavoitearvoon. Kuvasta 16 nähdään, että tämä tekijä edustaa noin 60 %:a kaikista koeohjelmassa olleista tekijöistä. Korkeampi jauhatuksen EOK-taso nostaa jauhatustasetta, fibrilloi kuituja enemmän ja parantaa niiden sitoutumiskykyä, mikä todennäköisesti yhdistettynä taustamassan jauhatuksen dominoivaan rooliin saa tämän vaikutuksen aikaan. Jauhatuksella myös lisätään paperin tiheyttä, mikä vaikuttaa positiivisesti puristuslujuuteen. Myös tiheyttä lisäävä märkäpuristaminen parantaa puristuslujuutta, mutta ei läheskään yhtä

paljon kuin jauhatus (kuvat 15-16). Kirjallisuudesta löytyy vastaavia tutkimustuloksia. Nordstöm (2016) on todennut, että rainan tiheyttä kasvattavista mekanismeista jauhatuksella pystytään parhaiten vaikuttamaan positiivisesti lainereiden puristuslujuuteen.

Jauhatusasteen kasvaessa myös suotautumisvastus kasvaa rainanmuodostuksen aikana ja vedenpoisto hidastuu. Tämä muuttaa myös viiraosan olosuhteita ja siirtämällä vesirajaa pidemmälle sekä viemällä enemmän vettä formerille, jolloin rainan z-suuntainen rakenne muuttuu. Koko poikkisuunnan puristuslujuudelle muillakin tekijöillä saavutetaan vasteita, mutta tarkasteltaessa pareto-diagrammia huomataan, että muiden kokeen tekijöiden vaikutus on hyvin alhainen; ainoastaan taustan massatärkkelys selittää vaikutuksia jonkin verran, mutta senkin osuus on vain 13 % koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä.



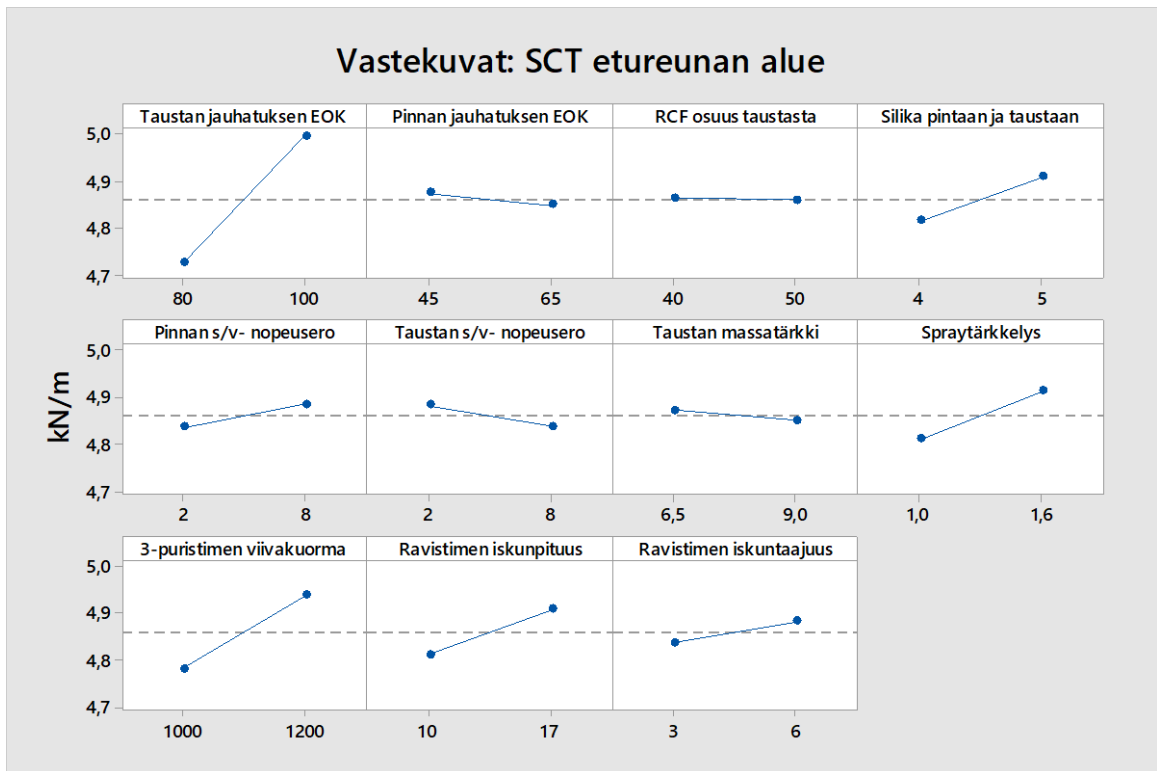
Kuva 15. SCT ps vastekuvat.



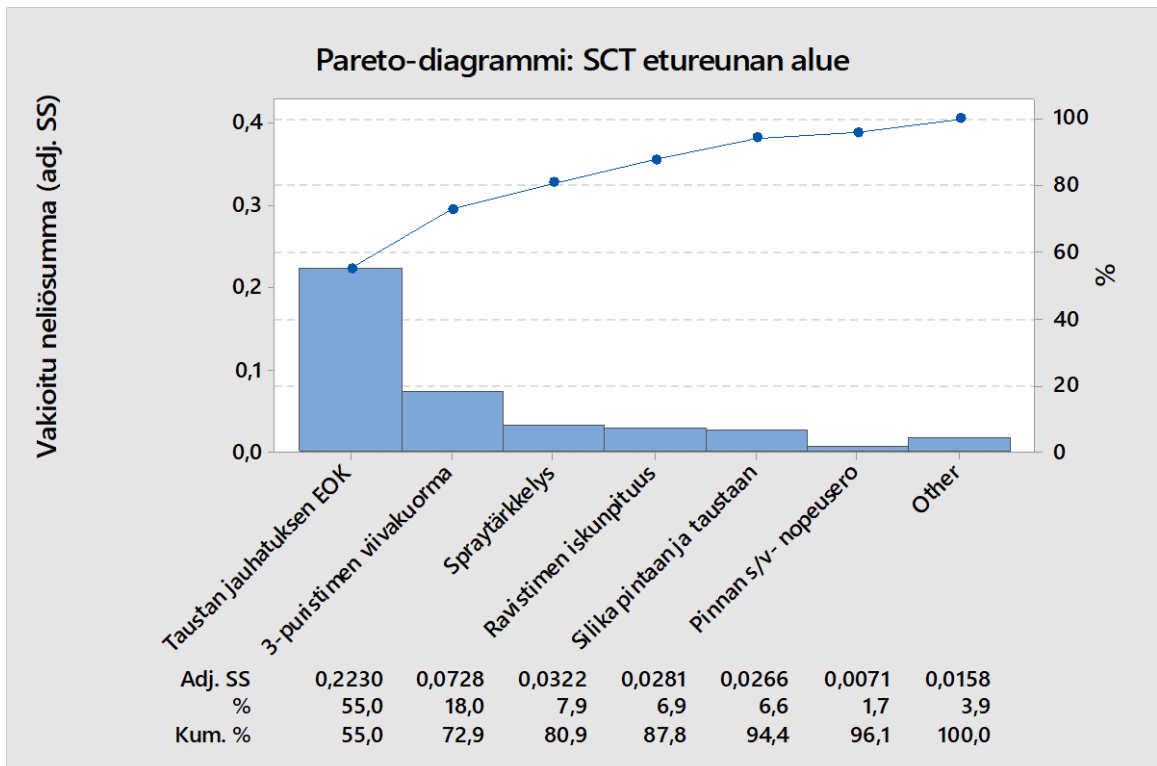
Kuva 16. SCT ps pareto-diagrammi.

Tulosten perusteella (kuvat 17-22) voidaan havaita, että eri tekijöille saadut vasteet ja vaikuttavuudet ovat erilaisia verrattaessa etu-, keski-, ja takareunan alueiden puristuslujuuksia. Eri poikkisuunnan alueille saadut tulokset eroavat myös verrattaessa koko poikkisuunnan puristuslujuuteen. Merkityksettömien vähäisten vaikutusten tekijöiden järjestyksessä on useita eroja verrattaessa koko poikkisuunnan puristuslujuuteen, mutta myös toiseksi eniten vaikuttava tekijä on näillä kolmella erillisellä poikkisuunnan alueella 3-puristimen viivakuorma, eikä taustan massatärkkelys, kuten koko poikkisuunnan puristuslujuudella. 3-puristimen viivakuorman osuutta vaikuttavista tekijöistä rainan poikkisuunnan osa-alueille voidaan pitää kohtuullisena, sen ollessa keskimäärin 21 %. Taustan jauhatuksen EOK oli kaikille poikkisuunnan alueille parhaan vasteen antanut tekijä selittävyysasteen vaihdellessa noin 42-55 % välillä koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä.

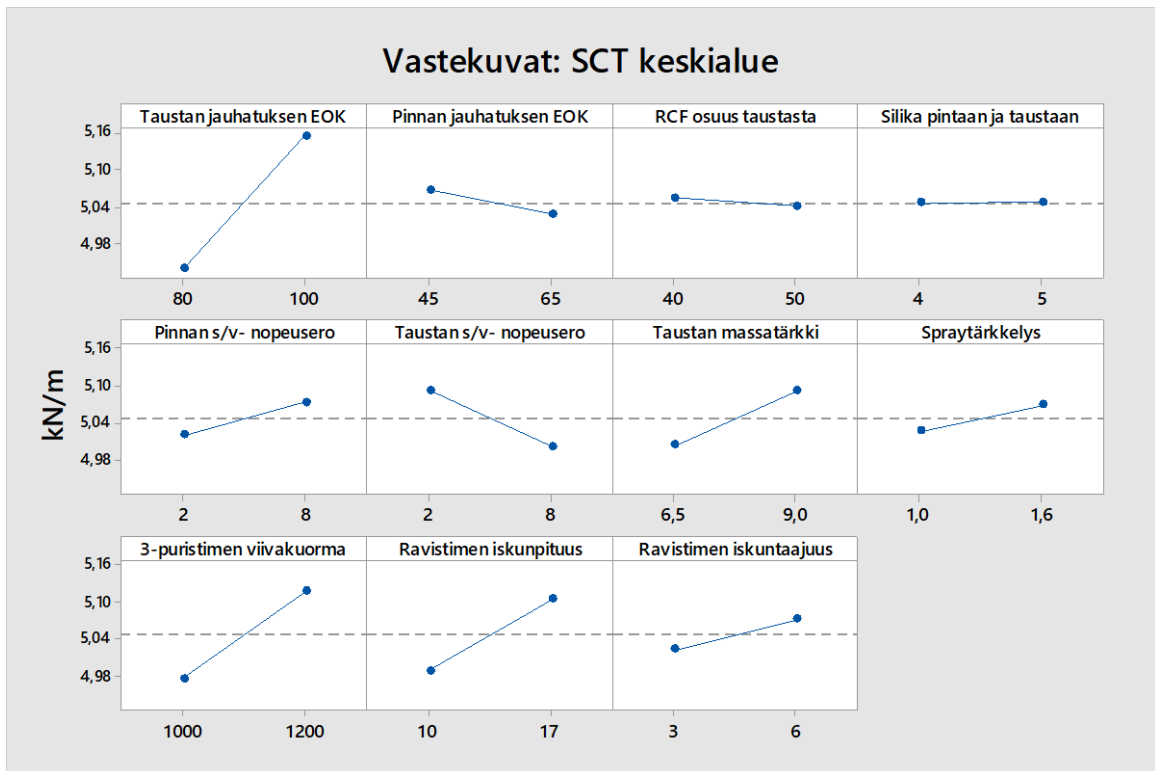
Syitä eroille poikkisuunnan puristuslujuuden syntymiseen koko poikkisuunnan ja eri alueiden välillä voidaan arvioida tulevan esimerkiksi eroavaisuuksista poikkisuunnan neliömassaprofiilissa. Yksittäinen puristuslujuusmittaus käsittää hyvin pienen alueen ja vaikka yhtä mittaustulosta varten tuloksiin on sisällytetty 21 erillistä mittausta, voi pienimittakaavainen neliömassavaihtelu aiheuttaa eroavaisuuksia mittaustuloksiin.



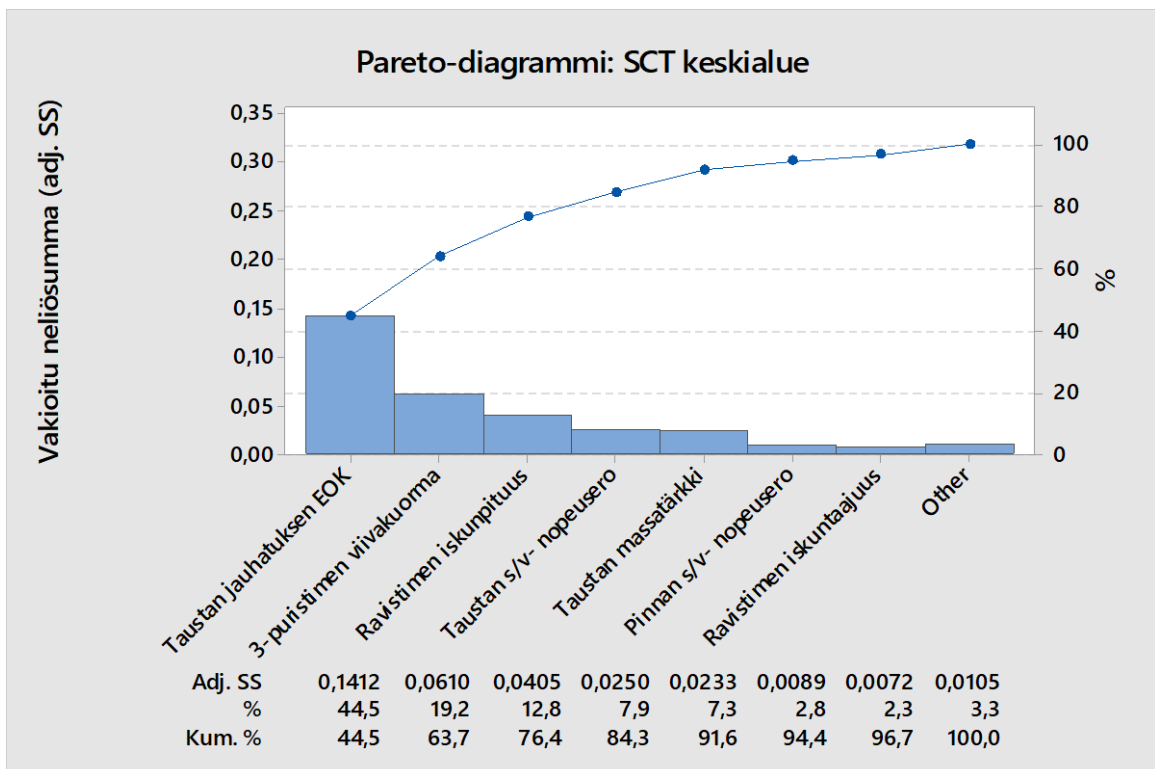
Kuva 17. SCT etureunan alueen vastekuvat.



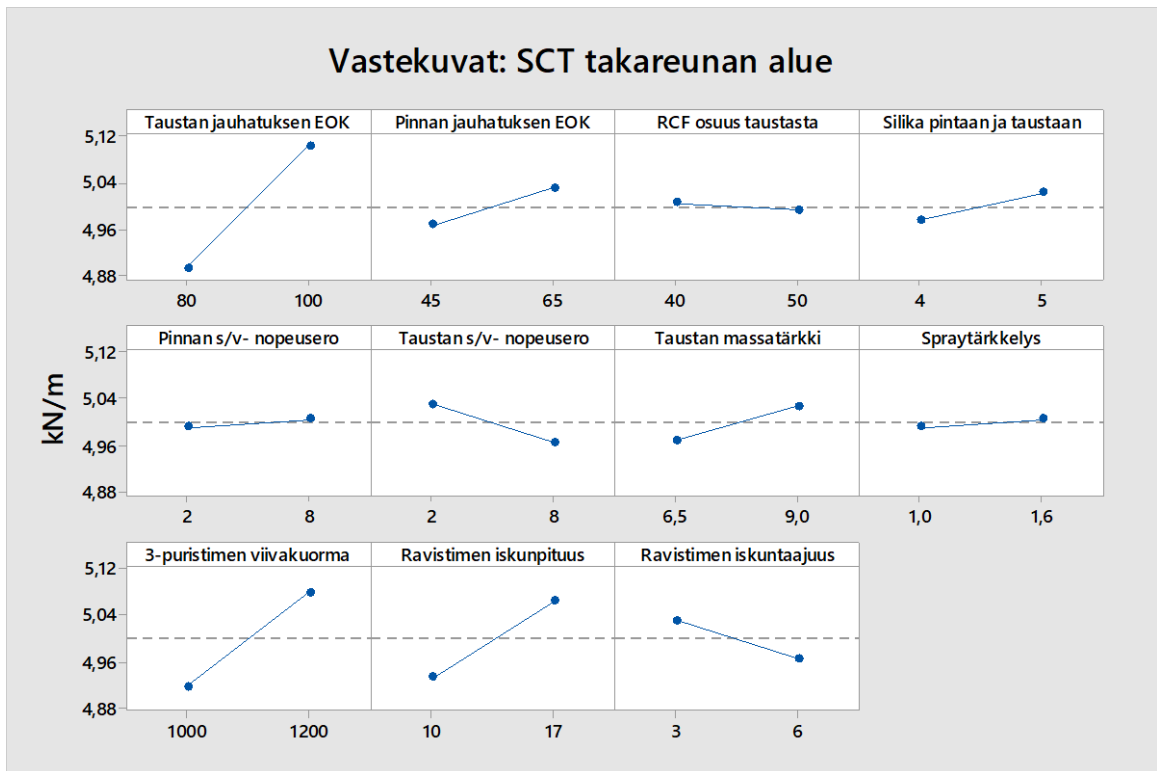
Kuva 18. SCT etureunan alueen pareto-diagrammi.



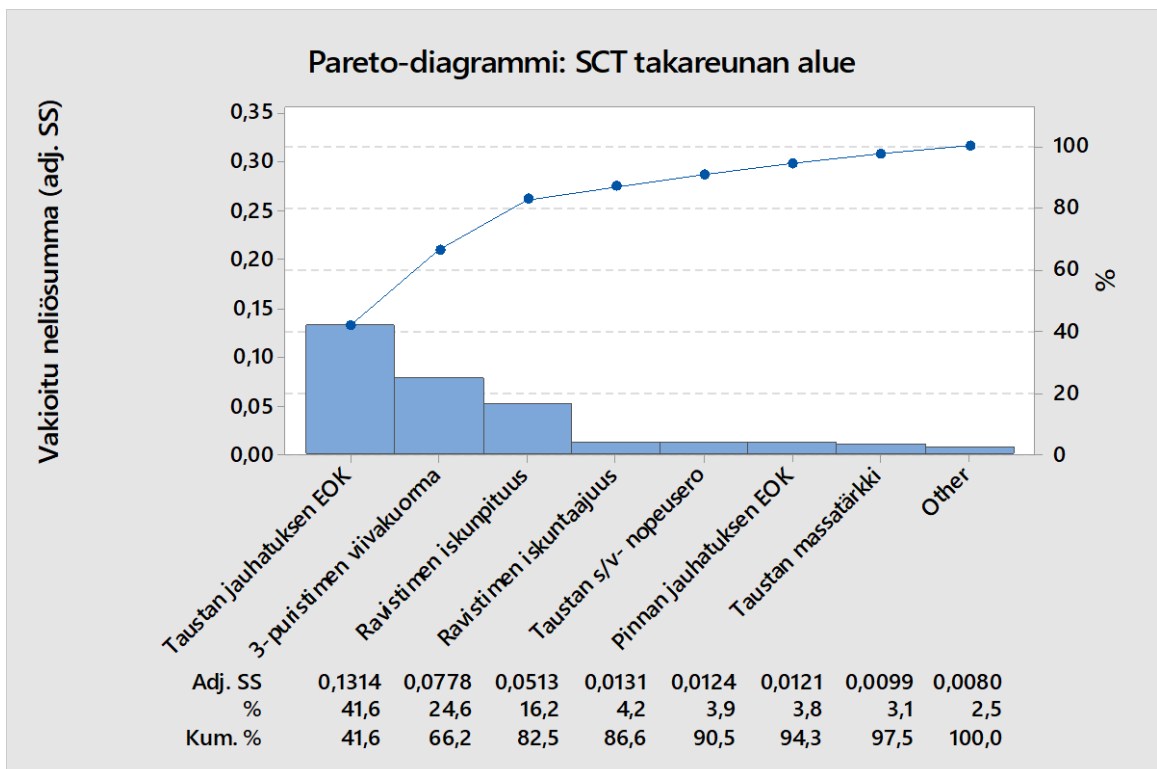
Kuva 19. SCT keskialueen vastekuvat.



Kuva 20. SCT keskialueen pareto-diagrammi.

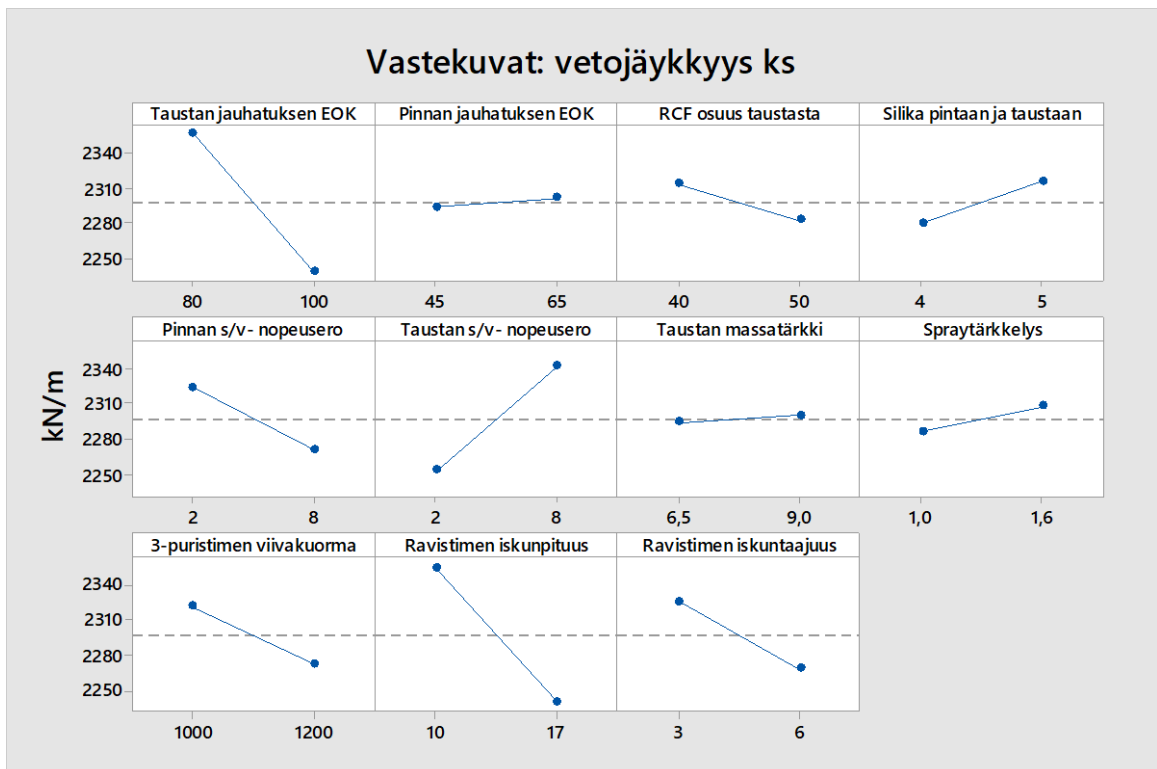


Kuva 21. SCT takareunan alueen vastekuvat.

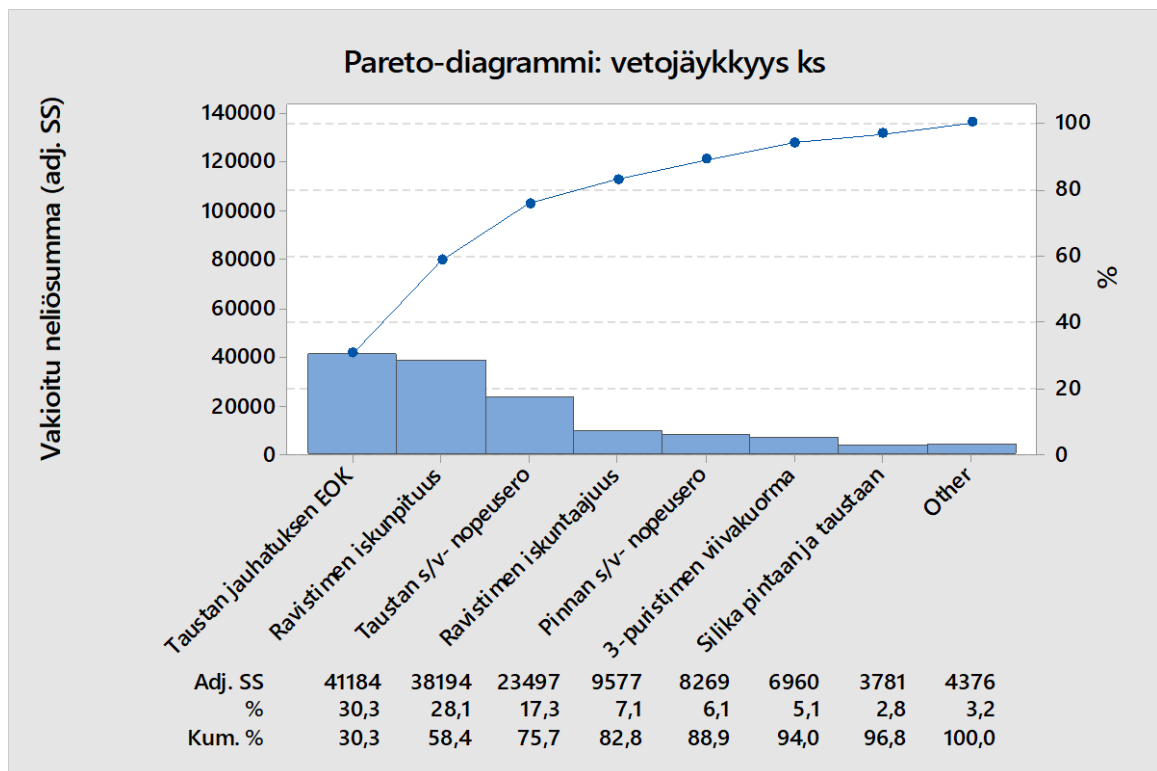


Kuva 22. SCT takareunan alueen pareto-diagrammi.

Konesuuntaiselle vetojäykkyydelle parhaat vasteet antoivat taustan jauhatuksen EOK ja ravistimen iskunpituus (kuva 23). Molempien muuttujien osalta korkeampi taso heikensi konesuuntaista vetojäykkyyttä hieman yli 100 kN/m ja molemmat tekijät selittivät noin 30 % konesuuntaiseen vetojäykkyyteen koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä (kuva 24). Ravistimen iskunpituuden konesuuntaiseen vetojäykkyyteen aikaansaama negatiivinen vaikutus poikkisuuntaisen vetojäykkyyden parantuessa (kuva 25) oli odotettu, mutta taustan jauhatuksen selkeä negatiivinen vaikutus ei. Teorian mukaan myös konesuuntaista vetojäykkyyttä saataisiin parannettua jauhatuksella kuituominaisuuksien kautta. Muiden tekijöiden vasteet ja vaikuttavuudet olivat vähäisiä.



