



Puristuslujuuden mittaus- laitteen käyttöönotto

Puristuslujuuslaitteen tarkkuus ja toistettavuus

Maksim Nikolaev

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Biotuote- ja prosessitekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuote- ja prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

NIKOLAEV, MAKSIM:
Puristuslujuuden mittausslaitteen käyttöönotto
Puristuslujuuslaitteen tarkkuus ja toistettavuus

Opinnäytetyö 71 sivua, joista liitteitä 12 sivua
Toukokuu 2023

Opinnäytetyössä tutkittiin Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 -puristuslujuusmittarin sisäistä ja ulkoista tarkkuutta. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää laitteen käytettävyys Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratorion tarpeiden näkökulmasta. Tavoitteena oli tuottaa johtopäätöksiä laitteen käyttökelpoisuudesta ja mahdollisista käyttökohteista. Tätä varten laitteen tarkkuus ja toistettavuus selvitettiin kokeellisen tutkimuksen avulla.

Tutkimuksessa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tarkkuutta ja toistettavuutta verrattiin uudempaan ja tarkempaan ZwickRoell Z020 -vetolujuuslaitteeseen, jolla voidaan mitata hyvin tarkasti myös puristavia voimia. Laitteilla suoritetaan reuna- ja tasolitistyslujuuden mittaukset sekä laatikon puristuslujuustestit. Tulosten tarkkuuden ja toistettavuuden vertailun pohjalta saavutettiin johtopäätös Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n käyttökelpoisuudesta.

Reunalitistyslujuus mitattiin yksi- ja kaksiaaltoisista aaltopahveista, ja tasolitistyslujuus yksiaaltoisesta aaltopahvista. Laatikon puristuslujuus mitattiin taivekartonkilaatikoista.

Kokeellisessa tutkimuksessa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tarkkuus todettiin tulosten oikeellisuuden osalta hieman huonommaksi ja toistotarkkuuden osalta merkittävästi huonommaksi verrattuna ZwickRoell Z020:een. Poikkeuksena oli laatikon puristuslujuus, jossa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n toistotarkkuus oli paremmalla tasolla, oikeellisuuden ollessa kuitenkin samaa tasoa ZwickRoell Z020:n kanssa.

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 paljastui kokeiden aikana helppokäyttöiseksi. Sen tulosten oikeellisuus oli verrattain hyvällä tasolla, mikä osoittaa sen kelpaavan myös muihin testeihin, mikäli tutkimus ei edellytä laitteelta parempaa toistotarkkuutta tai äärimmäistä oikeellisuutta.

Asiasanat: aaltopahvi, puristuslujuus, tarkkuus, toistettavuus

ABSTRACT

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

NIKOLAEV, MAKSIM:
Commissioning of Compressive Strength Tester
Accuracy and Repeatability of Compressive Strength Tester

Bachelor's thesis 71 pages, appendices 12 pages
May 2023

The purpose of this thesis was to examine the internal and external accuracy of the Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048. The aim of the study was to examine the compressive strength tester's usability for the purposes of the paper laboratory of Tampere University of Applied Sciences. Therefore, the compressive strength tester's accuracy and repeatability were investigated via experimental study.

The accuracy and repeatability of results obtained with the Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 were compared to the newer ZwickRoell Z020 tensile strength tester which, in addition to measuring tensile strength, can measure compressive forces with high accuracy and precision. An edge crush test, flat crush test and box compression test were conducted with both testing instruments. The accuracy and repeatability of results were compared between measuring devices, and a conclusion about the usefulness of the Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 was achieved.

During the experimental study, the overall accuracy of the Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 was found to be worse compared to the ZwickRoell Z020. The results were slightly lower in accuracy, and significantly lower in repeatability.

Throughout the study, the Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 proved to be easy to use and it had relatively good trueness of results, which indicates that it is usable for other studies unless better precision or extreme accuracy are required.

Key words: corrugated cardboard, compressive strength, accuracy, repeatability

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	AALTOPAHVI	9
2.1	Aaltopahvi materiaalina.....	9
2.2	Aaltopahvin raaka-aineet	10
2.2.1	Aallotuskartonki.....	10
2.2.2	Pintakartonki.....	11
2.2.3	Liima.....	12
2.3	Aaltopahvin valmistus	13
2.4	Aaltopahvin jalostus pahvilaatikoksi.....	13
2.4.1	Slitsilaatikko painoavauskoneella.....	14
2.4.2	Stanssilaatikko stanssauskoneella.....	14
2.4.3	Painatus	15
2.4.4	Liittäminen.....	15
3	PURISTUSLUJUUS.....	16
3.1	Teoria.....	16
3.2	Puristuslujuuteen vaikuttavat ominaisuudet.....	17
3.2.1	Kosteus	17
3.2.2	Paksuus.....	18
3.2.3	Neliömassa.....	18
3.2.4	Taivutusjäykkyys	19
3.2.5	Tiheys.....	19
3.3	Raaka-aineiden vaikutus puristuslujuuteen	20
3.3.1	Massa.....	20
3.3.2	Liima.....	20
4	TARKKUUS JA TOISTETTAVUUS	22
4.1	Teoria.....	22
4.2	Tarkkuuteen ja toistettavuuteen vaikuttavat asiat.....	23
4.2.1	Mittalaite	23
4.2.2	Mittausolosuhteet	23
4.3	Mittalaitteen käyttäjä	24
5	LAITTEISTO	25
5.1	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	25
5.2	ZwickRoell Z020	26
6	PURISTUSLUJUUDEN TESTAUS.....	28
6.1	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	28
6.2	ZwickRoell Z020	30

