



# **Kuitujen koostumuksen vaikutus paperitekniisiin ominaisuuksiin sekä happamien ja alkalisten mas- sojen eroavaisuudet**

Markus Yli-Kivistö

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2021

Biotuote- ja prosessitekniikan koulutusohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessitekniikka

YLI-KIVISTÖ, MARKUS:

Kuitujen koostumuksen vaikutus paperitekniisiin ominaisuuksiin sekä happamien ja alkalisten massojen eroavaisuudet

Opinnäytetyö 56 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Joulukuu 2021

---

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten kuidun kemialliset ominaisuudet vaikuttavat massan paperitekniisiin ominaisuuksiin. Lisäksi työssä vertailtiin alkalisen sulfaattimassan ja happaman sulfiittimassan ominaisuuksia. Työn teoreettinen osa perustuu alan kirjallisuuteen. Työssä on hyödynnetty myös kansainvälisiä lähteitä. Kokeellinen osa toteutettiin Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa.

Kokeellisessa osassa tutkittiin, miten erilaiset massaominaisuudet vaikuttavat seosmassoista valmistettujen arkkien paperitekniisiin ominaisuuksiin. Perusmassana käytettiin pitkäkuituista jauhattua ja valkaistua mäntysulfaattimassaa (Massa X). Seosmassoina käytettiin jauhamatonta valkaistua pitkäkuituista sulfiittimassaa (Massa A) sekä jauhamatonta ja valkaisematonta kokeellista lyhytkuituista massaa (Massa B), joka poikkesi tavanomaisista massoista koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan.

Opinnäytetyön selvityksen perusteella voitiin todeta kuitujen ominaisuuksien riippuvan pitkälti siitä, kuinka suuri suhteellinen osuus kuiduissa on kemiallisia komponentteja. Selluloosa ja hemiselluloosa tuovat paperiverkostolle tärkeitä ominaisuuksia, toisin kuin ligniini, joka tekee kuidusta sitoutumattoman ja jäykän. Kuidun pituus vaikuttaa positiivisesti lujuusominaisuuksiin. Kuituihin vaikuttaa myös kuitujen valmistustapa. Hapan kuitu on lyhyempi, heikompi ja murtuu helpommin kuin alkalinen kuitu. Paperitekniisiin ominaisuuksiin vaikuttavat kuitujen koostumus, kuitujen pituus, jauhatus, kuitujen mukautumiskyky ja kuitujen sitoutumiskyky.

Sulfaattimenetelmä tuottaa paremmat massan lujuusominaisuudet, se sopii kaikille kuituraaka-aineille ja lehtipuilla on korkea saanto. Happaman sulfiittimenetelmän hyviä puolia ovat korkeampi saanto ja valkoisempi massa. Vaikka pelkästään hapan sulfiittikeitto on ominaisuuksiltaan riittämätöntä paperiteollisuuteen, sulfiittikeiton suurimpia etuja on sen joustavuus: monivaiheinen sulfiittikeitto mahdollistaa tuotteiden valmistamisen laajemmalla laatuasteikolla kuin sulfaattikeitto.

Tulosten perusteella pitkäkuituinen Massa A oli paperiteknisten ominaisuuksien perusteella hieman parempaa melkein kaikissa seospisteissä kuin lyhytkuituinen Massa B, mutta tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Massa B sisälsi paljon tikkumaista materiaalia sekä flokkautuneita kuituja, kun taas Massa A oli homogeenistä ja laadullisesti tasaista. 10–20 % seosmassaa pystyttiin lisäämään perusmassaan, ennen kuin sen ominaisuudet alkoivat heikkenemään radikaalisti.

---

Asiasanat: Kuitujen ominaisuudet, sulfiittimassa, hapan, alkalinen, sulfiittimassa, selluloosa

## ABSTRACT

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

YLI-KIVISTÖ, MARKUS:

Influence of Fiber Composition on Paper Technical Properties and Differences Between Acidic and Alkaline Pulps

Bachelor's thesis 56 pages, appendice 1 pages  
December 2021

---

The thesis was commissioned by Tampere University of Applied Sciences. The aim of the thesis was to find out how the chemical properties of fiber affect the paper properties of pulp. In addition, the properties of alkaline sulphate pulp and acid sulphite pulp were compared. The theoretical part of the work is based on literature in the field. International sources have also been utilized in the work. The experimental part was performed in the paper laboratory of Tampere University of Applied Sciences.

The experimental part investigated how different pulp properties affect the paper technical properties of sheets made from mixed mass pulps. Long-fiber refined, and bleached pine sulphate pulp (Pulp X) was used as the base pulp. As a mixture, mass of unrefined bleached long-fiber sulphite pulp (Pulp A) and unrefined and unbleached experimental short-fiber pulp (Pulp B) was used. Pulp B differed from conventional pulps in composition and properties.

Based on the results of the thesis, it can be stated that the properties of the fibers depend to a large extent on the relative proportion of chemical components in the fibers. Cellulose and hemicellulose bring important properties to the paper web, unlike lignin, which makes the fiber unbound and rigid. The length of the fiber has a positive effect on the strength properties. Fibers are also affected by the way they are made. Acid fiber is shorter, weaker and breaks more easily than alkaline fiber. The technical properties of the paper are affected by the composition of the fibers, the length of the fibers, whether are they refined, the adaptability of the fibers and the ability of the fibers to bind.

The sulphate method produces better pulp strength properties, it is suitable for all fibrous raw materials and hardwoods have a high yield. The advantages of the acid sulfite process are higher yield and whiter mass. Although acid sulphite process alone has insufficient properties for the paper industry, the biggest advantages of the sulphite process are its flexibility: multi-stage sulphite process allows products to be made on a wider range of quality than sulphate process.

Based on the results, the long fiber Pulp A was slightly better at almost all blending points in terms of paper specifications than the short-fiber Pulp B, but the results are not fully comparable. Pulp B contained a lot of sticks as well as flocculated fibers, while Pulp A was homogeneous and qualitatively even.

---

Key words: Fiber properties, acid sulphite pulp, kraft, cellulose, hemicellulose

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	KUITUJEN KOOSTUMUS JA KUITULAJIT .....	8
	2.1 Komponentit .....	9
	2.1.1 Selluloosa .....	9
	2.1.2 Hemiselluloosa .....	9
	2.1.3 Ligniini .....	10
	2.1.4 Uuteaineet .....	10
	2.2 Kuitulajit .....	11
	2.2.1 Havupuu .....	12
	2.2.2 Lehtipuu .....	12
	2.2.3 Sahanpuru .....	13
	2.2.4 Uusiomassa .....	13
	2.2.5 Non-wood .....	13
3	KUITUJEN LUJUUDET .....	15
	3.1 Kuitudimensiot .....	16
	3.2 Kuitujen mukautumiskyky .....	17
	3.3 Kuidun sitoutumiskyky .....	17
	3.4 Jauhatus .....	17
4	KEMIALLINEN MASSAN VALMISTUS .....	20
	4.1 Kappaluku ja saanto .....	22
	4.2 Sulfaattimenetelmä .....	22
	4.3 Hapan Sulfiittimenetelmä .....	23
	4.4 Sulfaattimenetelmä vs. hapan sulfiittimenetelmä .....	24
	4.5 Uusien menetelmien teoria .....	26
5	PAPERIN, MASSOJEN JA KUITUJEN MITATTAVAT SUUREET .....	27
	5.1 Sakeus .....	27
	5.2 Yleiset ominaisuudet .....	27
	5.2.1 Neliömassa .....	27
	5.2.2 Paksuus .....	28
	5.2.3 Bulkki / Tiheys .....	28
	5.2.4 Ilmanläpäisevyys / huokoisuus .....	28
	5.3 Lujuusominaisuudet .....	29
	5.3.1 Vetolujuusindeksi .....	29
	5.3.2 Repäisylujuusindeksi .....	29
	5.3.3 Z-lujuus .....	30
	5.4 PINTAOMINAISUUDET .....	30

5.4.1 Karheus ja sileys .....	30
5.5 Optiset ominaisuudet .....	31
5.5.1 Opasiteetti .....	31
6 KOKEELLINEN OSA .....	32
6.1 Mittausmenetelmät.....	32
6.2 Arkkien valmistuksen menetelmät.....	32
7 TULOKSET .....	36
7.1 Yleiset ominaisuudet.....	36
7.1.1 Neliömassa.....	37
7.1.2 Paksuus.....	38
7.1.3 Bulkki.....	38
7.1.4 Ilmanläpäisevyys / huokoisuus .....	39
7.2 Lujuusominaisuudet .....	40
7.2.1 Vetolujuusindeksi.....	41
7.2.2 Repäisylujuusindeksi .....	41
7.2.3 Venymä .....	42
7.2.4 Z-Lujuus .....	43
7.3 Pintaominaisuudet.....	43
7.3.1 Karheus .....	44
7.4 Optiset ominaisuudet .....	45
7.4.1 Opasiteetti .....	46
7.5 Kuituominaisuudet.....	46
8 YHTEENVETO .....	48
LÄHTEET .....	54
LIITTEET Liite 1. Mittauspöytäkirja .....	56

**ERITYISSANASTO**

Kraft	Yleisnimitys sulfaattimassalle
Polysakkaridi	Monimutkaisia hiilihydraatteja
Polymerisaatio	Pienien molekyylien yhteenliittymä prosessissa
Hydrofobinen	Vettä hylkivä
Fibrilloituminen	jauhatuksessa tapahtuva sellukuitujen kuituuntuminen
Amorfinen	Kiteetön rakenne
Delignifioitumisaste	Kertoo ligniinin liukenemisasteen kemiallisessa massanvalmistuksessa

## 1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan miten kuitujen kemiallinen koostumus, kuitulajien ominaisuudet, kuidunpituus, sitoutumiskyky sekä jauhatuus vaikuttavat kuitujen paperiteknisiin ominaisuuksiin. Verrataan keskenään sulfiitti- ja sulfaattimassoja, verrataan happaman ja alkalisen massojen ja kuitujen eroavaisuuksia sekä niiden ominaisuuksia.

Kokeellisessa osassa tutkitaan miten erilaiset massaominaisuudet vaikuttavat seosmassoista valmistettujen arkkien paperiteknisiin ominaisuuksiin. Arkkien tavoiteltu neliömassa oli  $60 \text{ g/m}^2$ . Perusmassana on Massa X, joka on valkaistua pitkäkuituista mäntysulfaattimassaa ja jota on jauhettu 20 min. Seosmassoina käytetään jauhamatonta valkaistua pitkäkuituista sulfiittimassaa eli Massa A:ta ja jauhamatonta ja valkaisematonta kokeellista lyhytkuituista massaa, eli Massa B:tä, joka poikkeaa tavanomaisista massoista koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan. Arkkien ominaisuuksia tutkitaan Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa.

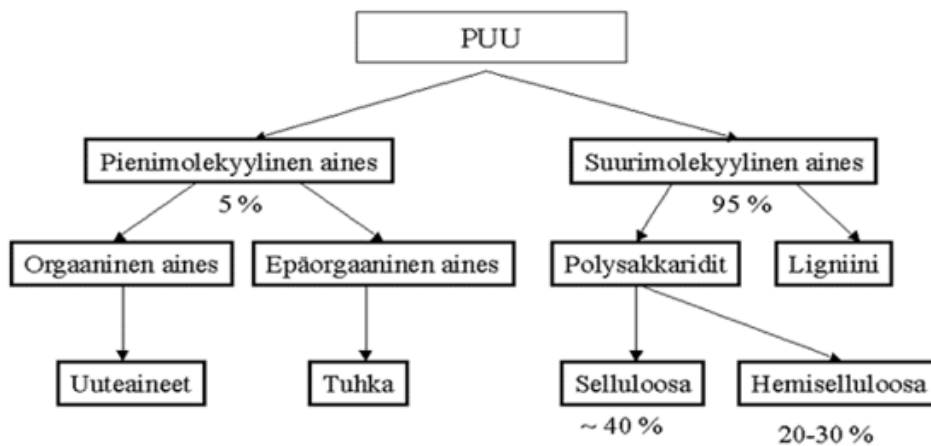
Työssä ei perehdytä kemiallisten massojen valmistusmenetelmiin. Kokeellisessa osiossa ei huomioida seuraavia asioita: massojen kemiallisia koostumuksia, kemiallisten komponenttien vaikutuksia, kemiallisen valmistusmenetelmien vaikutuksia, valkaisun tai valkaisemattomuuden vaikutuksia. Ainoastaan verrataan kuidunpituuksia, jauhatuksen tai jauhamattomuuden vaikutusta sekä massan karkeata koostumusta.

Tutkittaviin paperiteknisiin ominaisuuksiin on valittu ainoastaan tälle työlle, massojen ominaisuudet huomioon ottaen ja tutkittavien massojen vähyyden, vain merkittävimmät suureet.

## 2 KUITUJEN KOOSTUMUS JA KUITULAJIT

Kuituseinämät sisältävät pääasiassa selluloosaa, hemiselluloosaa, ligniiniä sekä uuteaineita. Komponentit eivät ole jakautuneet tasaisesti, vaan eri kerrokset sisältävät eri määrän komponentteja. Kerroksia ovat: kyhmykerros, sekundääriseinän sisäkerros, sekundaariseinän keskikerros, sekundääriseinän ulkokerros, primääriseinä sekä välilamelli (KnowPap, 2021a).

### Puun kemiallinen koostumus



KUVIO 1. Puun kemiallinen koostumus (KnowPulp, 2021a).

Eri puulajit sisältävätkin samoja ainesosia, mutta eri määrissä. Kuten nähdään Taulukosta 1, kuusi, mänty ja koivu sisältää lähes saman määrän selluloosaa, kun taas eukalyptus ja akaasia hieman enemmän. Havupuut ja lehtipuut eroavat toisistaan hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuuksien osalta (KnowPap, 2021a).

TAULUKKO 1. Puulajien kemialliset koostumukset (KnowPap, 2021a).

	Selluloosaa, %	Hemiselluloosa, %	Ligniini, %	Uuteaineet, %
<b>Kuusi</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>2</b>
<b>Mänty</b>	<b>42</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>5</b>
<b>Koivu</b>	<b>40</b>	<b>37</b>	<b>20</b>	<b>3</b>
<b>Eukalyptus</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>27</b>	<b>3</b>
<b>Akaasia</b>	<b>50</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>3</b>

## 2.1 Komponentit

### 2.1.1 Selluloosa

Selluloosa on puun tärkein kemiallinen ainesosa. Sen määrä ja ominaisuudet antavat puulle sen tärkeät ominaisuudet materiaalina (Sixta 2006, 51). Selluloosa on erittäin kestävä johtuen sen kiteisestä olomuodosta (Virkola 1983, 1073). Puulajien kuiva-aineksesta noin 40–50 % koostuu selluloosasta. Selluloosa ei juurikaan poikkea koostumukseltaan eri puulajien välillä (Alén, 2000). Selluloosa on polysakkaridi ja se koostuu glukoosiyksiköistä. Se muodostaa vetysidoksia viereisten molekyylien kanssa, jolloin syntyy puulle sen mekaaninen tuki. Selluloosa kestää hyvin alkalisia ja happamia olosuhteita, mutta silti selluloosaa pilkkoutuu keiton ja valkaisun aikana (KnowPap, 2021a).

Selluloosamolekyylien pilkkoutuminen huonontaa kuitujen lujuutta. Tästä johtuen huononevat myös ne paperin lujuusominaisuudet, jotka riippuvat yksittäisen kuidun lujuudesta. Kemiallisessa massan valmistusprosessissa onkin tärkeää säilyttää selluloosan polymerisaatioaste korkeana (KnowPulp, 2021b).

### 2.1.2 Hemiselluloosa

Hemiselluloosa on polysakkaridi. Hemiselluloosaa on yleensä 5–50 %, riippuen käytetystä lähteestä (Sixta 2006, 68). Puuaineksessa hemiselluloosaa on yleensä n. 20–30 %. Hemiselluloosan rakenne poikkeaa havu- ja lehtipuiden välillä (Alén, 2000). Hemiselluloosat muodostavat sidoksia keskenään ja antavat paperin kuituverkostolle huomattavasti lujuutta (KnowPulp, 2021c). Jopa jauhamattomalle massoista saadaan hyvin korkeita vetolujuusarvoja. Korkea hemiselluloosapitoisuus parantaa havupuumassojen jauhautuvuutta, mutta huonontaa esimerkiksi valonsirontakykyä (Virkola, 1983, 1073).