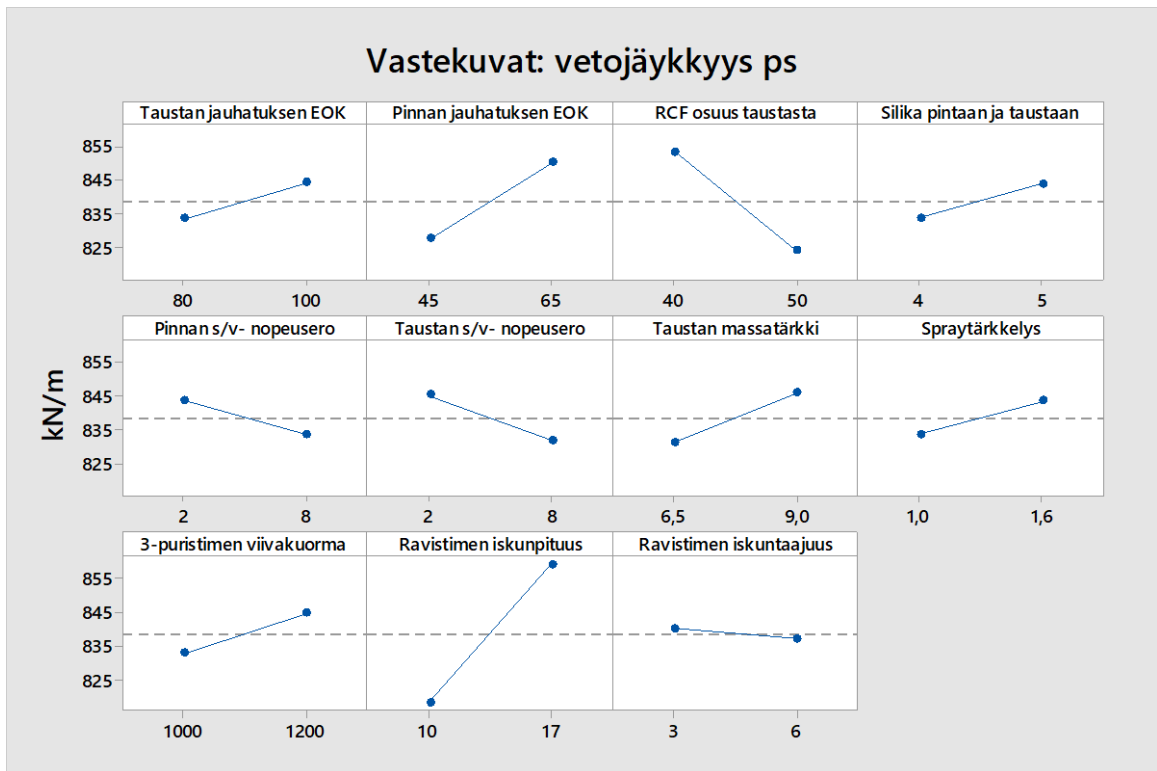
Kuva 23. Vetojäykkyys ks vastekuvat.



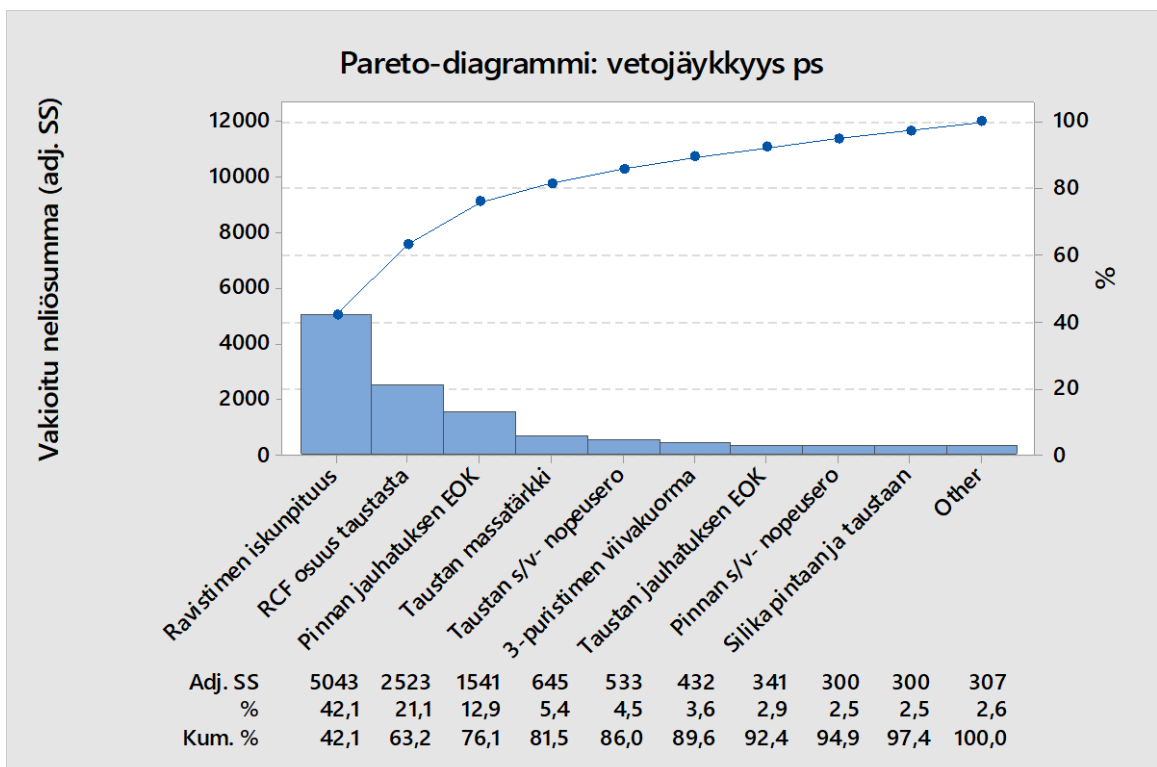
Kuva 24. Vetojäykkyys ks pareto-diagrammi.

Poikkisuuntaiselle vetojäykkyydelle saavutettiin paras vaste ja vaikuttavuus suuremmalla ravistimen iskunpituudella, kuten kuvista 25 ja 26 nähdään. 40 kN/m vastetta voidaan pitää merkityksellisenä, erityisesti huomioiden tekijän tasojen välinen pieni ero. Ravistimen operointi-ikkuna määritetään tietyllä nopeusalueella sallitun ravistusluvun perusteella ja ravistimen amplitudia on mahdollista kasvattaa koeohjelmaan valittua tasoa enemmän, erityisesti vähennettäessä ravistuslukuun vaikuttavaa ravistimen taajuutta. Jos vaste on samansuuntainen suuremmalla amplitudilla, niin tuotteen lujuusominaisuuksia saadaan kasvatettua selvästi ainoastaan parametrimuutoksella.

RCF:n osuus taustakerroksesta antoi toiseksi suurimman vasteen ja oli toiseksi vaikuttavin tekijä, suuremman osuuden heikentäessä poikkisuuntaista vetojäykkyyttä (kuvat 25 ja 26). Neitseellistä kuitua lujuusominaisuuksiltaan heikompi kuituraaka-aine vaikuttaa negatiivisesti vetojäykkyyteen vaikuttavaan kimmomoduuliin. Lyhyemmät kuidut heikentävät kimmomoduulia ja RCF:n todennäköisesti suurempi kuituvaurioiden määrä vähentää kuitujen aktivoitumisen kautta kimmomoduulia.

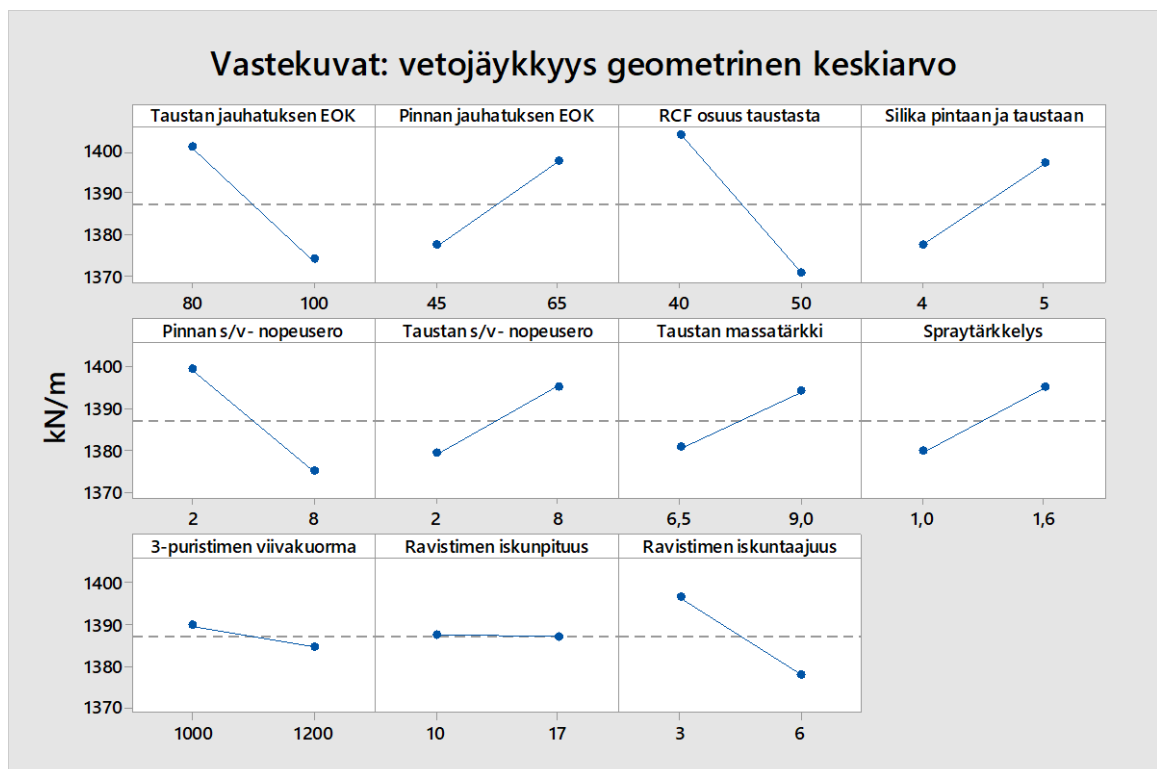


Kuva 25. Vetojäykkyys ps vastekuvat.

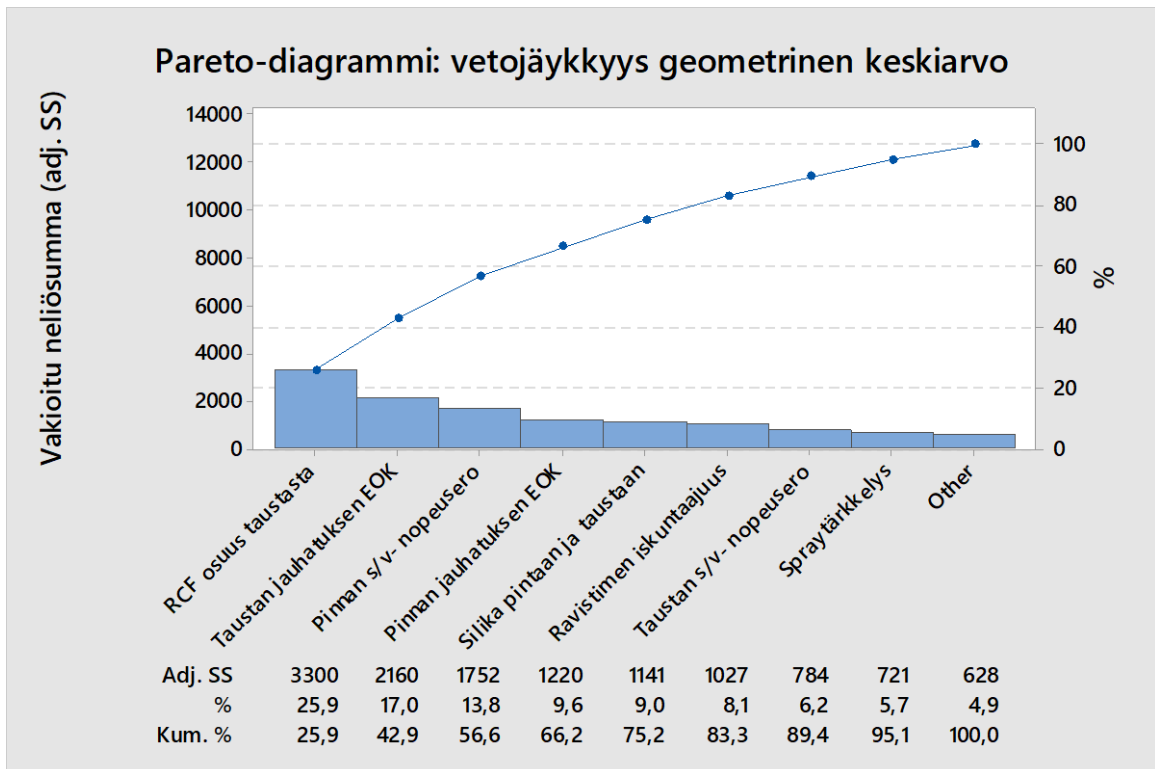


Kuva 26. Vetojäykkyys ps pareto-diagrammi.

Vetojäykkyyden geometrinen keskiarvo muodostuu kone- ja poikkisuuntaisten vetojäykkyyksien tulon neliöjuuresta ja vasteet sekä vaikuttavuudet koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä (kuvat 27 ja 28) noudattelevat kone- ja poikkisuuntaisten vetojäykkyyksien tuloksia, painottuen konesuuntaisen vetojäykkyyden vasteisiin. Vertaamalla kone- ja poikkisuuntaisen- sekä geometrisen vetojäykkyyden vastekuvia (kuvat 23, 25 ja 27) havaitaan, että selkeästi poikkisuuntaista vetojäykkyyttä parantavilla, mutta konesuuntaista vetojäykkyyttä heikentävillä muuttujilla saadaan arkista enemmän isotrooppinen poikkisuuntaisen vetojäykkyyden parantuessa ja konesuuntaisen heikentyessä. Ravistimen iskunpituus on selkein tällaisen vaikutuksen tekijä. Sen vaikutus geometriseen vetojäykkyyden keskiarvoon on lähes neutraali. RCF:n määrä heikentää selkeästi niin kone- ja poikkisuuntaista vetojäykkyyttä kuin myös vetojäykkyyden geometrinen keskiarvoa (kuvat 23, 25 ja 27). RCF:n osuus taustasta on vetojäykkyyden geometriseen keskiarvoon parhaan vasteen antava tekijä noin 26 % selittävyysasteellaan (kuva 28) koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä. Vasteita ja vaikuttavuuksia vetojäykkyyden geometriseen keskiarvoon voidaan pitää suhteellisen pieninä.



Kuva 27. Vetojäykkyyden geometrinen keskiarvo vastekuvat.

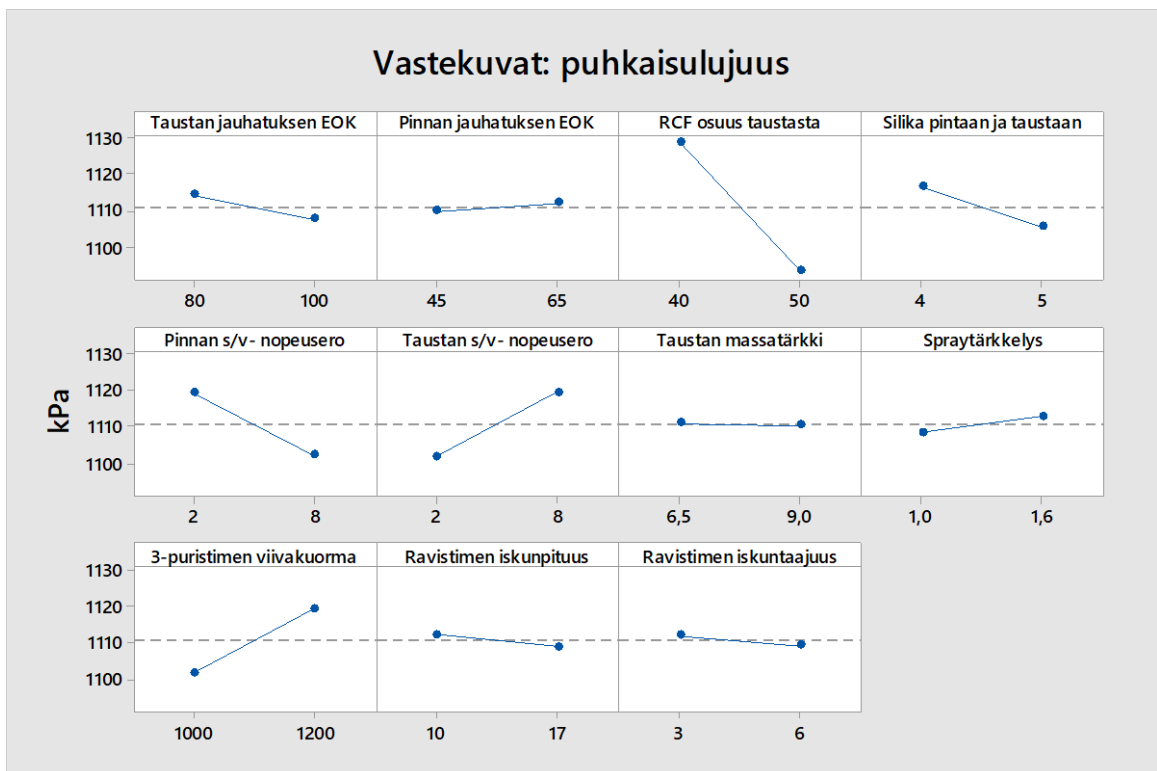


Kuva 28. Vetojäykkyys geometrinen keskiarvo pareto-diagrammi.

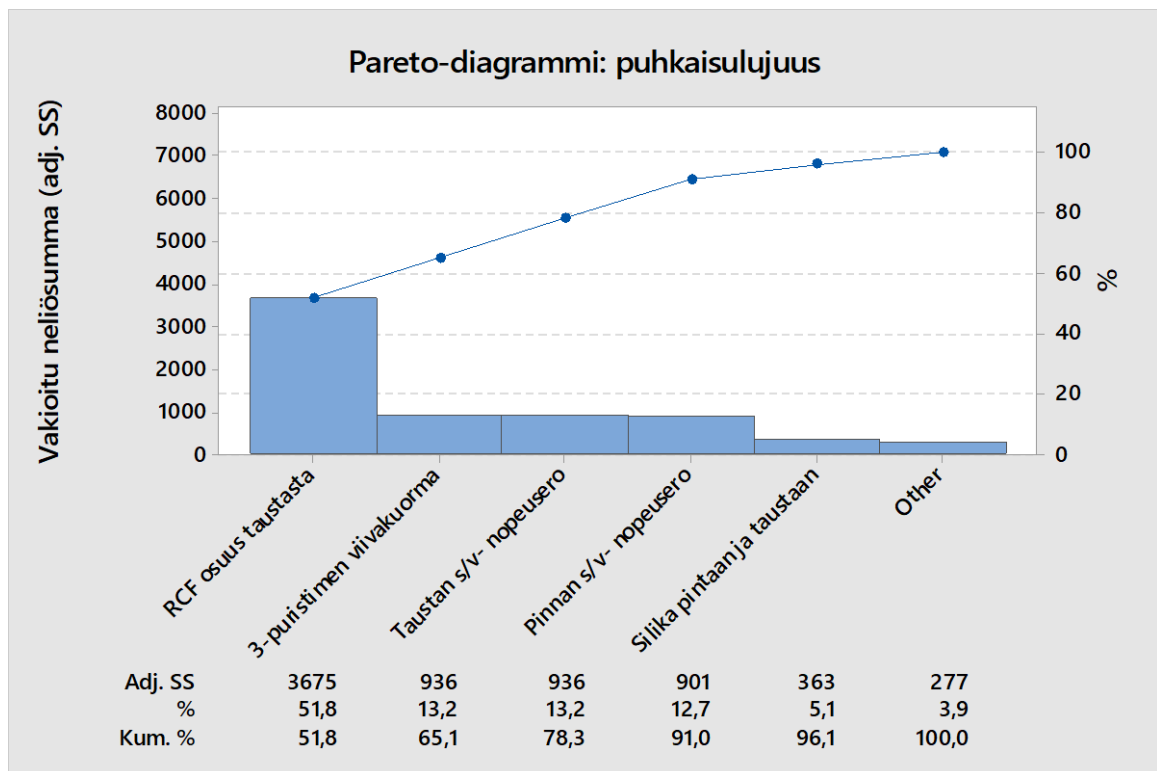
Kuvassa 29 esitetään tekijöiden vasteet puhkaisulujuuteen. Kuvasta havaitaan, että RCF:n annosteluun tehtävällä 10 %:n muutoksella saavutetaan lähes 40 kPa:n vaikutus puhkaisulujuuteen. RCF:n annosteluosuuden nostaminen heikentää puhkaisulujuutta. RCF sisältää tietyn määrän päällystettyjä kartonkeja, joiden mukana prosessiin annostellaan pigmenttiä ja tuotteen tuhkapitoisuus kasvaa. Tuhkapitoisuuden kasvaessa myös lujuudet heikentyvät. Verrattuna koneella käytettävään neutseelliseen massakomponenttiin kierrätysmassan kuitumateriaali vaihtelee ja vaihtelun lisäksi kierrätysmassan kuituominaisuudet ovat poikkeavat verrattuna neutseelliseen kuituun. Mahdollisesti jo useaan kertaan kuiduttamisen aikana mekaanisille rasituksille altistuneiden kuitujen kuidunpituus on lyhyempi ja kuidut voivat sisältää enemmän kuituvaurioita.

RCF:n osuus on hyvän vasteensa lisäksi myös selkeästi dominoiva tekijä, kuten kuvasta 30 nähdään. RCF osuus taustasta selittää 52 % kaikista koeohjelmassa puhkaisulujuuteen vaikuttaneista tekijöistä. Muiden tekijöiden vasteet ja vaikuttavuudet ovat suhteellisen pieniä.

Puhkaisulujuus määritetään puhkeamiskohtan pienimmän murtovenymän mukaan, kuten aiemmin on esitetty. Murtovenymä on yleisesti ottaen pienimmillään konesuunnassa ja murtovenymiseen vaadittu paperin jännitys vastaa konesuuntaista vetolujuutta. Näin ollen puhkaisulujuus muodostuu enimmäkseen konesuuntaisen vetolujuuden kautta ja liitteenä olevista vetolujuuden vastekuvista ja pareto-diagrammeista voidaan todeta RCF:n osuuden heikentävän selkeästi konesuuntaista vetolujuutta (liite II). Heikentyneen konesuuntaisen vetolujuuden kautta myös puhkaisulujuus muodostuu huonommaksi. Vetolujuuteen vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi kuidunpituus, joka kierrätyskuidussa on lyhyempää.

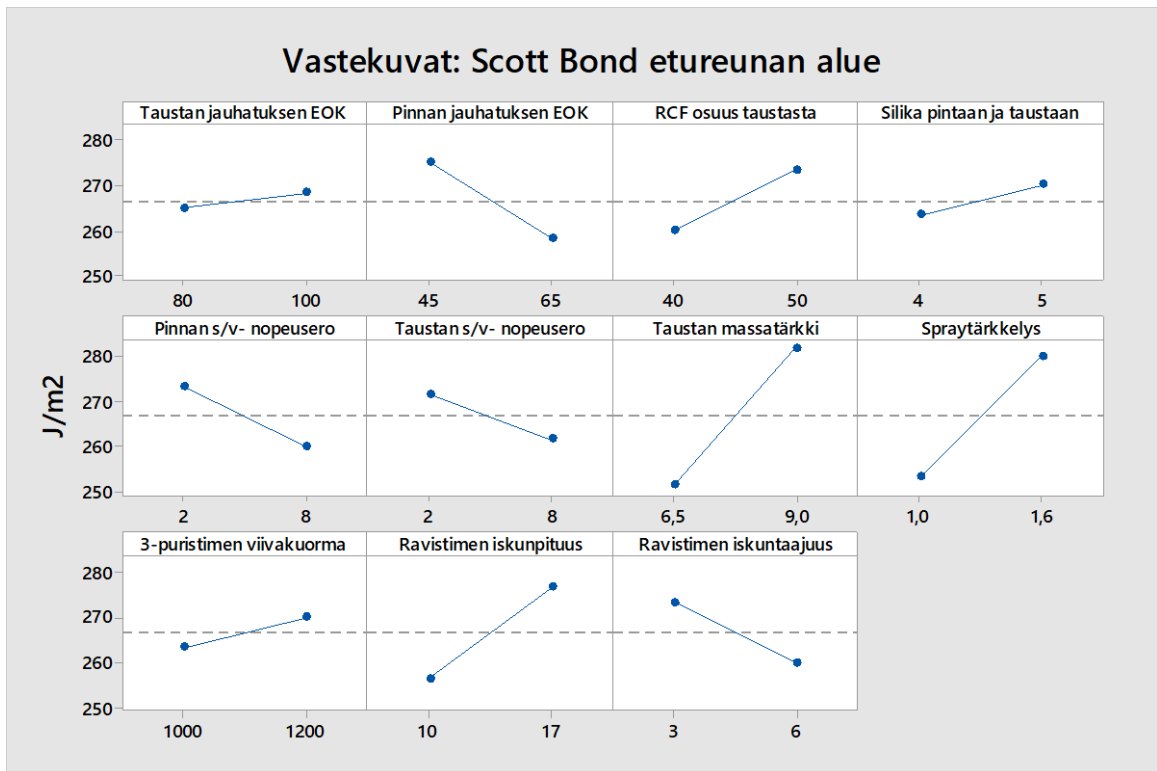


Kuva 29. Puhkaisulujuus vastekuvat.

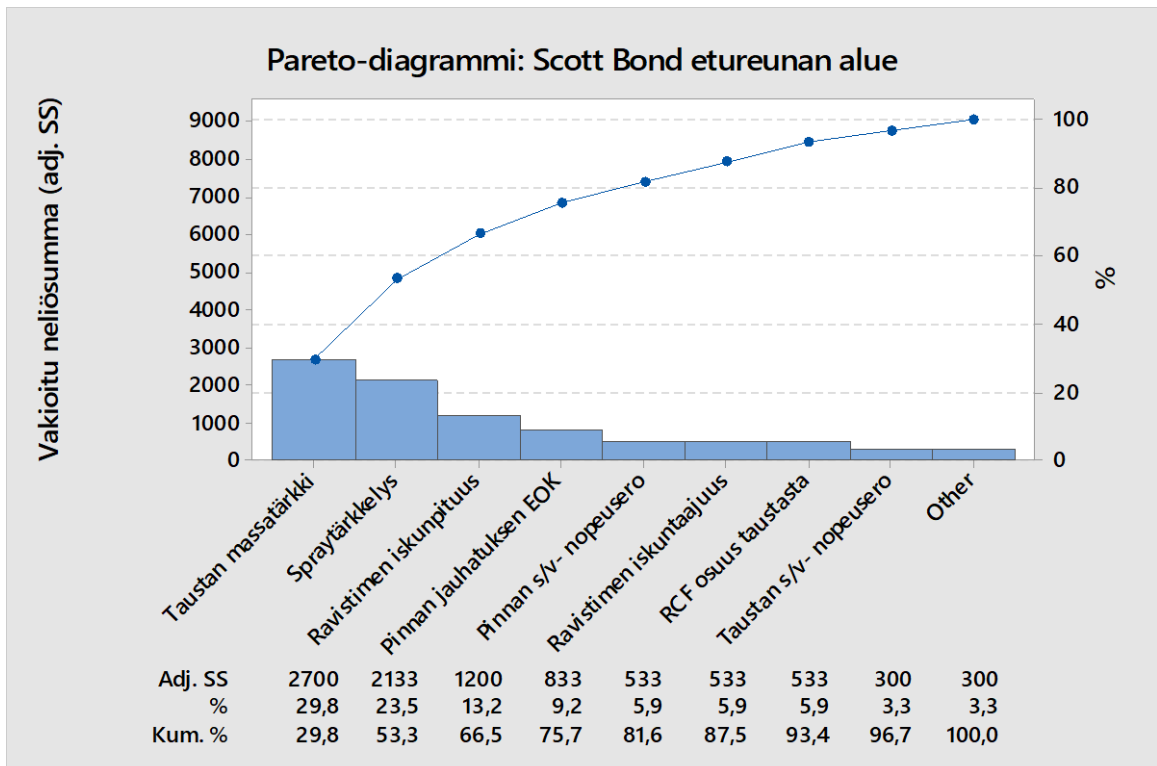


Kuva 30. Puhkaisulujuus pareto-diagrammi.