6.3 Suoritus.....	31
6.4 Puristuslujuustestit	32
6.4.1 Aaltopahvin reunalitistyslujuustesti ECT	32
6.4.2 Aaltopahvin tasolitistyslujuustesti FCT	33
6.4.3 Laatikon puristuslujuustesti BCT	35
7 LASKUT	37
7.1 ECT yksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre).....	37
7.2 ECT yksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell)	40
7.3 ECT kaksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre).....	40
7.4 ECT kaksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell)	41
7.5 FCT yksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre).....	42
7.6 FCT yksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell).....	44
7.7 BCT kartonkikotelosta (Lorentzen & Wettre)	45
7.8 BCT kartonkikotelosta (ZwickRoell).....	46
8 TULOKSET	48
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	53
10 MITTAUSVIRHEIDEN SYYT JA VIRHEARVIOINTI.....	54
10.1 Satunnainen virhe.....	54
10.2 Systemaattinen virhe	54
10.3 Karkea virhe	54
10.4 Näytteen valmistelu	55
10.5 Ympäristön virhe.....	56
11 POHDINTA	57
LÄHTEET	58
LIITTEET.....	60
Liite 1. Mittauspöytäkirja (ECT).....	60
Liite 2. Mittauspöytäkirja (ECT).....	61
Liite 3. Mittauspöytäkirja (FCT).....	62
Liite 4. Mittauspöytäkirja (BCT).....	63
Liite 5. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)	64
Liite 6. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)	65
Liite 7. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)	66
Liite 8. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)	67
Liite 9. FCT testitulokset (ZwickRoell Z020)	68
Liite 10. FCT testitulokset (ZwickRoell Z020)	69
Liite 11. BCT testitulokset (ZwickRoell Z020)	70
Liite 12. BCT testitulokset (ZwickRoell Z020)	71

ERITYISSANASTO

Aaltopahvi	Kartongista valmistettu pakkaustuote.
BCT	Laatikon puristuslujuustesti.
CCT	Aallotuskartongin reunalitistyslujuustesti.
CMT	Aallotuskartongin tasolitistyslujuustesti, myös <i>aallotuskartongin litistyslujuustesti</i> .
ECT	Aaltopahvin reunalitistyslujuustesti.
Ensiökuitu	Kuituja, jotka eivät ole olleet kierrossa.
FCT	Aaltopahvin tasolitistyslujuustesti, myös <i>aaltopahvin litistyslujuustesti</i> .
Fluting	Ensiökuituinen aallotuskartonki, joka on valmistettu puolikemiallisesta lehtipuumassasta.
Jännitys-venymäkäyrä	Materiaaliin kohdistetun jännityksen aiheuttama venymä graafisesti ilmaistuna.
Kartonki	Neliömassaltaan 125 g/m ² – 600 g/m ² painava monikerroksinen paperituote.
Kraflaineri	Aaltopahvissa pintakerroksena käytettävä pääosin ensiökuidusta valmistettu pintakartonki.
Laineri	Pintakartonki, joka pitää aaltopahvin aallotuskartonkia kasassa.
Neliömassa	Paperin, kartongin tai aaltopahvin paino neliömetriä kohden.
Nurjahdus	Tapahtuma, jossa kappale taittuu puristavan voiman alla.
Nuuttaus	Tapahtuma, jossa aaltopahviin tai kartonkiin painetaan nuuttausterällä ura, eli nuutti, joka mahdollistaa taittamisen.
OCC	Aaltopahvijäte, lyhenne tulee sanoista <i>old corrugated container</i> .
Oikeellisuus	Ulkoinen tarkkuus eli tulosten yhdenmukaisuus oikeaksi tiedetyn arvon kanssa.
PAT	Aaltopahvin liimasauman lujuustesti.
RCT	Pintakartongin rengaslitistyslujuustesti.

Tarkkuus	Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus.
Testlaineri	Osittain tai kokonaan uusiokuiduista valmistettu aaltopahvin väli- tai pintakerroksissa käytettävä pintakartonki.
Toistettavuus	Mittausten keskihajonnasta johdettu suure, jolla arvioidaan samoissa mittausolosuhteissa suoritettujen tutkimusten välistä vertailukelpoisuutta.
Toistotarkkuus	Sisäinen tarkkuus eli mittausten keskihajonta.
Uusiokuitu	Kuituja, jotka ovat olleet kierrossa ja jotka ovat peräisin esimerkiksi aaltopahvijätteestä.
Vakio-olosuhteet	Tutkimusta varten määrätyt tutkimusympäristön olosuhteet, joiden käyttäminen mahdollistaa vertailukelpoisten tutkimustulosten saamisen eri tutkimusten välillä.

1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratorion varastotiloissa oli käytöstä poistettu Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 -puristuslujuuden mittauslaite. Ohjaavan opettajan kanssa tuli puheeksi, olisiko kyseisessä laitteessa vielä käyttöikä jäljellä. Tämän selvittämisestä saatiin tehtyä aihe-ehdotus, joka hyväksyttiin aiheeksi opinnäytetyölle.

Opinnäytetyössä tarkoituksena on arvioida Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 -puristuslujuustesterin käyttökelpoisuutta TAMKin paperilaboratorion käyttö-tarkoituksiin, tekemällä sillä puristuslujuuden mittauksia ja vertailemalla tuloksia ZwickRoell Z020:lla tehtyihin vastaaviin mittauksiin.

ZwickRoell Z020 on vetolujuustesteri, jolla voidaan kuitenkin mitata hyvin tarkasti myös puristavia voimia. ZwickRoell Z020:lla voidaan mitata lisäksi venymää ja puristumaa, riippuen kappaleeseen kohdistetun voiman suunnasta.

Puristuslujuuden tuloksia vertailemalla voidaan arvioida Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 -puristuslujuusmittarin tarkkuutta. Puristuslujuuksille laske-taan myös keskihajonnat. Keskihajonnasta lasketaan Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tuloksille toistettavuus, jota vertaillaan ZwickRoell Z020:n ja standardien ilmoittamien odotettavissa olevien toistettavuuksien kanssa.

Opinnäytetyön alussa kerrotaan pohjustavaa tietoa aaltopahvin rakenteesta, val-mistuksesta ja jalostamisesta. Tämän jälkeen tutkitaan puristuslujuuteen sekä mittaustekniikkaan liittyvien käsitteiden teoriaa.

Työn kokeellisessa osuudessa on esitelty laitteisto ja kuvailtu puristuslujuuden mittaamista ja mittauksien kulkua. Kokeellisen osion jälkeen on esitelty laskut ja suoritettu virhearviointi. Lopuksi esitetään tulokset ja niihin perustuvat johtopää-tökset.