Hemiselluloosat ovat hydrofiilisiä. Ne edistävät kuitujen fibrilloitumista ja jauhautuvuutta. Ne lisäävät kuidun ulkoista pintaa ja paikallista mukautumiskykyä (Virkola 1983, 1071). Toisin kuin selluloosa, hemiselluloosa ei kestä yhtä hyvin keiton kemiallisia olosuhteita, johtuen amorfisesta olotilasta ja pienestä polymeroitumisasteesta (KnowPulp, 2021c).

Absoluuttinen hemiselluloosapitoisuus ei riitä yksin pelkästään selittämään paperin teknisiä ominaisuuksia, vaan hemiselluloosien keskeisillä suhteilla ja ligniinipitoisuustasolla on myös merkitystä. Poistamalla ligniini esim. selektiivisesti, saadaan korkean hemiselluloosapitoisuuden vuoksi erittäin korkeita vetolujuusarvoja jauhamattomista massoista (Virkola 1983, 1073).

### 2.1.3 Ligniini

Ligniiniä on puussa noin 20–30 %, riippuen puulajista. Se on luonnon polymeeri. Ligniini sitoo puun kuidut puussa toisiinsa, josta puu saa jäykkyyttä. Ligniini on hydrofobinen aine, jolloin se ei muodosta hyvin keskenään sidoksia, jotka lujittaisivat paperin kuituverkosto (KnowPap, 2021a). Ligniininen kuitu on jäykkä ja sen sitoutumiskyky on alhainen, sen jauhautuvuus on heikko ja paperitekniset ominaisuudet ovat huonoja. Täysvalkaistun massan ligniinipitoisuus on alle 0,1 % (Virkola 1983, 1071).

Ligniinin liukeneminen keitossa ei juuri vaikuta kuitujen vetolujuuteen tai keskimääräiseen kuitupituuteen, mutta tekee kuidut joustavammiksi ja sitoutumiskykyisemmiksi (KnowPulp, 2021b). Ligniinin merkitys on vähäisempi sellaisissa massoissa, joissa sen ohella on runsaasti hemiselluloosaa tai ligniini on sulfonoinneissa muodossa (Virkola 1983, 1070).

### 2.1.4 Uuteaineet

Uuteaineita on puun kuivapainosta alle 5 %. Uuteaineiden kirjo on laaja. Uuteaineista käytetäänkin geneeristä termiä, joka kattaa laajan kirjon terpenoideista rasvojen ja vahojen alifaattisiin ainesosiiniin, polymeerisiin hiilihydraatteihin ja polyfenoleihin. Näiden syntyyn vaikuttavat puun sijainti, anatominen kudokse, puun kasvunopeus ja geneettiset tekijät (Belgacem & Pizzi 2016, 96). Uuteaineiden rakenne ja määrä vaihtelevat puulajista riippuen (Alen, 2000). Massaan jääneiden uuteaineiden vaikutus on yleisesti haitallinen massan käytettävyyteen (Virkola 1983, 1073).

## 2.2 Kuitulajit

Puukuitujen ominaisuudet riippuvat käytettävästä puulajista, puun iästä ja kasvu- paikasta. Lisäksi jopa samassa puussa on hyvin paljon eroja, ovatko kuidut esi- merkiksi kevät- vai kesäpuukuituja, ovatko ne peräisin pinta-, sydän-, normaali- vai reaktiipuusta (KnowPap, 2021a). Puukuidut ovat karkeasti ottaen onttoja sy- linterejä, joiden päät ovat enemmän tai vähemmän suippenevia (Virkola 1983, 1076). Kuviossa 2 ja Taulukossa 2 on esitetty erilaisten kuitulajien perusominais- suuksia.

### Lehti- ja havupuukuitujen dimensioita

	Koivu	Haapa	Euka- lyptus	Akaasia	Mänty kevätpuu/ kesäpuu	Kuusi kevätpuu/ kesäpuu
Kuidun pituus, mm	1,1	0,8	1,0	0,7	2,9/2,9	2,9/2,9
Halkaisija, µm	22	18	16	20	35/20	33/19
Seinämän paksuus, µm	3	3	3	2	2,1/5,5	2,3/4,5

KUVIO 2. Lehti- ja havupuukuitujen dimensioita (Knowpap, 2021d).

TAULUKKO 2. Kuitulajien ominaisuudet (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 27).

Kuitulaji	Kuitu- pituus mm	Halkai- sija µm	Seinä- män paksuus µm	Trakei- deja %	Tylppy- soluja %	Putki- losolu- ja %
Mänty	3,0	20-35	2,1-5,5	93	7	-
Kuusi	3,1	19-33	2,3-4,5	95	5	-
Koivu	0,9-1,2	22	3	65	10	25
Eukalyptus	0,75-1,0	16	3	65	18	17

### 2.2.1 Havupuu

Mänty ja kuusi eivät juurikaan poikkea toisistaan kemiallisen koostumuksensa perusteella. Ainoastaan männyn uuteainepitoisuudet rajoittavat sen käyttöä sulfiittiprosessissa ja mekaanisissa massoissa, mutta niitä voidaan käyttää sulfaattiprosesseissa (KnowPap, 2021a).

Suomalaisen männyn keskimääräinen kuitupituus on n. 2,5 mm – 3,0 mm (Virkola 1983, 1076). Havupuun kuitupituus on keskimäärin noin 3–4 mm ja havupuun kuidun leveys on noin 0,05 mm. Kevätpuun kuidut ovat hieman leveämpiä kuin kesäpuun kuidut (KnowPulp, 2021b).

Havusellulta vaaditaan hyviä lujuusominaisuuksia. Valkaistua havusellua käytetään kirjoitus- ja painopapereihin, pakkauspapereihin sekä kartongin valmistukseen (KnowPulp, 2021d).

Kuusen ominaisuuksia riippumatta käytettävästä keittomenetelmästä ovat Virkolan mukaan: pienempi rejektin määrä, valkaisemattomana vaaleampi massa ja parempi repäisylujuus tietyssä vetolujuudessa (Virkola 1983, 497)

### 2.2.2 Lehtipuu

Lehtipuista kemiallisen massanvalmistuksen raaka-aineena käytetään yleisemmin koivua, eukalyptusta ja akaasiaa. Lisäksi koivun seassa voidaan käyttää myös haapaa. Massoilta vaaditaan hyvää bulkkia, sitoutumiskykyä, opasiteettia ja painatusominaisuuksia (KnowPulp, 2021b).

Lehtipuiden sisäiset erot ovat suurempia kemiallisen koostumuksen perusteella kuin havupuiden lajien väliset koostumukset. Eukalyptuksen ja akaasian sellulosaipitoisuus on korkea ja taas hemiselluloosan pitoisuus alhainen. Kun koivulla on taas tilanne päinvastainen. Tästä syystä eukalyptuksen saanto on korkeampi kuin koivun saanto (KnowPulp, 2021b).

Koivu sisältää enemmän hemiselluloosaa ja taas vähemmän ligniiniä kuin muut lehtipuut. Lehtipuun kuidun pituus on noin 1 mm luokkaa riippuen puulajista. Kuidun leveys on noin 0,02 mm (KnowPulp, 2021b).

### **2.2.3 Sahanpuru**

Sahanpuru koostuu samoista ainesosista kuin muukin puuaines. Yhdestä 2,2 m<sup>3</sup> tukista saadaan n. 0,3 m<sup>3</sup> sahanpuruja. Sahanpurun yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on raekokojakauma. Kun verrataan havupuun kuitupituutta sekä havusahanpurun kuitupituutta on havusahanpurun kuitupituus huomattavasti lyhempi n. 1,0–1,2 mm, jolloin sen lujuudetkin ovat heikommät (Korpinen 2010, 2).

Sahanpurusellua voidaan valmistaa useilla menetelmillä, joista yleisin on M&D keitin, jossa käytetään alkalista natriumhydroksidia (NaOH). Sahanpurusellun saanto vaihtelee 43–45 % välillä. Havusahanpurusellua voidaan kuitenkin ominaisuuksiltaan verrata lehtipuuselluun (Korpinen 2010, 2).

### **2.2.4 Uusiomassa**

Melkein kaikkea, mikä on aikaisemmin ollut kartonkia tai paperia, voidaan käyttää uusiomassassa. Keräyspaperit jaetaan kolmeen eri laatuluokkaan niiden ominaisuuksien perusteella: alemmat lajit (sanomalehdet, kotikeräyspaperi ja sekalaiset), keskilajit (ruskeat kartongit, voimapaperit, puupitoiset sekä puuvapaat painopaperit ja kartongit) ja korkeammat lajit (painamattomat puupitoiset ja puuvapaat paperit). Uusiomassan kuidut ovat ainakin kertaalleen käyneet kaikki paperinvalmistuksen vaiheet läpi. Niiden kuidut ovat rakenteellisesti muuttuneet ja lujuusominaisuudet heikohkoja (Knowpap, 2021c).

### **2.2.5 Non-wood**

Non-wood kuidut sisältävät samoja perusainesosia kuin puutkin. Niiden ligniinipitoisuus on usein alhaisempi. Saantoa heikentää alhainen selluloosapitoisuus. Hemiselluloosamäärä on kuitenkin korkea.

Non-wood kuidut vaihtelevat suuresti kuitupituuksiltaan. Ruohokasvit, oljet ja ruokokasvit ovat hyvin samankokoisia lehtipuiden kuitujen kanssa (Kuvio 3). Niini- ja lehtikuidut ovat taas pitkiä sekä taipuisia ja niistä saadaan erittäin vahvaa sellua (KnowPulp, 2021e). Esimerkiksi bambua käytetään korkealaatuisiin valkaistuihin papereihin, joiden ominaisuutena ovat hyvä repäisyjuuus, mutta heikko puhkaisu- ja vetolujuus (Virkola 1983, 11).

		kuitupituus, mm	kuidun halkaisija, µm
Ruohokasvit, oljet ja ruokokasvit	vehnä	1,4 (0,4 - 3,2)	15 (8 - 34)
	riisi	1,4 (0,4 - 3,4)	8 - 10
	elefanttiheinä	0,9 - 1,0	
	bagassi	1,7 (0,8 - 2,8)	20 (10 - 34)
	bambu	2,7(1,5 - 4,4)	14 (7 - 27)
Niinit	kenafhamppu	2,6 (2 - 6)	20 (14 - 33)
	hamppu	25 (5 - 55)	25 (10 - 50)
	juutti	2,5 (2 - 5)	20 (10 - 25)
Lehdet	sisal	3 (1 - 8)	20 (8 - 41)
	abaca	6 (2 - 12)	24 (16 - 32)
Siemenkuidut	puuvillalintteri	25	20 (10 - 30)

KUVIO 3. Non-wood kuitujen ominaisuuksia (Knowpulp, 2021f).

Selluteollisuudessa non-wood kuitujen käyttöä hankaloittaa niiden korkeat korjuukustannukset sekä käsittelyn että varastoinnin hankaluus. Raaka-aineet ovat myös hyvin kausiluontoisia. Lisäksi prosessointia hankaloittaa korkea piioksidipitoisuus (1–5 %). Olki- ja ruhoselluja voidaan käyttää lehtipuusellun tavoin. Niini- ja lehtiselluja käytetään suurta lujuutta vaativiin tuotteisiin (KnowPulp, 2021e).

### 3 KUITUJEN LUJUUDET

Kuitujen lujuudella yleensä tarkoitetaan yksittäisen kuidun pituussuuntaista vetolujuutta. Kuidun lujuuteen vaikuttavat sen: kemiallinen koostumus, kevät- ja kesäpuun suhde, fibrillikulma, selluloosan järjestäytymistila, hiilihydraattien polymeeroitumisaste ja kuituseinämän epäjatkuvuuskohdat. Kesäpuukuidut ovat huomattavasti lujempia kuin kevätpuukuidut. Kuidun lujuuden määrittäminen on hankalaa ja se onkin useiden eri osatekijöiden summa (Virkola 1983, 1084).

Yksittäisen kuidun lujuus vaikuttaa huomattavasti valmiin paperin lujuusominaisuuksiin. Kun paperin kuidut ovat hyvin sitoutuneet, kuitujen lujuus määrittää jopa paperin lujuuden. Yksittäisten kuitujen lujuus vaihtelee massassa, johtuen raaka-aineen ja valmistusprosessin epätasaisuudesta. Yhdessä grammassa kemiallista massaa on noin neljä miljoonaa kuitua (KnowPulp, 2021b).

Taulukossa 3 on esitetty kuituominaisuuksien kasvun vaikutuksia paperitekniisiin ominaisuuksiin. Kuitupituuden kasvaessa, vetolujuus, puhkaisulujuus, repäisylujuus ja taittolujuus kasvavat. Pituusmassan kasvaessa lujuudet taas heikkenevät. Mukautumiskyvyn kasvaessa kaikki muut ominaisuudet kasvavat, paitsi repäisylujuus, jonka sitoutumisaste on suuri. Yksittäisen kuidun lujuuden kasvaessa lujuuden paranevat. Sitoutumiskyvyn kasvaessa, vetolujuus, puhkaisulujuus ja repäisylujuus kun sitoutumisaste on pieni kasvavat.

TAULUKKO 3. Kuituominaisuudet (Virkola 1983, 1089).

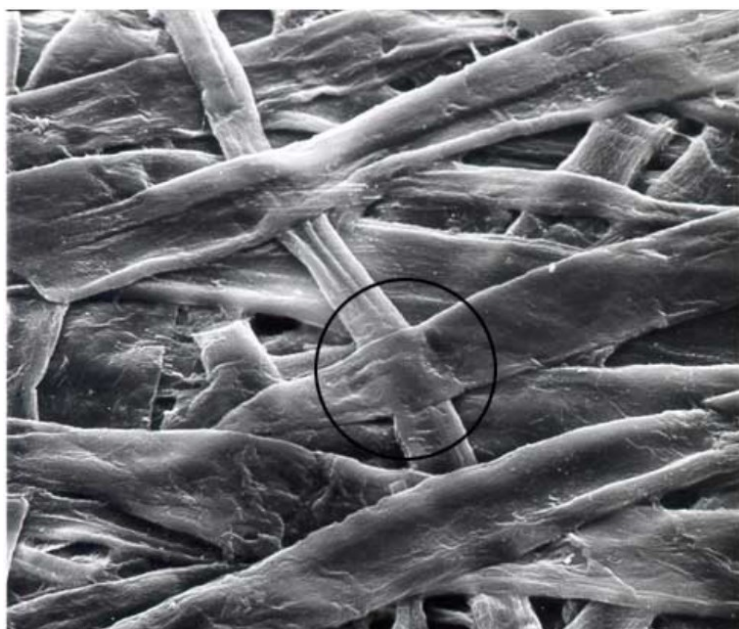
Ominaisuus	Tiheys	Vetolujuus	Puhkaisulujuus	Repäisylujuus		Taittolujuus
				Sitoutumisaste pieni	Sitoutumisaste suuri	
<b>Kuitupituus</b>	0	+	+	+++	+	+
<b>Pituusmassa</b>	–	–	--	–	–	--
<b>Mukautumiskyky</b>	+++	++	++	+	(–)	++
<b>Yksittäisen kuidun lujuus</b>	0	+	+	(+)	+++	+
<b>Sitoutumiskyky</b>	0	+++	++	+	0	0

Kuitujen vetolujuus on akselin suunnassa 100–300 mN, joka muutettuna katkeamispituudeksi on 95150 km. Se on suurempi kuin teräksen katkeamispituus.

Kuitujen lujuuteen vaikuttavat heikentävästi kuidun vauriot ja epäjatkuvuuskohdat. Vaurioita syntyy keskeisesti massan valmistus- ja käsittelyvaiheessa (KnowPulp, 2021b).

### 3.1 Kuitudimensiot

Kuitupituus on yksi tärkeimmistä kemiallisesti valmistettujen massojen ominaisuuksista. Kuitupituus vaikuttaa erityisesti paperin lujuusominaisuuksiin. Pidemmät kuidut muodostavat tiukemman kuituverkoston, sillä ne pystyvät luomaan enemmän sidoksia muiden kuitujen kanssa kuin lyhyet kuidut (KnowPulp, 2021b). Kuviossa 4 on havainnollistettu kuitujen väliset sidokset.