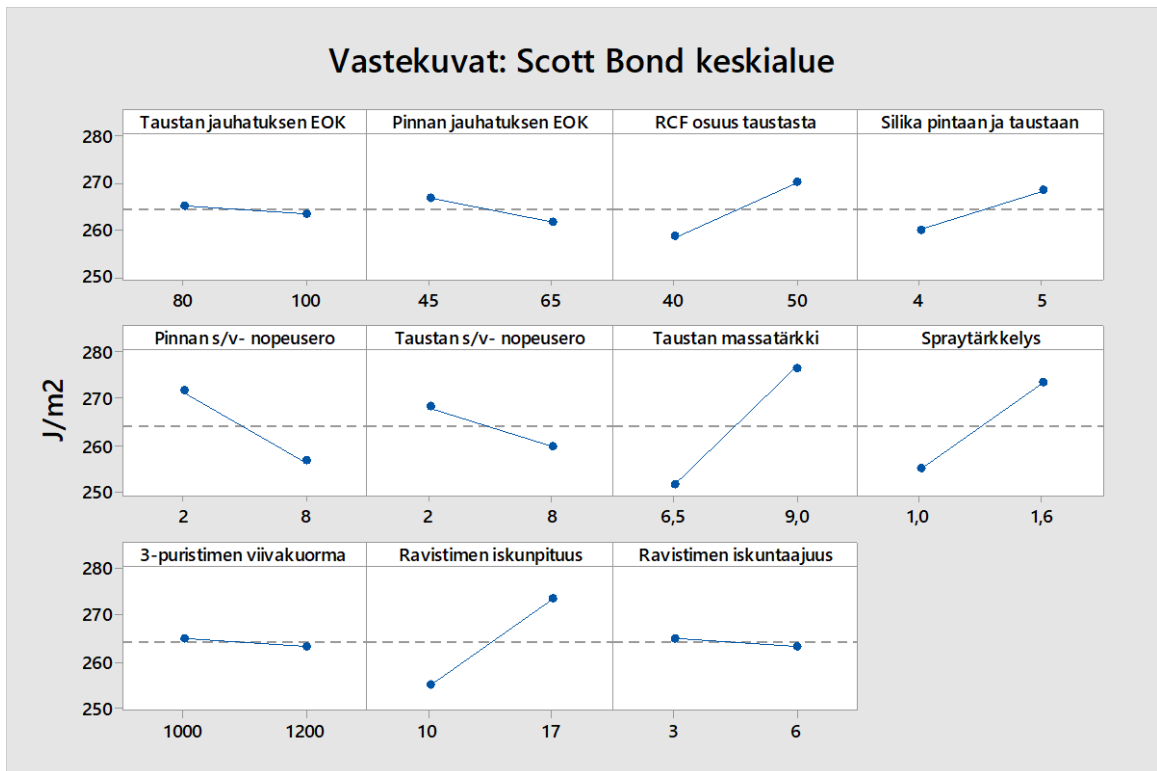
Scott Bondin osalta määritettiin vastekuvat sekä pareto-diagrammit poikkisuunnassa kolmelle eri kohdalle: etu-, keski- ja takareunojen alueille (kuvat 31-36). Vasteissa on eroavaisuutta riippuen mitä poikkisuunnan aluetta tarkastellaan. Vaikuttavuudeltaan merkittävimpiä tekijöitä ovat taustan massatärkki, ravistimen iskunpituus, spraytärkkelys, taustan jauhatuksen EOK ja 3-puristimen viivakuorma. Näistä tekijöistä paras vaste saavutettiin taustan massatärkkelyksellä, vasteen ollessa noin 30 J/m^2 . Sekä taustan massatärkin että spraytärkkelyksen sijoittuminen vaikuttavimpiin tekijöihin voidaan selittää sillä, että tärkkelys lisää kuitujen välisten vetysidosten määrää parantaen z-suuntaisia lujuusominaisuuksia. Taustan jauhatuksen suurempi EOK lisää kuitujen sitoutumiskykyä ja sitoutumispinta-alaa, mikä parantaa yleisesti lujuusominaisuuksia. 3-puristimen suurempi viivakuorma edesauttaa märkäpuristuksen kautta kuitujen välisten sidosten muodostumista lisäten osarainojen välistä adheesiota. Ravistimen iskunpituus vaikuttaa kuitujen orientoitumiseen ja todennäköisesti orientaation ja mahdollisesti muuttuvan taustakerroksen z-suuntaisen jakauman kautta vaikuttaa positiivisesti. Z-suuntaisen jakauman merkitystä rainten väliseen adheesioon voidaan pitää merkittävänä (Puusta paperiin M-506 1997, s. 240-241).



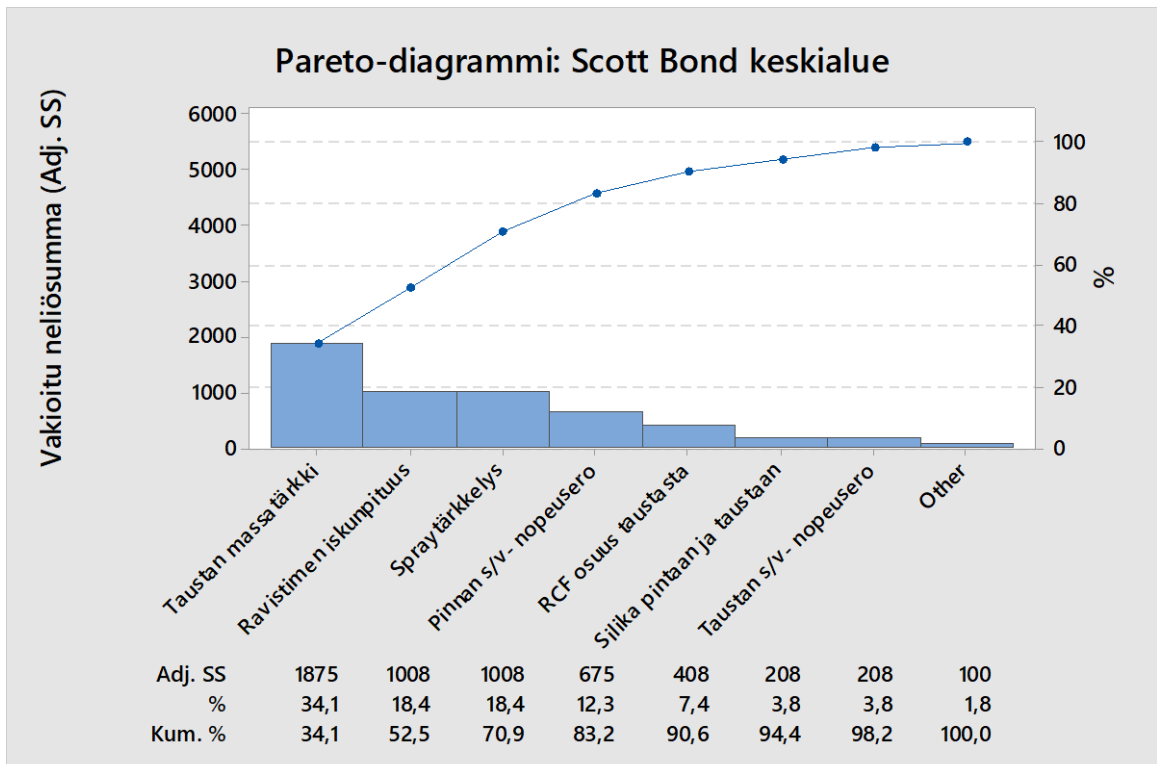
Kuva 31. Scott Bond etureunan alueen vastekuvat.



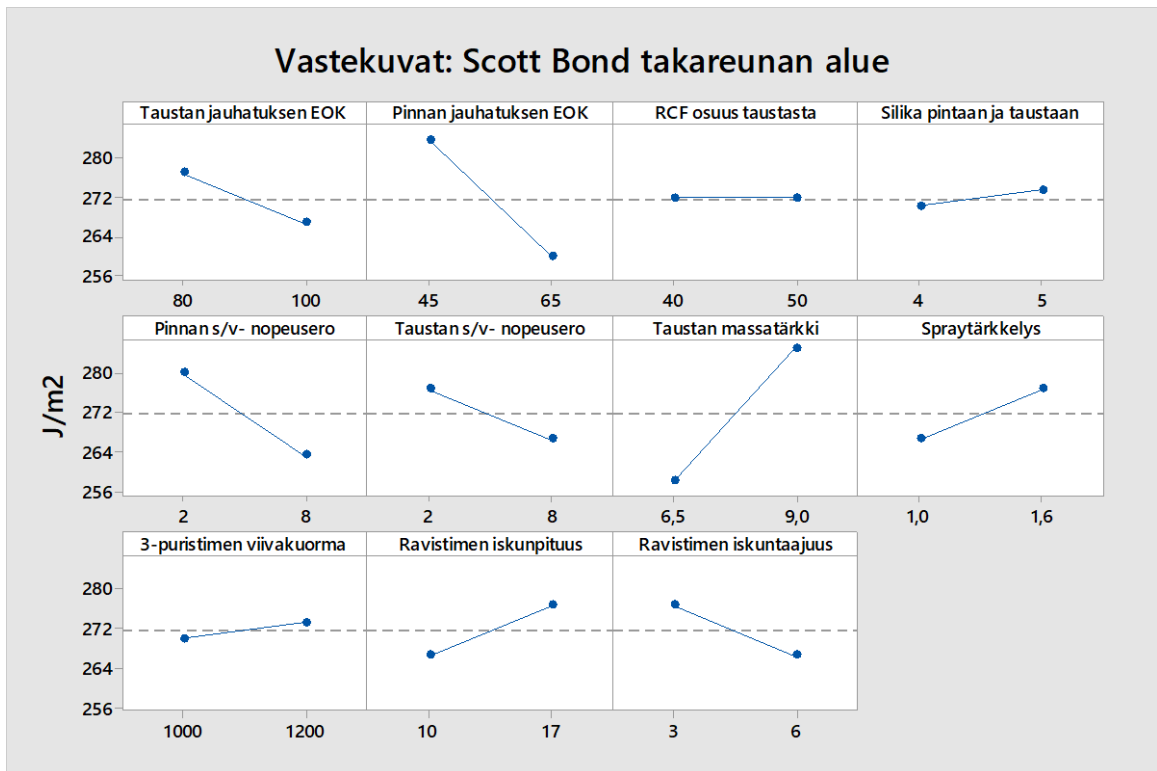
Kuva 32. Scott Bond etureunan alueen pareto-diagrammi.



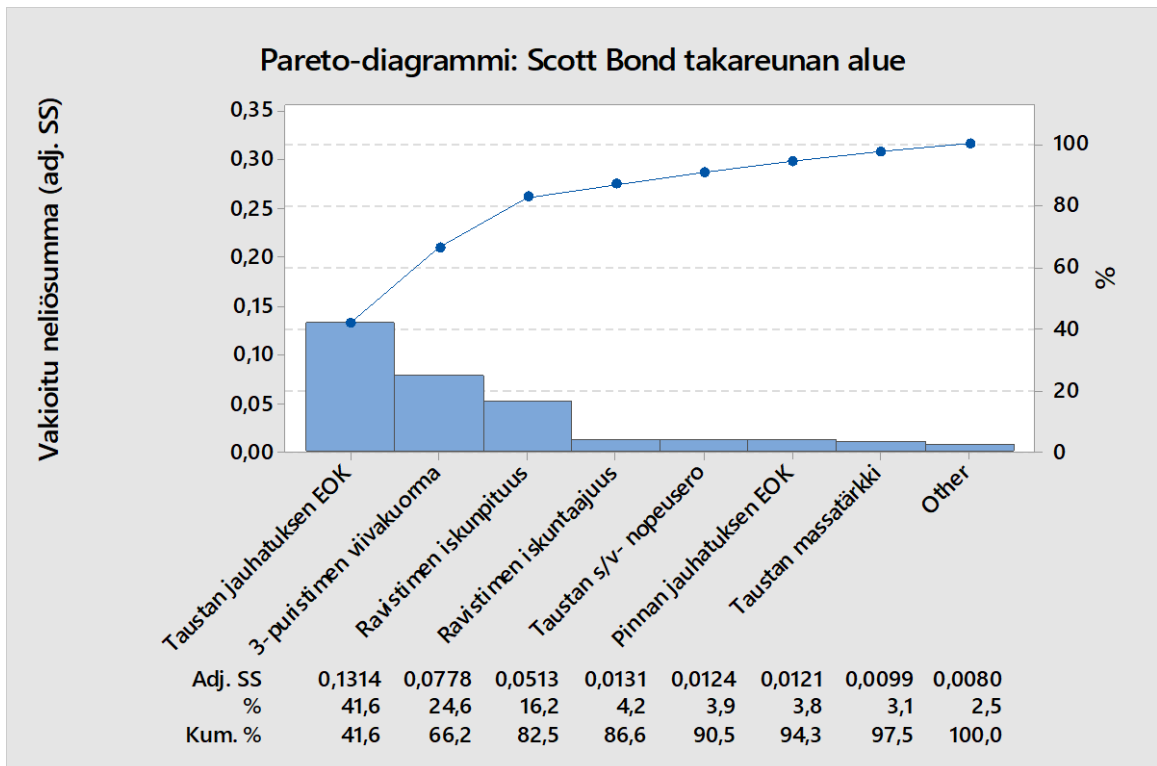
Kuva 33. Scott Bond keskialueen vastekuvat.



Kuva 34. Scott Bond keskialueen pareto-diagrammi.

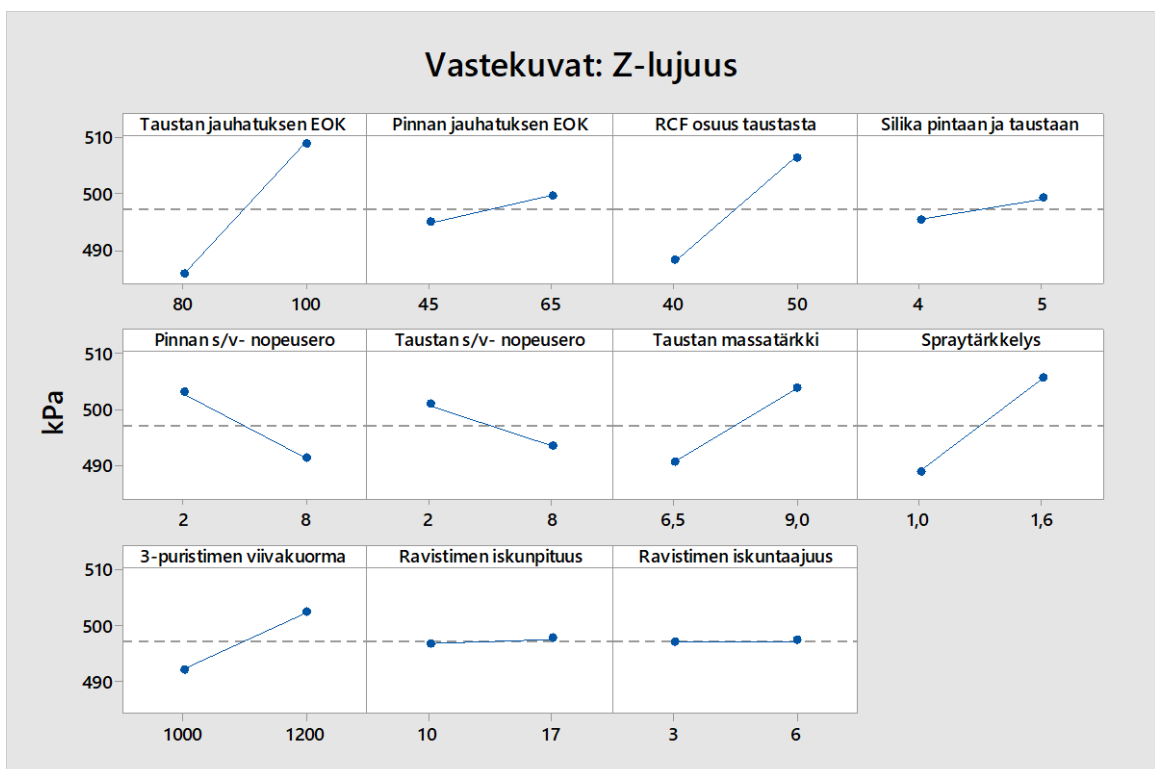


Kuva 35. Scott Bond takareunan alueen vastekuvat.

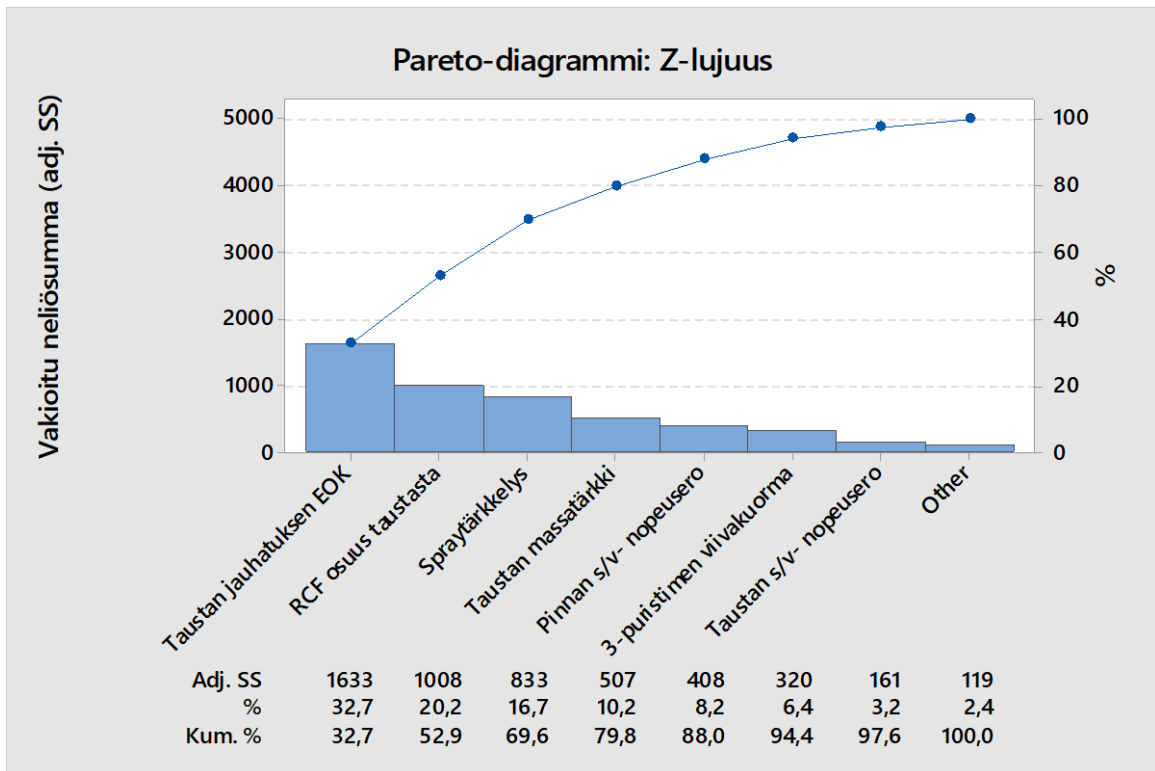


Kuva 36. Scott Bond takareunan alueen pareto-diagrammi.

Z-lujuuteen vaikuttavista tekijöistä taustan jauhatuksen EOK antoi parhaan vasteen ja selitti 33 % kaikista koeohjelmassa z-lujuuteen vaikuttaneista tekijöistä (kuvat 37 ja 38). Kuten kuvattu aiemmin, jauhatusta lisäämällä kuitujen sitoutumiskyky ja sitoutumispinta-ala paranee vaikuttaen positiivisesti z-suuntaiseen lujuteen. Massatärkkelyksen vaikutusta z-lujuuteen pidetään yleisesti merkittävänä (Krogerus 2007, s. 85), mutta taustan massatärkki on vasta neljänneksi eniten vaikuttava tekijä selittäen noin 17 % koeohjelmassa vaikuttaneista tekijöistä.



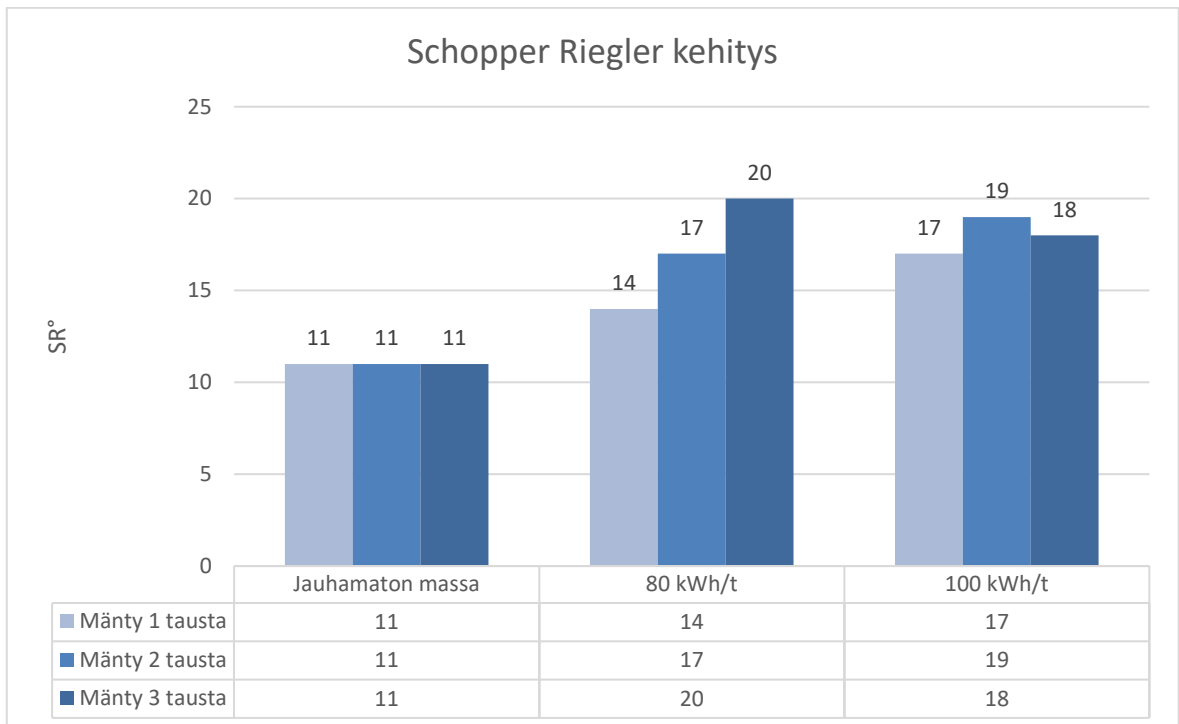
Kuva 37. Z-lujuus vastekuvat.



Kuva 38. Z-lujuus pareto-diagrammi.

10.4 Kuitututkimusten tulokset

Tässä kappaleessa kuvataan taustamassasta tehtyjen kuituanalyysien tulokset eri jauhatuksen energian ominaiskulutuksilla eri jauhimilla. Lisäksi havainnollistetaan taustamassan lujuusindeksien kehittymistä eri jauhatuksen energian ominaiskulutuksella. Kaavioissa 0 kWh/t tarkoittaa jauhamatonta massaa. Kuvasta 39 havaitaan, että taustakerroksen jauhimien jauhatustason kehittyminen eri jauhimilla on hyvin erilaista. 80 kWh/t EOK-tasolla taustakerroksen jauhin 3 kehittää SR° -lukua 43% enemmän kuin taustakerroksen jauhin 1. Erot SR° -luvun kehittämisessä 100 kWh/t EOK-tasolla jauhimien välillä ovat selkeästi pienemmät. 100 kWh/t EOK-tasolla jauhimien 3 mittaus tuloksen voidaan olettaa olevan virheellinen verrattaessa sitä 80 kWh/t EOK-tasolla saatuun tulokseen.



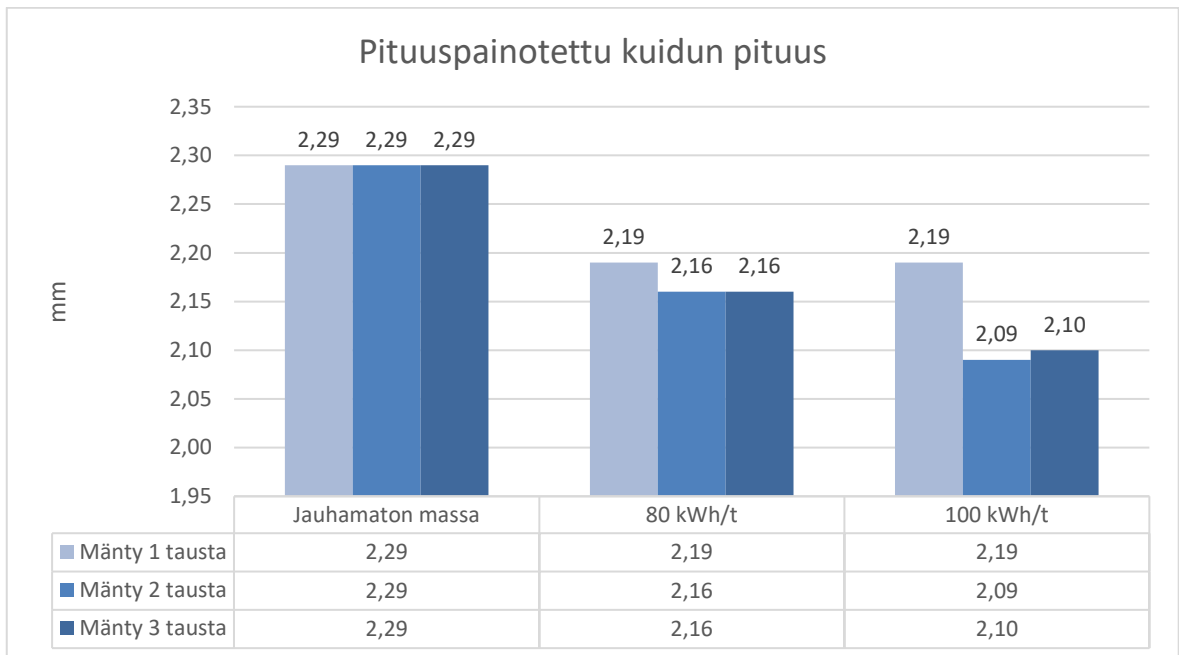
Kuva 39. Taustajauhimien Schopper-Riegler kehittäminen.

Kuvassa 40 esitetään pituuspainotetun kuidun pituuden kehittymistä eri taustakerroksen jauhimilla eri EOK-tasoilla. Pituuspainotetun kuidunpituuden laskennassa käytetään kaavaa 10 (Guay et al. 2005):

$$L_l = \frac{\sum n \times l_f^2}{\sum n \times l_f} \quad (10)$$

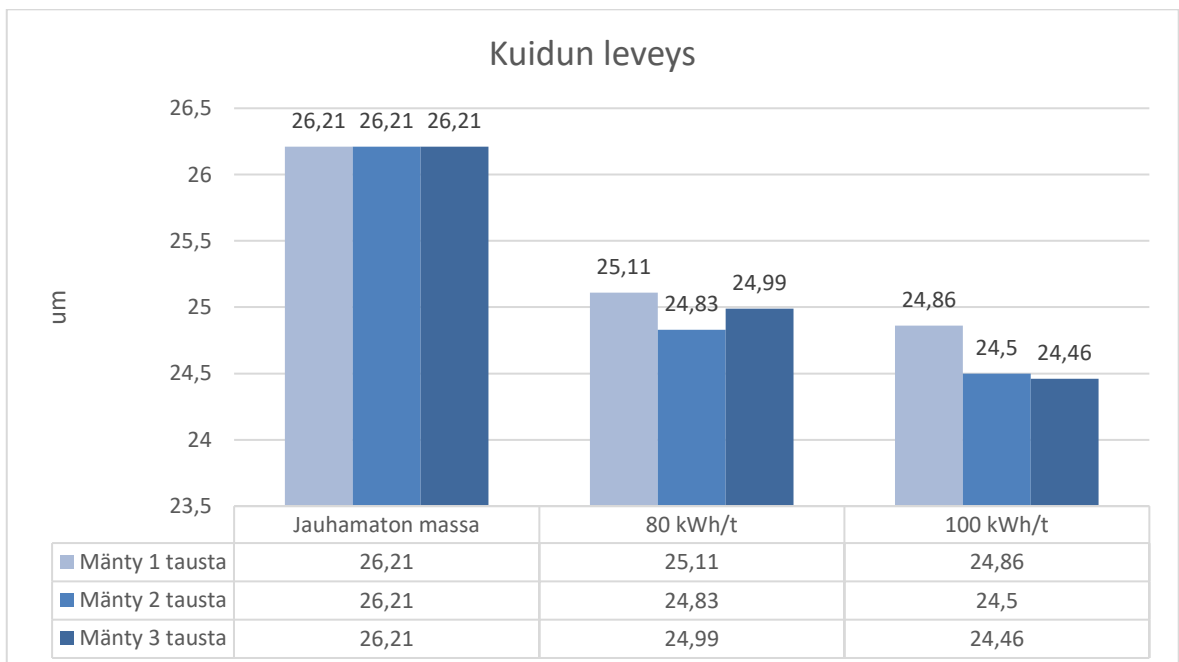
missä, L_l pituudella painotettu keskimääräinen kuidun pituus [mm]
 n kuitujen lukumäärä [kpl]
 l_f kuitujen pituus [mm]

Taustakerroksen jauhin 2 katkoo kuituja eniten, mikä korostuu 100 kWh/t EOK-tasolla. Jauhin 1 säilyttää kuidunpituuden hyvin eri EOK-tasoilla. Kuidunpituudella on vaikutus paperin tasonsuuntaisiin lujuusominaisuuksiin, koska lyhyempien kuitujen sidostenmuodostamispotentiaali on alhaisempi verrattuna pitkiin kuituihin. Pitemmällä kuidulla on enemmän mahdollisia kohtia kuidunpituutta kohti, joihin sidoksia voi muodostua.