2 AALTOPAHVI

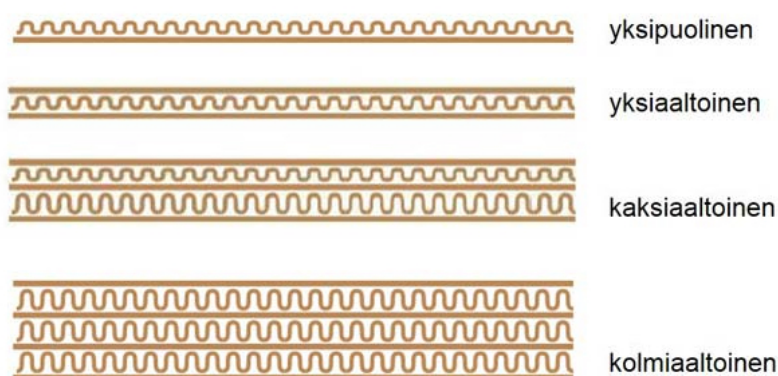
2.1 Aaltopahvi materiaalina

Aaltopahvi on maailman eniten käytetty pakkausmateriaali. Aaltopahvin etuja pakkausmateriaalina on sen kierrätettävyys, edullisuus ja hyvä kyky suojella siihen pakattua sisältöä. Pakkauksen sisällön suojelu edellyttää aaltopahvilta hyvää puhkaisu-, taitto- ja puristuslujuutta. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 134 & 150)

Aaltopahvi koostuu yksinkertaisimmillaan aallotuskartonkiin liimatusta pintakartongista. Tällaista rakennetta kutsutaan yksipuoliseksi aaltopahviksi.

Yksiaaltoinen aaltopahvi taas on aaltopahvi, jossa aallotuskartongin kummallakin puolella on laineri. Tällainen rakenne on vastaa yleistä mielikuvaa aaltopahvin rakenteesta.

Edellä mainitun kaltaisia aallotuskartongin ja pintakartongin sisältäviä kerroksia voi olla useita, jolloin puhutaan kaksi- ja kolmiaaltoisista aaltopahveista. Näitä aaltopahveja voidaan nimittää moniaaltoisiksi aaltopahveiksi. Kuviossa 1 esitellään yleisimmät aaltopahvirakenteet. (KnowPap, 2022)



KUVIO 1. Yleisimmät aaltopahvit (KnowPap 2023, muokattu).

Aaltopahvin tärkeimpiä mitattavissa olevia ominaisuuksia on sen puristuslujuus. Puristuslujuus vaikuttaa valmiin tuotteen eli pahvilaatikon pinoamiskestävyyteen

ja pahvilaatikon kykyyn suojella pakkauksen sisältöä. Puristuslujuutta voidaan mitata aaltopahvista sekä aaltopahvista valmistetusta laatikosta.

Puristuslujuutta voidaan mitata lukuisin eri testein, joista aaltopahville käytettäviä testejä ovat ECT ja FCT. Kokonaisen aaltopahvi- tai kartonkilaatikon puristuslujuus voidaan mitata BCT:llä. (KnowPap, 2022)

Puristuslujuuksista poikkisuuntainen reunalitistyslujuus on tärkeämpi kuin kone-suuntainen. Tämä johtuu siitä, että valmiissa aaltopahvilaatikossa pinottujen laatikoiden painoa kantavat poikkisuuntaiset aaltopahviseinämät. (Knowpap 2023)

Tasolitistyslujuutta taas tarvitaan, kun arvioidaan pahvilaatikon seinien kykyä suojella sisältöä ulkopuoliselta puristavalta voimalta. Laatikon puristuslujuustestillä voidaan arvioida laatikon pinottavuutta. (Knowpap 2023)

Aaltopahvin tärkein käyttökohde on siitä valmistetut erilaiset kuljetuspakkaukset. Tämän lisäksi materiaalia voidaan käyttää myös muuhun pakkaamiseen ja kaikenlaisen sisällön suojelemiseen.

2.2 Aaltopahvin raaka-aineet

2.2.1 Aallotuskartonki

Pintakartonkien väliin liimatun aallotuskartongin on tarkoitus tuoda aaltopahville jäykkyyttä. Aaltopahvin jäykkyys syntyy siitä, että aallotuskartonki eli fluting pitää pintakartongit tietyllä vakioetäisyydellä toisistaan. (KnowPap 2023)

Aallotuskartonkiin voi olla käytetty ensiö- tai kierrätyskuituja. Suurimmaksi osaksi ensiökuituinen fluting valmistetaan puolikemiallisesta lehtipuumassasta ja sillä on tällöin erinomaiset litistys- ja puristuslujuudet. Ensiökuituisen flutingin valmistukseen voidaan kuitenkin käyttää myös havupuusulfaattimassaa. (KnowPap 2023)

Kierrätyskuiduista valmistettua aallotuskartonkia nimitetään wellenstoffiksi tai RF:ksi. Käytetty kierrätyskuitu on useimmiten OCC:ta, mikä tarkoittaa vanhaa kierrätettyä aaltopahvia. Myös tehtaan omaa hylkyä voidaan käyttää. Wellenstoffin ja RF:n lujuusominaisuudet ovat hieman huonommat kuin ensiökuituisella flutingilla, mutta tätä voidaan kompensoida lisäämällä aallotuskartongin neliömassaa. (KnowPap 2023)

Aaltopahvin paksuutta kuvaillaan aakkosilla. Teollisuudessa yleisimmin käytetyt ovat A-, B-, C-, E- ja F -aaltoiset aaltopahvit. Aakkosten ensimmäiset kirjaimet tarkoittavat paksumpaa aaltopahvia. Alemmaksi aakkosissa mentäessä aallotuskartongin ja sitä kautta myös aaltopahvin paksuus pienenee. (Karhuketo, Sepälä, Törn & Viluksela 2004, 157)

Kaksiaaltoiset aaltopahvit kerrostuvat kahdesta yksiaaltoisesta aaltopahvista niin, että ne jakavat keskenään yhden testlainerin kiinnityskohtana toisiinsa. Tällaista kaksiaaltoista aaltopahvia voidaan nimittää esimerkiksi BC-aaltoiseksi aaltopahviksi. Tässä esimerkissä aaltopahvissa on käytetty B- ja C -aaltoisia aallotuskartonkeja.

2.2.2 Pintakartonki

Lainerit eli pintakartongit pitävät aaltopahvia kasassa. Lainereilta edellytetään siten korkeita lujuusarvoja. Lainerit voidaan jakaa kraftlainereihin ja testlainereihin. Lainerit liimataan aallotuskartonkiin tavallisesti tärkkelysliimalla.