KUVIO 4. Kuitujen väliset sidokset, 600-kertainen suurennos (KnowPulp, 2021g).

Kuitupituus pienenee lähinnä haketuksessa, kuidutuksessa ja jauhatuksessa. Lisäksi keitossa keskikuitupituus lyhenee, kun delignifioitumisaste kasvaa, tämä johtuu ilmeisimmin haketuksen aiheuttamasta kuituvaurioista. Kuitupituus kasvaa saannon kasvaessa (Virkola 1983, 1078).

Kuitenkin pelkästään kuitupituus ei vaikuta esimerkiksi paperin repäisylujuuteen, vaan esimerkiksi märkäpuristus kasvattaa repäisylujuutta samankaltaisesti kuin jauhatuksessa, kuitenkin kuidun pituutta ja lujuutta muuttamatta. Esimerkiksi sulfaattimassassa, kuidun pituus ja jäykkyys korreloivat hyvin, jonka takia monia

ilmiöitä on esitetty virheellisesti yksinomaan kuidun pituudella. Happamalla sulfiittimassalla, kuidun pituus ja jäykkyys ei taas korreloidu hyvin (Virkola 1983, 1081).

Kuidun halkaisijalla sekä seinämänpaksuudella on myös huomattavia vaikutuksia paperin ominaisuuksiin. Yhdessä kuituseinämän tiheyden kanssa ne määräävät pituusmassan. Pituusmassa on kuitujen keskimääräinen massa pituusyksikköä kohden (Virkola 1983, 1082). Seinämänpaksuus on noin sadasosa sen pituudesta (KnowPulp, 2021b)

### **3.2 Kuitujen mukautumiskyky**

Mukautumiskyvyllä tarkoitetaan märkien kuitujen kykyä muuttaa muotoaan ulkoisen voiman kohdistuessa kuituun. Mukautumista tapahtuu rainan suotautumisen, märkämpuristuksen, kuivautuksen ja kalanteroinnin aikana. Mukautumiskyky riippuu kuitudimensioista, kuidutusmenetelmästä ja jauhatuksesta. Hemiselluloosa parantaa paikallista mukautumiskykyä. Mukautumiskyky vaikuttaa lujuusominaisuuksiin ja muihin sitoutuneisuudesta riippuviin ominaisuuksiin (Virkola 1983, 1087).

### **3.3 Kuidun sitoutumiskyky**

Sitoutumiskyvyllä tarkoitetaan kuitupintojen kykyä muodostaa keskenään vetysidoksia. Sitoutumiskykyä muokkaavat kemialliset ja mekaaniset käsittelyt. Kuitupintojen sitoutumiskykyyn tarvittava jauhatusmäärä riippuu kuidun kemiallisesta kuidutustavasta (Virkola 1983, 1087).

### **3.4 Jauhatus**

Jauhatuksella vaikutetaan kuitujen sitoutumiskykyyn. Jauhamattomaan massaan ei synny tarpeeksi sidoksia, jolloin paperin lujuus on riittämätöntä, niin märkänä kuin kuivana. Lisäksi jauhamattoman paperin tai kartongin rakenne on liian huokoinen ja karhea, jotta sitä voitaisiin päällystää tai käyttää painamiseen. Jauhatuksessa kuidut notkistuvat, aukeavat ja turpoavat, jolloin niiden sitoutumispinta-ala laajenee. Jauhatuksessa pyritään saavuttamaan lopputuotteeseen tasapaino

eri jauhatustasasteista muodostuvien ominaisuuksien välille. Jauhatuksessa tietyt ominaisuudet heikkenevät, kun taas toiset paranevat. Yleensä lehtipuu ja havupuu jauhetaan erikseen (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 113).

Jauhatusprosessi parantaa vetojäykkyyttä, vetolujuutta, formaatiota, suotautumisvastusta, tiheys kasvaa, vetolujuus ja repäisylujuus kasvavat tiettyyn pisteeseen asti, kunnes ne alkavat sen jälkeen heikkenemään. Toisaalta jauhatus pienentää muun muassa bulkkia, opasiteettia, ilmanläpäisevyyttä sekä huokoisuutta. (Virtanen, 2009). Kemiallisen massan jauhatus huonontaa valonsirontaa, vaaleutta ja opasiteettia (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 115).

Jauhatuksessa kuitujen katkeiluun vaikuttavat eniten jauhintyyppi, jauhatustapa sekä massan sakeus. Happamalla menetelmällä valmistettu valkaistu kuitu katkeilee helpommin kuin valkaistu sulfaattikuitu (Virkola 1983, 1078–1079). Valkaisematonta massaa on jauhettava enemmän kuin valkaistua massaa ja mekaaninen massa vaatii vähemmän jauhatusta kuin kemiallisesti valmistettu massa (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 115).

Massan jauhatuksen primäärivaikutukset voidaan jakaa kuuteen mekanismiin, joita ovat: ulkoinen fibrillaatio, sisäinen fibrillaatio, kuidun suoruden muutokset, kuitujen katkeileminen ja keskikuitupituuden lyheneminen, hienoaineen syntyminen ja kuidun liukeneminen osittain tai kokonaan (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 113).

- Ulkoisessa fibrillaatiossa ulkokerrokset irtoavat osittain ja haiventuvat. Ulkoinen fibrillaatio edistää kuitujen välistä sitoutumista toisiinsa.
- Sisäisessä fibrillaatiossa vesi tunkeutuu kuituseinämän lamellien väliin, jolloin kuitu notkistuu.
- Kuidun suoruden muutoksessa jauhatusvoimat aiheuttavat kuidun suolistumisen pienessä sakeudessa, kun taas suuressa sakeudessa kuitu kähertyy.
- Kuitujen katkeileminen ja keskikuitupituuden lyheneminen ei ole yleensä toivottu ominaisuus. Pienempi keskikuitupituus heikentää repäisylujuutta, mutta parantaa formaatiota, kiiltoa, sileyttä ja tiiveyttä.

- Hienoaineen syntyminen eli kuitujen ja seinämien jauhaantuminen hienoiksi partikkeleiksi. Hienoaine edistää kuitujen sitoutumista
- Kuidun liukenemisessä kokonaan tai osittain, muodostuu sitoutuva kerros kuidun pintaan. Kokonaan liukeneminen ei ole toivottu ominaisuus, sillä kolloidiset aineet häiritsevät paperinvalmistusta

## 4 KEMIALLINEN MASSAN VALMISTUS

Kemiallisessa massanvalmistuksessa kuidut erotetaan kemiallisesti liuottaen. Päätaavoite on erottaa ligniini, joka pitävät solut kiinni puun alkuperäisessä muodossa. Tärkeää on, että tarpeeksi ligniiniä irtoaa, jotta puun kuidut vapautuvat (Belgacem & Pizzi 2016, 79). Kuitenkin niin, että selluloosan polymerisaatioaste pysyy korkeana (KnowPulp, 2021b).

Käyttämällä alkalisia, neutraalisia tai happamia ratkaisuja, korkeassa lämpötilassa ja paineessa saadaan ligniini liuotettua, mutta väistämättä polysakkarideja liukenee myös (Belgacem & Pizzi 2016, 80). Se kuinka paljon komponentteja liukenee, riippuu hyvinkin pitkälle siitä, mitä menetelmää on käytetty, kuinka pitkälle keitto on viety ja kuinka vaaleaksi massa on valkaistu. (KnowPulp, 2021b). Näin ollen on tärkeää saavuttaa optimi ligniinipitoisuus, joka antaa parhaat ominaisuudet massoille (Virkola 1983, 1071).

Keittokemikaaleina pyritään käyttämään sellaisia aineita, jotka liuottavat ligniiniä, mutta mahdollisimman vähän selluloosaa. Lisäksi on vältettävä käsittelyjä, jotka katkaisevat selluloosaketjuja. Selluloosaketjujen katkeaminen heikentää yksittäisten kuitujen lujuuksia, joka taas heikentää paperin lujuutta. Ligniinin liukeminen tekee kuidut joustavimmiksi ja vaikuttaa sitoutumiskykyyn positiivisesti, mutta ligniinin liukeneminen ei juurikaan vaikuta kuitujen vetolujuuteen tai keskimääräiseen kuitupituuteen (KnowPap, 2021a).

Kemiallisen massan valmistuksessa yleensä massa happidelignifioidaan ja valkaistaan. Happidelignifioinnissa hapen ja alkalien avulla poistetaan jäännösligniiniä ja valkaisussa massa valkaistaan, jäännösligniiniä poistamalla ja vaalentamalla massan värillisiä aineita. Valkaisuun käytetään pääasiassa nykyaikaisissa laitoksissa EFC-valkaisua (elementally chlorine free), mutta käytössä on myös TCF-valkaisua (totally chlorine free) (KnowPulp, 2021h).

Kemiallisessa massan valmistuksessa valmistustavat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: sulfaatti- ja sulfiittimenetelmään. Sulfaattimenetelmä on nykypäivänä yleisin hallitseva muoto ja vuonna 2000 tuotannosta 89 % oli sulfaattimenetelmällä valmistettua ja vain 5,7 % sulfiittimenetelmällä (Sixta 2006, 111).

CEPI-maiden tuotannosta vuonna 2018 tuotettiin 26,185 miljoonaa tonnia sulfaattimenetelmällä, kun taas vastaavasti 1,678 miljoonaa tonnia valmistettiin sulfiittimenetelmällä (Taulukko 4).

TAULUKKO 4. CEPI-maiden tuotanto. (CEPI, 2020)

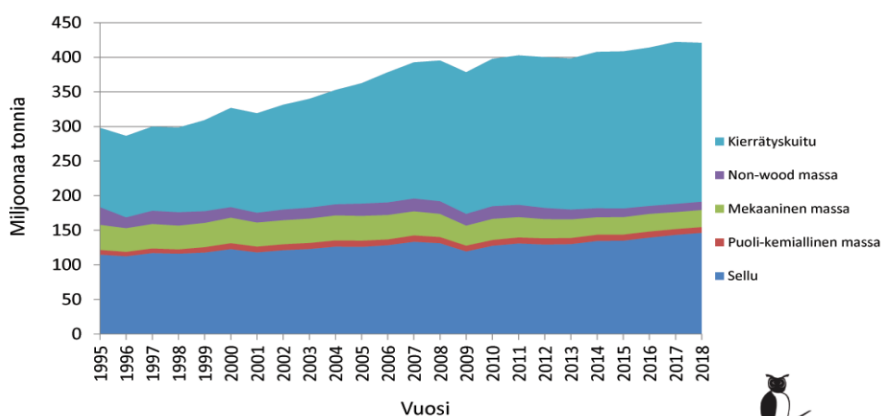
#### Total Pulp<sup>1</sup> Production and Consumption

Total Pulp <sup>1</sup>	Production			Consumption		
	2019	2020	% Change 2020/2019	2019	2020	% Change 2020/2019
Mechanical & Semi-Chemical	9 542	8 323	-12.8	9 630	8 263	-14.2
Sulphite Pulp	1 672	1 607	-3.8	1 425	1 346	-5.5
Sulphate Pulp	26 601	26 167	-1.6	29 261	28 191	-3.7
Total Chemical Pulp	28 273	27 774	-1.8	30 686	29 537	-3.7
Total Woodpulp	37 814	36 098	-4.5	40 316	37 800	-6.2
Other Pulp <sup>2</sup>	163	92	-43.4	309	228	-26.4
<b>Total Pulp<sup>1</sup></b>	<b>37 977</b>	<b>36 190</b>	<b>-4.7</b>	<b>40 625</b>	<b>38 028</b>	<b>-6.4</b>

Kuviossa 5 on havainnollistettu myös koko maailman tuotanto vuonna 2020. Kierätyskuidun määrä on lisääntynyt huomattavasti ja vaikka sellun tuotanto sulfaattimenetelmällä on hieman lisääntynyt, on sen käyttö kuitenkin kokonaismäärältään suhteutettuna muihin massalajien tuotantoon reilusti pienentynyt.

#### Eri massalajien tuotanto globaalisti

2018 massan tuotanto maailmassa oli yhteensä 421 miljoonaa tonnia



20.04.2020  
LÄHDE: ForesSTAT, FAO



Prowledge

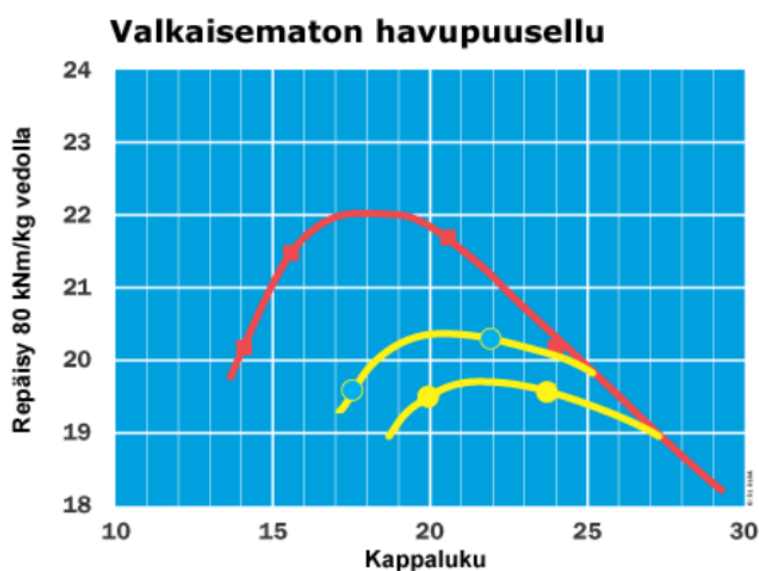
KUVIO 5. Massalajien tuotanto globaalisti (KnowPulp, 2021i).

## 4.1 Kappaluku ja saanto

Kappaluvulla kuvataan ligniinin määrää keiton jälkeen. Mitä isompi luku on, sitä tummempaa massa on. Valkaistulla lehtipuumassalla kappaluku on 14–20, havupuulla taas 25–30. Valkaisemattomille massoille kappaluku on tyypillisesti 40–100.

Saanto taas kertoo sen, että kuinka monta prosenttia kuivasta puusta saadaan sellua. Tyypillisesti lehtipuiden saanto on noin 50–53 % ja havupuulle 46–49 %.

Keittovaiheessa kappalukua ei ole suotavaa alentaa liikaa. Massan lujuusominaisuudet ja saanto putoavat tietyn pisteen jälkeen huomattavasti (Kuvio 6) (KnowPulp, 2021j).

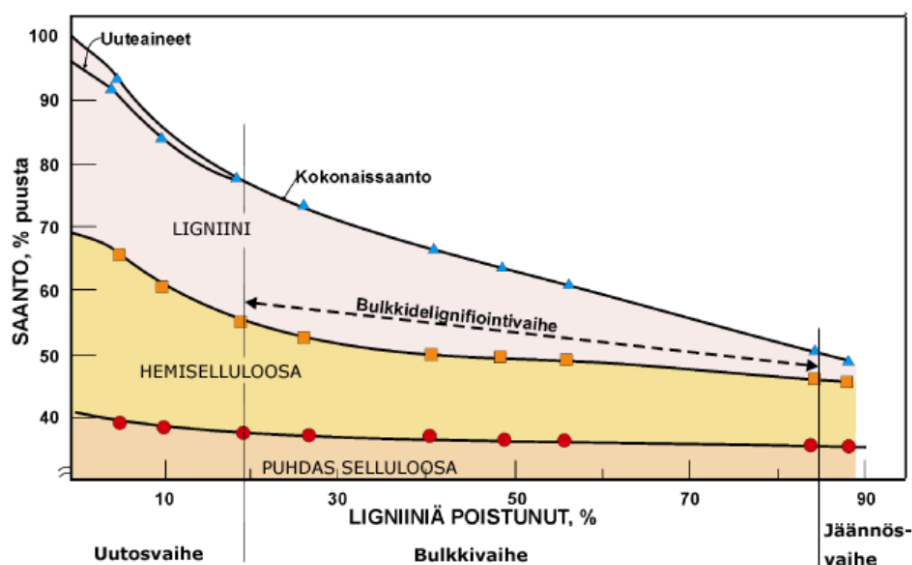


KUVIO 6. Valkaisematon havupuusellu (KnowPulp, 2021i).