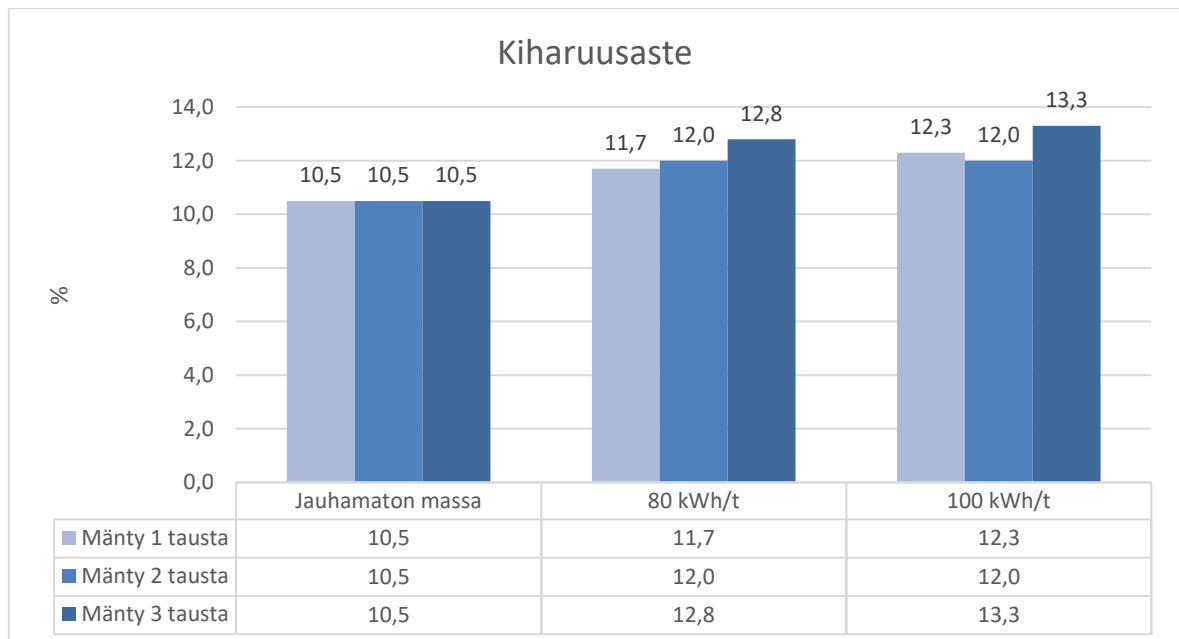
Kuva 40. Pituuspainotettu kuidun pituus.

Kuvassa 41 esitetään kuidun leveyden kehittyminen EOK:n funktiona. Eri jauhimien vaikutus kuitujen leveyden alenemiseen eri EOK-tasoilla noudattaa kuitujen pituuden alenemisen kanssa yhtenevää suuntaa. Jauhin 1 säilyttää kuidunleveyden muita jauhimia paremmin.



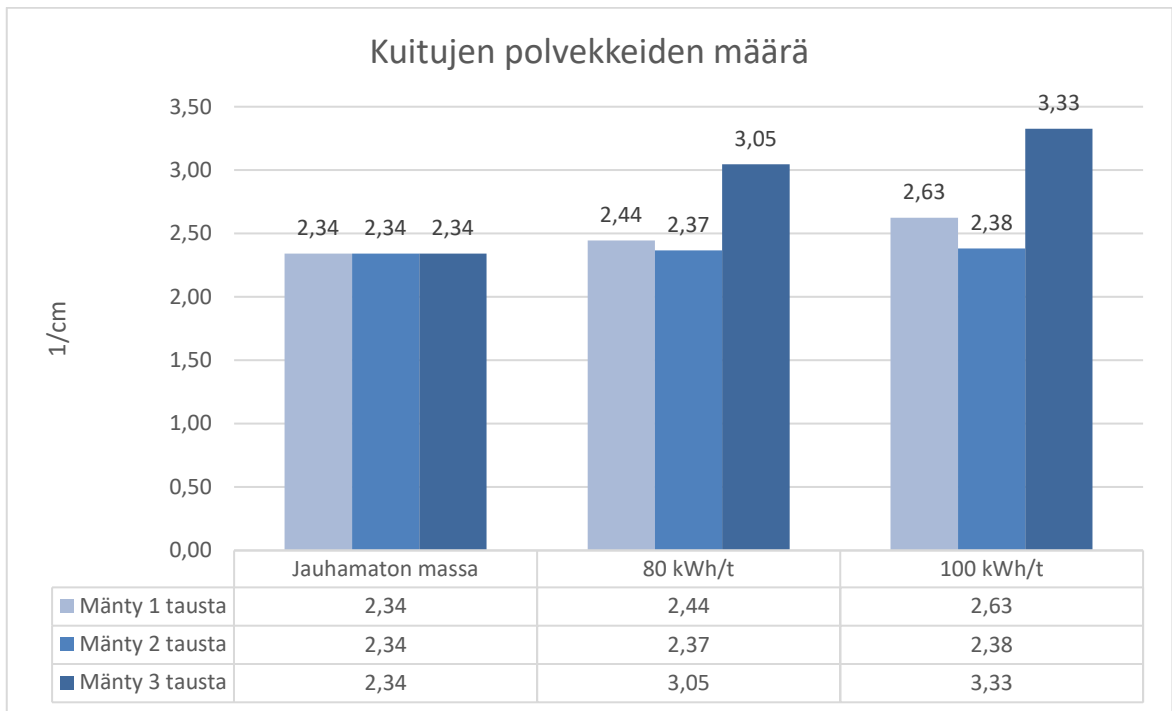
Kuva 41. Kuidun leveys.

Kuvassa 42 esitetään kuitujen kiharoitumisen osuutta eri EOK-tasoilla. Kuitujen kiharoitumisen lisääntymisessä eri EOK-tasoilla voidaan havaita lievää lineaarisuutta lukuun ottamatta jauhinta 2. Verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin teorioihin ja aiempiin tutkimuksiin (Barbe et al. 1985) voidaan todeta korkeamman EOK-tason vähentävän massan vetolujuutta, mutta parantavan repäisylujuutta. Kiharoituneet kuidut tekevät kuituverkoston rakenteesta avoimemman ja vähentävät mahdollisuutta kuitujen välisten sidosten muodostumiseen pitämällä kuidut muotonsa takia etäämmällä toisistaan. Kiharoituminen vähentää myös massan vetolujuuskykyä. Vähäisellä jauhatusintensiteetillä kuitujen kiharoituminen kirjallisuudessa esitetyn tiedon mukaan monessa tapauksessa vähenee, koska hellävarainen jauhatus lisää kuitujen suoristumista.



Kuva 42. Kiharusaste.

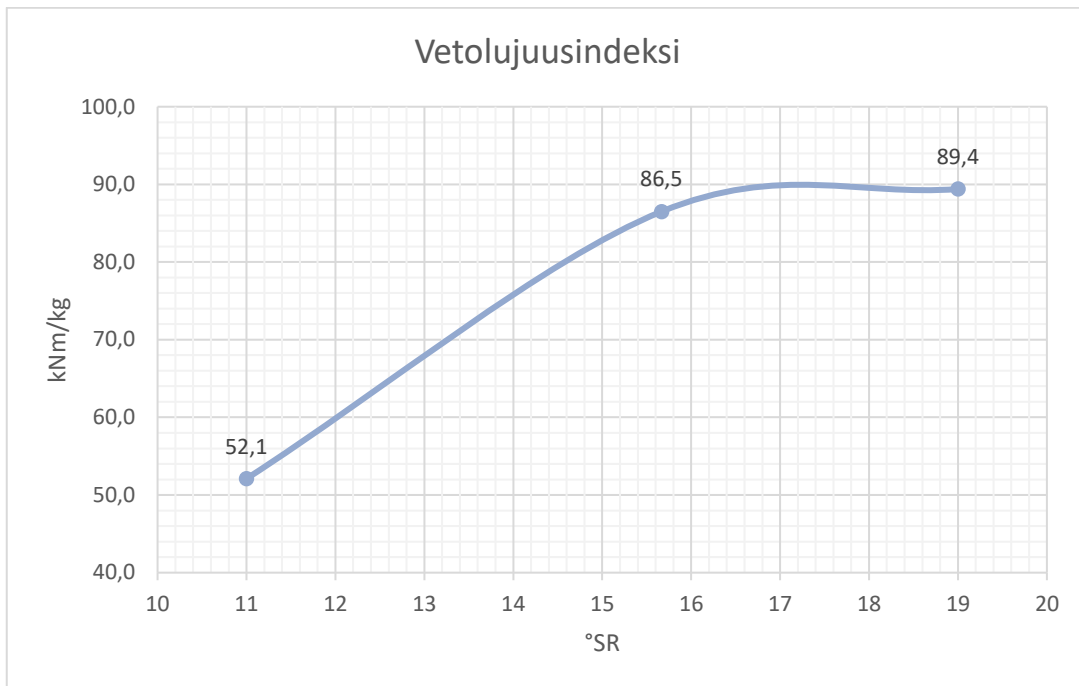
Kuva 43 esittää kuitujen polvekkeiden määrän kehittymistä eri jauhimilla EOK:n funktiona. Kuitujen polvekkeiden määrän kehittyminen kiharoitumisen kanssa on hyvin yhtenevää, mikä kuvastaa jauhatustapaa. Kaaviosta kuitenkin voidaan havaita selkeänä erona, että jauhin 3 muodostaa kuituihin taitekohtia selkeästi muita enemmän. EOK-tasolla 100 kWh/t jauhin 3 muodostaa taitekohtia 40 % enemmän kuin jauhin 2. Jauhimen kolme polvekkeiden kehittäminen on myös selkeästi voimakkaammin kasvavaa EOK-tason noustessa verrattuna muihin jauhimiin.



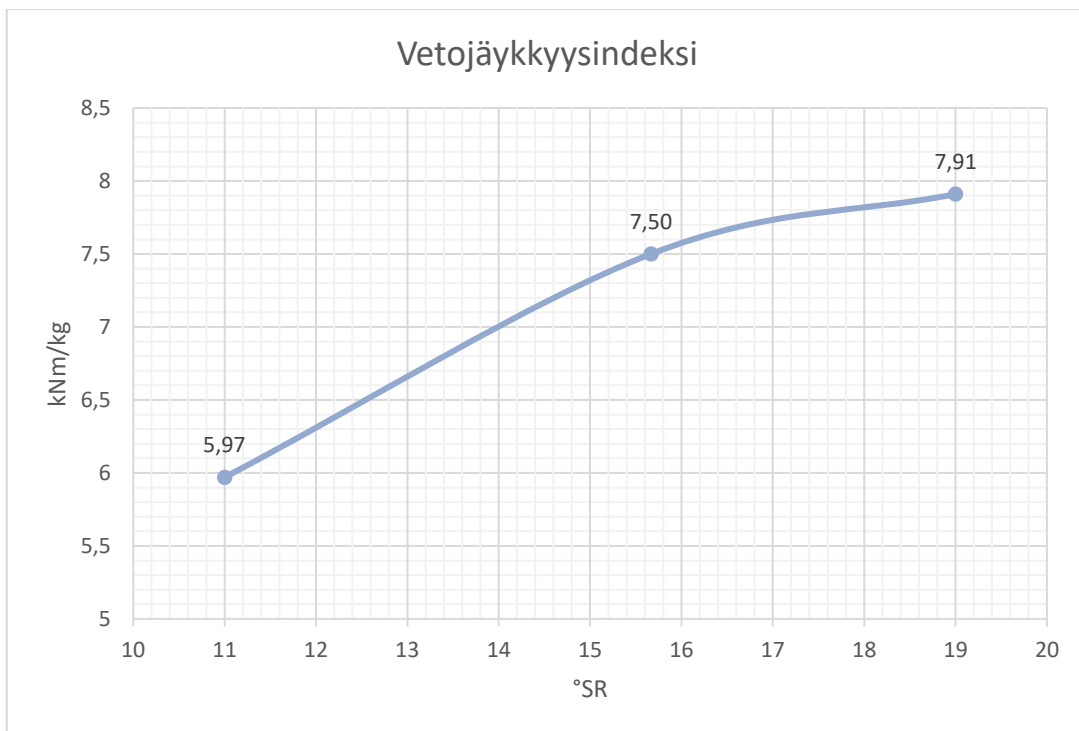
Kuva 43. Kuitujen polvekkeiden määrä.

Kuvat 44 ja 45 esittävät taustamassan vetolujuusindeksin ja vetojäykkyyksindeksin kehittymistä Schopper-Rieglerin funktiona. Jauhatuksen voidaan havaita kehittävän massan vetolujuutta selvästi verrattuna jauhamattomaan massaan, mutta samanaikaisesti havaitaan, että korkeammalla EOK-tasolla vetolujuusindeksin kehittyminen ei kasva enää merkittävästi. Kuten SCT:n vastekuvista ja pareto-diagrammista voidaan havaita, niin taustamassan jauhatuksen EOK:n nostamisella on merkittävä positiivinen vaikutus poikkisuuntaiseen puristuslujuuteen ja moneen muuhun lujuusominaisuuteen.

Vetojäykkyyksindeksin kehittyminen on käyttäytymiseltään lineaarisempaa verrattaessa vetolujuusindeksiin. Tätä selittänee jauhatuksessa tapahtuvat muutokset yksittäisten kuitujen kimmomoduulissa. Verrattaessa massan lujuusindeksien kehitystä paperista mitattuihin arvoihin voidaan todeta, että kaikkien ominaisuuksien osalta massan lujuuspotentiaalin ja paperin lujuusominaisuuksien kehittyminen ei ole yhtenevää. Tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että massan lujuuspotentiaali määritetään laboratorio-olosuhteissa ja koneella valmistettavan paperin ominaisuuksiin vaikuttaa massan ominaisuuksien lisäksi merkittävässä määrin monet muut tekijät, kuten rainanmuodostusosan vedenpoistotapa, hydrodynaamiset voimat, märkäpuristus ja kuivatuskutistuman seurauksena tapahtuvat muutokset.



Kuva 44. Vetolujuusindeksi jauhatusasteen funktiona



Kuva 45. Vetojäykkyyssindeksi jauhatusasteen funktiona

10.5 Koeajon tulosten vertaaminen normaaliin tuotantoon

Koeajossa suoritettujen osakokeiden tekijäyhdistelmien toimivuutta voidaan arvioida vertaamalla mitattuja laatuominaisuuksia pidemmän aikavälin keskiarvoon. Kuvat 46 ja 47 ovat histogrammeja, joissa esitetään sekä taulukko- että graafisessa muodossa mitatuille ominaisuuksille keskiarvo (Mean), keskihajonta (StDev) ja mittaustulosten lukumäärä (N). Keskiarvolla kuvissa tarkoitetaan aritmeettista keskiarvoa eli kaikkien mitattujen arvojen summa jaetaan mittaustulosten lukumäärällä. Standardipoikkeama eli keskihajonta kertoo mittaustulosten keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta ja kuvaa Taguchi-menetelmälle olennaista elementtiä eli vaihtelua. (Operations Research Committee 1996, s. 6-7.)

Histogrammeissa y-akselia kuvataan tiheydellä (=density). Histogrammin pylvään n tiheys saadaan jakamalla pylvään datajoukon sisältämien mittaustulosten suhteellinen frekvenssi pylvään luokkaleveydellä. Tiheys on histogrammeissa hyvä kuvaamaan y-akselia erityisesti silloin, kun verrataan kahta keskenään erikokoista datajoukkoa. (Minitab LLC 2019b; Minitab LLC 2019d.)

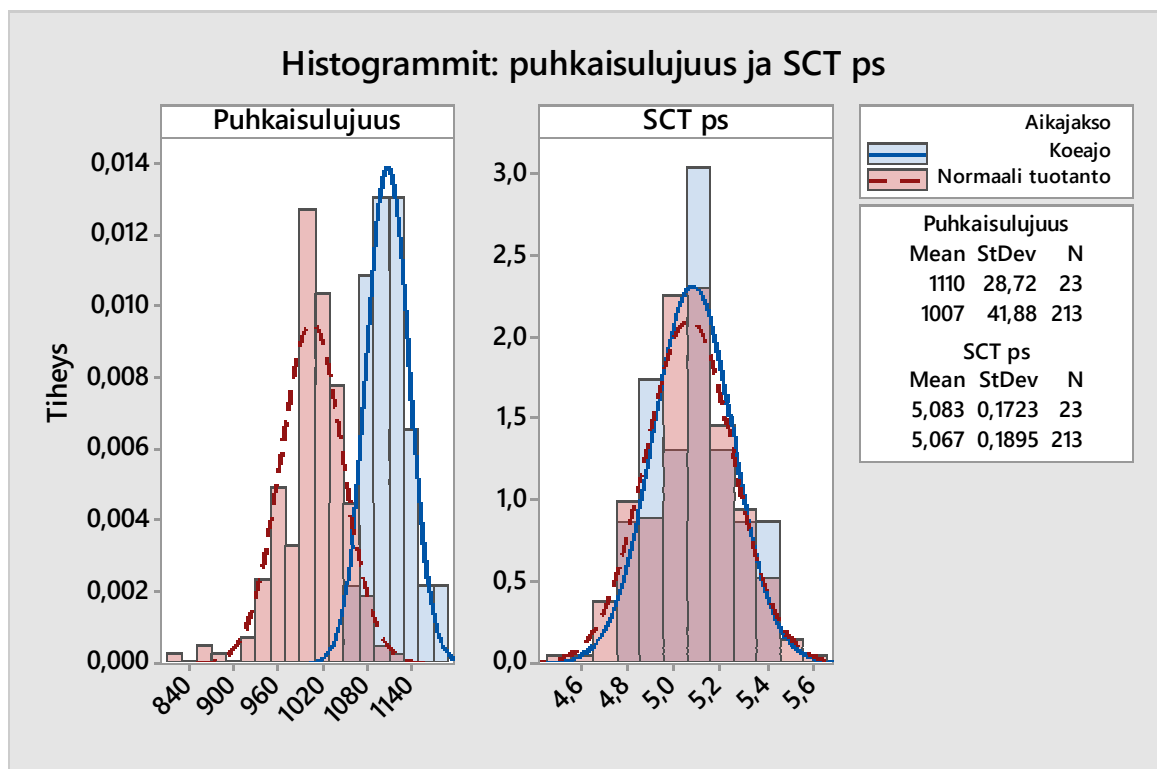
Kuvissa 46 ja 47 koeajon vertailuajanjaksona on käytetty puolen vuoden aikajaksoa lokakuusta 2019 maaliskuuhun 2020 KL225-lajilla. ”Normaali tuotanto” kuvaa siis aikaa ennen koetta ja kokeen jälkeen. Kuvista havaitaan, että lainereille tärkeimpien laatuominaisuuksien osalta koeohjelmaan valittujen tekijöiden yhteisvaikutuksella pystyttiin saavuttamaan parannusta keskimääräiseen mitattuun tasoon nähden sekä lisäksi vähentämään keskihajontaa. Taulukossa 3 esitetään prosentteina muutokset koeajon aikaisten mittaustulosten ja keskihajonnan osalta vertailuajanjaksoon nähden. Suurimmat parannukset mitatuissa arvoissa saavutettiin puhkaisulujuudessa ja konesuuntaisessa vetojäykkyydessä. Keskihajonta pieneni eniten puhkaisulujuuden ja vetojäykkyyden geometrisen keskiarvon osalta. Konesuuntaisen vetojäykkyyden keskihajonta kasvoi vertailuajanjaksoon nähden, mikä kuvastaa koeohjelmassa olleen tekijöitä, jotka tuottavat paljon vaihtelua konesuuntaiseen vetojäykkyyteen.

Tulosten tulkinnassa tulee kuitenkin huomioida eri ajanjaksoja kuvaavien näyttöiden lukumäärä; kokeen aikana otettujen näyttöiden lukumäärä on huomattavasti pienempi vertailuajanjakson näytemäärään nähden. Lisäksi laaduntuottokykyyn vaikuttavat useat tekijät, joihin kartonkikoneella ei ole vaikutusmahdollisuuksia. Näistä merkittävimpiä ovat

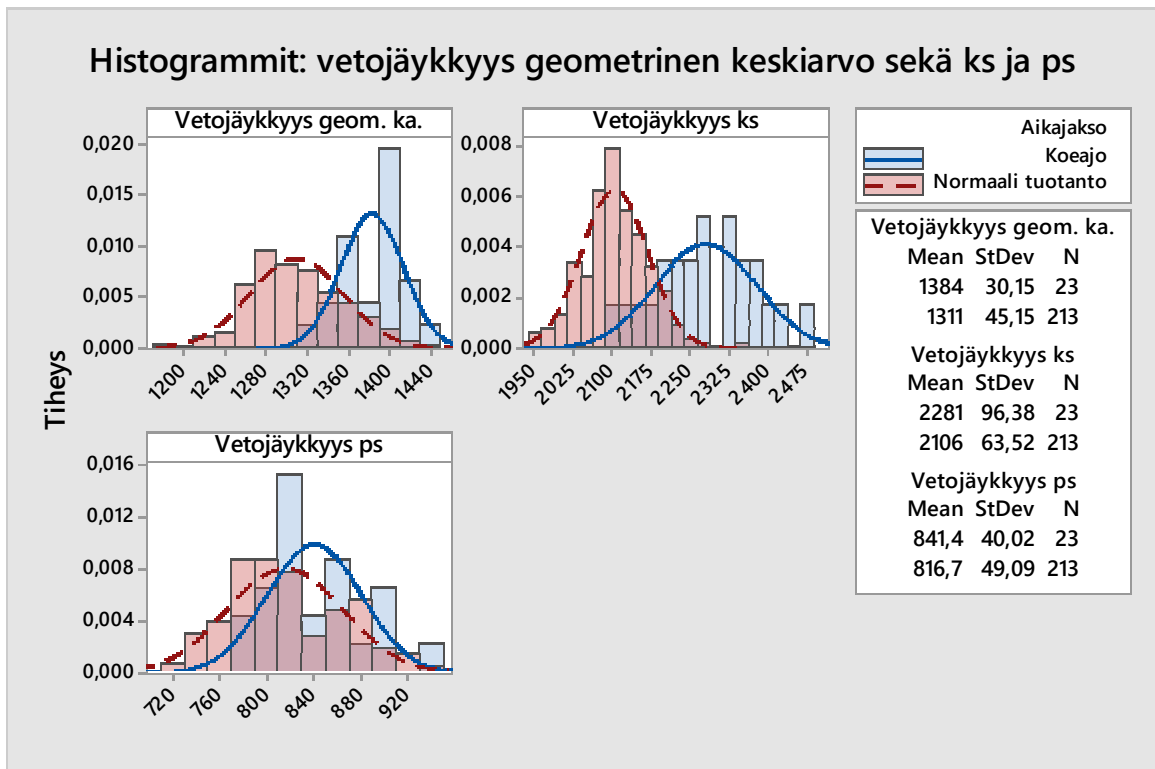
sellun- ja kierrätyskuidun laatu sekä laatuvaihtelut. Keskimääräistä tasoa vertailujakson aikana noin 18 % alaisempi RCF:n annostelumäärä selittää osittain korkeampaa puhkaisulujuutta. Annostelua jouduttiin pitämään alaisemmalla tasolla, että annostelu saatiin pidettyä vakiona kokeen suorittamisen ajan.

Taulukko 3. Koeajo vertailujaksoon nähden

Laatuominaisuus:	Muutos keskiarvossa	Muutos keskihajonnassa:
SCT ps	+0,3 %	-9,1 %
Puhkaisulujuus	+10,2 %	-31,4 %
Vetojäykkyys ps	+3,0 %	-18,5 %
Vetojäykkyys ks	+8,3 %	+51,7 %
Vetojäykkyys geometrinen keskiarvo	+5,6 %	-33,2 %



Kuva 46. Puhkaisulujuus ja SCT ps histogrammi



Kuva 47. Vetojäkkyys geometrinen keskiarvo, ks ja ps histogrammi

11 KOKEELLISEN OSAN YHTEENVETO

Kokeellisessa osassa tutkittiin kraftlainerin tärkeimpiin lujuusominaisuuksiin vaikuttavien tekijöiden vasteita ja vaikuttavuuksia Taguchi-menetelmää hyödyntäen. Koeajon suoritus onnistui teknisesti hyvin aina suunnittelupalavereista toteutukseen asti. Koe pystyttiin suorittamaan tekijöille valituilla tasoilla aiheuttamatta häiriöitä normaaliin tuotanto-ohjelmaan. Tulosten analysointi kertoo myös teknisesti onnistuneesta kokeesta, koska pareto-diagrammeista pystytään havaitsemaan, että virhetekijöiden osuus tuloksiin jäi kauttaaltaan hyvin pieneksi. Tekijöiden selittävyysasteet tutkittuihin vasteisiin olivat suurimmat taustan jauhatuksen EOK:lla.

Kokeellisen osan tulosten perusteella kraftlainereille tärkeimpien lujuusominaisuuksien kehittyminen voidaan tiivistää tapahtuvan kolmella eri mekanismilla: kuitujen sitoutumiskyvyn parantamisella, paperin tiheyden kasvamisella ja kuituorientaatioon vaikuttamalla. Kuitujen sitoutumiskyvyn edistäminen luo lisää vetysidoksia kuitujen välille ja parantaa kuituverkoston lujuusominaisuuksia. Tiheyden kasvattaminen jauhatuksella ja märkäpuristuksella lisäävät kuitujen välisten sidosten muodostumista tuomalla niitä lähemmäksi toisiaan. Nordström (2016) on todennut, että jauhatuksella saavutettu tiheyden kasvu johtaa märkäpuristuksella saavutettua tiheyden kasvua suurempaan puristuslujuuteen. Poikkisuuntaista orientaatiota lisäävät tekijät, kuten alhainen suihku/-viira -suhde ja ravistimen suurempi amplitudi kasvattavat poikkisuuntaista orientoitumista ja kehittävät poikkisuuntaisia lujuusominaisuuksia, mikä vaikuttaa positiivisesti aaltopahvin valmistuksen geometrian kannalta keskeisimpiin kraftlainerin lujuusominaisuuksiin. Taustan massatärkkelys kehitti lujuusominaisuuksia positiiviseen suuntaan parantamalla kuitujen sitoutumiskykyä ja lisäämällä kuitujen välisiä vetysidoksia.

Jauhatuksella ja märkäpuristuksella saavutettava rainan tiivistyminen parantaa tärkeimpiä lujuusominaisuuksia, mutta heikentää bulkkia ja bulkin heikkenemisen kautta lainerin taivutusjäykkyyttä. Optimoitaessa aaltopahvilaatikon kannalta tärkeimpiä lainerin ominaisuuksia tämä ei kuitenkaan ole merkittävimpiä tekijöitä, koska aaltopahvin paksuus vaikuttaa oleellisesti sen taivutusjäykkyyteen ja aaltopahvin paksuuden suurin muuttuva tekijä on pintakartongit erillään pitävän aallotuskartongin aallon profiili. Lainerin

taivutusjäykkyyden heikkenemisen suurin negatiivinen tekijä on herkempi altistuminen pyykkilautakuviolle.

Tuloksista pystytään havaitsemaan poikkisuuntaista vaihtelua eri laatuominaisuuksissa. Esimerkiksi SCT:lle ja Scott Bondille saatiin erilaiset vasteet etu-, keski- ja takareunojen alueille. Myös SCT:n koekohtaisista profiileista (liite III), nähdään että poikkisuuntainen profiili on muodoltaan hyvin samanlainen kaikissa erilliskokeissa ja koeohjelmaan valituilla muuttujilla siihen ei pystytty vaikuttamaan. Diplomityön tekemisen aikana ajettiin myös toinen koe eri tekijöillä, jolloin SCT-profiilit olivat vastaavanlaisia. Näitä poikkisuuntaisia vaihteluita selittää poikkisuuntainen neliömassaprofiili ja mahdollisesti erilainen poikkisuuntainen vedenpoistojakauma.

Kokeeseen valituista tekijöistä jauhatuksen rooli lujuusominaisuuksien muodostumisessa oli odotetusti hyvin merkittävä. Ravistimen iskunpituuden vaikutus oli eniten ennalta arvaamaton. Ravistimen jo pienelläkin iskunpituuden nostamisella normaaliin käytettyyn tasoon nähden saavutetaan tulosten perusteella parannusta kaikkiin oleellisiin lujuusominaisuuksiin. Sen lisäksi, että ravistimen iskunpituus oli esimerkiksi poikkisuuntaiseen vetojäykkyyteen eniten vaikuttava tekijä, niin se oli myös keskialueen Scott Bondiin enemmän vaikuttava tekijä, kun spraytärkkelys. Erityisen hyvää lujuusominaisuuksien parantamisessa ravistimen avulla on sen kustannustehokkuus; ravistimen suurempi iskunpituus ei käytännössä nosta tuotteen valmistuskustannuksia.