Kraftlainerilla on yleensä samalla neliöpainolla paremmat lujuusominaisuudet kuin testlainerilla. Kraftlaineri on suurimmaksi osaksi ensiökuidusta valmistettua kaksikerroksista kartonkia. Kraftlaineria käytetään aaltopahvin pintakerroksissa, jossa esimerkiksi hyvillä painatus- ja lujuusominaisuuksilla on suurta merkitystä. (KnowPap 2023)

Kraftlainerin pintakerros on tehty voimakkaasti jauhetuista sellukuiduista, jotka on myös voitu valkaista. Voimakkaalla jauhamisella tavoitellaan painatuskelpoista lujaa, tiivistä ja sileää pintakerrosta. Taustakerrokseen käytettävät sellukuidut on

jauhettu kevyemmin, jotta lujuus- ja jäykkyysominaisuudet säilyvät. (KnowPap 2023)

Kraftlainerin pinta- ja taustakerroksissa käytetty pitkäkuituinen sellu on peräisin havupuista ja on havupuusulfaattimassaa. Taustakerrokseen käytettävään havupuusulfaattimassaan voidaan kuitenkin lisätä myös OCC:ta tai muita uusiokuituja. (KnowPap 2023)

Testlaineri on suurimmilta osin uusiokuiduista valmistettua kaksikerroksista kartonkia. Uusiokuitujen suuri määrä johtaa lujuusominaisuuksien heikkenemiseen. Lujuusominaisuuksien heikentymistä voidaan kuitenkin estää lisäämällä testlainerin neliömassaa. Testlaineria käytetään yleensä moniaaltoisten aaltopahvien välikerroksissa, mutta sitä voidaan käyttää myös yksiaaltoisten aaltopahvien pintakerroksissa. (KnowPap 2023)

Testlainerin pintakerros on valkaisuamatonta, pitkäkuituista ja hyvin jauhettua massaa, joka on puhdistettu perusteellisesti. Massa on suurimmaksi osaksi uusiokuitua. Pintakerroksessa käytetään OCC:ta, mutta myös valkaisuamatonta havupuusellua voidaan käyttää. (KnowPap 2023)

Testlainerin taustakerros on yleensä valmistettu OCC:sta, mutta siinä voidaan käyttää myös jotain muuta uusiokuitua. Testlainerin taustakerrokseen käytetyt kuidut ovat vähemmän jauhettuja kuin pintakerrokseen käytettävät kuidut. Kevyellä jauhatuksella pyritään säilyttämään testlainerin lujuusominaisuuksia. (KnowPap 2023)

2.2.3 Liima

Liimana käytetään yleensä tärkkelyspohjaista liimaa. Tärkkelysliima valmistetaan perunasta, vehnästä tai maissista. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 158)

Liimaa käytetään liimaamaan aallotuskartonki pintakartonkeihin. Liimauksen kesteudenkesto voidaan parantaa huomattavasti käyttämällä polymeeripohjaisia märkälujaliimoja. (KnowPap 2023)

2.3 Aaltopahvin valmistus

Aaltopahvia valmistetaan aaltopahvikoneella pintakartongeista ja aallotuskartonista. Aaltopahvin valmistus alkaa lämmittämällä ja kostuttamalla aallotuskartonki ja esilämmittämällä pintakartonki esilämmittimessä. Lämmittämisen jälkeen kostutettu aallotuskartonki aallotetaan aallotusteloilla. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 154)

Tämän jälkeen aallotetun aallotuskartongin aallonharjoille levitetään tärkkelysliimaa, minkä jälkeen pintakartonki liimataan kiinni aallotuskartonkiin. Tämä yksipuolisena aaltopahvina tunnettu rakennelma, kulkee sitten aaltopahvikoneessa toiselle liimausryhmälle, jossa sen auki jääneelle puolelle liimataan toinen pintakartonki. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 154)

Seuraavaksi kaksipuolisen yksiaaltoisen aaltopahvin rakenteen saanut aaltopahvirata kuivuu puristuksissa arinan eli kuivatusosan lämmössä. Aaltopahvirata kulkee pituusleikkurille, jossa aaltopahvista leikataan sopivan levyisiä ratoja. Samalla tehdään koneensuuntaiset nuuttaukset, jotka mahdollistavat taittamisen myöhemmin rikkomatta aaltopahvia. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 158)

Pituusleikkurin jälkeen poikkileikkuri leikkaa konesuuntaiset radat sopivan pituisiksi arkeiksi. Tämän jälkeen valmiit arkit pakataan pinoihin ja ne ovat valmiita myyntiin. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 158)

2.4 Aaltopahvin jalostus pahvilaatikoksi

Aaltopahvin jalostus voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen, jotka ovat painatus, stanssaus ja liittäminen. Slitsi- ja stanssityyppiset laatikot ovat yleisimpiä pahvilaatikoita. Näiden valmistus kuvaillaan seuraavassa osiossa. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 161)

2.4.1 Slitsilaatikko painoavauskoneella

Slitsi- eli läppälaatikko voidaan valmistaa slitsikoneella. Slitsikone leikkaa pelkääntään aukot, mutta se ei avaa niitä. Slitsilaatikko muodostuu toisiinsa nähden suorakulmassa olevista leikkauksista. Poikkisuuntaiset nuuttaukset tehdään etukäteen aaltopahvikoneella. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 154)

Slitsikoneen edistyneempää versiota kutsutaan painoavauskoneeksi tai yhdistelmäkoneeksi. Painoavauskone leikkaa aukot ja tämän lisäksi myös painattaa aaltopahviarkit. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 154)

Edistyneempää versiota painoavauskoneesta kutsutaan in-linekoneeksi. In-linekoneella painatus, aukkojen avaaminen, taivuttaminen ja liimaus voidaan tehdä yhdessä tuotantolinjassa. In-linekoneen automaatio kykenee myös huolehtimaan aaltopahviarkkien syötöstä ja niputuksesta, sekä kykenee usein myös hoitamaan niiden lavauksen. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 164)

2.4.2 Stanssilaatikko stanssauskoneella

Stanssilaatikko valmistetaan painamalla stanssiformu eli eräänlainen muotti läpi aaltopahviarkista. Stanssiformussa on teräviä teriä, jotka leikkaavat aukot ja tylppiä nuuttausteriä, jotka tekevät nuuttaukset. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 155)

Stanssi voi olla myös rumpurakenteinen, jolloin pyörivä rumpu tekee stanssauksen levyn sijasta. Tällöin puhutaan laakastanssauksen sijaan rotaatiostanssausesta. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 155)

Stanssaaminen mahdollistaa suorista kulmista muodostuvaa slitsimenetelmää monimutkaisempien laatikkorakenteiden rakentamisen. Stanssattu laatikko voi olla asiakkaalle helpompi ja nopeampi kasata valmiiksi pahvilaatikoksi asti. Tästä syystä, ajan säättämiseksi, teollisuudessa käytetään paljon stanssaamalla valmistettuja automaattipohjaisia pahvilaatikoita. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 155)