## 4.2 Sulfaattimenetelmä

Sulfaattimenetelmässä käytetään alkalisia olosuhteita ja keittolämpötilana on noin 150–170 °C. Keittokemikaaleina käytetään natriumhydroksidin (NaOH) ja natriumsulfidin (Na<sub>2</sub>S) seosta eli valkolipeää, valkolipeä on vahvasti emäksinen liuos, jonka pH on noin 14. Keiton edetessä ligniini sekä uuteaineen liukenevat,

mutta samalla tapahtuu myös epätoivottua hemiselluloosaan ja selluloosan liukenemista, kuten Kuviosta 7 voidaan nähdä (KnowPulp, 2021j). Sulfaattikeitossa alkali (NaOH) reagoi ligniinin kanssa, jolloin ligniini pilkkoutuu. (Isotalo 2004, 52)



KUVIO 7. Sulfaattimassan komponenttien liukeneminen (KnowPulp, 2021b).

### 4.3 Hapan Sulfiittimenetelmä

Sulfiittikeitto voi tapahtua happamassa, neutraalissa tai alkalisissa olosuhteissa. Sulfiittiprosessit ja niiden pH alueet on esitetty taulukossa 5. (Sixta 2006).

TAULUKKO 5. Sulfiittimenetelmät pH:n mukaan (Sixta 2006, 393).

Nimike	pH-alue (25 °C)	Perusvaihtoehdot	Aktiiviset reagenssit
Hapan bisulfiitti	1–2	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> , HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Bisulfiitti (Magnefiitti)	3–5	Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(H <sup>+</sup> ), HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Neutraalinen sulfiitti	6–9	Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SOO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Alkalinen sulfiitti	10–13.5	Na <sup>+</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , OH <sup>-</sup>

Hapanta sulfiittimenetelmää käytetään nykyään liukosellun valmistukseen. Liukoselluloosassa tarkoituksena on poistaa ligniini ja hemiselluloosa. Liukoselluloosalle on tyypillistä korkea selluloosapitoisuus 92 % ja se sisältää noin 1–10 % hemiselluloosaa. Liukoselluloosasta valmistetaan muuntokuituja, joita käytetään eniten viskoosikuidun valmistukseen (KnowPulp, 2021k)

Happamissa sulfiittikeitoissa glykosidiset sidokset hydrolysoituvat happojen vaikutuksesta. Hapan hydrolyysi pilkkoo hiilihdraatteja, joka vaikuttaa erityisesti lyhytketjuiseen hemiselluloosaan. Hydrolyysin edetessä hemiselluloosasta muodostuu monosakkarideja. Selluloosan pilkkoutuminen ei kuitenkaan johda merkittäviin saantohäviöihin. Ligniinin liukeneminen perustuu sulfonoitumiseen ja hydrolyysiin. Sulfiittisellun lujuudet ovat yleensä heikompia, verrattuna sulfaattimenetelmään, joskin saanto on korkeampi samassa kappaluvussa ja massa on valkoisempaa (Isotalo 2004, 76). Happamassa keitossa sulfiittikuitu turpoaa enemmän, jolloin kuituseinämä repeilee ja tekee kuidun heikommaksi kuin sulfaattimenetelmässä (Virkola 1983, 1084).

Happamaan sulfiittikeittoon mänty soveltuu huonosti, johtuen sen sydänpuussa esiintyvän pinosylviinin takia, joka muodostaa kanssa epätoivottuja kondensoitumisreaktioita yhdessä ligniinin ja keittokemikaalien kanssa. Lehtipuiden pääasiallinen hemikomponentti ksylaani taas liukenee helposti happamissa olosuhteissa, joten lehtipuut eivät sovellu kovin hyvin happamaan sulfiittikeittoon, jos halutaan valmistaa paperia. Hemikomponentin liukenemisen takia lehtipuumassan lujuudet ovat heikkoja. Pääasiassa happamassa sulfiittikeitossa on käytetty kuusipuuta (Isotalo 2004, 76-77).

#### **4.4 Sulfaattimenetelmä vs. hapan sulfiittimenetelmä**

Ligniiniipitoisuuden kasvu heikentää selkeästi alkalisella puolella valmistettujen massojen lujuuksia, kun niitä verrataan happamalla puolella valmistettuihin massoihin. Happamalla puolella ligniini taas sulfonoituu, joka parantaa sen hydrofiilisyyttä. Tämänlaisten pintaligniiniipitoisuuksien kasvu ei juurikaan alenna lujuuksia (Virkola 1983, 1071). Happamien massojen polymeroitumisaste on usein korkeampi kuin alkalisten massojen, josta seuraa massan laadun huononemista (Virkola 1983, 1073).

Tab. 11.3 Fiber dimensions of fully bleached commercial paper pulps, as determined with Kajaani FS200 [17].

Parameter		Pine		Spruce		Eucalyptus		Beech	
		Kraft		Kraft		Sulfite		Sulfite	
		ECF	TCF	ECF	ECF	TCF	ECF	TCF	
Average fiber length									
arithmetic	mm	0.90	1.04	0.55	n.d.	0.79	0.52	0.28	
length-weighted	mm	2.16	2.36	0.72	n.d.	2.15	1.89	0.66	
weight-weighted	mm	2.82	3.01	0.91	n.d.	2.93	2.91	0.86	
Fines (P < 0.2 mm)	wt%	3.5	2.7	2.0	n.d.	4.2	7.9	12.8	
Coarseness	mg m <sup>-1</sup>	0.213	0.215	0.074	n.d.	0.227	0.219	0.122	

n.d. = not determined

KUVA 1. Sulfiitti- ja sulfaattimassojen pituusjakauma (Sixta 2006. 1021).

Kuvassa 1 on esitetty eri menetelmällä valmistettujen kuitujen pituusjakaumaa sulfaatti- ja sulfiittimassoissa. Kun tutkitaan kuusimassoja, nähdään sulfiittimassan kuitujen olevan lyhyempiä kuin sulfaattimassassa (Sixta 2006, 1020).

Sulfaattimenetelmän tuottamat hyvät massan lujuusominaisuudet, sen sopivuus kaikille kuituraaka-aineille, lehtipuiden korkean saannon, ympäristöystävällisyyden (vrt. hapen sulfaattiketto) sekä keittokemikaalien uudelleenkierätyksen takia siitä on tullut pääkeittomenetelmä (KnowPulp, 2021m). Lisäksi havupuun pihkaongelmat ovat vähäisiä ja sulfaattimenetelmässä saadaan arvokkaita sivuvirtoja talteen: tärpätti- mänty-, ja koivuöljy (Virkola 1983, 292). Huonoina puolina voidaan todeta havupuumassan alhainen saanto, vaikea valkaistavuus ja hajurik- kiyhdisteet (KnowPulp, 2021m).

Happamassa sulfiittimenetelmässä hyviä puolia ovat korkea saanto, korkea kap- paluku (KnowPulp, 2021m). Sulfiittimassat ovat helpommin valkaistavissa ja ne tarvitsevat vähemmän jauhatusenergiaa mutta huonoina puolina ovat heikommat lujuusominaisuudet, joista suurin ongelma on huomattavan alhainen repäisy- lujuus. Lehtipuu-sulfiittimassa onkin lujuusominaisuuksiltaan heikointa massaa (Virkola 1983, 491). Happaman sulfiittikeiton suuremmat päästöt sekä rajallinen määrä keitossa käytettäviä materiaaleja ja keittokemikaalien huono kierrätettä- vyys, on johtanut siihen, ettei sitä juurikaan enää käytetä paperinvalmistukseen (KnowPulp, 2021m).

## 4.5 Uusien menetelmien teoria

Vuosikymmenien aikana on käytetty valtavasti resursseja uusien tapojen ja prosessien kehittämiseen, joilla voitaisiin voittaa alkalisen menetelmän puutteet, eli ilman ja veden saasteet sekä suuret investoinnin kustannukset. Jotta sulfaattimenetelmällä valmistettua sellua voitaisiin haastaa, on sen ominaisuudet oltava samanlaisia tai parempia. Sixta:n mukaan sen täytyy omata seuraavanlaisia piirteitä (Sixta 2006, 16):

- Selektiivinen delifgniointi, jotta massan saanto kasvaa ja lujuusominaisuudet säilyvät korkeina.
- Massan oltava yhtä laadukasta kuin Kraft massan.
- Pieni energiankulutus ja tasainen lämpötila profiili.
- Pieni kemikaalien kulutus ja tehokas että yksinkertainen kemikaalien elpymisprosessi.
- Mahdollisuus sulkea kemikaalikierto, kuitenkin niin, ettei se heikennä prosessoitavuutta tai massan laatua.
- Selektiivinen valkaisu ilman klooria.
- Laaja materiaalivalikoima.
- Minimaalinen ilman- ja vedensaastuminen. Prosessin tulisi olla rikitön.
- Sivutuotteiden saanti kilpailukykyisesti.
- Kannattava pienempi tuotantoyksikkö, jonka investoinnin kustannukset ovat alhaiset.

## 5 PAPERIN, MASSOJEN JA KUITUJEN MITATTAVAT SUUREET

Paperin tärkeimmät ominaisuudet määräytyvät käyttökohteen mukaan. Seuraavaksi käydään läpi tärkeitä ominaisuuksia. Ominaisuudet ovat jaettu yleisiin ominaisuuksiin, lujuusominaisuuksiin, pintaominaisuuksiin sekä optisiin ominaisuuksiin.

### 5.1 Sakeus

Massan sakeus kertoo sen, että kuinka paljon kuiva-ainetta massasulppu sisältää. Sakeus lasketaan kaavalla 5, jossa  $X$  on sulpun sakeus (g/l),  $a$  on suodatinpaperin ja massakakun paino (g) ja  $b$  on suodatinpaperin paino (g).

$$X = \frac{(a - b)(500)}{\rho} \cdot 1000 \quad (1)$$

### 5.2 Yleiset ominaisuudet

#### 5.2.1 Neliömassa

Neliömassa kertoo paperin painon neliömetriä kohti. Neliömassan yksikkönä käytetään yleisesti grammaa per neliömetri (g/m<sup>2</sup>). Neliömassaan sisältyy paperin tai kartongin kuiva-aine sekä vesi. Neliömassa vaikuttaa lähes kaikkiin paperin ominaisuuksiin. Esimerkiksi, jos neliömassaa pienennetään niin paksuus alenee, lujuudet heikkenevät sekä opasiteetti alenee (Knowpap, 2021d).

Neliömassa lasketaan kaavalla 1. Kaavassa  $\rho_a$  on neliömassa (g/m<sup>2</sup>),  $m$  on näytteen massa (g) ja  $A$  on näytteen pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$$\rho_a = \frac{m}{A} \quad (2)$$

### 5.2.2 Paksuus

Paksuus kertoo paperi- tai kartonkiarkin pintojen välisen etäisyyden. Paksuus ilmoitetaan yleensä mikrometreinä ( $\mu\text{m}$ ). Paksuus vaikuttaa jäykkyyteen ja lujuuksiin positiivisesti (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 82).

### 5.2.3 Bulkki / Tiheys

Tiheys määritetään paksuuden ja neliömassan avulla. Tiheyden yksikkö on kilogrammaa per kuutiometri ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Tiheys määrittyy olennaisesti kahdesta eri asiasta, joita ovat raaka-aineiden ainetiheys ja huokososuus. Paperi sekä kartonki on sitä tiheämpää, mitä enemmän se sisältää täyteaineita ja päällystyspigmenttejä.

Tiheyden avulla voidaan määrittää bulkki, joka on tiheyden käänteisarvo ja sen yksikkö on  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Paperilla ja kartongilla on yleensä toivottavaa saada korkea bulkki. Korkea bulkki korreloi hyvän opasiteetin, suuren jäykkyyden, suuren koonpuristuvuuden ja suuren repäisylujuuden kanssa. Kun halutaan tiettyjä ominaisuuksia, kuten pinnan sileyttä ja vetolujuutta, bulkki useimmiten huononee. Esimerkiksi pitkäkuitusellun lisääminen mekaaniseen massaan ja kalanteroiminen huonontavat bulkkia (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 83).

Bulkki voidaan laskea kaavalla (3). Kaavassa Bulkki on tiheyden käänteisarvo ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ).  $\rho$  on näytteen tiheys ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).

$$\text{Bulkki} = \frac{1}{\rho} \cdot 1000 \quad (3)$$

### 5.2.4 Ilmanläpäisevyys / huokoisuus

Huokoisuudella ja ilmanläpäisyllä tarkoitetaan paperin kykyä läpäistä ilmaa. Kuidujen rakenne sekä niiden orientaatio vaikuttavat merkittävästi huokoisuuteen. Mitä pienempiä ja jauhetumpia kuidut ovat, sitä paremmin ne sitoutuvat. Siispä suuret kuidut, kuten havupuukuidut antavat paperille huokoisia ominaisuuksia.

Suuri huokoisuus haittaa lujuusominaisuuksia, jota esimerkiksi lyhytkuituisilla papereilla kompensoidaan monikerroksisella rakenteilla. Huokoinen rakenne vähentää myös tiheyttä. Ilmanläpäisevyys vähenee, kun neliömassaa kasvatetaan. Parempi formaatio ja täyteaineet parantavat huokoisuutta. (Knowpap, 2021d).

### 5.3 Lujuusominaisuudet

#### 5.3.1 Vetolujuusindeksi

Kun halutaan verrata lajien vetolujuuksia, on käytettävä vetolujuusindeksiä. Vetolujuusindeksi ottaa huomioon lajien välisen neliömassaeron. Vetolujuusindeksi  $X_2$  (Nm/g) saadaan kaavalla (4), jossa  $X_1$  on vetolujuus (kN/m) ja  $w$  on neliömassa ( $\text{g/m}^2$ )

$$X_2 = 1000 \cdot \frac{X_1}{w} \quad (4)$$

Vetolujuus on paperin suurin kuormitus, jonka niistä leikattu liuska kykenee kestämään murtumatta, kun sitä vedetään molemmista päistä samanaikaisesti. Paperikoneella on rainalla oltava riittävä vetolujuus, ettei tule katkoja. Vetolujuus korreloi neliömassan kasvaessa. Lisäksi kosteus, pieni formaatio, kuituorientaatio, pieni tuhkapitoisuus, yksittäisten kuitujen lujuus ja kuitujen sitoutuminen vaikuttaa positiivisesti vetolujuuteen. Vetolujuus ilmoitetaan kN/m (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 98).

#### 5.3.2 Repäisylujuusindeksi

Repäisylujuus kertoo sen voiman (mN), joka tarvitaan jatkamaan repäisemiseen alkuvuillosta lähtien. Repäisylujuus simuloi siis tilannetta, jossa rainan reunassa on reikä, repeämä tai tikku. Jos repäisylujuus on suuri, voima leviää laajalle alueelle repäisykohdan kärjessä ja taas jos repäisylujuus on pieni, niin voima kohdistuu pistemäisesti repäisykohdan kärkeen. Repäisylujuus on erittäin tärkeä poikkisuuntaisena koneella.

Repäisylujuusindeksi  $X_2$  ( $\text{mN} \cdot \text{m}^2 / \text{g}$ ) lasketaan kaavalla (5), jossa repäisylujuus on ( $\text{mN}$ ) ja  $w$  on neliömassa ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).

$$\text{Repäisylujuusindeksi} = \frac{\text{repäisylujuus}}{w} \quad (5)$$

Repäisylujuuteen vaikuttavat sitoutumisaste, kuitupituus, kuidun lujuus ja orientaatio. Orientaatiolla saadaan poikkisuuntaista repäisylujuutta. Jos kuidut ovat toisiinsa nähden lujuuden ja pituuden perusteella sitoutuneet sopivasti saadaan hyvä repäisylujuus, mutta jos kuidut ovat heikkoja ja paljon sitoutuneita tai ei yhtään sitoutuneita on repäisylujuus heikko (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2006, 98).

### 5.3.3 Z-lujuus

Paperin Z-lujuudella tarkoitetaan paperin kykyä vastustaa sen pintaan kohdistuvaa kohtisuoraa kuormitusta. Kun paperin kohtisuora kuormitus ylittää z-suuntaisen lujuuden, sen rakenne murtuu. Z-lujuus riippuu kuitujen lujuudesta, kuitukuitu-sidosten lujuudesta, sitoutumisesta sekä niiden jakautumisesta (Knowpap, 2021d).