Kuituominaisuuksien jauhinkohtaisella tutkimisella havaittiin taustakerroksen jauhimien kehittävän kuituominaisuuksia hyvin eri tavalla jauhimia keskenään verrattaessa. Lujuusarkkien tekeminen jauhinkohtaisesti olisi tuonut vielä mahdollisuuden analysoida miten kuituominaisuuksien erot näkyvät massan lujuuspotentiaalissa. Kuituominaisuuksien vaikutuksia lujuusominaisuuksiin verrattaessa voidaan todeta, että kuidun pituuden väheneminen ja kuituvaurioiden lisääntyminen ei vaikuta negatiivisesti poikkisuuntaiseen puristuslujuuteen tai -vetojäykkyyteen. Jauhatuksen EOK-tason kasvaessa edellä mainitut lujuusominaisuudet paranevat, vaikka kuituvaurioiden määrä lisääntyy ja kuidun pituus lyhenee.

Verrattaessa saavutettuja tuloksia keskimääräiseen tasoon KL225-lajilla, voidaan todeta, että kokeeseen valitulla tekijäyhdistelmällä saavutettiin keskimääräistä tasoa paremmat lujuusominaisuudet ja alhaisempi keskihajonta. Tässä tarkastelussa täytyy kuitenkin muistaa, että koeajon otanta on huomattavasti pienempi suhteessa muuhun ajanjaksoon ja prosessiin vaikuttaa erilaisia kontrolloimattomia häiriömuuttujia, joita on hankala vakioida ja vaikutusta todentaa. Lisäksi laaduntuottokykyyn vaikuttaa jossain määrin puukemiasta johtuva kausittainen vaihtelu, jota käytetyllä vertailumenetelmällä ei voida ottaa huomioon.

Koeajoa analysoitiin myös kartonkikoneen tehokkuuden näkökulmasta. Trendeistä havaittiin, että esimerkiksi kuivatusosan kapasiteetti alkoi tulla rajoitetuksi vasta siinä vaiheessa, kun samaan aikaan sekä pinta- että taustamassa jauhettiin korkeammalla EOK-tasolla, massatärkkelystä annosteltiin taustaan suurempi määrä ja silikan määrä oli alemmalla tasolla. Jos esimerkiksi seuraavassa osakokeessa parametrit säilyivät edellä mainittujen osalta muuten samana, mutta massatärkkelyksen määrää laskettiin, niin kuivatusosalla höyrynpaineet laskivat. Tämä on hyvä konkreettinen osoitus Taguchi-menetelmän soveltuvuudesta tekijäyhdistelmien löytämiseen, joita ei ole mahdollista löytää yksitekijäkokeilla.

Tuloksien voidaan todeta korreloivan hyvin myös kirjallisuudessa esitettyjen teorioiden kanssa, koska kirjallisuudessa kraftlainerille tärkeimpiin lujuusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa parhaiten parantamalla kuitujen sitoutumiskykyä ja saamalla aikaan tiheyden kasvua. Yksittäisten kuitujen ja niistä muodostuvan kuituverkoston ominaisuuksia pidetään kraftlainerin lujuusominaisuuksien muodostumisen kannalta merkittävänä.

12 TYÖN YHTEENVETO JA KEHITYSEHDOTUKSET

Tämän diplomityön kirjallisessa osassa tutkittiin aaltopahvipakkauksen rakentumista ja lujuuden muodostumista. Lainereiden tärkeimmät lujuusominaisuudet ovat olennaisessa osassa aaltopahvipakkauksen lujuuden muodostumisen kannalta. Lisäksi kirjallisessa osassa perehdyttiin lainerin lujuusominaisuuksien muodostumiseen vaikuttaviin tekijöihin rainan muodostuksen kannalta sekä laineriin muodostuneisiin tärkeimpiin rakenteellisiin ominaisuuksiin. Lainerin lujuusominaisuuksien muodostumisen kannalta yksittäisten kuitujen ja kuituverkoston muodostuminen sekä kuitujen sidostenmuodostamiskyvyn parantaminen ovat merkittävässä asemassa. Lisäksi rainan tiheyttä kasvattavat tekijät kehittävät tärkeimpiä lujuusominaisuuksia positiiviseen suuntaan.

Kokeellisessa osassa tutkittiin kraftlainerikoneen lujuusominaisuuksien kehittämistä Taguchi-menetelmällä. Taguchi-menetelmän ansiosta kokeellisessa osassa saatiin 2048 erillistä yksitekijäkoetta vastaava informaatio sekä tekijöiden yhteisvaikutuksia, joita yksitekijäkokeilla ei voida selvittää. Kokeellisen osan tuloksien perusteella voidaan referoida lujuusominaisuuksien kehittyvän kolmella eri mekanismilla: kuitujen sitoutumiskyvyn parantamisella, paperin tiheyden kasvamisella ja kuitujen poikkisuuntaisella orientoitumisella. Poikkisuuntaista orientoitumista lisäävillä tekijöillä arkin rakennetta saatiin enemmän isotrooppiseksi, jolloin myös geometriset lujuusominaisuudet kehittyivät.

Työlle asetetut tavoitteet täyttyivät. Kokeellisessa osassa saatiin selville lujuusominaisuuksiin positiivisesti vaikuttavia tekijöitä sekä myös robusteja tekijöitä, joilla lujuusominaisuuksiin ei ole merkittävää negatiivista tai positiivista vaikutusta. Myös merkityksettömien tekijöiden tunnistaminen on prosessin ja tuotteen laadun kehittämisen kannalta tärkeää. Kokeellisen osan tulosten perusteella saatiin muodostettua vaikutusmatriisi koeohjelmaan valittujen muuttujien ja tärkeimpien lujuusominaisuuksien välille. Vaikutusmatriisin tiivistetty versio esitetään liitteessä IV.

Työn tekemisen aikana havaittiin selkeitä muutoksia massan jauhautuvuudessa. Tiettyjen aikajaksojen aikana samalla EOK-tasolla massan jauhautuvuus oli hyvin erilaista. Eroavaisuutta näiden aikajakson aikana ei voida selittää ainoastaan esimerkiksi jauhinterien

kulumisella, koska aikajaksot olivat hyvin lähellä toisiaan. Jonkin verran vaihtelua massan jauhautuvuuteen voi tuoda esimerkiksi raaka-aineena käytettävän sahakkeen osuus. Kuusikuidun dimensiot eroavat mäntykuidusta, mikä johtaa erilaiseen jauhautuvuuteen.

Koeajoissa havaittiin jauhatuksen vaikuttavan merkittävästi lujusominaisuuksiin. Kuituominaisuuksien ottaminen mukaan jauhatuksen seurantaan voisi tuoda mahdollisuuksia löytää laatuvaihteluihin vaikuttavia tekijöitä mahdollisesti havaittavien muuttuvien kuituominaisuuksien kautta. Tätä kautta päästäisiin mahdollisesti kiinni sellutehtaan tuotantoprosessissa tapahtuviin vaihteluihin. Jauhatusastetta ja kuituominaisuuksia mittaavan PEX -analysointilaitteen kuituominaisuusmittaukset voisi rakentaa siirtymään Wedgeen seurannan helpottamiseksi. Laite mittaa jokaisesta analysoidusta näytteestä esimerkiksi hienoaineksen määrän, kuidun polvekkeiden määrän, kiharuuden ja kuidunpituuden- sekä leveyden. Näiden mittausten kautta päästäisiin mahdollisesti myös paremmin kiinni kausittaisiin puukemian kautta tuleviin laatuvaihteluihin. Myös koeajoissa massojen analysointiin käytetyn kajaaniFS300 -analysointilaitteen tehokkaampi hyödyntäminen voisi tuoda lisää tietoutta kuituominaisuuksista.

Kuidun jauhautuvuutta ja lujusominaisuuksien saavuttamiseksi tarvittavaa jauhatusenergiaa voitaisiin seurata myös tekemällä säännölliset laajemmat jauhatusnäytekerrokset esimerkiksi kerran kvartaalissa. Näytekerroksella otettaisiin massanäytteet ennen ja jälkeen jokaisen jauhimen ja näytteistä tehtäisiin SR-tason ja sakeuden lisäksi käsiarkit ja käsiarkeista määritettäisiin lujusindeksit. Tällaisella seurannalla pystyttäisiin pitkällä aikavälillä tutkimaan kuidun jauhautuvuutta ja lisäksi pitämään jauhatusteet optimitasolla. Tästä kertyvällä datahistorialla pystyttäisiin lisäksi paremmin pääsemään kiinni sellutehtaalla mahdollisesti tapahtuviin muutoksiin ja myös kausittaisiin vaihteluihin.

Lujusominaisuuksien poikkisuuntaista hajontaa voitaisiin selvittää tutkimalla poikkisuuntaista formaatioprofiilia. Tällä tutkimuksella saataisiin selvitettyä pienimittakaavaisen neliömassavaihtelun vaikutusta eri lujusominaisuuksien mittaustuloksiin ja niiden poikkisuuntaiseen hajontaan. Esimerkiksi SCT on mittaustulosten johtuen herkkä neliömassavaihteluille.

LÄHTEET

Aaltonen, P. 1983a. Paperirainan tiivistyminen. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. s. 151-168.

Aaltonen, P. 1983b. Sulpun suotautuminen. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. S. 121-149.

Aaltonen, P., Pfaler, J. & Ryti, N. 1983. Rainanmuodostus. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. s. 551-606.

Aaltonen, P. & Nordman, L. 1983. Paperin rakenne. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. s. 169-206.

Anonen, T. & Mäkinen, T. 2020. Perustietoa aaltopahvista [julkaisematon dokumentti]. Stora Enso.

Alava, M. & Niskanen, K. 2008. In-plane Tensile Properties. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Paper Physics. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 182-224. Papermaking Science and Technology. Book 16. Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Arvela, P. 1983. Paperin sorptio-ominaisuudet. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. s. 253-270.

Auvinen, S. & Lahtinen, K. 2008. Converted Paper and Paperboard as Packaging Materials. Teoksessa: Kuusipalo, J. (toim.) Paper and Paperboard Converting. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 286-333. Papermaking Science and Technology. Book 12.

Barbe, M. C., Jordan, B. D., Page, D. H. & Seth, R. S. 1985. Curl, Kinks and Microcompressions in Pulp Fibres – Their Origin, Measurement and Significance. Teoksessa: Punton, V. (toim.) Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium. Oxford. S. 183-227.

Brezinski, J. P. 1956. The Creep Properties of Paper. Tappi Journal Volume 39 No 2. S. 116-128.

Carlsson, L. A. & Hägglund, R. 2012. Packaging Performance. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Mechanics of Paper Products. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co. S. 29-52.

Cepi ContainerBoard. 2017. European List of Corrugated Base Papers. 5th Edition. Viitattu 26.3.2020. Saatavilla: <https://www.cepi-containerboard.org/>.

Fellers, C. 2007. Scientific Characterisation of European Corrugated Board Materials. SP-2 Sustainpack Seminar. Latest Innovation in Cellulose Packaging.

Guay, D., Malandri, N., Mattingly, K., Rantanen, W., Ross, N., Schneider, M. & Stephens, A. 2005. Comparison of Fiber Length Analyzers. TAPPI Practical Papermaking Conference Proceedings.

Gustafsson, P.-J. & Niskanen, K. 2012. Paper as an Engineering Material. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Mechanics of Paper Products. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co. S. 5-22.

ISO 15754. 2009. International Standard. Paper and Board – Determination of Z-directional Tensile Strength. First Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 14 s. Standardien lainaukset on tehty Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n luvalla.

ISO 16260. 2016. International Standard. Paper and Board – Determination of Internal Bond Strength. First Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 22 s. Standardien lainaukset on tehty Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n luvalla.

ISO 1924-2. 2008. International Standard. Paper and Board – Determination of Tensile Properties. Third Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 12 s. Standardien lainaukset on tehty Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n luvalla.

ISO 2759. 2014. Board – Determination of Bursting Strength. Fourth Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 13 s. Standardien lainaukset on tehty Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n luvalla.

ISO 5628. 2019. International Standard. Determination of Bending Stiffness – General Principles for Two-point, Three-point and Four-point Methods. Third Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 8 s. Standardien lainaukset on tehty Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n luvalla.

ISO 9895. 2008. International Standard. Paper and Board – Compressive Strength – Short-span Test. Second Edition. Geneve: International Organization for Standardization. 8 s.

Jokisalo, H. & Salomäki, K. 1983. Matalasakeusjauhatuus. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. S. 421-435.

Juran, J. M. & Godfrey, A. B. 1998. Juran's Quality Handbook. Fifth Edition. New York: McGraw-Hill. 1698 s.

Kajanto, I. 2008. Structural Mechanics of Paper and Board. Teoksessa: Niskanen, K (toim.) Paper Physics. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 230-264. Papermaking Science and Technology. Book 16. Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Karjalainen, E. 1992. Teollinen koesuunnittelu – Esimerkkejä Suomessa toteutetusta kokeellisesta tuotteen ja prosessin suunnittelusta Taguchi-menetelmällä. Tekninen tiedotus 9/92. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 161 s.

Karjalainen, E. 1989. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla – Taguchi-menetelmä. Tekninen tiedotus 25/89. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 94 s.

Ketoja, J. 2008a. Dimensional Stability. Teoksessa: Niskanen, K (toim.) Paper Physics. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 320-348. Papermaking Science and Technology. Book 16

Ketoja, J. 2008b. Rheology. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Paper Physics. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 296-316. Papermaking Science and Technology. Book 16.

Kiviranta, A. 2000. Paperboard Grades. Teoksessa: Paulapuro, H. (toim.) Paper and Board Grades. Helsinki: Fapet Oy. 2000. S. 55-75. Papermaking Science and Technology. Book 18.

Knowpap. 2019a. Kuitujen rakenne. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin). Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Knowpap. 2019b. Kuituraaka-aineet. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin).

Knowpap. 2019c. Massojen jauhatus - yleistä. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin). Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Knowpap. 2019d. Märkäpuristus. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin).

Knowpap. 2019e. Palstautumislujuus. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin). Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Knowpap. 2019f. Rainanmuodostuksen teoria. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin). Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Knowpap. 2019g. Vetolujuus. Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, versio 21.0 [sähköinen lähde]. AEL, Prowledge Oy. Saatavilla: <http://www.knowpap.com/> (vaatii maksullisen lisenssin). Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Koskenhely, K. 2007. Refining of Chemical Pulp Fibres. Teoksessa: Paulapuro, H. (toim.) Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy. 2007. S. 94-134. Papermaking Science and Technology. Book 8.

Krogerus, B. Papermaking Additives. 2007. Teoksessa: Alén, R (toim.) Papermaking Chemistry, Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 56-118. Papermaking Science and Technology. Book 16.

Laakso, O. & Rintamäki, T. 2000. Aaltopahvin valmistus ja jalostus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 2003. Suomen Aaltopahviyhdistys ry ja opetushallitus. 143 s. Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Laamanen, M. & Lahti, J. 2008. Fibre-based Packaging Materials. Teoksessa: Kuusipalo, J. (toim.) Paper and Paperboard Converting. Second Edition Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 210-241. Papermaking Science and Technology. Book 12.

Laine, J. General Aspects of Papermaking Chemistry. 2007. Teoksessa: Alén, R (toim.) Papermaking Chemistry. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 28-52. Papermaking Science and Technology. Book 16.

Levlin, J.-E. 1999. General Physical Properties of Paper and Board. Teoksessa: Levlin, J.-E. & Söderhjelm, L. (toim.) Pulp and Paper Testing. Helsinki: Fapet Oy, S. 138-160. Papermaking Science and Technology. Book 17.

Levlin, J.-E., Nordman, L. & Visti, J. 1983. Kuivatuksen vaikutus paperirainan ominaisuuksiin. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, Paperin valmistus osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. S. 705-724.

Lipponen, E. 1983. Paperin liimaus. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. Osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. S. 271-309.

Markström, H. 1991. The Elastic Properties of Paper – Test Methods and Measurement Instruments. Tukholma: Lorentzen & Wetter. 45 s.

Mauranen, P. 1983. Tärkeimmät paperi- ja kartonkilajit. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, Paperin valmistus osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. 361-390.

Minitab LLC 2019a. Designing an Experiment [verkkodokumentti]. Minitab 18 Support. [Viitattu 3.1.2019]. Saatavissa: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/>

Minitab LLC. 2019b. Specify the Default Settings for Histograms [verkkodokumentti]. Minitab 18 Support. [Viitattu 3.1.2019]. Saatavissa: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/minitab-environment/settings-and-defaults/individual-graphs/histograms/>

Minitab LLC. 2019c. Taguchi Designs [verkkodokumentti]. Minitab 18 Support. [Viitattu 3.1.2019]. Saatavissa: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>

Minitab LLC. 2019d. Y-Scale Type [verkkodokumentti]. Minitab 18 Support. [Viitattu 3.1.2019]. Saatavissa: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/graphs/how-to/general-graph-options/graph-framework-and-scale/y-scale-type/#y-scale-type-for-histograms>

Montgomery, D. 2013. Design and Analysis of Experiments. 8th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 725 s.

Montgomery, D. 2009. Introduction to Statistical Quality Control. Sixth Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 729 s.

Niskanen, K. 2012. Micromechanics. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Mechanics of Paper Products. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co. S. 197-227.

Niskanen, K. & Pakarinen, P. 2008. Paper Structure. Teoksessa: Niskanen, K. (toim.) Paper Physics., Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 11-58. Papermaking Science and Technology. Book 16.

Nordman, L. 1983. Paperin ja kartongin tutkimusmenetelmät. Teoksessa: Arjas, A. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, Paperin valmistus osa 1.

Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. 391-408.

Nordström, B. 2014. Unbleached Linerboard Kraft Pulps with Different Kappa Number (yield) – Effects on Tensile Properties and Compression Strength with Free or Restrained drying. Paper Physics. Nordic Pulp & Paper Research Journal Vol 29 no (3). S. 462-467.

Nordström, B. 2016. Densification by Wet Pressing Versus Refining of Never-dried High-Yield Softwood Kraft Pulp – Effects on Compression Strength, Tensile Stiffness and Tensile Strength. Paper Physics. Nordic Pulp & Paper Research Journal Vol 31 no (3). S. 422-431.

Norman, B. 2007. Web Forming. Teoksessa: Paulapuro, H. (toim.) Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy. 2007. S. 219-282. Papermaking Science and Technology. Book 8.

Operations Research Committee. 1996. Statistical Methods Manual. Montreal: Technical Section Canadian Pulp and Paper Association. 45 s.

Panthai, S., Patchiyo, T., Puthson P. & Somboon, P. 2017. Analysis of Cracking Potential and Micro-Elongation of Linerboard. Pulp and Paper Technology, University of Bangkok, Department of Forest Products. 6 s.

Paulapuro, H. 2008. Wet Pressing. Teoksessa: Paulapuro, H. (toimittaja). Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy. 2007. S. 344-391. Papermaking Science and Technology. Book 8. Saatu lupa kuvamateriaalin käyttöön.

Piirainen, A. 2014. Vaihtelu. Lahti: Quality Knowhow Karjalainen Oy. 185 s.

Popil, R. 2017. The Physical Testing of Paper. Shawbury: Smithers Group Company. 193 s.

Pruitt, M. 2008. How Fourdrinier Table Control Affects Strength and Speed on Linerboard. Pulp & Paper November 2008. s. 33-35.

Puusta paperiin M-506 Kartonkoneet. 1997. Sepsilva Ltd Oy. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy.

Roy, R. 2010. A Primer on the Taguchi Method. 2nd Edition. Michigan: Society of Manufacturing Engineers. 299 s.

SCA Investor Presentation. 2020. SCA Investor Relations [verkkodokumentti]. 95 s. Julkaistu 30.1.2020. [Viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://www.sca.com/globalassets/sca/investerare/presentationer/2019/2020-01-30-investor-presentation.pdf>

Soininen, M. 1983. Paperirainan kuivatus. Teoksessa: Arjas, A. (toimittaja). Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, Paperin valmistus osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys r.y., Oy Turun Sanomat/Serioffset Osa 1. 641-702.

Sirviö, J. 2008. Fibres and Bonds. Teoksessa: Niskanen, K. (toimittaja). Paper Physics. Second Edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. S. 61-89. Papermaking Science and Technology. Book 16.

Stora Enso. 2019. Varkauden pakkauskartonkitehtaan esittelyaineisto [sisäinen verkkosivu]. Viimeksi päivitetty 13.6.2019. [Viitattu 10.10.2019].

T 494 om-01. 2006. Tensile Properties of Paper and Paperboard (using constant rate of elongation apparatus). TAPPI Standard.

T 804 om-06. 2006. Compression Test of Fiberboard Shipping Containers. TAPPI Standard.

Wendler, S. 2006 Washboarding of Corrugated Board. Doctoral Thesis. Department of Applied Physics. Royal Melbourne Institute of Technology.



Monimuuttujakoeajo KL225 -lajin lujuusominaisuuksien kehittämiseksi

1. Taustatiedot ja tavoitteet

Koeajolla on tarkoitus löytää tekijöitä, joilla pystytään vaikuttamaan parhaiten tuotteen tärkeimpiin lujuusominaisuuksiin, erityisesti puristuslujuuteen, ja vähentämään laatuvaihteluita. Koe suoritetaan Taguchi L12 -monimuuttujakokeena ja koeohjelma sisältää 12 erilliskoetta, joissa muutetaan yhtätoista tekijää. Koeohjelma on viimeisellä sivulla.

2. Aikataulu

Koeajo suoritetaan KL225 -lajilla ja koe aloitetaan torstaina 21.11 noin klo 13, kun laji vaihtuu KL225:lle. Koe kestää arviolta noin 24-25 h.

3. Resurssit, näytteenotto ja laboratoriomääritykset

Näytteenotot on ohjeistettu taulukkomuodossa viimeisellä sivulla.

Näytteenotto ja laadunvarmistus operaattoreiden toimesta

- Yksi poikkiratanäyte+arkki jokaisen muutoksen jälkeisestä konerullasta. Näistä normaalit tuotannon aikaiset määritykset operaattoreiden toimesta. Vaikka kaikki muutokset eivät ole tässä täysin tulleet läpi, niin tarkoitus on varmistaa, että koneelta syntyy myyntikelpoista tuotantoa.
- Viisi poikkiratanäytettä jokaisesta koevaiheesta: 1 kpl poikkiratanäyte+arkki keskeltä ajonaikaisiin mittauksiin PaperLab:lle, 1 kpl formaatiota/Scott Bondia varten ja 3 kpl poikkisuuntaisen SCT-profiilin määrittystä varten. Ajetaan kokeen aikana tämä yksi poikkiratanäyte operaattoreiden toimesta PaperLab:lla läpi ja määritetään Scott Bond keskeltä otettavasta arkista. Muut poikkiratanäytteet (4 kpl) jätetään merkittynä (konerullanumerotarra, hp/kp ja koepiste) tuotannon labraan.

Laboratorion toimesta tehtävä näytteenotto ja määritykset kaikissa koevaiheissa

Paperinäytteiden määritykset

- Kolme poikkiratanäytettä ajetaan PaperLab:lla ohjelmalla, joka antaa kaikki mittaukset
- Formaatio
- Scott Bond (kolmesta kohdasta)
- Pinnan visuaalinen teippikoe

Koepisteen 4 massanäytteiden ottaminen

- Jauhamattoman massan näyte männyn jauhatussäiliöltä
- Mänty 1 pinta näyte PEX:ltä
- Mänty 2 pinta näyte PEX:ltä

- Mänty 1 tausta PEX:Itä
- Mänty 2 tausta PEX:Itä
- Mänty 3 tausta PEX:Itä

Koepisteen 7 massanäytteiden ottaminen

- Mänty 1 pinta näyte PEX:Itä
- Mänty 2 pinta näyte PEX:Itä
- Mänty 1 tausta PEX:Itä
- Mänty 2 tausta PEX:Itä
- Mänty 3 tausta PEX:Itä

Määrytykset massanäytteistä

- SR-taso ja sakeus seoksista pinta (mänty 1 pinta ja mänty 2 pinta) ja tausta (mänty 1 tausta, mänty 2 tausta ja mänty 3 tausta).
- Kajaani FS300 -kuituanalysaattorin määrytykset:
 - Taustan jauhimilta erikseen (mänty 1 tausta, mänty 2 tausta ja mänty 3 tausta).
 - Pinnan jauhimilta erikseen (mänty pinta 1 ja mänty pinta 2).
 - jauhamattoman massan näyte
- Vetolaitteen antamat arvot käsiarkeista:
 - jauhamaton tausta
 - koepiste 4 tausta seoksena
 - koepiste 4 pinta seoksena
 - koepiste 7 tausta seoksena
 - koepiste 7 pinta seoksena

4. Kokeen aikana vakioitavat arvot

Kokeessa keskitytään pääosin selvittämään jauhatuksen, raaka-aineiden ja viiraosan tekijöiden vaikutusta lujuusominaisuuksiin. Kaikki muut paitsi kokeeseen valitut tekijät pyritään vakioimaan kokeen ajaksi.

- Kokonaisneliömassa: 225 gsm
- Hylyn annostelu vakioidaan kokeen ajaksi
- Pinnan neliömassa pidetään vakiona kokeen suorittamisen ajan
- Alaviiran vetotelan nopeus vakioidaan noin 450 m/min tasolle
- Sekä pinnan että taustan jauhatussakeudet pidetään vakiona kokeen suorittamisen ajan
- Viiraveden sakeudet (pinta ja tausta) pidetään vakiona kokeen suorittamisen ajan
- Pinnan ja taustan viiraosan parametrit (alipaineet, kuormituslista, listakulmat jne.) pidetään kokeen aloitushetken mukaisessa tilanteessa.
- 1- ja 2-puristimien kuormitus pidetään vakiona kokeen suorittamisen ajan
- Puristimen ja kuivatusosan väliset vetoerot pyritään pitämään vakiona kokeen suorittamisen ajan
- Kuivatusosan vetoerot: pyritään pitämään vakiona kokeen suorittamisen ajan

5. Kokeen suoritus

Kokeessa ajetaan 12 erillistä koetta (taulukossa riveillä), joissa tutkitaan 11 eri tekijän (taulukossa sarakkeissa) vastetta lujuusominaisuuksiin. Kokeen aikana syntyvä tuotanto menee tilauksiin ajo-ohjelman mukaisesti.