2.4.3 Painatus

Suosituimpia pakkauksien painomenetelmiä on flekso-, syväpaino- ja offsetmenetelmät (KnowPap 2023). Näistä fleksopainotekniikka on eniten käytetty painomenetelmä. Digitaalipainotekniikka on nopeiten kasvussa oleva painomenetelmä pakkausteollisuudessa (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 172)

Painatuksessa aaltopahviarkille painatetaan kuvia tai tekstiä. Painatuksen tarkoituksena voi olla esimerkiksi ohjeistaa käyttäjää laatikon kasaamisessa tai kertoa sen ominaisuuksista. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 162)

2.4.4 Liittäminen

Liitoksia eli liittämistä voidaan tehdä pahvilaatikoihin liimaamalla, niittaamalla ja teippaamalla. Liimaus on yleisin liittämismenetelmä kustannustehokkuutensa vuoksi. Liimoina voidaan käyttää dispersio- tai hotmelt -liimoja. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 166)

Teippauksessa aaltopahviaihio kasataan teipillä. Tämän menetelmän etu on se, että liitosläppä ei ole tarpeen teipin pitäessä liitosta kasassa. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 166)

Nidonta taas on liittämismenetelmä, jolla voidaan tehdä vahvempia liitoksia nitomalla teräslankaa liitoksiin. Teollisuudessa raskaita lavakuormia on usein pakattu nitomalla vahvistettuihin pahvilaatikoihin. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 166)

3 PURISTUSLUJUUS

3.1 Teoria

Puristuslujuus tarkoittaa kappaleen tai materiaalin kykyä vastustaa puristavaa voimaa. Puristuslujuutta voidaan mitata nesteistä, kiinteistä aineista ja kaasuista. Valmiin aaltopahvilaatikon on kestävä pinoamista ja tästä syystä puristuslujuuden testaaminen on tärkeää laadun varmentamisessa ja tuotekehityksessä. Aaltopahville ECT-, FCT- ja BCT -puristuslujuudet ovat tärkeimpiä mitattavia ominaisuuksia, kun arvioidaan aaltopahvilaatikon pinottavuutta ja kestävyyttä.

Aaltopahvin reunanvastaiseen puristuslujuuteen käytetään ECT:tä ja tasonvastaiseen puristuslujuuteen FCT:tä. Kokonaiselle aaltopahvi- tai kartonkilaatikolle käytetään BCT:tä.

Puristuslujuusmittauksia voidaan tehdä sitä varten suunnitellulla puristuslujuustesterillä tai vetolujuustesterillä, jos se soveltuu puristavan voiman mittaamiseen. Aaltopahvin puristuslujuuden mittaamisen lisäksi puristuslujuutta voidaan testata erikseen siinä käytetyistä pinta- ja aallotuskartongeista. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 134)

Puristuslujuuden mittaamiseksi näytteeseen kohdistetaan puristavaa voimaa, kunnes tapahtuu murtumistapahtuma. Murtuminen voidaan havaita alaspäin aukenevan paraabelin muotoisen jännitys-venymäkäyrän lakipisteestä löydettävänä maksimivoimana. Kaikki laitteistot eivät kuitenkaan piirrä tätä käyrää, vaan laite huomaa murtumistapahtuman puristuslujuuden alenemana, joka ylittää tietyn ennakkoon asetetun herkkyuden.

Pinottaessa aaltopahvilaatikkoja puristava rasitus kohdistuu aaltopahvin reunaan poikkisuunnassa, joten ECT-mittaukset suoritetaan aaltopahville poikkisuunnassa. Poikkeuksena tästä on pintaa vastaan suoritettavat tasolitistyslujuustestit ja osa pintakartongeille suoritettavista testeistä, joissa mittaukset suoritetaan kone- ja poikkisuunnassa.

3.2 Puristuslujuuteen vaikuttavat ominaisuudet

Aaltopahvin aallotuskartongille ja pintakartongille toivotaan usein toisistaan erilaisia ominaisuuksia mahdollisimman hyvän puristuslujuuden aikaansaamiseksi. Puristuslujuutta voidaan myös mitata pelkästään aaltopahvista usein eri menetelmin ja tiettyjen ominaisuuksien lisääminen ei aina lisää puristuslujuutta tasaisesti eri testien välillä.

Aaltopahvin puristuslujuuteen vaikuttavat lukemattomat aaltopahvin itsensä ja siinä käytetyn aallotuskartongin sekä pintakartongin ominaisuudet. Useat ominaisuudet – joista tärkeimpiä on esitelty seuraavissa osioissa – eivät aina suuretessaan tai pienentyessään vaikuta puristuslujuutta suurentavasti tai pienentävästi. Hyvä puristuslujuus syntyy hyvin valittujen kompromissien summasta, sillä useat ominaisuudet vaikuttavat puristuslujuuden lisäksi myös toisiinsa.

3.2.1 Kosteus

Kosteus muuttaa aallotuskartongin kimmokerrointa pienemmäksi ja aallotuskartonki muuttuu muovautuvaksi. Tämä heikentää aaltopahvin puristuslujuutta, sillä aallotuskartonki ei enää pysty pitämään aaltopahvia kasassa, koska se muuttuu helposti taipuvaksi. Tämän vaikutus mittauksiin vakioidaan suorittamalla kokeet vakio-olosuhteissa. (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 293)

On arvioitu, että aaltopahvin kostuessa aaltopahvilaatikon pinoamiskestävyys alenee tavallisiin olosuhteisiin verrattuna jopa puoleen aiemmasta. Kosteussuojamalla aaltopahvi vahalla tai muovilla voidaan kosteuden vaikutusta pinoamiskestävyteen vähentää. (Karhuketo, Seppälä, Törn & Viluksela 2004, 168)

3.2.2 Paksuus

Aaltopahvin reunalitistyslujuus kasvaa aaltopahvin paksuuden myötä. Paksummat aaltopahvit ovat myös jäykempiä ja siten kestävätkä paremmin puristavaa voimaa. Myös aaltopahvin, pintakartonkien ja aallotuskartongin taivutuslujuus kasvaa paksuuden kasvaessa. (Urbanik 2001, 333 & KnowPap 2023)

Mitä ohuempaa aaltopahvi on, sitä helpommin se nurjahtaa puristettaessa. Nurjahdus on aaltopahvin puristuksessa tapahtuva tapahtuma, jossa testattava materiaali taittuu puristavan voiman vaikutuksesta. Kun aaltopahvia puristetaan ja aaltopahvi pääsee taittumaan, sen puristuslujuus laskee huomattavasti todellisesta puristuslujuudesta (KnowPap 2023)

Puristustapahtuma voi olla myös puhdas, mikä merkitsee sitä, että nurjahdusta ei ole päässyt tapahtumaan. Puristustapahtuman ollessa puhdas, voimavektori pysyy vertikaalisena eli siinä suunnassa missä materiaalin vahvuus on suurin. Tällä tavalla saadut tulokset ovat tarkkoja.