## 5.4 PINTAOMINAISUUDET

### 5.4.1 Karheus ja sileys

Sileydellä ja karheudella tarkoitetaan paperin pinnan. Sileys ja karheus on tärkeä ominaisuus varsinkin painettavilla papereille. Karheus ilmenee pinnan epätasaisuutena, jolloin esimerkiksi painettaessa, muste jakautuu pinnalle epätasaisesti.

Sileyttä pystytään parantamaan paperikoneella kalanteroimalla sekä päällystämällä. Lisäksi sileyteen vaikuttaa esimerkiksi formaatio sekä viiran pinnan tasaisuus paperikoneella (Knowpap, 2021d).

## 5.5 Optiset ominaisuudet

### 5.5.1 Opasiteetti

Opasiteetti kertoo paperin läpinäkymättömyyden, joka ilmaistaan mustaa pintaa vasten mitatun heijastusluvun sekä rajaheijastusluvun suhteena. Se ilmoitetaan prosentteina. Mitä pienempi opasiteetti on, sitä läpinäkyvämpää paperi on, ja taas toisinpäin, mitä suurempi opasiteetti on, sitä läpinäkyvämpää on paperi. Jos paperin opasiteetti on huono, painatuksen jälkeen painojäljen läpikuultavuus on suuri ja hankaloittaa tekstin lukemista (Knowpap, 2021d).

## 6 KOKEELLINEN OSA

### 6.1 Mittausmenetelmät

Kaikki näytteet on ilmastoitu ISO 187 standardin mukaisesti. Standardin mukaan kosteuden on oltava  $50 \% \pm 2 \%$  ja lämpötilan on oltava  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , vähintään neljä tuntia.

Alla olevassa taulukossa 6 on ilmoitettu suureet, niiden yksiköt, mittauslaitteet, standardi ja poikkeus -sarakkeeseen, on ilmoitettu standardista poikkeavien testien lukumäärä. Arkkien valmistus on kirjoitettu erikseen.

TAULUKKO 6. Mittausmenetelmät ja yksiköt.

Suure	Yksikkö	Laite	Standardi	Poikkeukset
Neliömassa	$\text{g/m}^2$	Kern Tarkkuusvaaka	ISO 536	5
Paksuus	$\mu\text{m}$	L&W Micrometer	ISO 534	5
Tiheys	$\text{kg/m}^3$	L&W Micrometer + Kern Tarkkuusvaaka	ISO 534	5
Bulkki	$\text{cm}^3/\text{g}$	L&W Micrometer + Kern Tarkkuusvaaka	ISO 534	5
Ilmanläp. /huokoisuus	ml/min	Messmer Buchel Parker print	ISO 8791/4	5
Karheus	ml/min	L&W Bentsen tester	ISO 8791-2	5
Opasiteetti	%	Konica Minolta CM-3630	ISO 2469 ja ISO 2470	5
Repäisylujuus	mN	L&W Tearing tester	ISO 1974	3
Vetolujuus, venymä	kN/m	L&W Tensile tester	ISO 1924-3	5
Z-lujuus	kPa	L&W ZD Tensile tester	ISO 15754	1
Jauhatus	-	Valley-Hollander	SCAN-C25:76	1/2
Märkähajotus	-	-	SCAN-C18:65	-

### 6.2 Arkkien valmistuksen menetelmät

Sulfaattimassaa (Massa X) revitään 180 g valmiista arkista, lisätään vettä niin että yhteistilavuudeksi tulee 5 l ja annetaan turvota vähintään 4 tuntia. Tämän jälkeen lisätään 9 litraa n. 20 C vettä jauhimeen ja lisätään kuitu-vesi suspensio. Massan annetaan hajottua 20 min terä auki ja tämän jälkeen jauhetaan terällä, jossa on 5,4 kg painoa 20 min. Sen jälkeen massa laimennetaan 2 g/l, annostelua varten.

Sulfiittimassaa (Massa A) revitään valmiista arkista 50 g pieniksi paloiksi, lisätään tilavuudeksi 5 litraa vettä ja annetaan olla vähintään neljä tuntia turpoamassa. Tämän jälkeen massasuspension märkähajotus tapahtuu 10 000 kierroksella. Lopuksi massa laimennetaan 2 g/l.

Massa B ei ollut valmiina arkkeina vaan märkäpuristettuna, joten massa B:n käsittely eroaakin hieman muista. N. 70 grammaa, kuivaa massaa punnitaan ja massa laimennetaan n. 13 g/l ja annetaan olla vähintään neljä tuntia turpoamassa vesisuspensiossa. Tämän jälkeen massaa hajotetaan 30 000 kierrosta märkähajottimella (Kuva 2). Märkähajotuksen jälkeen massa lajitellaan 2 mm sihdillä (Kuva 3). Lajittelussa massasuspension sakeudeksi laimennetaan n. 7,5 g/l, sihtauksen helpottamiseksi.



KUVA 2. Märkähajotus.



KUVA 3. Lajittelu.

Lajittelun jälkeen massan todellinen sakeus määritetään sakeusmittauksella. Kun oletetaan sakeuden olevan 2–10 g/l välillä, otetaan näytettä 500 ml, punnitaan vakipainoon kuivattu suodatinpaperi. Tämän jälkeen sulppu suodatetaan suodatinpaperin läpi Büchner-suppilossa. Suodatinpaperi ja massakakku kuivataan vakipainoon sekä punnitaan. Tulos lasketaan kaavalla 1 ja on esitetty taulukossa 7. Sakeuden määrittämisen jälkeen massa laimennetaan 2 g/l.

TAULUKKO 7. Sakeus.

Suodatinpaperi (g)	0,68
Yht. punnittu (g)	2,75
Sakeus (g/l)	4,14

Arkki valmistukseen on käytetty arkkimuottia (Kuva 4), jonka pinta-ala on 16,5 cm x 16,5 cm. Arkkimuottiin annostellaan 0,8 litraa 2 g/l sulppua. Seospisteiksi valittiin 11 eri pistettä, joiden seossuhteet on esitetty taulukossa 8. Käynnistetään ilmasekoitin ja annetaan automaattisen sekoituksen käydä loppuun. Päästetään sulppuseos ja annetaan veden läpäistä viira. Asetetaan rainan päälle imukartonki ja kaksi käytettyä imukartontia ja niiden päälle metallilevy. Kaulitaan messinki-kaulimella tasaisesti viisi (5) kertaa edestakaisin. Sen jälkeen arkki ja päälliset (ei metalli) siirretään arkkitelineeseen. Arkin molemmille puolelle tulee yksi (1) imukartontia ja niiden ympärille kaksi (2) käytettyä imukartontia. Tämä prosessi toistetaan, niin kauan kuin arkkeja tehdään. Massojen vaihtuessa laitetaan ohut metallilevy jakajaksi.

TAULUKKO 8. Seospisteet.

Piste #	Massa X	Massa A	Massa B
1	100 %	0 %	0 %
2	90 %	10 %	0 %
3	80 %	20 %	0 %
4	60 %	40 %	0 %
5	30 %	70 %	0 %
6	10 %	90 %	0 %
7	0 %	100 %	0 %
6	90 %	0 %	10 %
7	80 %	0 %	20 %
8	60 %	0 %	40 %
9	30 %	0 %	70 %
10	10 %	0 %	90 %
11	0 %	0 %	100 %



KUVA 4. Arkkien valmistuslaite.



KUVA 5. Märkäpuristus.

Kosteat ja pinotut arkit märkäpuristetaan L&W Sheet Press puristimella (Kuva 5). Pinon alimmaksi ja ylimmäksi asetetaan metallilevy tasaamaan painetta. Märkäpuristus tapahtuu automaattilla ja vakiopaineella. Tämän jälkeen arkit asetetaan yksitellen kuivausrumpuun imukartonkien ympäröimänä ja panta kiristetään. Kuivaus kestää neljä (4) tuntia, kunnes kuivuri pysähtyy automaattisesti. Arkit vietään paperilaboratorioon, jossa arkkien annetaan olla vähintään neljä (4) tuntia ISO 187 standardin mukaan ennen mittauksia. Lisäksi ennen mittauksia arkit leikataan 15 cm x 15 cm kokoisiksi, jolloin niiden pinta-ala A on 225 cm<sup>2</sup>.

## 7 TULOKSET

Seuraavaksi käydään läpi tuloksia, tulokset ovat jaettu yleisominaisuuksiin, lujuusominaisuuksiin, pintaominaisuuksiin sekä optisiin ominaisuuksiin. Taulukkoihin on kirjattu seospisteet (0 %, 10 %, 20 %, 40 %, 70 %, 90 %, 100 %). Prosentti kertoo kuinka paljon se sisältää, joko massa A:ta tai massa B:tä, riippuen käytetystä taulukosta. Ainoastaan taulukoihin 10, 12, 14 ja 16 ei ole kirjattu seospistettä 100 %, johtuen massan kyvyttömyydestä sitoutua, jonka takia 100 % arkkien tekeminen ei onnistunut.

Kaikkiin päätaulukoihin 9–16 on kirjattu seospiste 0 %, eli piste, joka sisältää pelkästään jauhattua Massa X:ää (100 %). Tämä on tehty kuvioiden sekä taulukoiden lukemisen helpottamiseksi. Massa A:ta esitetään sinisellä värillä ja Massa B:tä keltaisella värillä. X tuloksen tilalla kertoo sen, ettei mittaustulos ole hyödynnettävissä.

### 7.1 Yleiset ominaisuudet

Taulukkoon 9 on merkitty Massa A:n yleiset ominaisuudet, joita ovat: neliömassa, paksuus, bulkki sekä ilmanläpäisevyys. Taulukkoon 10 on merkitty vastaavasti massa B:n yleiset ominaisuudet. Neliömassa on laskettu kaavalla (2) ja bulkki kaavalla (3).

TAULUKKO 9. Massa A:n yleiset ominaisuudet.

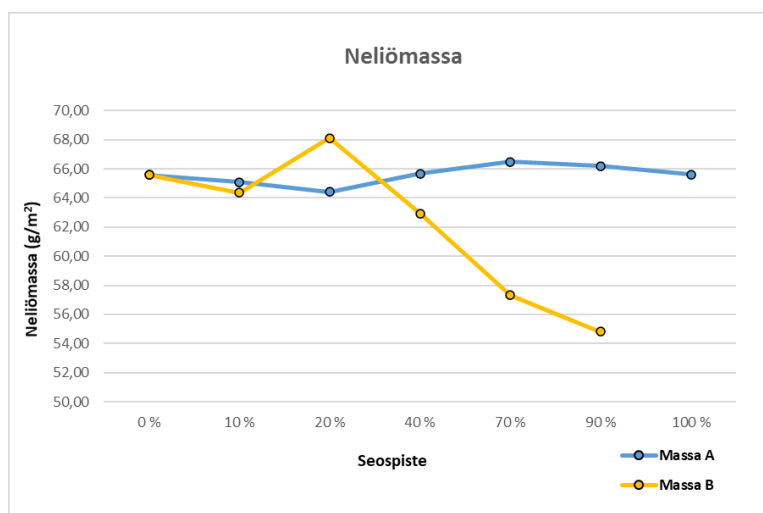
Massa A							
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %
<b>Neliömassa (g/m<sup>2</sup>)</b>	65,57	65,10	64,43	65,68	66,49	66,20	65,61
<b>Neliömassa (Δ%)</b>	1,79	2,30	4,71	3,28	2,36	0,83	1,65
<b>Paksuus (μm)</b>	112,60	113,80	115,80	119,40	121,40	124,00	135,20
<b>Paksuus (Δ%)</b>	0,36	0,82	0,69	1,01	0,55	0,81	0,59
<b>Bulkki (cm<sup>3</sup>/g)</b>	1,72	1,75	1,80	1,82	1,83	1,87	2,06
<b>Ilmanläpäisevyys yp (ml/min)</b>	1446,00	1491,00	1781,00	4169,00	x	x	x
<b>Ilmanläpäisevyys yp (Δ%)</b>	16,07	18,47	18,99	15,57	x	x	x
<b>Ilmanläpäisevyys ap (ml/min)</b>	1370,00	1672,50	1975,00	3872,00	x	x	x
<b>Ilmanläpäisevyys ap (Δ%)</b>	16,55	22,77	22,29	12,43	x	x	x

TAULUKKO 10. Massa B:n yleiset ominaisuudet.

Massa B						
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Neliömassa (g/m <sup>2</sup> )	65,57	64,36	68,10	62,93	57,31	54,81
Neliömassa (Δ%)	1,79	1,40	1,42	1,44	1,77	2,23
Paksuus (μm)	112,60	114,40	130,00	134,40	154,00	147,00
Paksuus (Δ%)	0,36	2,20	2,15	2,83	4,30	4,08
Bulkki (cm <sup>3</sup> /g)	1,72	1,78	1,91	2,14	2,06	2,69
Ilmanläpäisevyys yp (ml/min)	1446,00	1484,00	1636,00	4664,00	x	x
Ilmanläpäisevyys yp (Δ%)	16,07	17,18	19,32	9,17	x	x
Ilmanläpäisevyys ap (ml/min)	1370,00	1456,00	1659,00	3525,00	x	x
Ilmanläpäisevyys ap (Δ%)	16,55	16,77	22,95	9,55	x	x

### 7.1.1 Neliömassa

Viivakaavio (Kuvio 8) esittää neliömassan seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää neliömassan (g/m<sup>2</sup>).

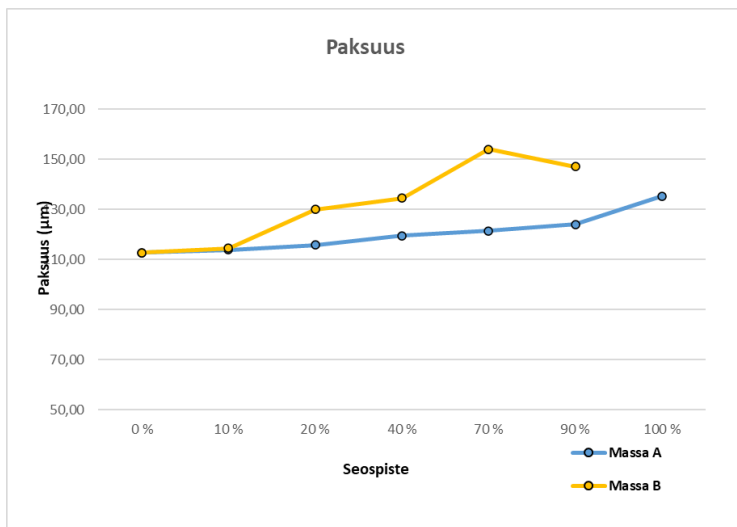


KUVIO 8. Neliömassa.

Kuviossa 8 Massa A:n neliömassa on ensin hieman laskenut ja sitten hieman noussut. Kuitenkin Massa A:n neliömassa on pysynyt seospisteissä lähes samankaltaisena. Massa B:n neliömassa on ensin hieman laskenut ja sitten reilusti noussut. Tämän jälkeen neliömassa on reilusti pudonnut.

### 7.1.2 Paksuus

Viivakaavio (Kuvio 9) esittää paksuuden seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää paksuuden ( $\mu\text{m}$ ).

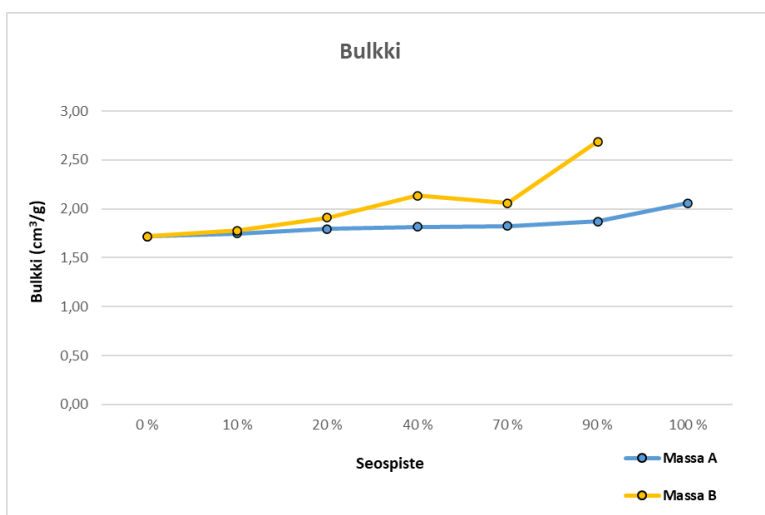


KUVIO 9. Paksuus.