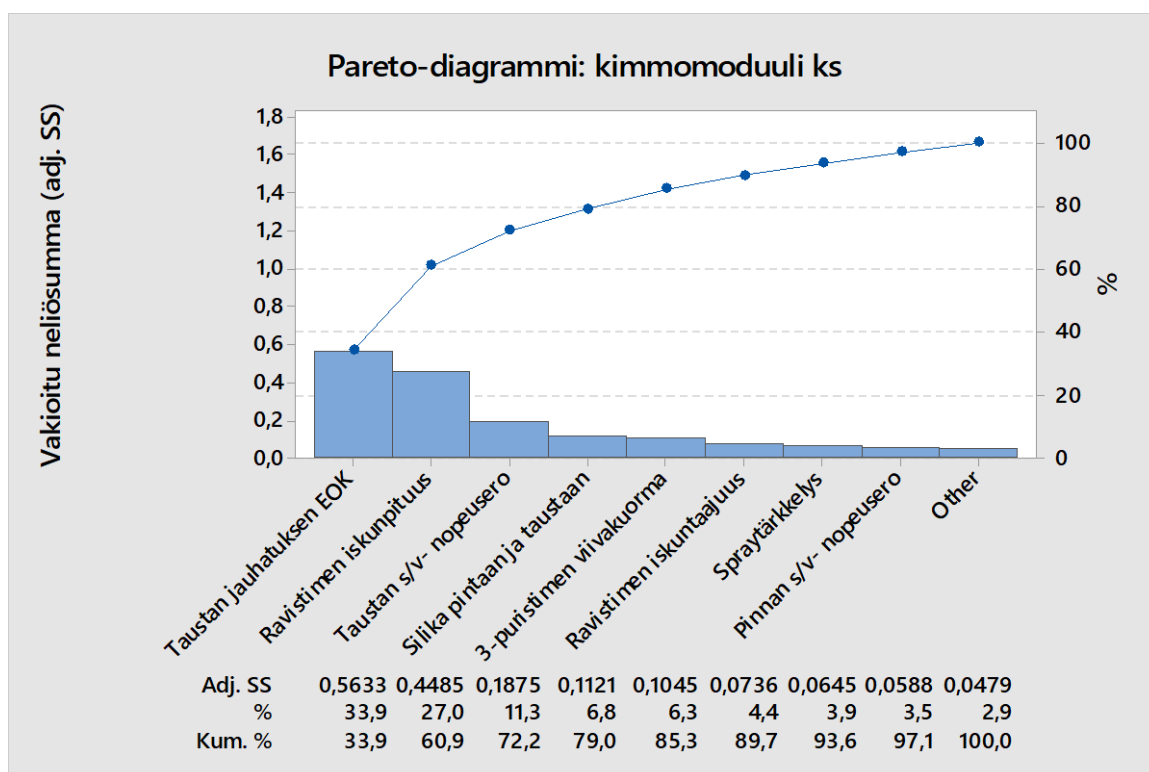
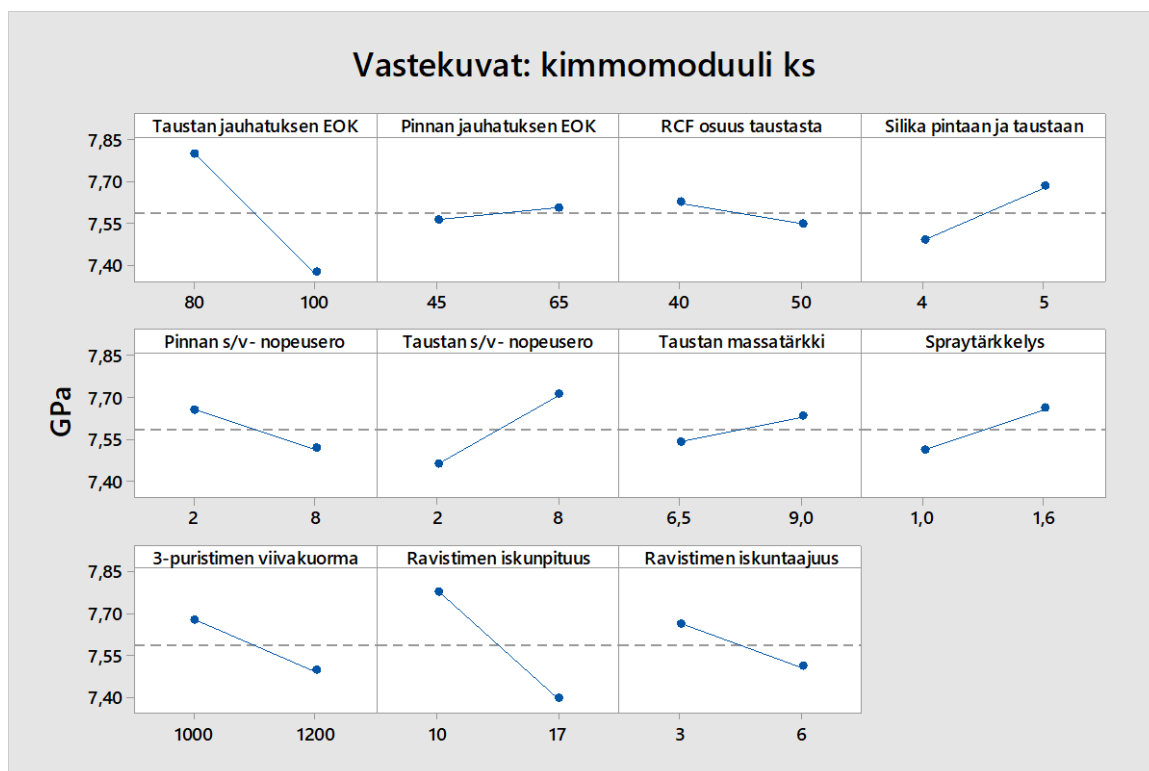
Siirryttäessä kokeesta toiseen tekijöitä muutetaan yhtäaikaaisesti. Kokeissa jokaisella tekijällä on kaksi eri tasoa ja koeohjelma muodostuu yhdentoista eri tekijän eri tasojen yhdistelmistä. Monimuuttujakokeen tulosten luotettavuuden kannalta on tärkeää, että kokeet ajetaan koesuunnitelmassa esitetyillä arvoilla. Koesuunnitelma on liitteenä viimeisellä sivulla. Viimeisellä sivulla on myös taulukko koevaiheiden seuraamisen helpottamiseksi.

Mikäli kokeen aikana havaitaan, että syntyvä tuote ei ole myyntikelpoista niin otetaan näytteet ja siirrytään seuraavaan koepisteeseen.

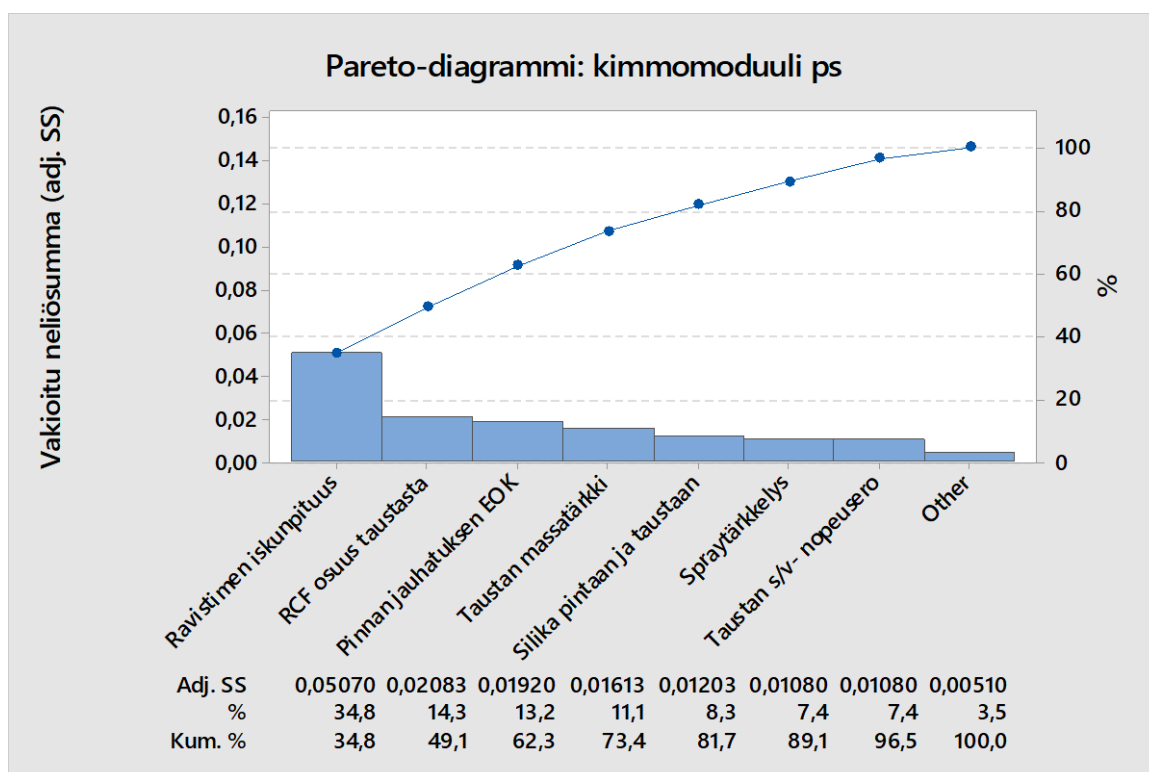
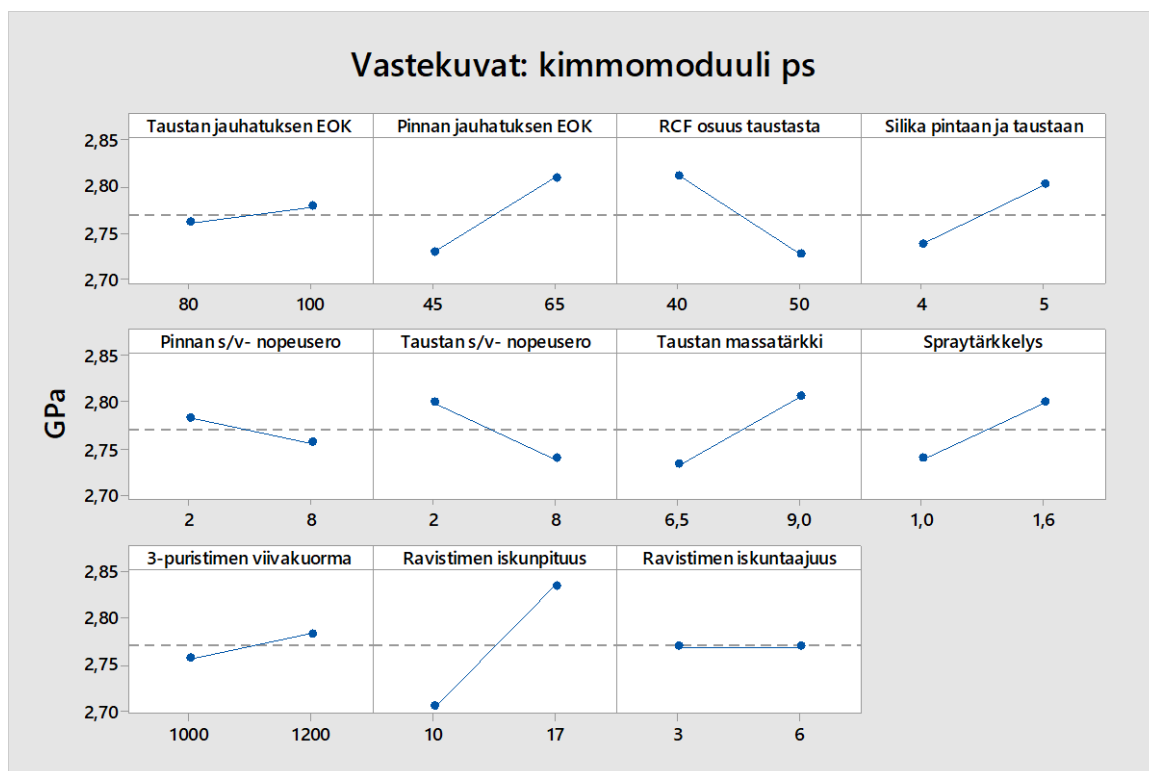
Kokeen tekijöiden selitykset ja yksiköt:

- Taustan jauhatuksen EOK. Taustamännyn jauhimille 1, 2 ja 3 asetetaan kokeen mukainen EOK-taso (kWh/t).
- Pinnan jauhatuksen EOK. Pintamännyn jauhimille 1 ja 2 asetetaan kokeen mukainen EOK-taso (kWh/t).
- RCF annostelu. RCF annostelu asetetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (%).
- Siilika pintaan ja taustaan. Ajetaan koeohjelman mukaan siikaa sekä pintaan että taustaan (kg/t).
- Pinnan suihku-/viira -nopeusero. Pinnan suihku-/viira nopeusero ajetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (m/min).
- Taustan suihku-/viira -nopeusero. Pinnan suihku-/viira nopeusero ajetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (m/min).
- Taustan massatärkki. Asetetaan taustan massatärkkelys koeohjelman mukaisiin arvoihin (kg/t).
- Spraytärkkelys. Spraytärkkelyksen määrä asetetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (g/m²).
- 3-puristin viivakuorma. Asetetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (kN/m).
- Ravistimen iskunpituus. Ravistimen iskunpituus asetetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (mm).
- Ravistimen iskuntaajuus. Ravistimen iskuntaajuus asetetaan koeohjelman mukaisiin arvoihin (hZ).

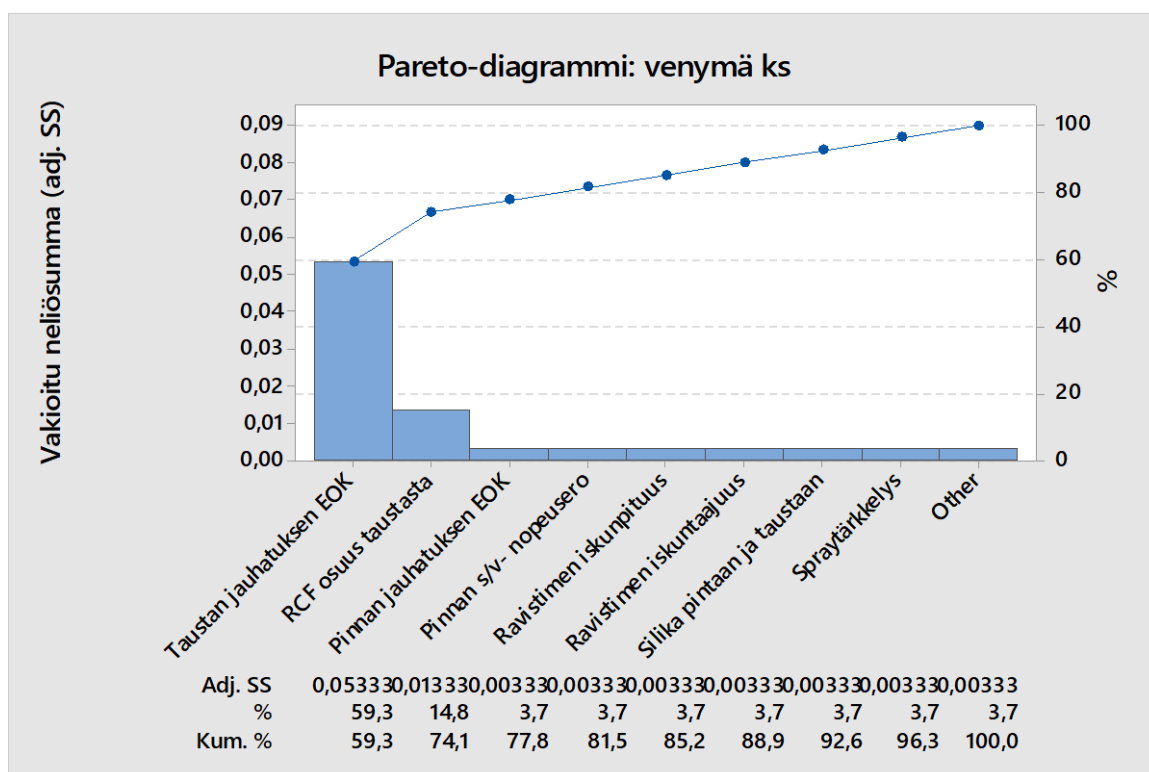
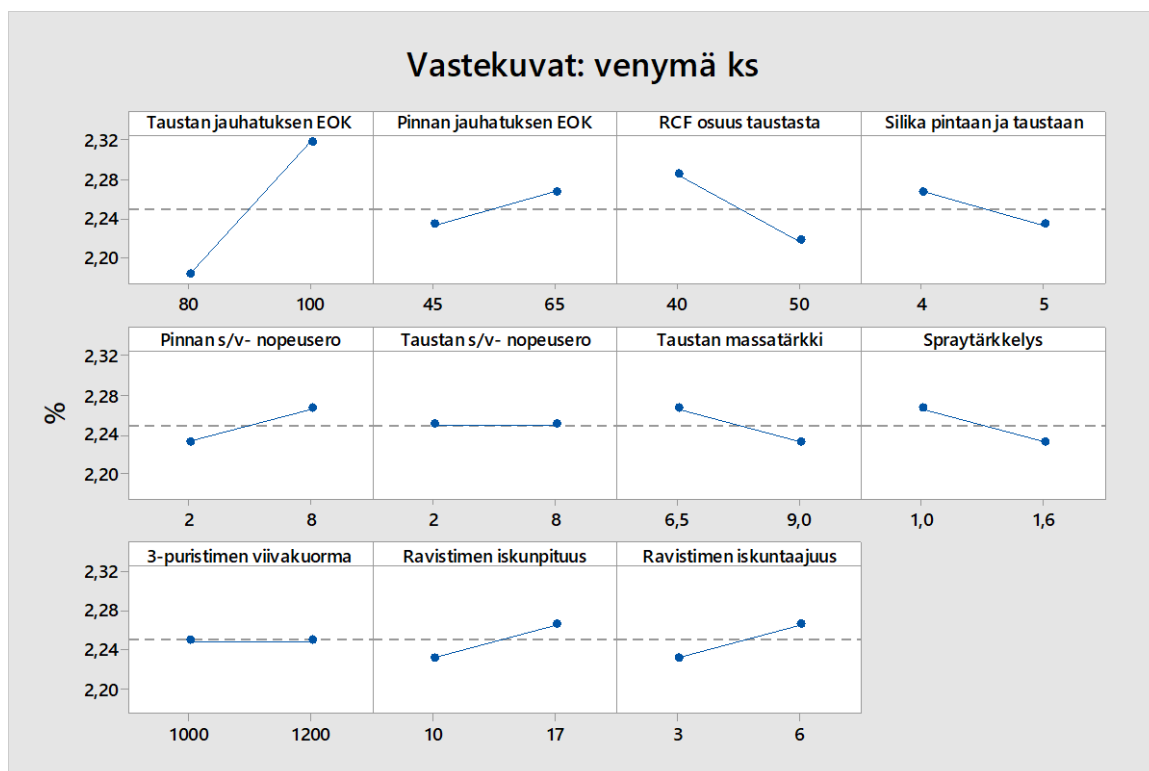
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 1 (14)



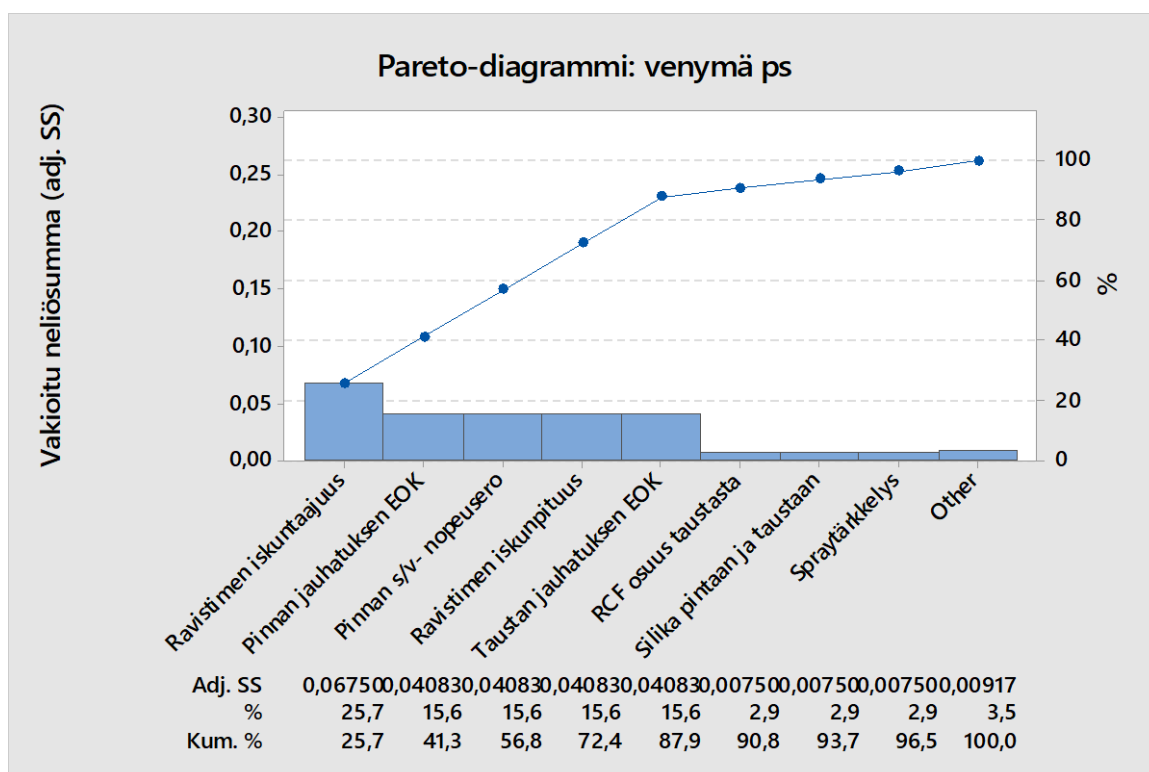
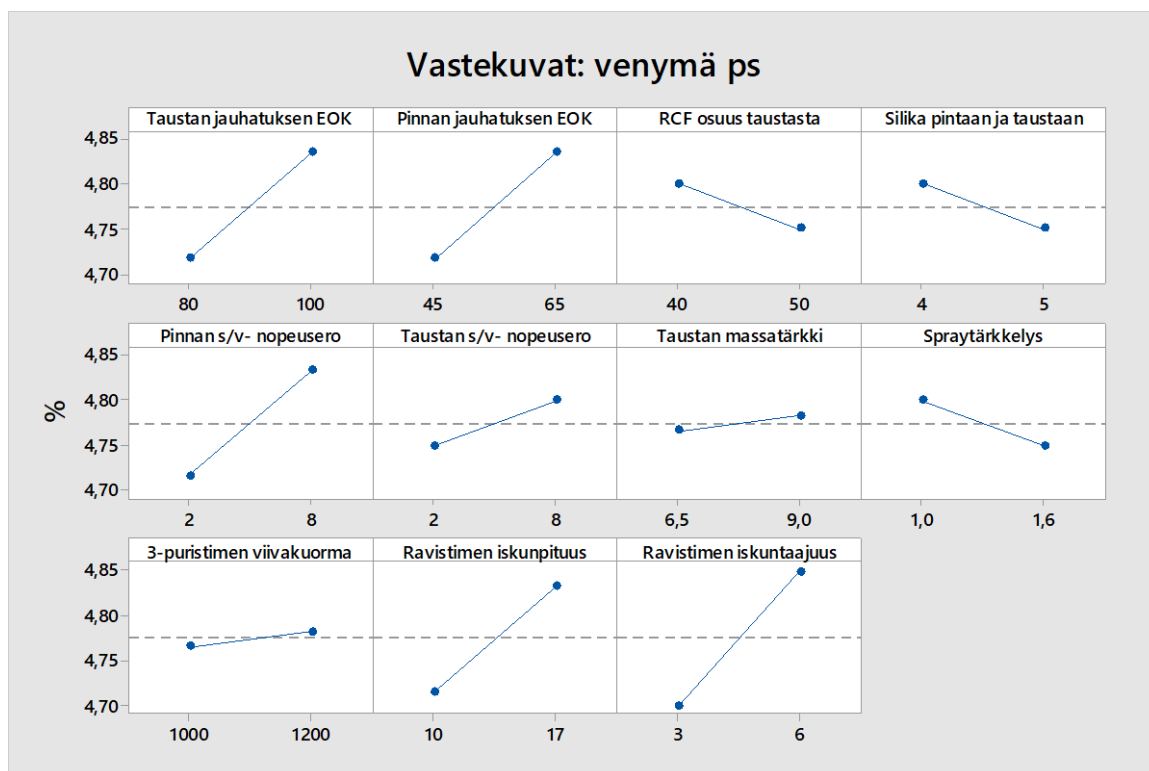
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 2 (14)



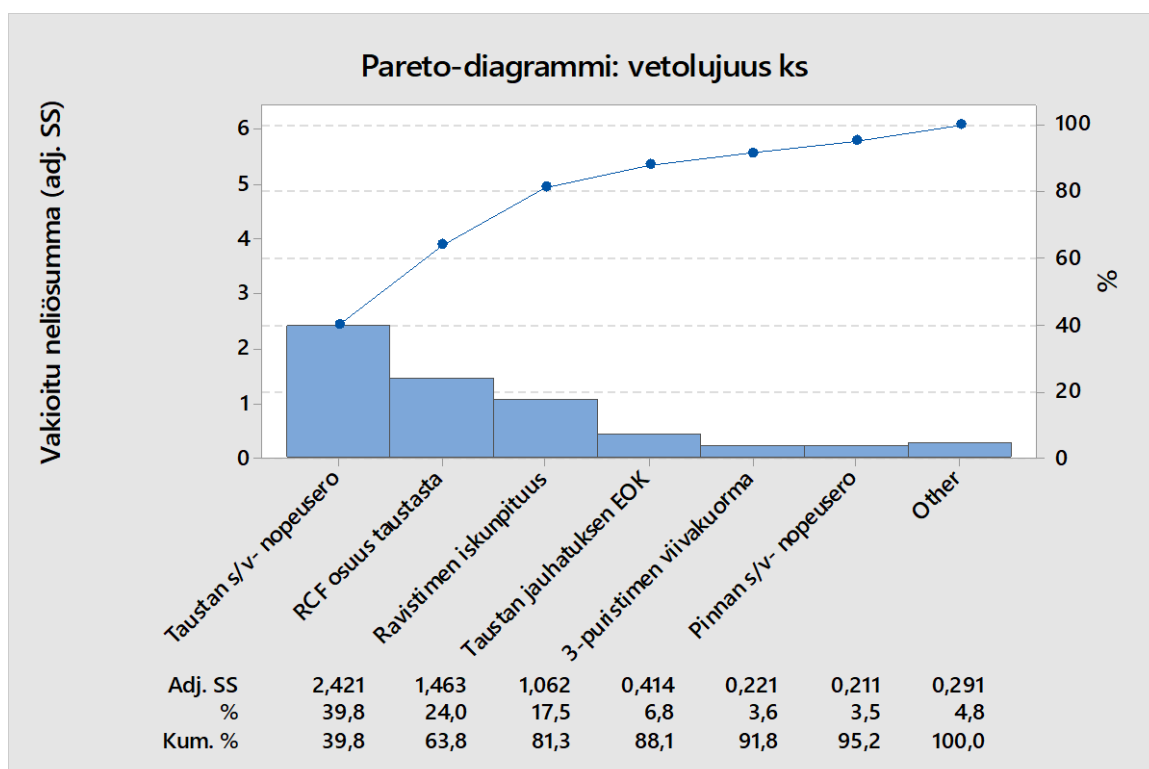
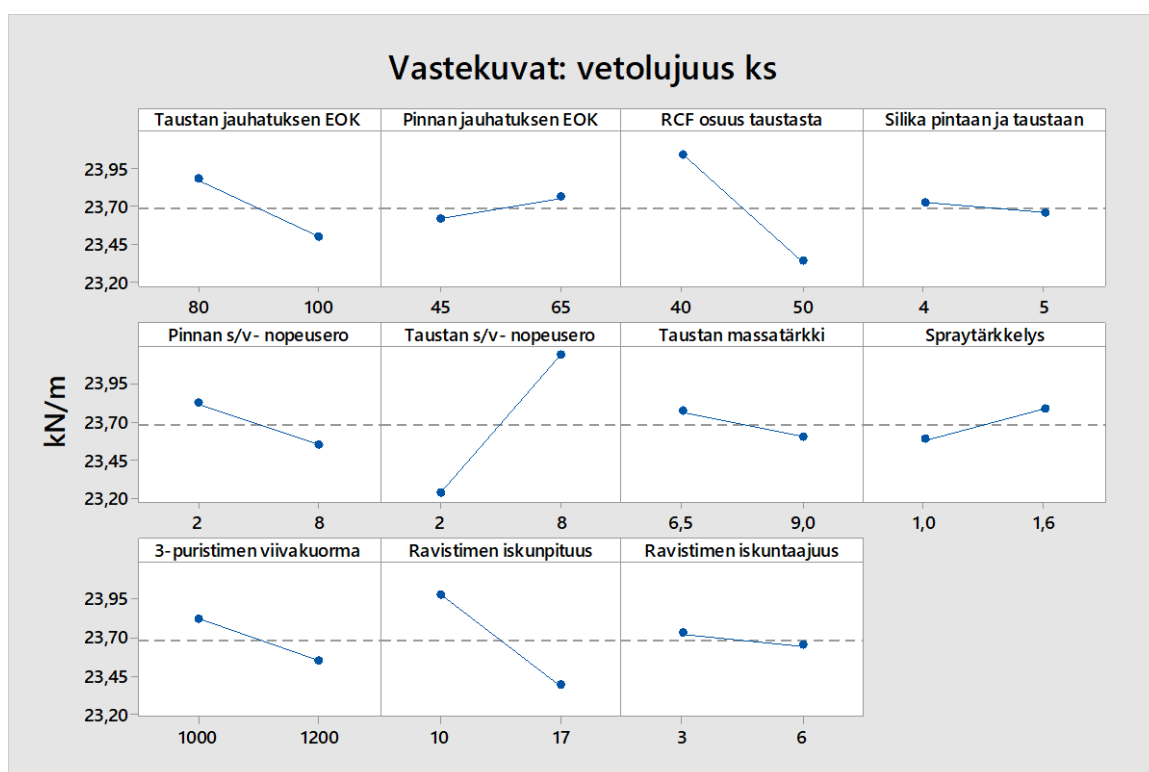
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 3 (14)