3.2.3 Neliömassa

Neliömassa kertoo paljonko yhden neliömetrin verran aaltopahvia, kartonkia tai aallotuskartonkia painaa. Neliömassan lisäys vaikuttaa lisäävästi puristuslujuuteen muiden ljuuksien ohella. (Urbanik 2001, 333)

Aallotuskartongin taivutusjäykkyyden on oltava hyvä, jotta sen puristuslujuus olisi hyvä. Taivutusjäykkyyttä voidaan lisätä lisäämällä neliömassaa. Suurempi neliömassa tarkoittaa, että neliömetrille aaltopahvia on käytetty enemmän massaa ja siinä mukana olevia kuituja. Suurempi kuitusidosten määrä lisää puristuslujuutta. (KnowPap 2023)

3.2.4 Taivutusjäykkyys

Pinoamiskestävyyteen vaikuttaa aaltopahvin poikkisuuntainen taivutusjäykkyys. Jäykkä aaltopahvi on vähemmän altis nurjahdukselle. Nurjahdus on tapahtuma, jossa aaltopahvi pääsee taivuttamaan puristavan voiman alla. (KnowPap 2023)

Aaltopahvin taivutusjäykkyys on riippuvainen sen pintakartonkien kimmomoduuleista. Mitä suurempi on lainerien kimmomoduuli, sitä suurempi on aaltopahvin taivutusjäykkyys. (KnowPap 2023)

Lujuusarvoja, kuten taivutusjäykkyyttä voidaan lisätä lisäämällä pintakartonkien kimmomoduulia. Poikkisuuntaisen taivutusjäykkyyden on oltava hyvä aaltopahvilaatikon pinottavuutta varten, sillä pinon alimmaisen laatikon seinät eivät saa taittua painon alla. (KnowPap 2023)

Aaltopahvin puristuslujuuteen vaikuttaa myös aallotuskartongin taivutusjäykkyys, joista poikkisuuntainen taivutusjäykkyys on tärkeämpi, puristavan voiman kohdistuessa valmiiden laatikoiden pinossa etenkin aaltopahvin poikkisuuntaiseen reunaan. Pieni taivutusjäykkyys voi altistaa nurjahdukselle ja aaltopahvin taittumiselle. (KnowPap 2023)

Aaltopahvin puristuslujuuteen poikkisuunnassa reunaa vasten vaikuttaa myös siinä käytetyn aallotuskartongin poikkisuuntaisen reunan vastainen puristuslujuus. (KnowPap 2023)

3.2.5 Tiheys

Tiheyden kasvaessa aaltopahvin puristuslujuus kasvaa. Tämä johtuu suuremmasta kuitujen välisten sidosten määrästä (Järvi-Kääriäinen & Ollila 2007, 134). Aina näin ei kuitenkaan ole. Käyttämällä lyhyitä taipuisia uusiokuituja tiheys kasvaa, mutta lujuusarvot heikkenevät kuitujen taipuisuuden ja lyhyiden vuoksi. (KnowPap 2023)

3.3 Raaka-aineiden vaikutus puristuslujuuteen

Aallotuskartongin, pintakartonkien ja siten myös aaltopahvin puristuslujuuteen vaikuttavat niissä käytetyt raaka-aineet. Raaka-aineiden valinnalla ja niiden käsittelyllä pyritään saamaan aaltopahville haluttuja ominaisuuksia, ylittämättä tai alittamatta tiettyjä ennalta määrättyjä ominaisuuksille asetettuja raja-arvoja.

3.3.1 Massa

Ensiökuidusta valmistettu aallotuskartonki on lujuusominaisuuksiltaan parempaa verrattuna uusiokuiduista valmistettuihin saman neliömassan aallotuskartonkeihin. Tämä johtuu ensiökuitujen suuremmasta paksuudesta, mikä lisää niiden jäykkyyttä. Uusiokuiduista valmistetun aallotuskartongin lujuusominaisuuksia voi parantaa lisäämällä neliömassaa. (KnowPap 2023)

Pintakartongeilla uusiokuitujen käyttö heikentää samaan tapaan niiden lujuusarvoja. Aallotuskartongin tavoin tätä ongelmaa voi ehkäistä kasvattamalla neliömassaa tai käyttämällä enemmän pitkiä ja jäykkiä ensiökuituja. (KnowPap 2023)

3.3.2 Liima

Puristuslujuuteen ja pinottavuuteen vaikuttaa liimaussidoksen vahvuus. Huono liimaussidos vaikuttaa alentavasti aaltopahvin jäykkyyteen (KnowPap 2023)

Liimaussidoksen ollessa heikko tai liiman ollessa epätasaisesti levitetty, voi laineri irrota aallotuskartongista puristamistapahtuman aikana. Tässä tapauksessa pintakartonkien ja aallotuskartongin laadulla tai erinomaisilla lujuusarvoilla ei ole merkitystä. Tästä syystä liimaus on syytä suorittaa huolella. (KnowPap 2023)

Pintakartonkien ja aallotuskartongin neliömassan ja paksuuden tasaisuus sekä kosteuden jakautuminen tasaisesti pintakartonki- ja aallotuskartonkiradoilla ovat

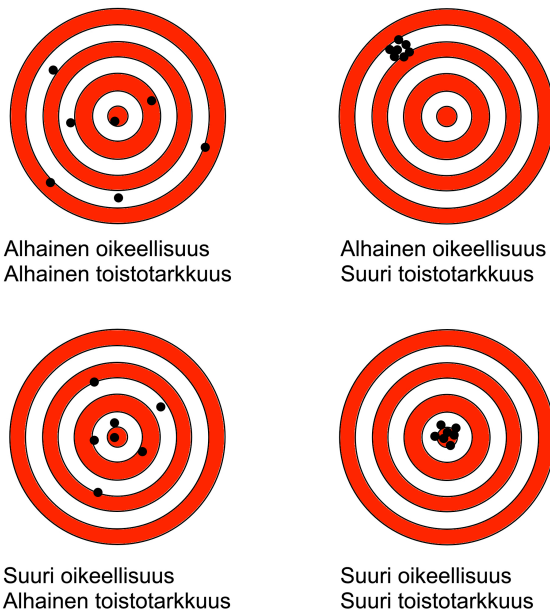
tärkeitä. Aallotuksessa aallotuskartongin ja pintakartongin kosteuden pitäisi olla 6–8 %, jotta liimauksella olisi mahdollisimman suuri todennäköisyys onnistua. (KnowPap 2023)