Kuviosta 9 nähdään paksuuden kasvavan massa A:lla kaikissa seospisteissä. Massa B:n paksuus kasvaa reilusti 70 % asti, jonka jälkeen se laskee hieman.

### 7.1.3 Bulkki

Viivakaavio (Kuvio 10) esittää bulkin seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää bulkin ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ). Bulkki on laskettu kaavalla x.

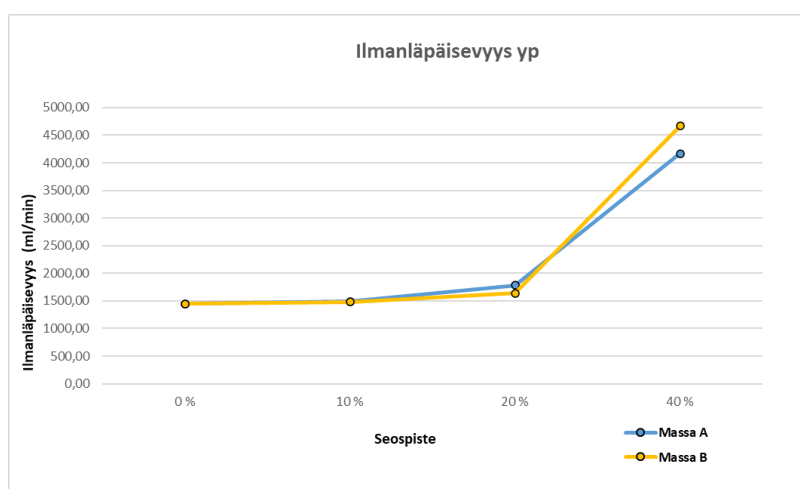


KUVIO 10. Bulkki.

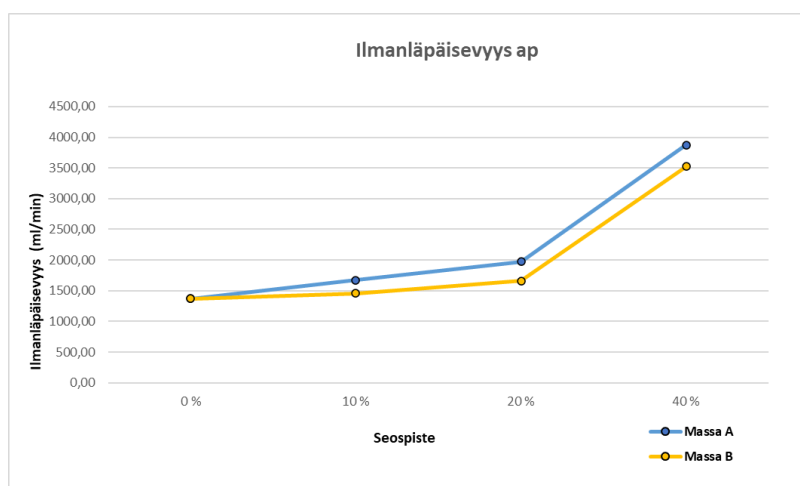
Kuvion 10 perusteella nähdään molempien seosmassojen bulkin nousevan seossuhteen kasvun edetessä. Massa B:n bulkin nouseminen on huomattavasti raskampaa.

### 7.1.4 Ilmanläpäisevyys / huokoisuus

Viivakaavio (Kuvio 11 ja Kuvio 12) esittää ilmanläpäisevyyden seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää ilmanläpäisevyyden (ml/min). Tulokset ovat ainoastaan 40 % asti, johtuen liian huokoisista tuloksista.



KUVIO 11. Ilmanläpäisevyys yp / huokoisuus yp.



KUVIO 12. Ilmanläpäisevyys ap / huokoisuus ap.

Kun tutkitaan kuvioita 11 ja 12, nähdään molempien puolien käyttäytyvän samankaltaisesti, molemmilla massoilla. Ilmanläpäisevyys nousee hieman 20 % asti, jonka jälkeen tapahtuu rajua huokoisuuden kasvu.

## 7.2 Lujuusominaisuudet

Taulukkoon 11 on merkitty Massa A:n lujuusominaisuudet, joita ovat vetolujuus, venymä, repäisylujuus ja z-lujuus. Vetolujuusindeksi sekä repäisylujuusindeksi on laskettu kaavoilla 3 ja 4. Taulukkoon 12 on merkitty vastaavasti massa B:n lujuusominaisuudet. Lujuusominaisuuksissa käsitellään vetolujuutta sekä repäisylujuutta niiden indeksien kautta.

TAULUKKO 11. Massa A:n lujuusominaisuudet.

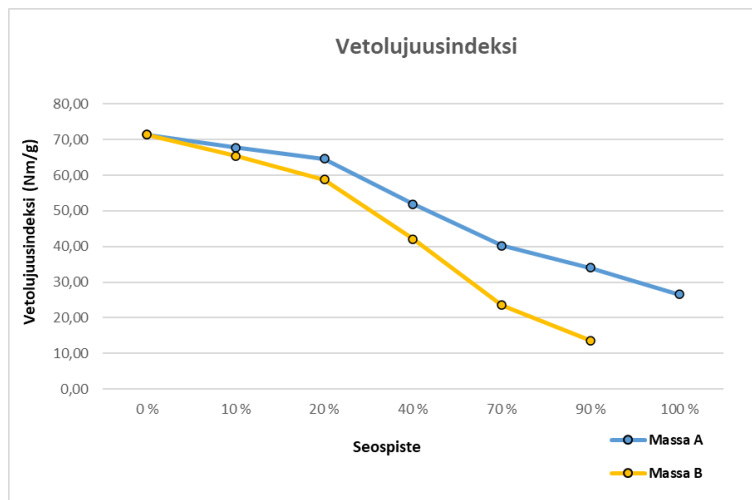
Massa A							
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %
Vetolujuus (kN/m)	4,68	4,41	4,16	3,41	2,66	2,26	1,74
Vetolujuus ( $\Delta\%$ )	4,10	4,99	6,15	5,99	3,92	4,21	4,73
Venymä (%)	4,14	4,07	4,09	4,04	3,62	2,76	2,35
Venymä ( $\Delta\%$ )	6,71	6,12	7,14	2,14	6,05	3,92	8,57
Repäisylujuus (mN)	1105,00	1053,00	1021,00	993,00	946,00	920,00	830,00
Repäisylujuus ( $\Delta\%$ )	87,00	82,00	80,00	54,00	98,00	68,00	71,00
Z-lujuus (kPa)	617,35	602,35	551,70	484,60	398,45	323,60	242,85
Vetolujuusindeksi (Nm/g)	71,37	67,74	64,57	51,92	40,18	33,99	26,52
Repäisylujuusindeksi (mN m <sup>2</sup> /g)	16,85	16,18	15,85	15,12	14,29	13,84	12,65

TAULUKKO 12. Massa B:n lujuusominaisuudet.

Massa B						
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Vetolujuus (kN/m)	4,68	4,21	4,00	2,65	1,35	0,75
Vetolujuus ( $\Delta\%$ )	4,10	3,54	4,89	2,43	6,40	6,38
Venymä (%)	4,14	3,81	3,35	3,32	2,22	0,85
Venymä ( $\Delta\%$ )	6,71	5,64	7,06	7,4	11,6	17,1
Repäisylujuus (mN)	1105,00	973,00	941,00	699,00	387,00	177,00
Repäisylujuus ( $\Delta\%$ )	87,00	34,00	51,00	44,00	59,00	20,00
Z-lujuus (kPa)	617,35	599,70	518,50	406,10	261,00	229,70
Vetolujuusindeksi (Nm/g)	71,37	65,41	58,74	42,11	23,56	13,59
Repäisylujuusindeksi (mN x m <sup>2</sup> /g)	16,85	15,12	13,82	11,11	6,75	3,23

### 7.2.1 Vetolujuusindeksi

Viivakaavio (Kuvio 13) esittää vetolujuuden indeksin seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja Y-akseli esittää vetolujuusindeksin (kN/m).

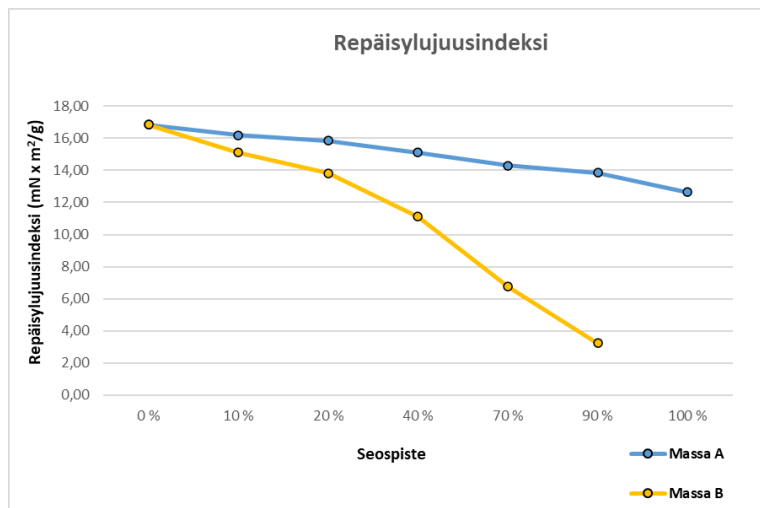


KUVIO 13. Vetolujuusindeksi.

Kuviosta 13 nähdään vetolujuusindeksin heikkenevän seossuhteiden kasvaessa. 20 % asti vetolujuusindeksi heikkenee maltillisemmin, mutta sen jälkeen heikkeneminen on suurempaa. Massa B:n lujuusindeksi on huomattavasti heikompaa kuin Massalla A.

### 7.2.2 Repäisylujuusindeksi

Viivakaavio (Kuvio 14) esittää repäisylujuusindeksin seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akselilla esitetään repäisylujuusindeksin (Nm<sup>2</sup>/g).

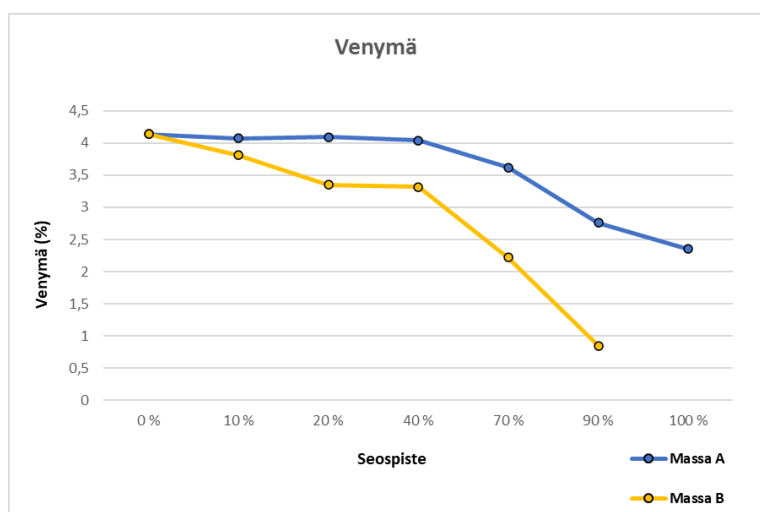


KUVIO 14. Repäisylujuusindeksi.

Repäisylujuusindeksi käyttäytyy Massa B:n kohdalla samankaltaisesti kuin veto-  
lujuusindeksikin. 20 % asti repäisylujuus heikkenee pienemmällä kulmakerto-  
mella, mutta sen jälkeen lasku on huomattavasti suurempaa. Massa A:n repäisy-  
lujuus käyttäytyy maltillisemmin. Se heikkenee 20 % asti tasaisesti ja sen jälkeen  
hieman suuremmin 100 % asti.

### 7.2.3 Venymä

Viivakaavio (Kuvio 15) esittää venymän seospisteen perusteella. X-akseli esittää  
seospisteen (%) ja y-akselilla esitetään venymä (%).

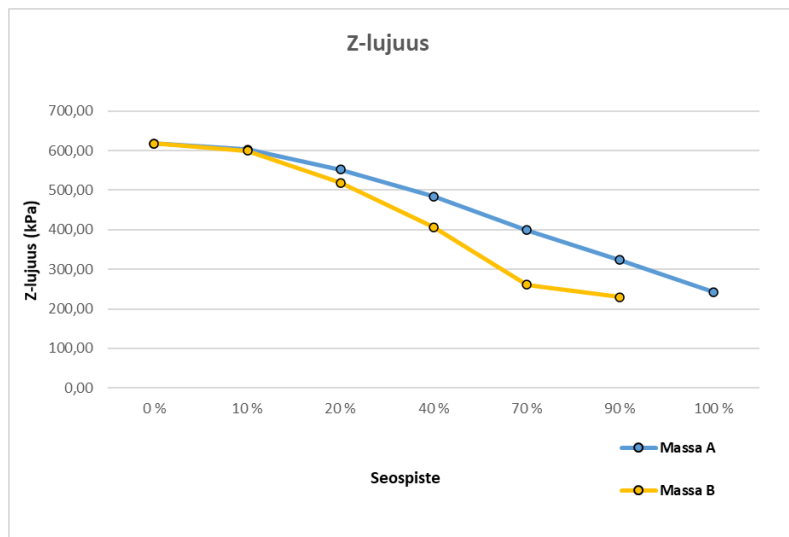


KUVIO 15. Venymä.

Kuvion 15 perusteella nähdään venymän pienenemän seossuhteiden kasvaessa. 40 % asti venymisen aleneminen on maltillista Massa A:lla, mutta sen jälkeen venyminen pienenee huomattavasti. Massa B:llä venymä laskee tasaisesti 20 % asti, 20–40 % se laskee vain vähän, mutta sen jälkeen se laskee todella paljon 90 % asti.

#### 7.2.4 Z-Lujuus

Viivakaavio (Kuvio 16) esittää Z-lujuuden seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää Z-lujuuden (kPa).



KUVIO 16. Z-Lujuus.

Z-lujuudet ovat vain suuntaa antavia, johtuen näytteiden vähyydestä. Mutta kuten huomataan ne jäljittelevät hyvin muita lujuuksia. Massa A:n Z-lujuus heikkenee 20 % melkein tasaisesti ja sen jälkeen heikkenee hieman suuremmalla kulmakertoimella 100 % asti. Massa B taas heikkenee maltillisesti 20 %, kunnes sen jälkeen suuresti heikkenee 70 % asti. 70 % ja 90 % seospisteiden välillä Z-lujuus heikkenee vain vähän.

#### 7.3 Pintaominaisuudet

Taulukkoon 13 on merkitty Massa A:n karheudet. Taulukkoon 14 on merkitty vastaavasti massa B: karheudet.

TAULUKKO 13. Massa A:n pintaominaisuudet.

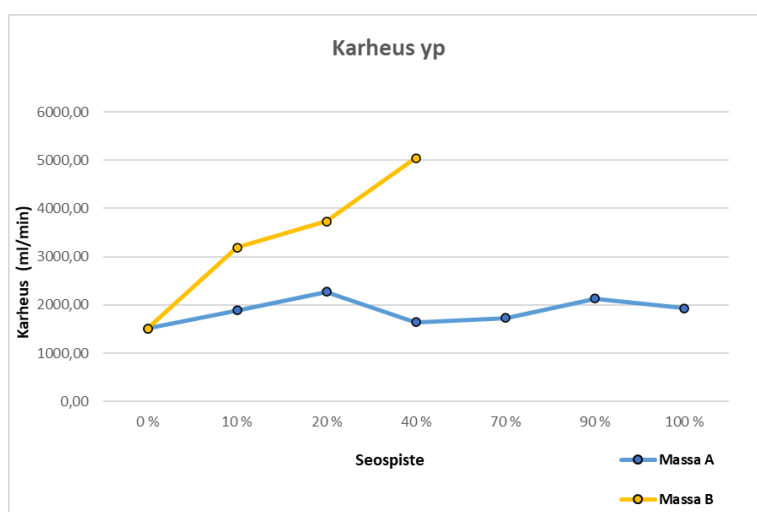
Massa A							
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %
Karheus yp (ml/min)	1515,00	1886,50	2272,00	1641,00	1732,00	2132,00	1937,00
Karheus yp ( $\Delta\%$ )	4,00	7,40	14,50	3,60	8,70	16,60	6,70
Karheus ap (ml/min)	1802,00	2048,50	2311,00	1830,00	1888,00	2153,00	2136,00
Karheus ap ( $\Delta\%$ )	14,50	8,50	13,60	10,00	6,60	15,70	7,30

TAULUKKO 14. Massa B:n pintaominaisuudet.