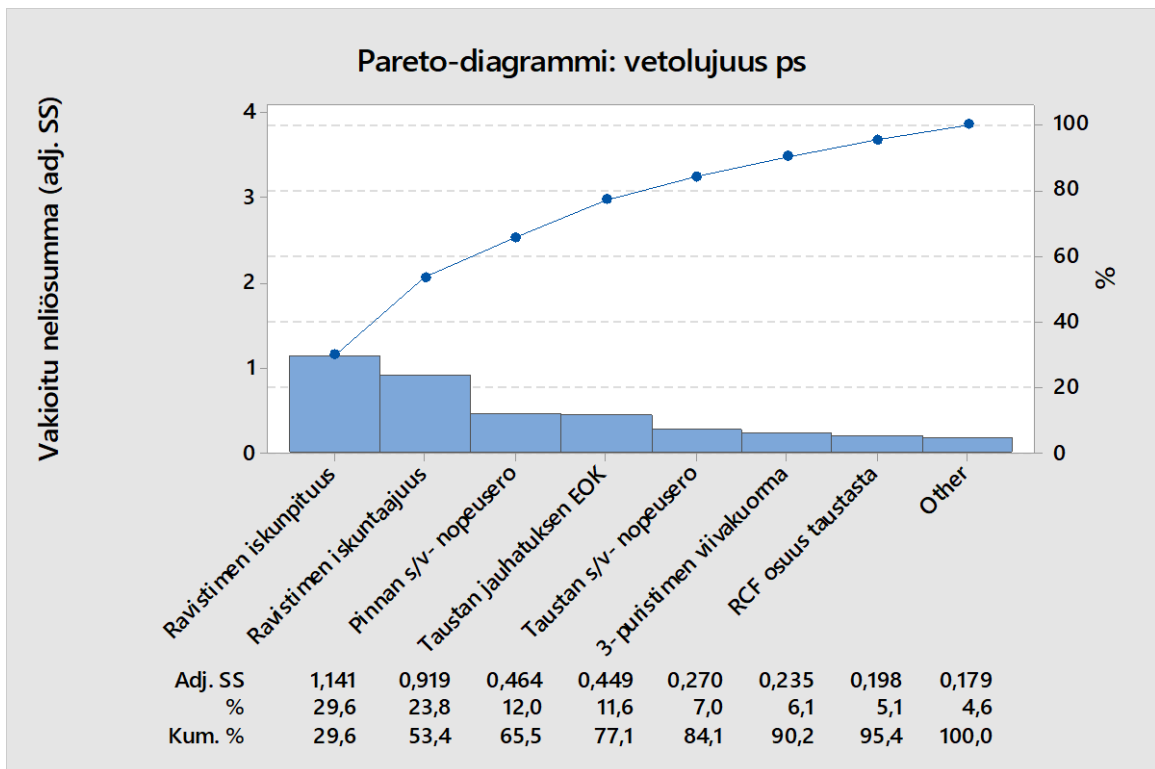
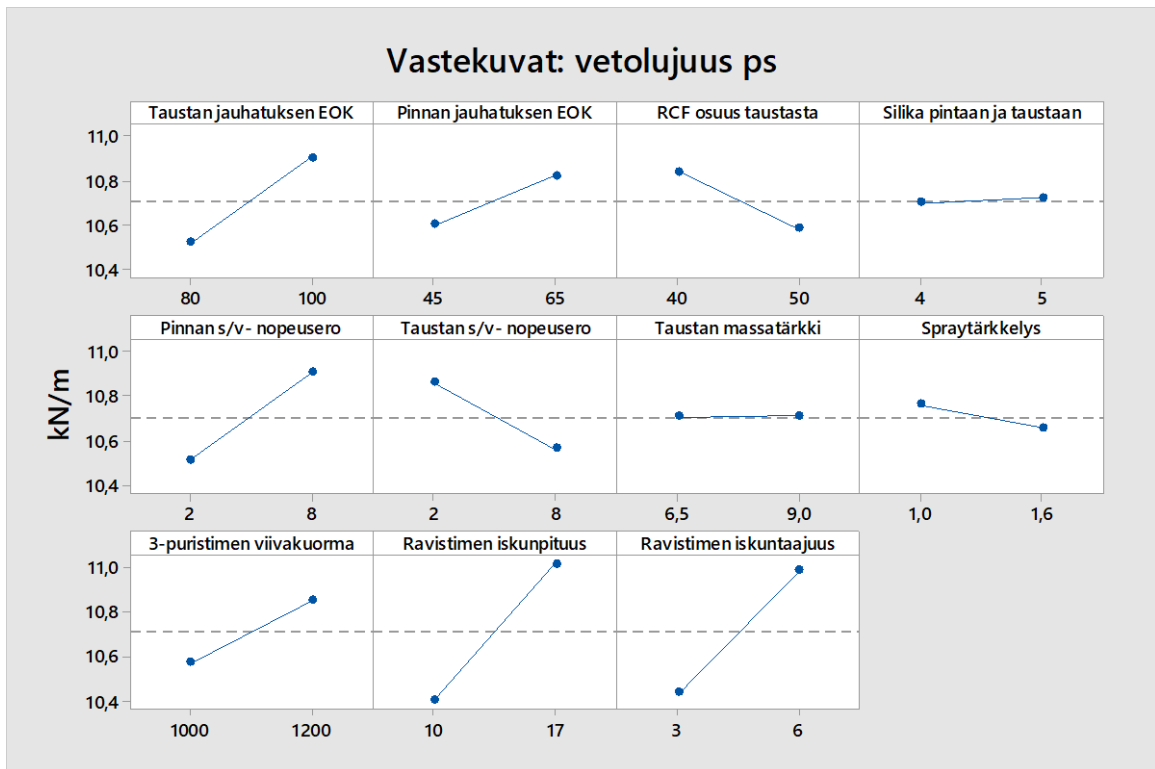
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 4 (14)



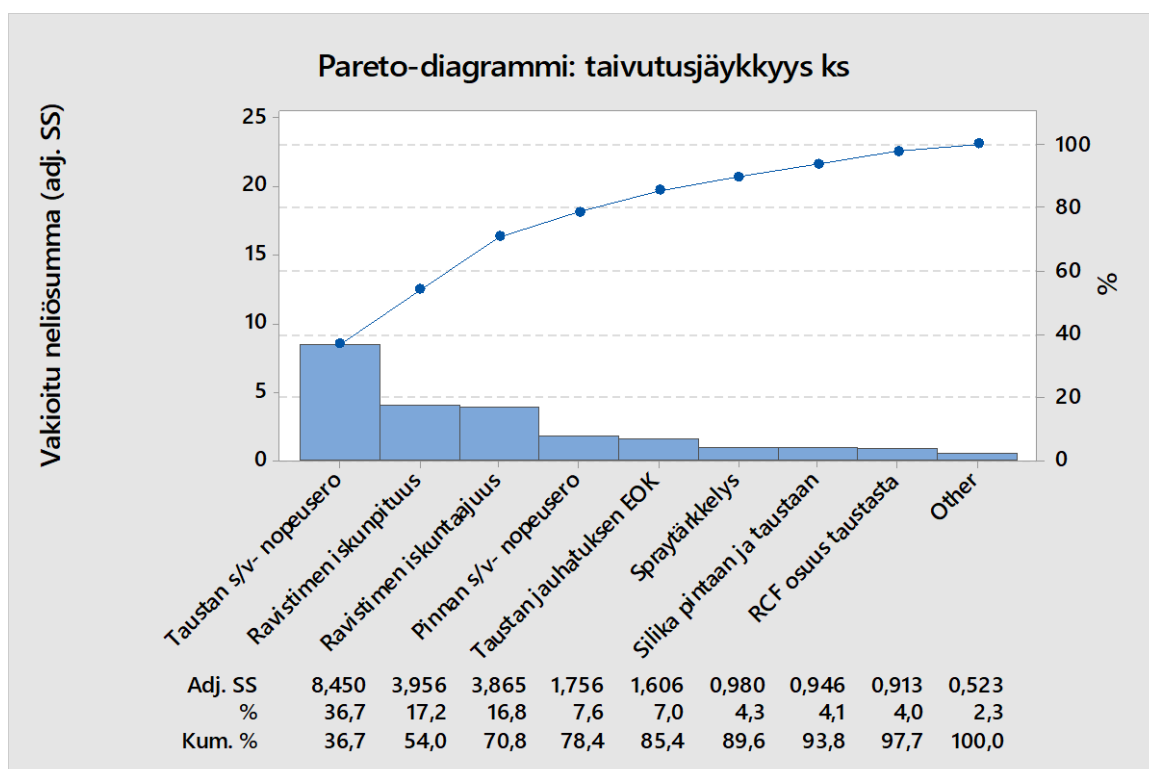
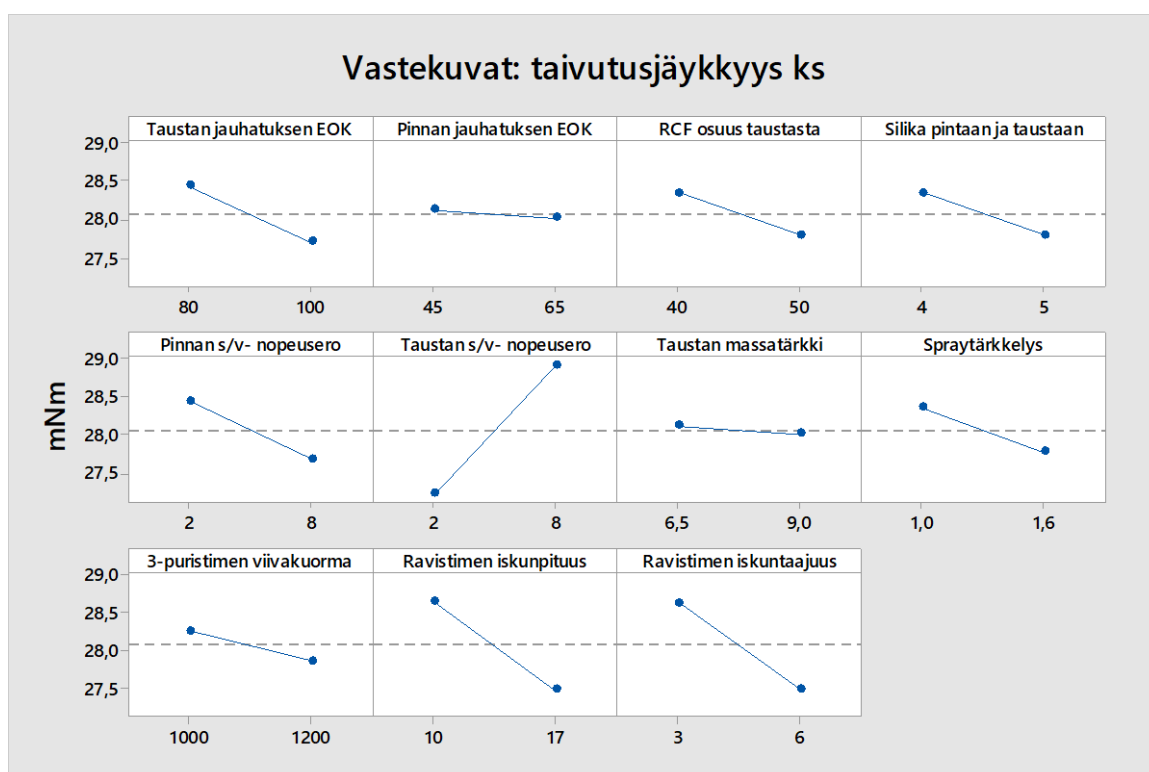
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 5 (14)



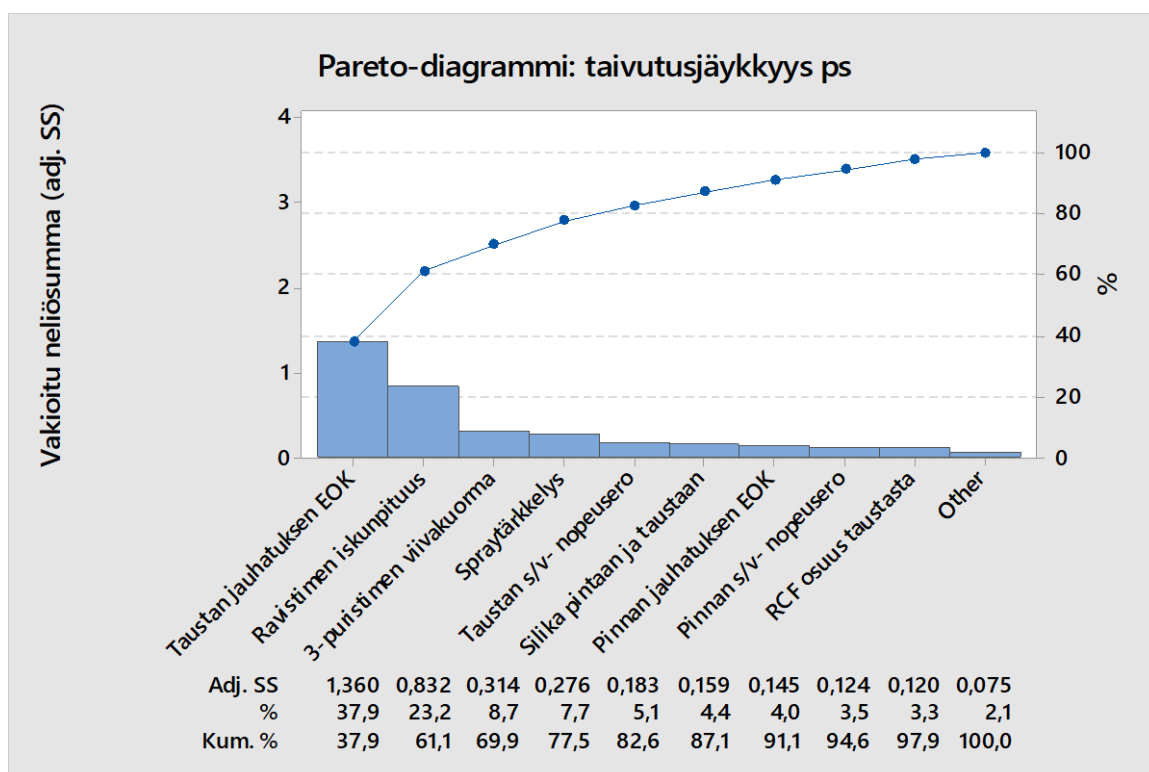
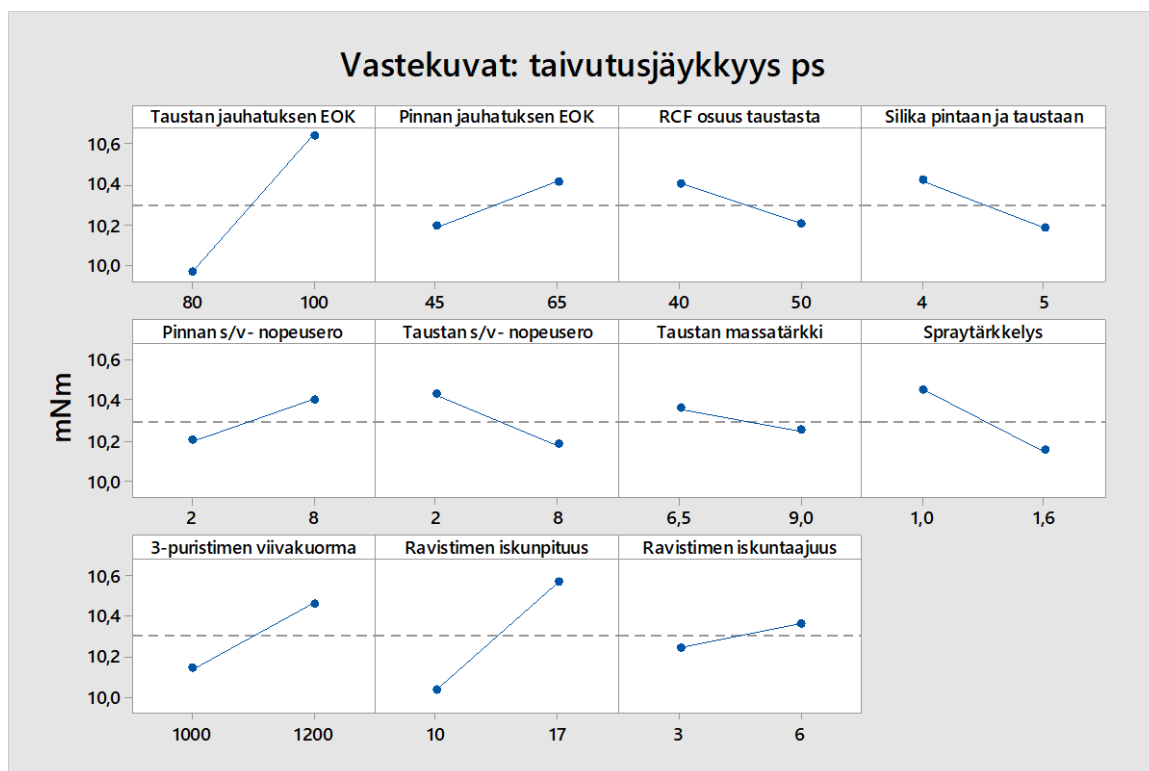
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 6 (14)



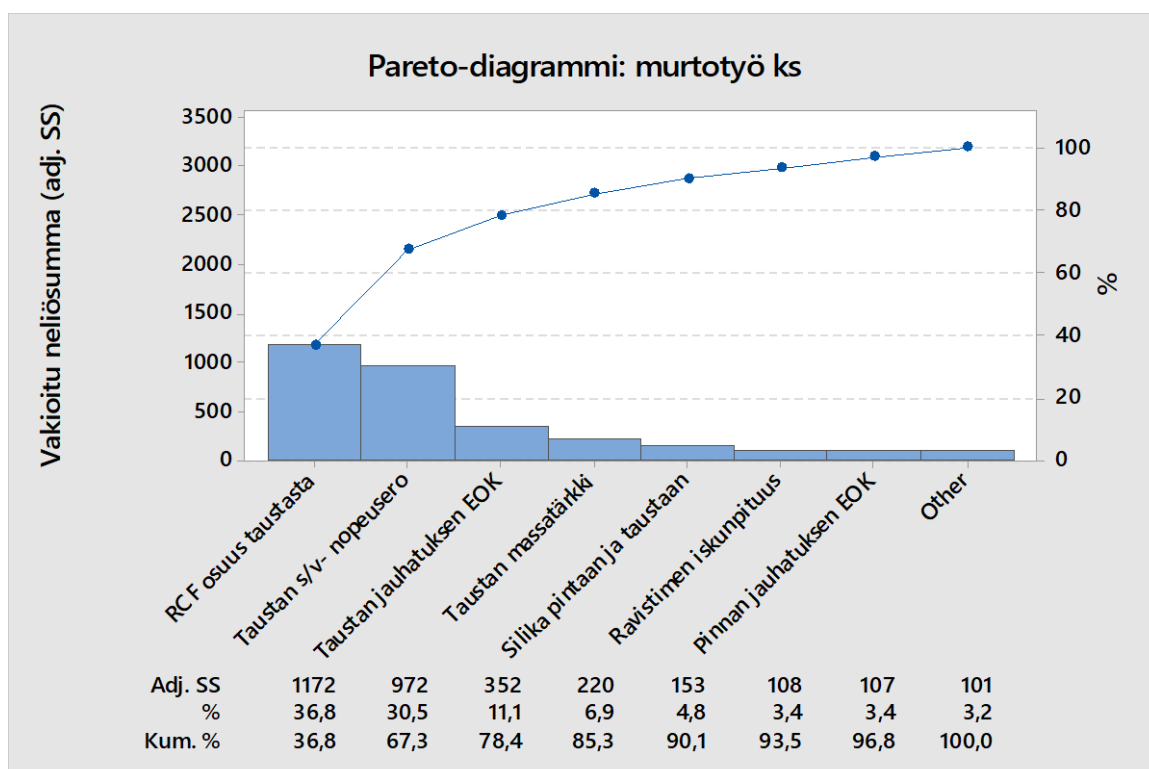
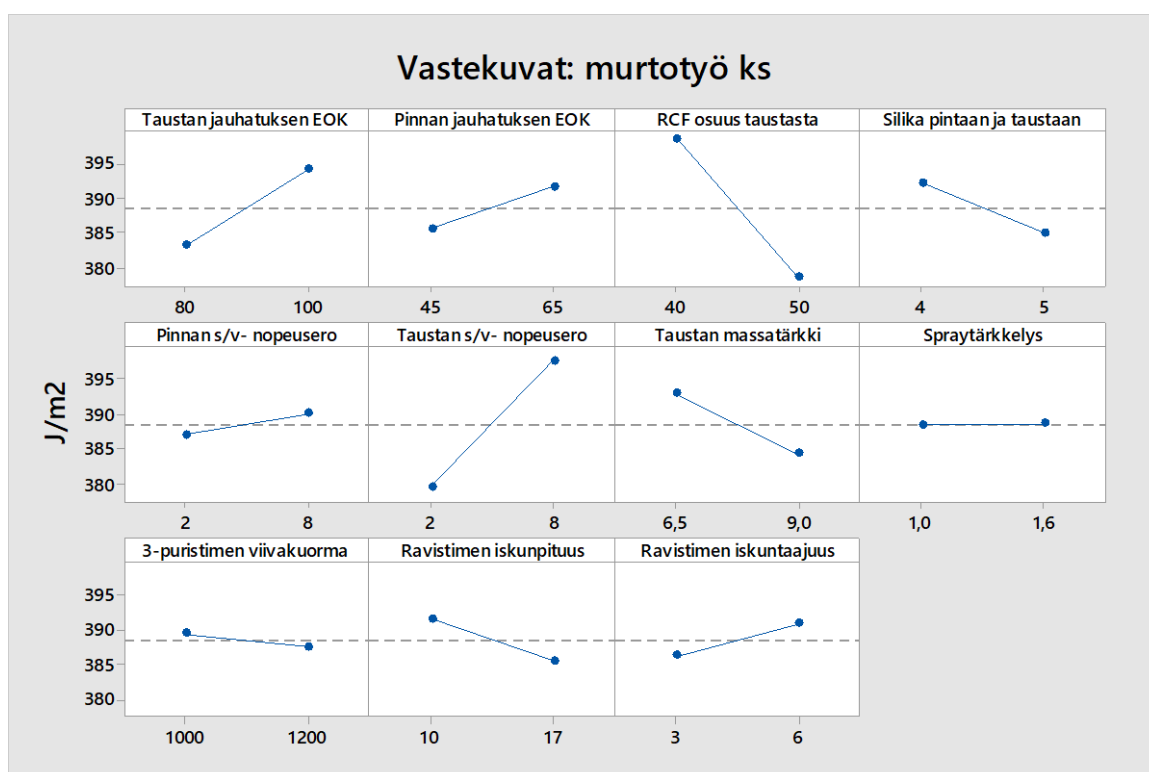
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 7 (14)



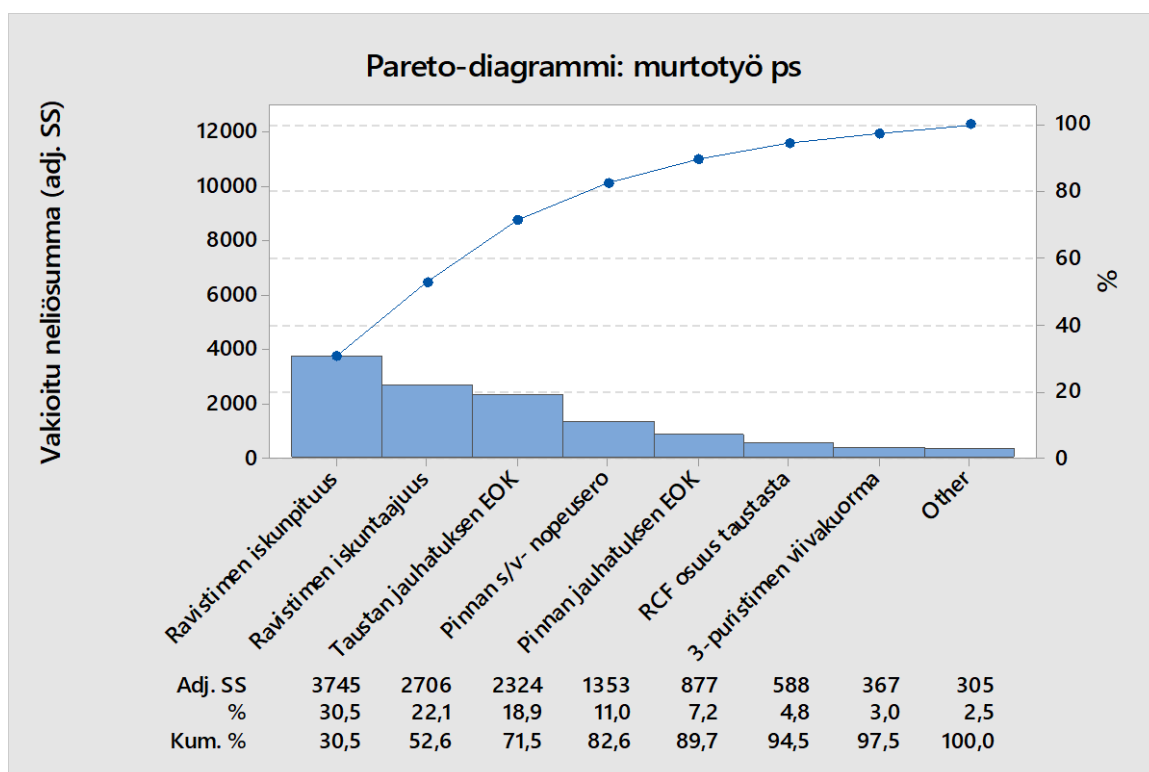
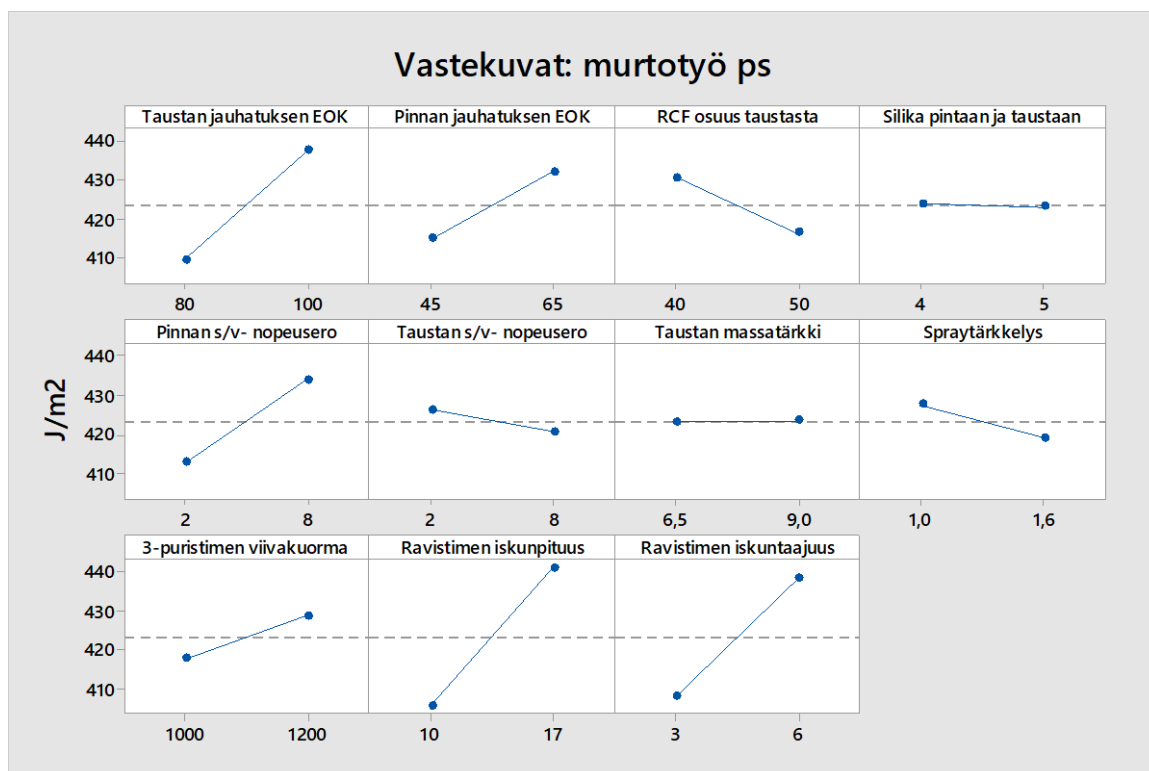
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 8 (14)