4 TARKKUUS JA TOISTETTAVUUS

4.1 Teoria

Hyvä tarkkuus edellyttää hyvää sisäistä ja ulkoista tarkkuutta. Kun mittauslaitteen sisäinen ja ulkoinen tarkkuus ovat tarpeeksi hyvällä tasolla, voidaan mittauslaitteen sanoa olevan tarkka.

Hyvä tarkkuus koostuu siis hyvästä oikeellisuudesta ja hyvästä toistotarkkuudesta. Oikeellisuutta ja toistotarkkuutta voidaan ilmaista graafisesti kuten kuviossa 2 on tehty. Maalitalun keskipiste edustaa oikeaksi tiedettyä arvoa ja mustat pisteet yksittäisiä mittauksia.



KUVIO 2. Laitteen sisäinen ja ulkoinen tarkkuus (Maksim Nikolaev).

Hyvä sisäinen tarkkuus eli suuri toistotarkkuus yksittäisten mittausten välillä tarkoittaa pientä mittausten välistä keskihajontaa. Suuri mittausten välinen keskihajonta taas merkitsee laitteen huonoa sisäistä tarkkuutta. Tällöin laite on sisäisesti epätarkka.

Pieni yksittäisten mittausten välinen keskihajonta johtaa pieneen eli hyvään toistettavuuteen. Toistettavuus, joka lasketaan keskihajonnasta, seuraa keskihajontaa lineaarisesti. Toistettavuutta käytetään, kun arvioidaan samoissa olosuhteissa, käytännöillä, mittausvälineillä ja samoja standardeja käyttäen tehtyjen mittausten vertailukelpoisuutta keskenään.

Hyvä ulkoinen tarkkuus eli mittauslaitteella saadun tuloksen suuri oikeellisuus tarkoittaa sitä, että mittausten keskiarvon perusteella laskettu tulos on lähellä oikeaksi tiedettyä arvoa. Mikäli laitteella tehtyjen mittausten perusteella laskettu tulos ei ole lähelläkään oikeaksi tiedettyä arvoa, on mittauksiin käytetty laite ulkoisesti epätarkka.

Kuviossa 2 nähdään, että laitteella saatu tulos voi olla oikein, vaikka sen toistotarkkuus olisi huono. Kuviossa nähdään myös, että laitteen toistotarkkuus voi olla hyvä, mutta laitteella saatu tulos voi olla täysin väärä.

4.2 Tarkkuuteen ja toistettavuuteen vaikuttavat asiat

4.2.1 Mittalaite

Laitteistolla on vaikutusta tarkkuuteen sekä toistettavuuteen. Laitteen sisäinen tarkkuus riippuu sen toistotarkkuudesta. Laitteen sisäisestä tarkkuudesta riippuu myös laitteella saatujen tulosten toistettavuus. Laitteen ulkoinen tarkkuus riippuu sillä saatujen tulosten oikeellisuudesta. Laitteen kalibroinnilla voidaan parantaa ulkoista tarkkuutta.

4.2.2 Mittausolosuhteet

Ympäristön olosuhteilla on paljon merkitystä mittaustuloksiin, ja mittaukset eivät ole aina vertailukelpoisia toistensa kanssa, jos niitä ei ole suoritettu samoissa olosuhteissa. Mittaukset suoritetaan tämän vuoksi vakio-olosuhteissa, jotka määrää kulloinkin käytettävä mittausstandardi.

Aaltopahvin ominaisuudet muuttuvat mittaolosuhteiden myötä. Ilmankosteus ja alhaiset lämpötilat vähentävät aaltopahvin puristuslujuutta. Tämän vuoksi mittaukset suoritettiin standardin mukaisessa lämpötilassa ja suhteellisessa ilmakeudessa.

4.3 Mittalaitteen käyttäjä

Laitteen käyttäjä voi tehdä virheitä näytteiden valmistelun, mittaamisen tai tulosten käsittelyn aikana. Tällaiset virheet johtavat näytteiden hylkäämiseen, virheisiin mittauspöytäkirjassa ja pahimmillaan jopa väriin mittaustuloksiin. Laitteen käyttäjän virheet eivät vaikuta laitteen todelliseen tarkkuuteen, mutta ne voivat vaikuttaa tutkimukseen pohjautuvaan johtopäätökseen laitteen tarkkuudesta.

Laitteen tarkkuus voi huonontua laitteen käyttäjän huolimattomuuden vuoksi sekä oikeellisuuden että toistotarkkuuden kannalta. Tulosten oikeellisuutta tai toistotarkkuutta voivat huonontaa esimerkiksi väärin valmistellut näytteet.

5 LAITTEISTO

5.1 Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 on puristuslujuuden mittauslaite, jolla voidaan mitata puristuslujuuksia aaltopahville, aallotuskartongille ja pintakartongeille. Laitteen mukana toimitetaan kaksi teräspalaa, joilla esimerkiksi ECT-tyyppinen näyte voidaan tukea pystyyn testin alussa. Laite on esiteltyä kuvassa 1.



KUVA 1. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 (KnowPap 2023, muokattu).