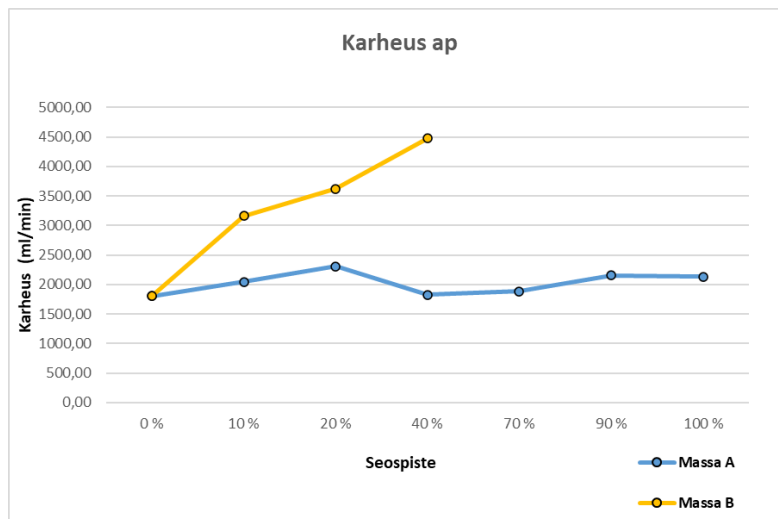
Massa B						
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Karheus yp (ml/min)	1515,00	3187,00	3731,00	5041,00	x	x
Karheus yp ( $\Delta\%$ )	4,00	23,10	20,30	17,10	x	x
Karheus ap (ml/min)	1802,00	3161,00	3623,00	4474,00	x	x
Karheus ap ( $\Delta\%$ )	14,50	22,20	25,10	14,20	x	x

### 7.3.1 Karheus

Viivakaavio (Kuvio 17 ja Kuvio 18) esittää karheuden seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää karheuden (ml/min). X-akseli esittää seospisteen ja y-akseli esittää karheuden (ml/min). Tulokset ovat ainoastaan 40 % asti Massa B:llä, johtuen liian karheista tuloksista.



KUVIO 17. Karheus yp.



KUVIO 18. Karheus ap.

Kuvioiden 17 ja 18 perusteella nähdään karheuksien olevan hyvin samankaltaisia ylä- ja alapuolelta. Massa A:n karheus ei juurikaan poikkea 0–100 % välillä. Massa B:n karheus kasvaa reilusti seospisteiden välillä.

#### 7.4 Optiset ominaisuudet

Taulukkoon 15 on merkitty Massa A:n opasiteetti. Taulukkoon 16 on merkitty vastaavasti massa B:n opasiteetti.

TAULUKKO 15. Massa A:n optiset ominaisuudet.

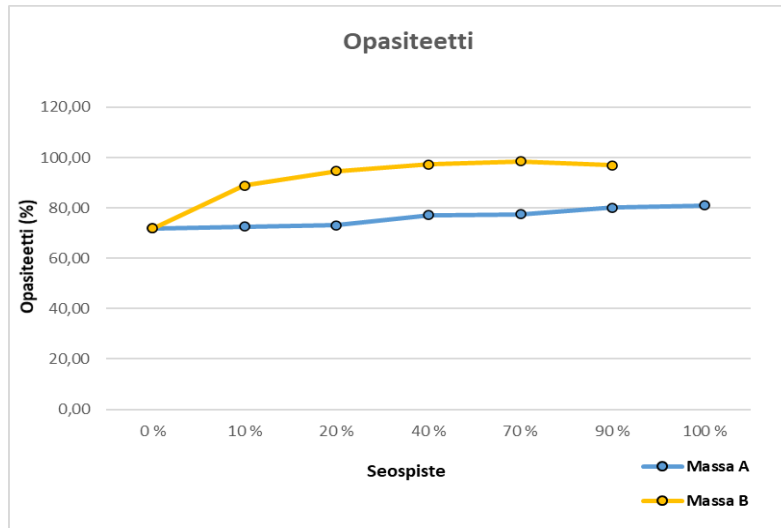
Massa A							
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %
<b>Opasiteetti (%)</b>	71,97	72,54	73,15	77,13	77,43	80,07	80,94
<b>Opasiteetti (<math>\Delta</math>%)</b>	0,29	0,38	1,29	0,75	2,52	2,58	0,38

TAULUKKO 16. Massa B:n optiset ominaisuudet.

Massa B						
	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
<b>Opasiteetti (%)</b>	71,97	88,96	94,75	97,22	98,43	96,95
<b>Opasiteetti (<math>\Delta</math>%)</b>	0,29	0,24	1,46	0,88	0,48	2,48

### 7.4.1 Opasiteetti

Viivakaavio (Kuvio 19) esittää opasiteetin seospisteen perusteella. X-akseli esittää seospisteen (%) ja y-akseli esittää opasiteetin (%).

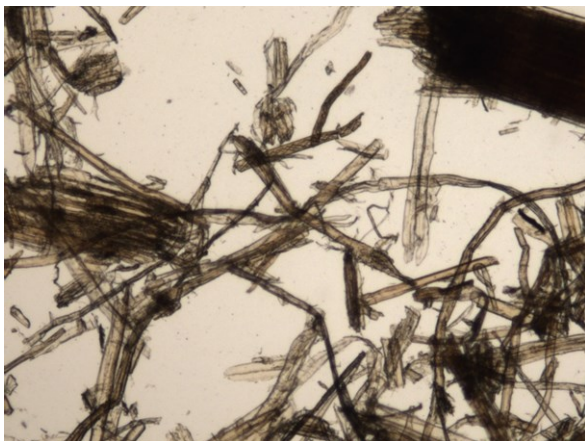


KUVIO 19. Opasiteetti.

Massa A:lla opasiteetti pysyy miltei samana 20 % asti, jonka jälkeen se nousee hieman 100 % asti. Massa B:llä opasiteetti kasvaa reilusti 10 % asti, jonka jälkeen se saavuttaa melkein täyden opasiteetin pisteessä 70 %, kunnes laskee hieman pisteessä 90 %.

### 7.5 Kuituominaisuudet

Kuva 6 on otettu havainnollistamaan silmämääräisesti jo havaittua poikkeavaa Massa B:n koostumusta. Kuvassa näkyy flokkinen, tikkumainen ja suuripartikkelinen koostumus. Kuva 7 on otettu samasta syystä, siinä havaitaan hyvin, miten arkkien tekeminen ei onnistunut Massa B:llä 100 %. Massa X ja Massa B oli taas tehty homogeenisestä ja laadullisesti tasaisesta massasta.



KUVA 6. Massa B:n mikroskooppikuva 20x.



KUVA 7. 100 % arkki B.

## 8 YHTEENVETO

Selluloosa on puun tärkein kemiallinen ainesosa kuitumateriaalina. Selluloosa kestää hyvin alkalisia ja happamia olosuhteita, johtuen sen kiteisestä olomuodosta. Silti selluloosaa pilkkoutuu keiton ja valkaisun aikana. Selluloosaketjujen katkeaminen heikentää yksittäisten kuitujen lujuuksia, joka taas heikentää paperin lujuutta.

Hemiselluloosat muodostavat keskenään sidoksia ja antavat paperin kuituverkostolle huomattavasti lujuutta. Absoluuttinen hemiselluloosapitoisuus ei riitä silti pelkästään selittämään paperin teknisiä ominaisuuksia, vaan hemiselluloosien keskeisillä suhteilla ja ligniinipitoisuustasolla on myös merkitystä. Hemiselluloosat edistävät fibrilloitumista ja jauhautuvuutta. Ne lisäävät kuidun ulkoista pintaa ja paikallista mukautumiskykyä. Hemiselluloosat eivät kestä keiton kemiallisia olosuhteita, johtuen niiden amorfisesta olotilasta sekä polymeroitumisasteesta.

Ligniini sitoo puun kuidut toisiinsa. Ligniini on hydrofobinen aine, jonka takia se ei muodosta hyvin keskenään sidoksia. Ligniinin kuitu on jäykkä ja sen sitoutumiskyky sekä jauhautuvuus on heikko. Lisäksi ligniinisen kuidun paperitekniset ominaisuudet ovat huonoja. Ligniinin liukeneminen tekee kuidut joustavimmiksi ja vaikuttaa sitoutumiskykyyn positiivisesti, mutta ligniinin liukeneminen ei juurikaan vaikuta kuitujen vetolujuuteen tai keskimääräiseen kuitupituuteen. Ligniinin merkitys on vähäisempi sellaisissa massoissa, joissa sen ohella on runsaasti hemiselluloosaa tai ligniini on sulfonoituneessa muodossa.

Uuteaineet kattavat laajan kirjon erilaisia ainesosia. Massaan jääneiden uuteaineiden vaikutus on yleisesti ottaen haitallinen massan käytettävyyteen. Lisäksi uuteaineiden talteenotolla pystytään lisäämään taloudellista hyötyä. Esimerkiksi arvokkaiden sivuvirtojen kuten tärpätti- mänty-, ja koivuöljyn talteenotto.

Puulajit sekä non-wood kuidut sisältävät samoja ainesosia, mutta eri määrissä. Mänty ja kuusi eivät poikkea kemiallisen koostumuksensa perusteella juurikaan

toisistaan. Havupuut ja lehtipuut taas eroavat toisistaan hemiselluloosa- ja ligniinipitoisuuksien osalta. Lehtipuiden sisäiset erot ovat suurempia kuin havupuiden keskeiset koostumukset. Eukalyptuksella ja akaasiolla selluloosapitoisuus on korkea, kun taas hemiselluloosan pitoisuus on alhainen. Koivulla tilanne on taas päinvastainen. Koivu sisältää vähemmän ligniiniä kuin muu lehtipuut. Non-wood kuiduilla ligniinipitoisuus ja selluloosapitoisuus on alhainen, kun taas hemiselluloosapitoisuus korkea. Sahanpuru koostuu samoista ainesosista kuin muukin puuaines. Uusiomassa on melkein kaikkea, mikä on ollut aikaisemmin kartonkia tai paperia ja niiden kemiallinen koostumus riippuu käytetystä raaka-aineesta ja sen valmistusmenetelmästä.

Kuidut ovat karkeasti ottaen onttoja sylinterejä, joiden päät ovat enemmän tai vähemmän suippenevia. Havupuiden kuidut ovat lehtipuiden kuituja paljon pidempiä. Havupuiden kuitupituus on noin 3–4 mm kun taas lehtipuiden kuidut ovat pituudeltaan n. 1 mm. Sahanpurukuidut ovat huomattavasti lyhyempiä, jolloin lujuudetkin ovat heikompia. Non-wood kuidut vaihtelevat suuresti kuitupituuksiltaan riippuen käytetystä raaka-aineesta (Kuvio 3). Uusiomassan kuidut taas ovat rakenteellisesti muuttuneet ja lujuusominaisuudet ovat heikohkoja.

Kun puhutaan kuitujen lujuudesta, sillä tarkoitetaan yleensä yksittäisen kuidun pituussuuntaista vetolujuutta. Kuitujen lujuuteen vaikuttavat sen kemiallinen koostumus, kevät- ja kesäpuun suhde, fibrillikulma, selluloosan järjestäytymistila ja hiilihydraattien polymeroitumisaste. Kun kuidut ovat hyvin sitoutuneet, kuitujen lujuus määrittää jopa paperin lujuuden. Kuitupituuden kasvaessa, vetolujuus, puhkaisulujuus, repäisylujuus ja taittolujuus kasvavat (Taulukko 3). Kuitujen lujuuteen vaikuttavat taas heikentävästi kuidun vauriot ja epäjatkuuskohdat. Pidemmät kuidut muodostavat tiukemman kuituverkoston, sillä ne pystyvät muodostamaan enemmän sidoksia kuin lyhyet kuidut.

Kuitenkin pelkästään kuitupituus ei vaikuta esimerkiksi paperin repäisylujuuteen, vaan esimerkiksi märkäpuristus kasvattaa repäisylujuutta samankaltaisesti kuin jauhatuksessa, kuitenkin kuidun pituutta ja lujuutta muuttamatta. Esimerkiksi sulfaattimassassa, kuidun pituus ja jäykkyys korreloivat hyvin, jonka takia monia ilmiöitä on esitetty virheellisesti yksinomaan kuidun pituudella.

Sitoutumiskyky eli kuitupintojen kyky muodostaa keskenään vetysidoksia. Sitoutumiskyvyn kasvaessa, vetolujuus, puhkaisulujuus, repäisylujuus, kun sitoutumisaste on pieni kasvavat. Sitoutumiskykyä voidaan parantaa jauhatuksella. Jos paperissa ei ole tarpeeksi sidoksia, sen lujuudet ovat riittämättömiä ja rakenne huokoista sekä karheaa.

Jauhatuksessa kuidut notkistuvat, aukeavat sekä turpoavat, jolloin niiden sitoutumispinta-ala laajenee. Jauhatuksessa tietyt ominaisuudet heikkenevät, kun taas toiset paranevat. Jauhatus parantaa vetojäykkyyttä, vetolujuutta, formaatiota, suotautumisvastusta ja tiheys kasvaa. Vetolujuus ja repäisylujuus kasvavat tiettyyn pisteeseen asti, kunnes ne alkavat heikkenemään. Toisaalta jauhatus pienentää muun muassa paperin bulkkia, opasiteettia, ilmanläpäisevyyttä sekä huokoisuutta. Kemiallisen massan jauhatus huonontaa valonsirontaa, vaaleutta ja opasiteettia. Jauhatus on aina kompromissi ja riippuu pääsääntöisesti lopputuotteen vaatimuksista. Valkaisematonta massaa on jauhettava enemmän kuin valkaistua massaa ja mekaaninen massa vaatii vähemmän jauhatusta kuin kemiallisesti valmistettu massa

Kemiallisen massanvalmistuksen päätavoite on erottaa ligniini, jotta puun kuidut vapautuvat. Kuitenkin niin että selluloosan polymerisaatioaste pysyy korkeana. Se kuinka paljon eri komponentteja liukenee, riippuu siitä, mitä menetelmää käytetään, kuinka pitkälle keitto on viety ja kuinka vaaleaksi massa on valkaistu. Kemiallisen massan päämenetelmät voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, joita ovat: sulfaatti- ja sulfiittimenetelmä. Näistä sulfaattimenetelmä on hallitseva muoto ja vuonna 2000 tuotannosta 89 % valmisteettiin sillä ja vain 5,7 % sulfiittimenetelmällä.

Sulfaattimenetelmän tuottamat hyvät massan lujuusominaisuudet, sen sopivuus kaikille kuituraaka-aineille, lehtipuiden korkean saannon, ympäristöystävällisyyden (vrt. hapan sulfaattiketto) sekä keittokemikaalien uudelleenkierrätyksen takia siitä on tullut pääkeittomenetelmä. Sulfaattikeitossa tapahtuu myös epätoivottua hemiselluloosan ja selluloosan liukenemistä. Huonoina puolina voidaan todeta havupuumassan alhainen saanto, vaikeampi valkaistavuus ja hajurik-kiyhdisteet. Sulfaattimassalla kuidun pituus ja jäykkyys korreloivat hyvin.