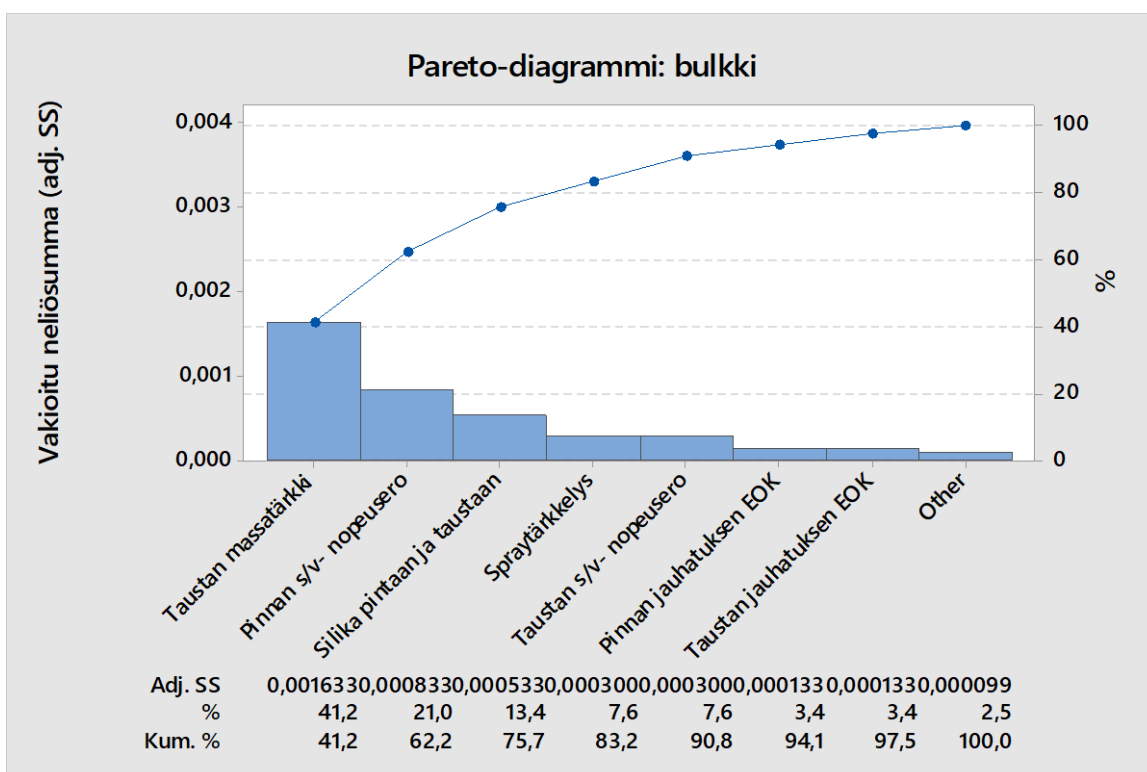
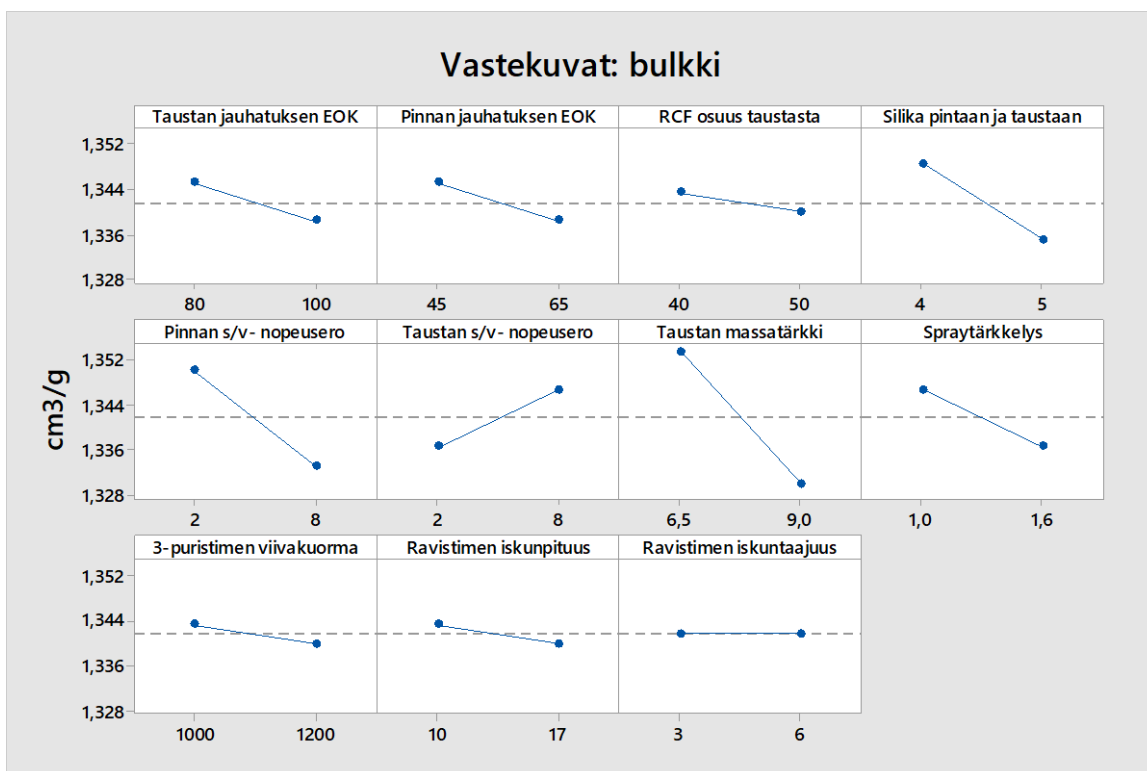
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 9 (14)



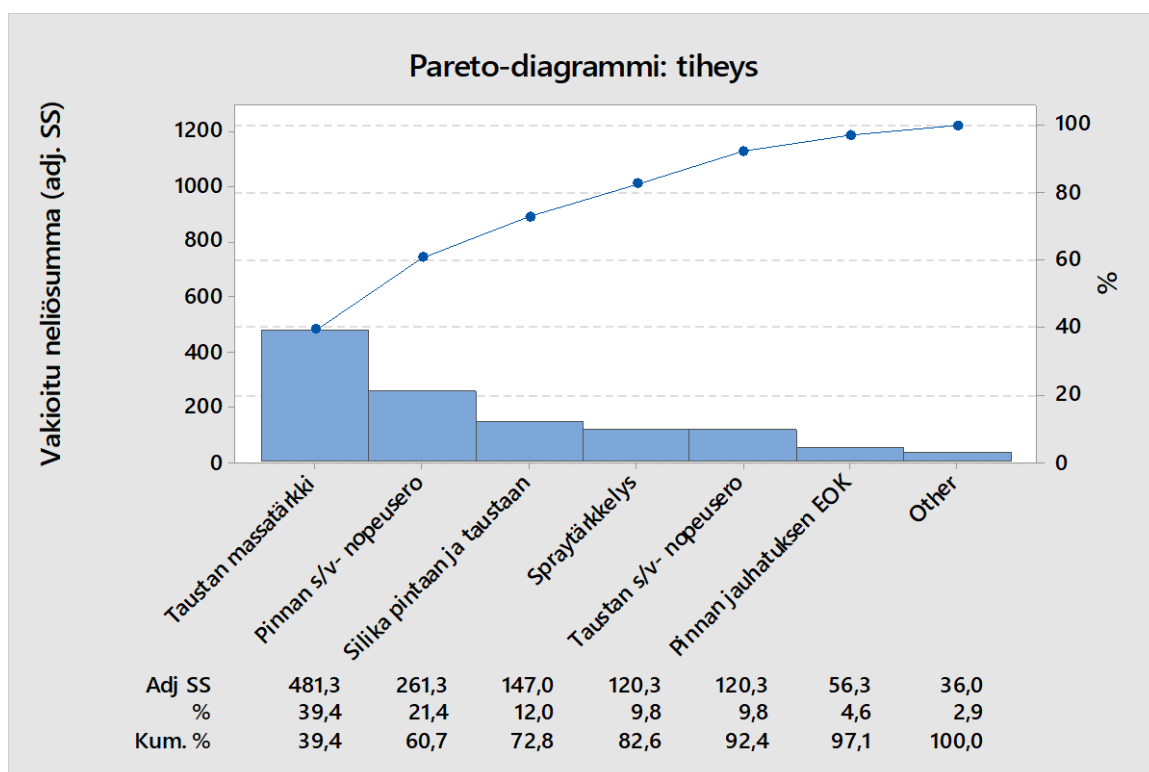
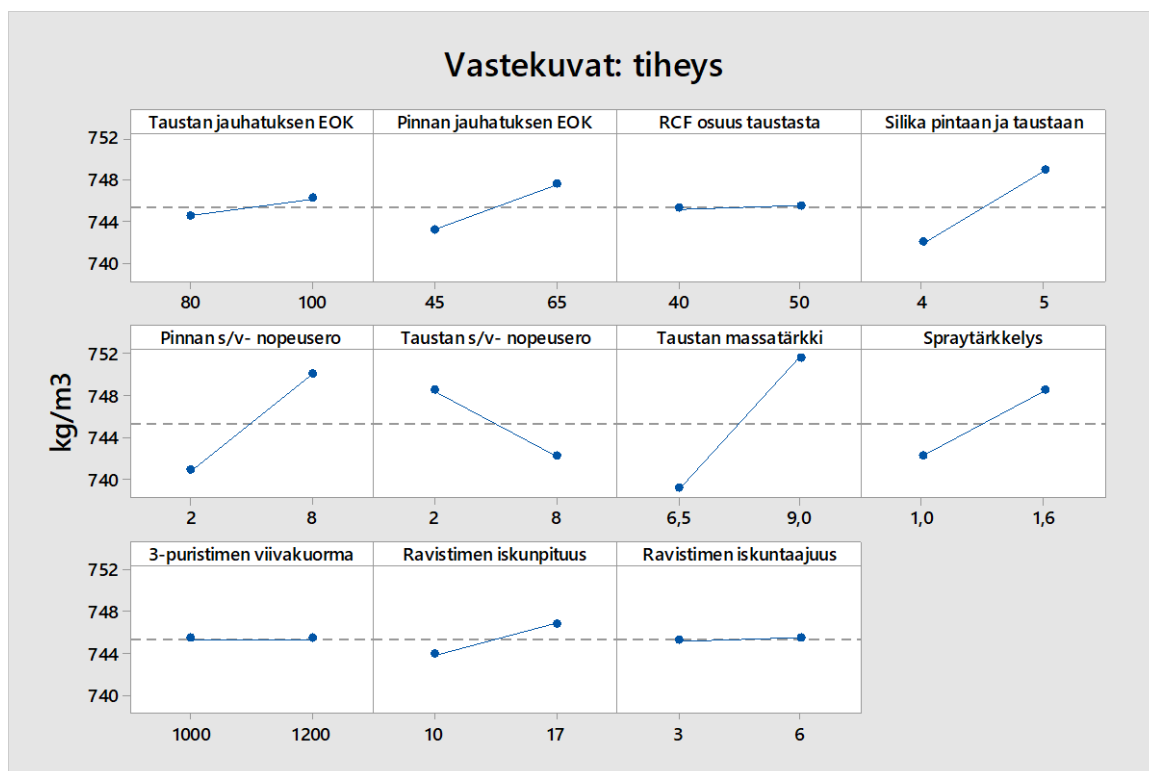
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 10 (14)



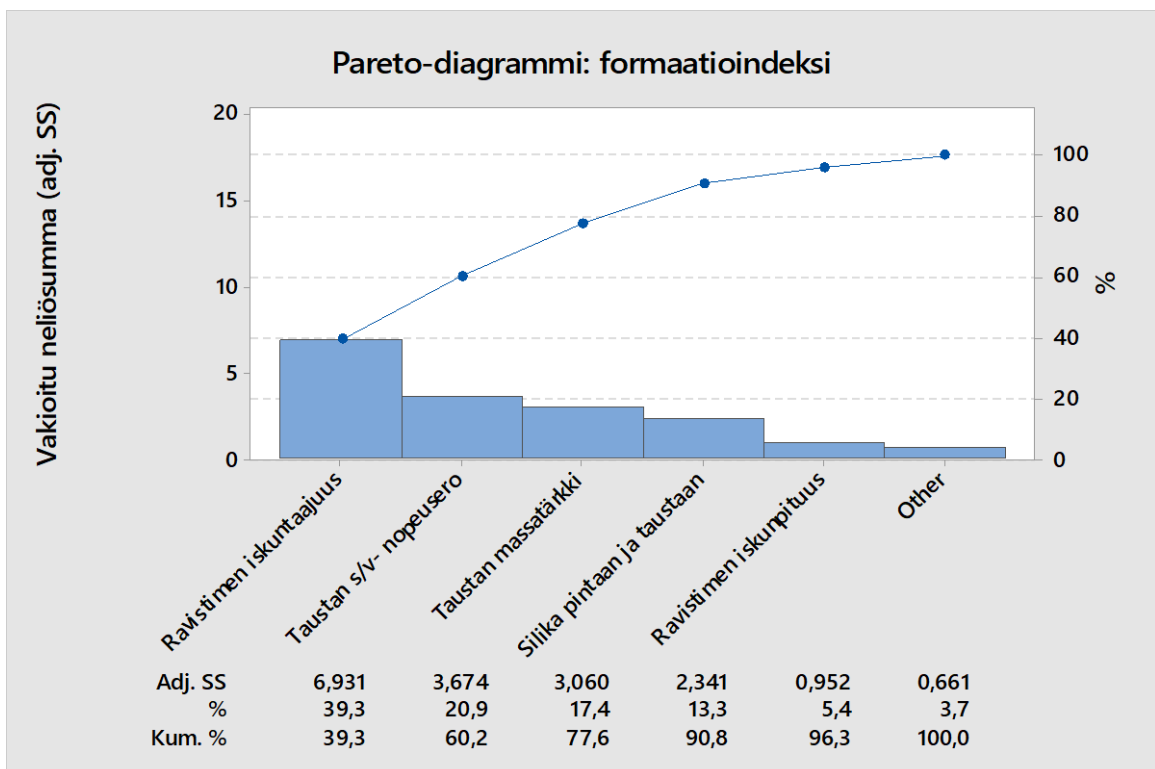
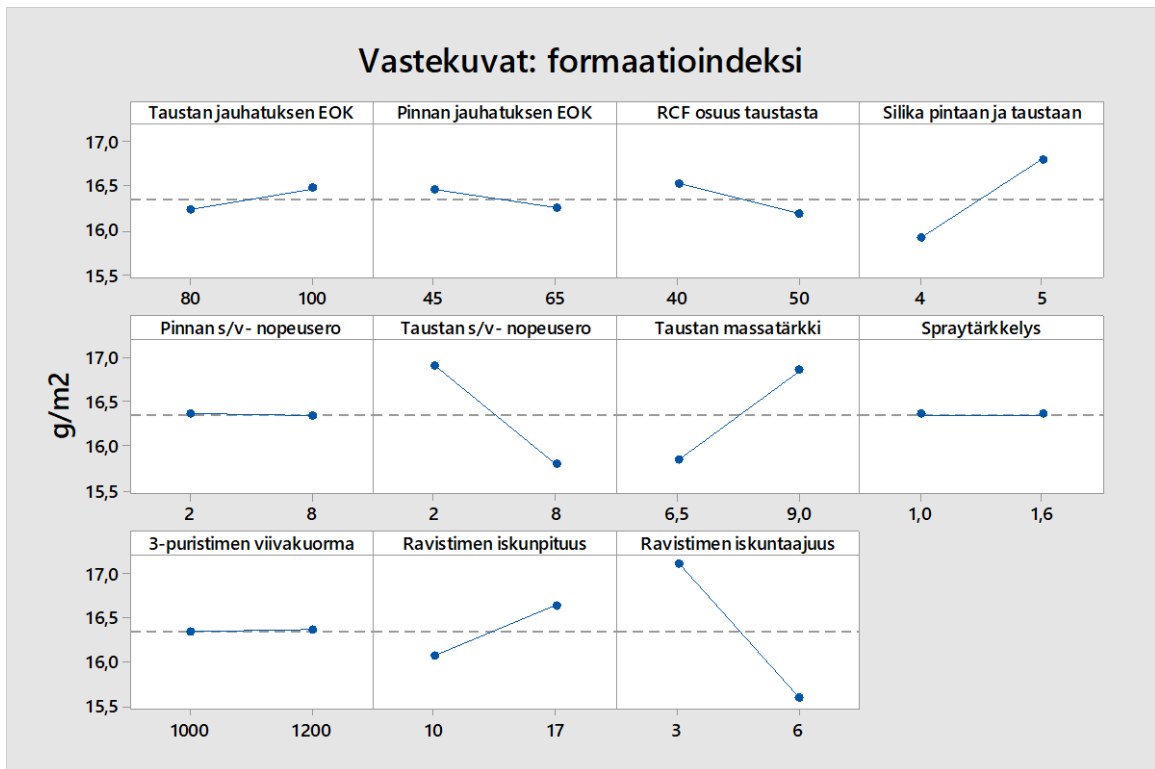
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 11 (14)



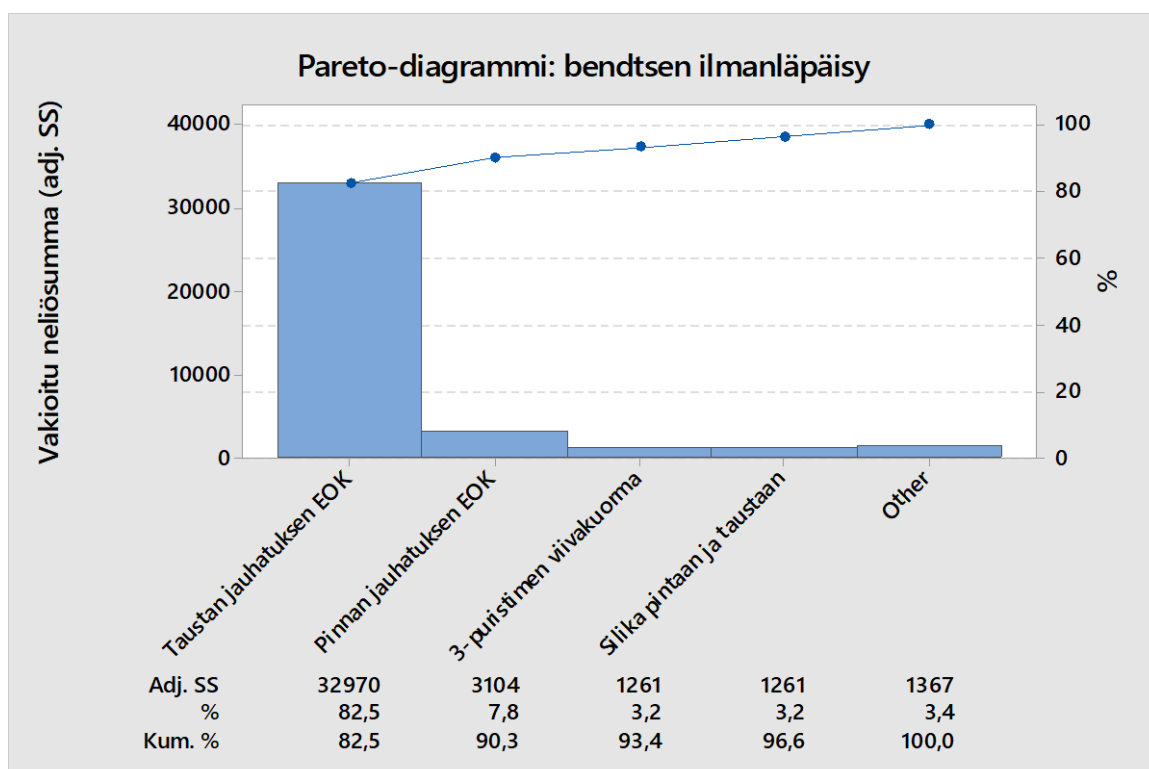
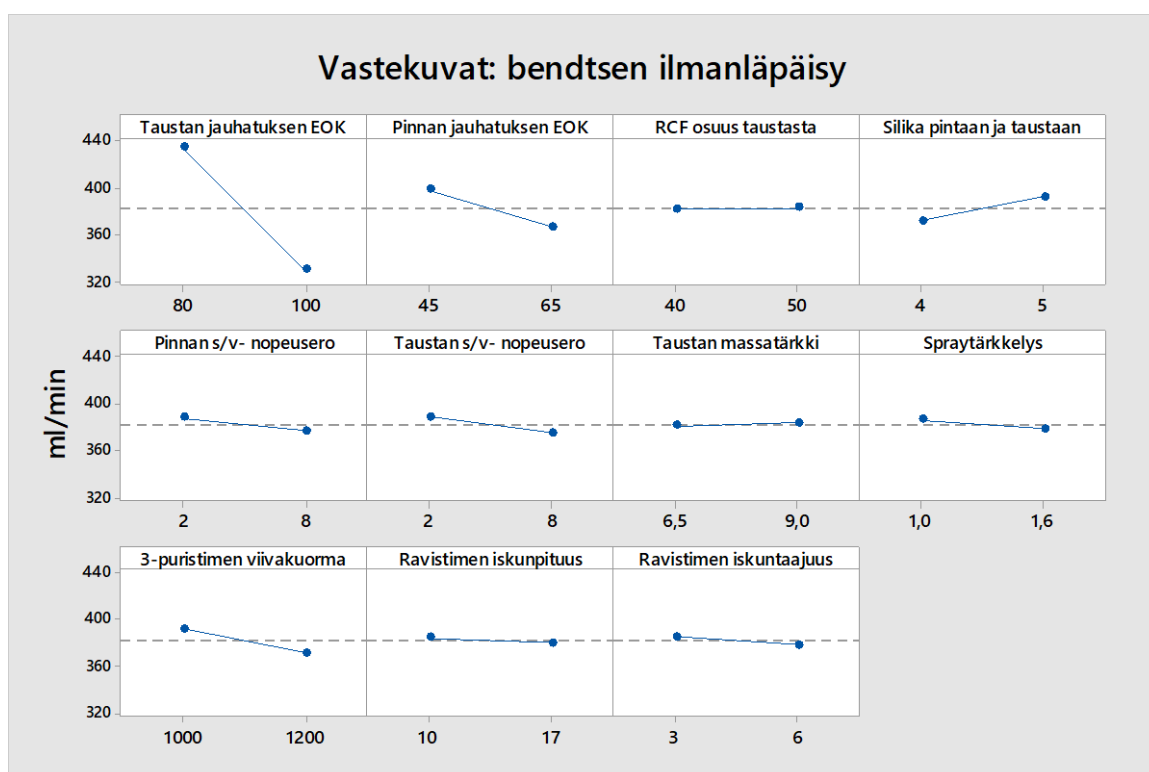
Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 12 (14)



Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 13 (14)

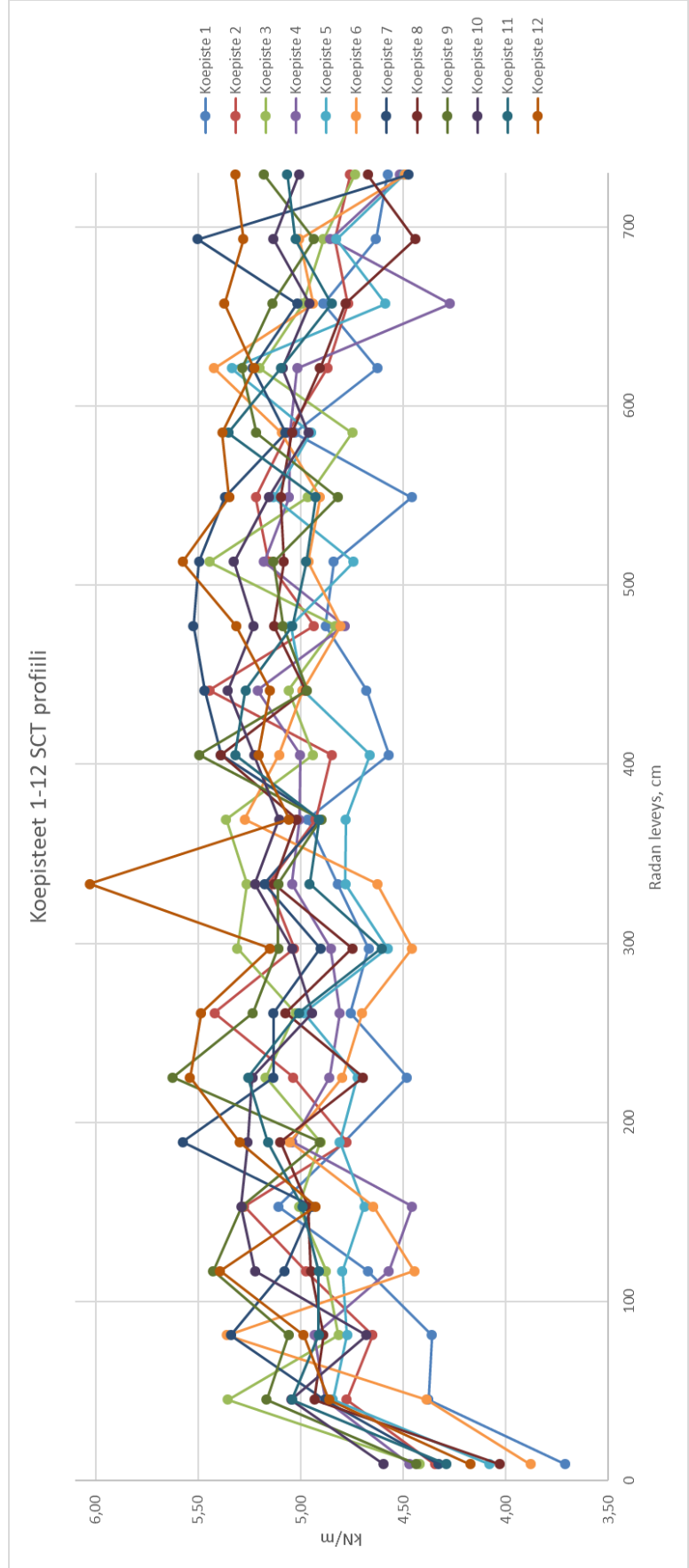


Liite II: Koeajon muut vastekuvat ja pareto-diagrammit, 14 (14)



Liite III: Koeajon SCT-profiilit 1 (1)

Koepiste:	SCT etu:	SCT keski:	SCT taka:	Kolmen poikkiratanäytteen keskiarvon minimiarvo:	Kolmen poikkiratanäytteen keskiarvon maksimiarvo:	Maksimi- ja minimiarvon erotus:
1	4,50	4,76	4,72	3,71	5,11	1,40
2	4,83	5,11	4,95	4,35	5,45	1,10
3	4,94	5,11	5,00	4,42	5,45	1,03
4	4,74	4,96	4,85	4,27	5,21	0,94
5	4,67	4,83	4,87	4,08	5,34	1,26
6	4,65	4,85	4,97	3,88	5,42	1,54
7	5,04	5,21	5,17	4,33	5,58	1,25
8	4,79	5,07	4,86	4,03	5,39	1,36
9	5,13	5,13	5,10	4,44	5,62	1,19
10	5,05	5,16	5,09	4,60	5,36	0,76
11	4,94	5,02	5,04	4,29	5,35	1,06
12	5,03	5,34	5,36	4,17	6,03	1,86



Liite IV: Koeajon tuloksien vaikutusmatriisi 1 (1)

Tekijä:	SCT ps	SCT etu- reunan alue	SCT keski- alue	SCT taka- reunan alue	Veto- jäykkyys ps	Veto- jäykkyys ks	Veto- jäykkyys geometrisen keskiarvo	Puhkaisu- lujuus	Scott Bond etureunan alue	Scott Bond keskialue	Scott Bond takareunan alue	Z-lujuus
Taustan jauhituksen suurempi EOK	++	++	++	++	+	---	--	-	+	-	-	++
Pinnan jauhituksen suurempi EOK	++	-	-	++	+	+	++	+	--	-	---	+
RCF osuus taustasta suurempi	--	-	-	-	---	--	---	---	+	++	+	++
Siilika pintaan ja taustaan suurempi	+	++	+	+	+	++	+	--	+	++	+	+
Pinnan s/v -nopeusero suurempi	++	+	+	+	-	--	--	--	--	---	---	--
Taustan s/v -nopeusero suurempi	-	-	--	--	-	++	+	++	--	---	-	-
Taustan suurempi massatarkin määrä	++	-	++	+	+	+	+	+	++	++	++	+
Spraytärkkelyk- sen suurempi määrä	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++
3-puristimen viivakuorma suurempi	+	++	++	++	+	--	-	++	+	-	+	+
Ravistimen suurempi iskunpituus	+	++	++	++	++	---	-	-	++	++	+	+
Ravistimen suurempi iskuntaajuus	+	+	+	--	-	--	--	-	--	-	-	+