Happamassa sulfiittimenelmässä hyviä puolia ovat sen korkeampi saanto samassa kappaluvussa ja massa on valkoisempaa. Hapan hydrolyysi vaikuttaa suuresti lyhytketjuiseen hemiselluloosaan, mutta selluloosaan pilkkoutuminen ei juurikaan johda merkittäviin saantohäviöihin. Sulfiittisellun lujuudet ovat yleensä heikompia, joista suurin ongelma on huomattavan alhainen repäisyjuuus. Happamassa keitossa sulfiittikuitu turpoaa enemmän, jolloin kuituseinämä repelee ja tekee kuidun heikommaksi kuin sulfaattimenetelmässä. Happamalla menetelmällä valmistettu valkaistu kuitu katkeilee helpommin kuin valkaistu sulfaattikuitu. Happaman sulfiittikeiton laadulliset puutteet ovat huomattavia, mutta puutteita voidaan huomattavasti vähentää siirtymällä modifioituihin sulfiittikeittoihin. Vaikka pelkästään hapan sulfiittikeitto on ominaisuuksiltaan riittämätöntä, niin hyvinä puolina todettakoon, että sulfiittikeiton suurimpia etuja ovat sen joustavuus. Monivaiheisella sulfiittikeitolla voidaan valmistaa tuotteita laajemmassa laatuskaalassa kuin sulfaattikeitolla. Happamien massojen polymeroitumisaste on usein korkeampi kuin alkalisten massojen, josta seuraa massan laadun huononemista. Happamalla sulfiittimassalla, kuidun pituus ja jäykkyys ei korreloidu hyvin.

Tuloksista nähdään Massa A:ta lisättäessä neliömassan, paksuuden, bulkin ja ilmanläpäisevyyden kasvavan. Jauhettu massa asettuu tiiviimmin arkille ja sen huokosten määrää pienenee. Jauhetun massan neliömassa, paksuus, huokoisuus ja bulkki pienenee sekä arkin rakenne on tasaisempaa. Eli kun lisätään jauhamatonta massaa, pitäisi paksuuden, neliömassan, bulkin ja ilmanläpäisevyyden kasvaa ja näin tapahtuukin. Massa B:tä lisättäessä taas neliömassa pienenee, mutta paksuus, bulkki ja ilmanläpäisevyys kasvaa. Neliömassan laskua voidaan selittää hienoaineen karkaamisella viiraosalla. Tikkumainen sekä flokkimainen jauhamaton rakenne selittää paksuuden, bulkin ja ilmanläpäisevyyden kasvua. Yleiset ominaisuudet eivät muutu niin paljoa 20 % asti, paitsi Massa B:n neliömassa. Kuitujen pituudellakaan ei tuloksien perusteella ole juurikaan väliä huokoisuuteen, vaikka lyhyemmän kuidun pitäisi sitoutua paremmin kuin pitkäkuituisen, mutta jauhamaton kuitu ei silti sitoudu riittävän hyvin, jotta tällä olisi suurempia vaikutuksia.

Molemmat Massa A ja B ovat huomattavasti heikompia lujuusominaisuuksiltaan kuin Massa X. Lujuusominaisuudet heikkenevät maltillisesti 20 % asti, mutta heikkenevät sen jälkeen reilusti. Massa A on lujuusominaisuuksiltaan parempaa kuin Massa B ja tätä voidaan selittää Massa A:n pitkillä kuiduilla. Lujuusominaisuudet kasvavat, kun käytetään pitkiä kuituja ja lisäksi yksittäisen kuidun lujuus kasvattaa lujuusominaisuuksia. Jauhettu massa on enemmän sitoutunutta, jolloin sen lujuusominaisuudetkin ovat parempia sidoksien kautta. Vaikka korkea neliömassa ja bulkki korreloivat korkean repäisylujuuden kanssa, on jauhamaton kuitu liian sitoutumatonta, jotta tämä näkyisi tuloksissa. Kuten venymän tuloksista huomataan, on Massa B niin sitoutumatonta, että se ei kestä juurikaan venytystä vaan katkeaa melkein heti. Paperin kerrosten sitoutuminen hyvin vaikuttaa positiivisesti Z-suuntaiseen lujuuteen, mittauksia ei voitu suorittaa kuin yhden Z-lujuudella, joten tulokset ovat suuntaa antavia. Mutta kuten nähdään ne mukailevat hyvin vetolujuutta ja repäisylujuutta.

Vaikka kaikki massat olivat hyvin karheita, oli Massa A melkein yhtä "sileää" kuin jauhettu Massa X. Jauhatuksessa syntyvä hienoaine ja kuitujen sitoutuminen parantaa pintaominaisuuksia, jolloin jauhatus laskee karheutta. Massa A:n karheus lisääntyi loppua kohden. Massa B:n karheus taas nousi rajusti ja mitaaminen oli 40 % jälkeen mahdotonta. Tikkumainen, flokkaantunut ja suuri partikkelinen rakenne selittää hyvin tämän ilmiön. Pinnan tasaisuuden kasvaessa eli sileyden kasvaessa esimerkiksi ilmanläpäisy eli huokoisuus pienenee.

Massa B oli huomattavasti muita massoja parempaa opasiteetin osalta. Massa A ja Massa B:n opasiteetti oli parempaa kaikissa mittauspisteissä verrattaessa Massa X:ään. Tulos selittyi korkeammasta bulkista ja paksuudesta. Alhaisempi opasiteetti taas Massa X:llä ja Massa B:llä selittyy sen sisältämästä täysvalkaistusta sellusta, joka siis huonontaa opasiteettia. Massa X:llä jauhatus heikentää myös opasiteettia.

Kokeellisen osien tulokset eivät Massa B:n osalta ole täysin vertailukelpoisia, jos mietitään esimerkiksi pitkien kuitujen ja lyhyiden kuitujen vertailua. Massa B sisälsi paljon tikkumaista materiaalia (Kuva 6), jota ei saatu poistettua, johtuen saannon liiallisesta heikkenemisestä. Tätä olisi voitu parantaa paremmalla lajitelumenetelmällä, pienemmällä sihtikoolla ja enemmän määrällä käytettävissä

olevaa massaa. Massa B sisälsi myös paljon flokkaantuneita kuituja. Massa X ja Massa A olivat taas hyvin homogeenisia ja laadullisesti tasaisia. Lisäksi 100 % Massa B:n arkkien valmistuminen ei onnistunut (KUVA 7). Kuitujen sitoutumiskyky oli liian heikko. Tulokset ovat kuitenkin suuntaa antavia. Tuloksien perusteella 10–20 % seosmassan lisäyksellä jauhettuun massaan ei ollut niin paljon vaikutusta ominaisuuksiin yleisesti, kuin taas esimerkiksi 40–90 % lisäys oli huomattavasti radikaalimpi.

Seuraavana vaiheena voisi olla Massa B:n homogeenisuuden parantaminen, lajittelun parantaminen ja mahdollisesti tutkia jauhatuksen vaikutuksia tutkittujen massojen paperitekniisiin ominaisuuksiin.

## LÄHTEET

Alén, R. 2000. Forest Products Chemistry, Structure, and chemical composition of wood. Helsinki. Fapet Oy.

Belgacin Mohammed & Pizzi Antonio 2016. Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook. Beverly. Scruveber Publishing.

CEPI 2018, European pulp & paper industry. Luettu 20.10.2021  
<https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/10/Final-Key-Statistics-2018.pdf>  
Cepi maiden tuotanto ja kulutus

Hägglom-Ahnger Ulla ja Komulainen Pekka, 2006. Paperin ja kartongin valmistus. 5. Painos.

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

KnowPap, versio 22.0. 2021a. Kuitujen kemiallinen rakenne. Luettu 10.11.2021  
Knowpap. Kuitujen kemiallinen rakenne.  
[http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/4\\_fiber\\_chem\\_structure/frame.htm](http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/4_fiber_chem_structure/frame.htm)

KnowPap versio 21.0. 2021b. Kuitudimensiot. Luettu 11.10.2021  
[http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/1\\_trees/dimensioiden\\_vertailu.gif](http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/1_trees/dimensioiden_vertailu.gif)

KnowPap versio 21.0. 2021c. Uusiomassa ja muut kuituraaka-aineet. Luettu 12.10.2021  
[http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/1\\_trees/dimensioiden\\_vertailu.gif](http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/1_trees/dimensioiden_vertailu.gif)

Knowpap versio 21.0. 2021d. Paperin ja kartongin ominaisuudet.  
[http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/paper\\_grades/quality.htm](http://www.knowpap.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/paper_grades/quality.htm)

Knowpulp versio 19.0. 2021a. Kuidun kemiallinen koostumus. Luettu 11.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/4\\_fiber\\_chem\\_structure/kuidun\\_kemkoost.gif](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/4_fiber_chem_structure/kuidun_kemkoost.gif)

Knowpulp versio 19.0. 2021b, Kuidun ominaisuudet. Luettu 11.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp\\_grades/4\\_quality/1\\_fibers/fiber\\_properties/frame.htm](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp_grades/4_quality/1_fibers/fiber_properties/frame.htm)

KnowPulp versio 19.0. 2021c, Keitossa tapahtuvat reaktiot. Luettu 11.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1\\_process/5\\_reactions/frame.htm?zoom\\_highlightsub=hemiselluloosa](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1_process/5_reactions/frame.htm?zoom_highlightsub=hemiselluloosa)

KnowPulp versio 19.0. 2021d. Kuituraaka-aineet. Luettu 11.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/1\\_trees/frame.htm](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/1_trees/frame.htm)

KnowPulp versio 19.0. 2021e. Non-wood sellu. Luettu 12.10.2021

[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp\\_grades/1\\_pulps/1\\_bleached\\_pulps/3\\_non-wood\\_pulp/frame.htm](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp_grades/1_pulps/1_bleached_pulps/3_non-wood_pulp/frame.htm)

KnowPulp versio 19.0, 2021f. nonwood morfologia. Luettu 12.11.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp\\_grades/1\\_pulps/1\\_bleached\\_pulps/3\\_non-wood\\_pulp/nonwood\\_morfologia.gif](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp_grades/1_pulps/1_bleached_pulps/3_non-wood_pulp/nonwood_morfologia.gif)

KnowPulp versio 19.0. 2021g. Kuitujen väliset sidokset. Luettu 12.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/5\\_bonding/kuitujen\\_valiset\\_sidokset\\_photo.jpg](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/5_bonding/kuitujen_valiset_sidokset_photo.jpg)

KnowPulp versio 19.0. 2021h. Sulfaattisellun valmistus. Luettu 20.10.2021  
<http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/kps/ui/process/general/ui.htm>

KnowPulp versio 19.0. 2021i. Eri massalajien tuotanto globaalisti. Luettu 20.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw\\_materials/1\\_fibers/1\\_trees/pulpprodu.gif](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/raw_materials/1_fibers/1_trees/pulpprodu.gif)

KnowPulp versio 19.0. 2021j. Sellun keiton periaate. Luettu 20.10.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1\\_process/1\\_principle/frame.htm](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1_process/1_principle/frame.htm)

KnowPulp versio 19.0. 2021k. Liukosellu. Luettu 1.11.2021  
([http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp\\_grades/1\\_pulps/1\\_bleached\\_pulps/4\\_dissolved\\_pulp/frame.htm](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulp_grades/1_pulps/1_bleached_pulps/4_dissolved_pulp/frame.htm))

KnowPulp versio 19.0. 2021l. Esimerkki kappaluvun vaikutuksesta massan reäisylujuuteen.

KnowPulp versio 19.0. 2021m. Sulfiittikeitto. Luettu 10.11.2021  
[http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1\\_process/7\\_other\\_methods/frame.htm?zoom\\_highlightsub=sulfiitti.\)](http://www.knowpulp.com.libproxy.tuni.fi/extranet/suomi/pulping/cooking/1_process/7_other_methods/frame.htm?zoom_highlightsub=sulfiitti.))

Korpinen, R. 2010. On the potential utilization of sawdust and wood chip screenings. Laboratory of fiber and cellulose technology. Department of chemical engineering. Åbo Academy university. 84 s. ISBN 978-952-12-2417-1

Sixta Herbert, 2006. Handbook of Pulp. Volume 1,2. Weinham. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Virtanen, Mika. Prosessivesien kovuuden vaikutus paperin ominaisuuksiin. Luettu 20.10.2021  
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9414/Virtanen.Mika.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Virkola Nils-Erik 1983. Puumassan valmistus. Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja II. 2. painos.

## LIITTEET

## Liite 1. Mittauspöytäkirja

Massa X		Massa A					Massa B							
	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Neliomassa (g/m <sup>2</sup> )	65,57	65,57	65,10	64,43	65,68	66,49	66,20	65,61	65,57	64,36	68,10	62,93	57,31	54,81
Neliomassa (Δ%)	1,79	1,79	2,30	4,71	3,28	2,36	0,83	1,85	1,79	1,40	1,42	1,44	1,77	2,23
Paksuus (µm)	112,60	112,60	115,80	119,40	121,40	124,00	135,20		112,60	114,40	130,00	134,40	154,00	147,00
Paksuus (Δ%)	0,36	0,36	0,62	0,69	1,01	0,55	0,81	0,59	0,36	2,20	2,15	2,83	4,30	4,08
Bulkki (cm <sup>3</sup> /g)	1,72	1,72	1,75	1,80	1,82	1,83	1,87	2,06	1,72	1,78	1,91	2,14	2,06	2,69
Ilmanläpäisevyys yp (ml/min)	1446,00	1446,00	1491,00	1781,00	4769,00	x	x	x	1446,00	1484,00	1636,00	4664,00	x	x
Ilmanläpäisevyys yp (Δ%)	16,07	16,07	18,47	18,99	15,57	x	x	x	16,07	17,18	19,32	9,17	x	x
Ilmanläpäisevyys ap (ml/min)	1370,00	1370,00	1672,50	1975,00	3872,00	x	x	x	1370,00	1455,00	1659,00	3525,00	x	x
Ilmanläpäisevyys ap (Δ%)	16,55	16,55	22,77	22,29	12,43	x	x	x	16,55	16,77	22,95	9,55	x	x
Massa X		Massa A					Massa B							
	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Vetolujuus (kN/m)	4,68	4,68	4,41	4,16	3,41	2,66	2,26	1,74	4,68	4,21	4,00	2,65	1,35	0,75
Vetolujuus (Δ%)	4,10	4,10	4,99	6,15	5,99	3,92	4,21	4,73	4,10	3,54	4,89	2,43	6,40	6,38
Venymä (%)	4,14	4,14	4,07	4,09	4,04	3,62	2,76	2,35	4,14	3,81	3,35	3,32	2,22	0,85
Venymä (Δ%)	6,71	6,71	6,12	7,14	2,14	6,05	3,92	8,57	6,71	5,84	7,06	7,4	11,6	17,1
Repäisyjujuus (mN)	1705,00	1705,00	1053,00	1021,00	993,00	946,00	920,00	830,00	1705,00	973,00	941,00	699,00	387,00	177,00
Repäisyjujuus (Δ%)	87,00	87,00	82,00	80,00	54,00	96,00	68,00	71,00	87,00	34,00	51,00	44,00	59,00	20,00
Z-lujuus (kPa)	617,35	617,35	602,35	551,70	484,80	398,45	323,60	242,85	617,35	599,70	518,50	406,10	261,00	229,70
Vetolujuusindeksi (Nm/g)	71,37	71,37	67,74	64,57	51,92	40,18	33,99	26,52	71,37	65,41	58,74	42,11	23,56	13,59
Repäisyjujuusindeksi (mN)	16,85	16,85	16,18	15,95	15,12	14,29	13,84	12,65	16,85	15,12	13,82	11,11	6,75	3,23
Massa X		Massa A					Massa B							
	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Karheus yp (ml/min)	1515,00	1515,00	1886,50	2272,00	1641,00	#####	#####	#####	1515,00	3187,00	3731,00	5041,00	x	x
Karheus yp (Δ%)	4,00	4,00	7,40	14,50	3,60	8,70	16,60	6,70	4,00	23,10	20,30	17,10	x	x
Karheus ap (ml/min)	1802,00	1802,00	2048,50	2311,00	1830,00	#####	#####	#####	1802,00	3161,00	3623,00	4474,00	x	x
Karheus ap (Δ%)	14,50	14,50	8,50	13,60	10,00	6,60	15,70	7,30	14,50	22,20	25,10	14,20	x	x
Massa X		Massa A					Massa B							
	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %	100 %	0 %	10 %	20 %	40 %	70 %	90 %
Opasiteetti (%)	71,97	71,97	72,54	73,15	77,13	77,43	80,07	80,94	71,97	88,96	94,75	97,22	96,43	96,95
Opasiteetti (Δ%)	0,29	0,29	0,38	1,29	0,75	2,52	2,58	0,38	0,29	0,24	1,46	0,88	0,48	2,48