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n puristustaso rajoittaa puristettavien kappaleiden mitat kooltaan 125 mm – 125 mm kappaleisiin. Laitteen käyttöoppaassa mainitaan laitteelle kaksi erilaista mittausväliä, 0–5 kN ja 0–1999 N. Käytettäessä mittausväliä 0–5 kN, jossa yksikkönä on kilonewton, rajoittuu laitteen tarkkuus 0,01 kN eli 10 N tarkkuuteen. (L&W crush tester operating instructions, 3)

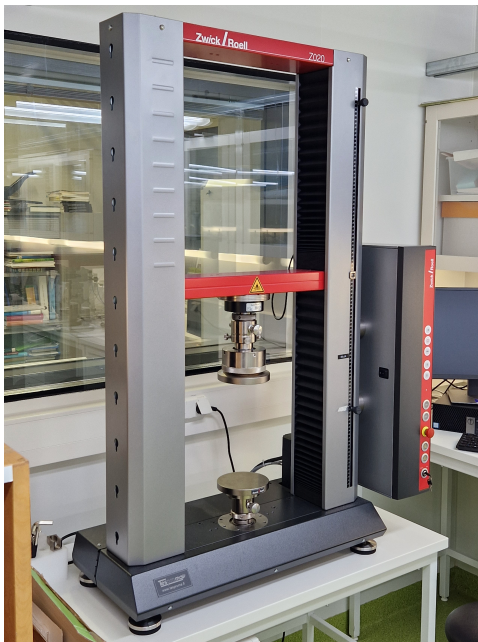
Laitteen puristusnopeus on säädettävissä portaattomasti 0,0 mm/min – 50,0 mm/min välillä. Puristuskorkeus on 76 mm ja tämän korkeampia kappaleita laitteella ei pystytä testaamaan.

Laitteessa on myös nappi, jolla puristusnopeus voidaan hetkellisesti nostaa 50 mm/min tyhjän tilan kuromiseksi umpeen ennen varsinaista puristamista. Laitteen palautusnopeus on vakio ja nopeudeltaan 50 mm/min. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 antaa maksimivoiman alle 1 % virheellä mittaustuloksella välillä 500 N – 5000 N.

Laitteen suomenkielisessä oppaassa mainitaan ilman lisävarusteita tehtäviksi testeiksi CMT ja FCT. Käyttämällä lisävarusteita onnistuvat myös CCT, RCT, ECT ja PAT. Laitteen englanninkielinen käyttöopas mainitsee edellä mainittujen lisäksi myös CLT:n. (Litistyskoestuslaite käyttöohje, 3)

5.2 ZwickRoell Z020

ZwickRoell Z020 on vetolujuuden mittauslaite, jolla voidaan mitata vetolujuuden ja venymän lisäksi hyvin tarkasti myös puristavia voimia. Laitteen hallintaan ja mittaustulosten käsittelyyn käytetään TestXpert III -ohjelmistoa. Ohjelmisto piirtää testattavalle materiaalille jännitys-venymäkäyrän. Laite on esiteltyinä kuvassa 2.



KUVA 2. ZwickRoell Z020 (Maksim Nikolaev 2022).

ZwickRoell Z020 pystyy tuottamaan suurimmillaan 20 kN vetävän tai puristavan voiman. Tampereen ammattikorkeakoulun ZwickRoell Z020:n voimakkenno on kuitenkin suojattu yli 15 kN voimilta. ZwickRoell Z020:n Xforce P -voimasensorin virhe on yli 80 N voimilla alle 1 % ja yli 400 N voimilla alle 0,5 %. (ZwickRoell Group n.d.)

Laitetta voidaan käyttää ohjelmistosta käsin tai ohjata suoraan laitteen kyljessä olevista napeista. Laitteessa olevista napeista voidaan määrätä laite aloittamaan ennalta määrätty koe, lopettamaan koe tai manuaalisesti ohjata laitteen tasoa ylös ja alas.

6 PURISTUSLUJUUDEN TESTAUS

6.1 Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 haettiin varastosta ja kone laitettiin päälle. Koneen käyttöön saattamiseksi oli syytä tehdä hieman säätöjä.

Ensin odoteltiin ohjekirjan mukaisesti tunti koneen elektroniikan stabiloitumista, kunnes se oli saavuttanut tasaisen lämpötilan. Tämän jälkeen voitiin aloittaa kalibroinnin tarkistaminen. Laitteisto on esiteltynä kuvassa 3.



KUVA 3. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 (Maksim Nikolaev 2023).

Koneen elektroniikan lämpötilan vakiinnuttua aloitettiin kalibroinnin tarkistus. Koneen kalibrointi tarkistettiin painamalla laitteen CHECK-nappula ylös ja vertaamalla nestekidenäytölle ilmaantunutta lukemaa koneeseen merkittyyn arvoon.

Nestekidenäytön lukema sai erota koneeseen merkitystä 3,12 kN korkeintaan 1 %, jotta kalibrointi olisi hyväksyttävissä (kuva 4). Kalibroinnin todettiin olevan rajojen sisällä ja koneen muisti pantiin OFF-asentoon.



KUVA 4. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n kalibroinnin varmistusta ja hienosäätöä (Maksim Nikolaev 2023).

Seuraavaksi säädettiin ZERO-nupilla nestekidenäytön lukema nolnaan. Kalibroinnin hienosäätämisen aikana oli syytä pitää yksiköt newtoneina tarkemman kalibroinnin aikaansaamiseksi. Hienosäätämisen jälkeen voitiin nuppi kääntää keskelle OP. asentoon. Laite oli valmiina puristusvoimien mittaamiseen. Päivän aikana valmisteltiin muutamia koenäytteitä, joilla kokeiltiin erilaisia asetuksia murtumaherkkyydelle ja murtumakynnykselle.

ECT-koenäytteiden perusteella voitiin päätellä, että arvoiltaan 5 % ja 10 % murtumaherkkyys tunnisti maksimivoiman luotettavan usein. Murtumaherkkyys arvoilla 15 % ja 20 % laite ei havainnut maksimivoimaa vaan laite jatkoi puristamista loppuun saakka. Murtumakynnys jätettiin oletusasetukselle eli nolnaan, sillä se tuotti useilla asetuksilla ja 5 %, 10 %, 15 % ja 20 % murtumaherkkyyksillä kyvyttömyyden havaita maksimivoimaa.

Päivän aikana kokeiltiin myös muutamia FCT-näytteitä murtumaherkkyyksillä 5 %, 10 % ja 15 % ja erilaisilla murtumakynnyksen asetuksilla. Murtumaherkkyys ollessa 5 % ja 15 % maksimivoimaa ei havaittu, kun taas murtumaherkkyys ollessa 10 % maksimivoima havaittiin murtumakynnyksen ollessa nolna. Testien perusteella varsinaiset kokeet toteutettiin murtumaherkkyydellä 10 % ja murtumakynnyksellä nolna.

6.2 ZwickRoell Z020

ZwickRoell Z020:lla testit aloitettiin kokeellisilla ECT- ja FCT -mittauksilla. ZwickRoell Z020:aa käytetään ja voidaan myös ohjata Testxpert III -ohjelmistosta käsin. Ohjelmistosta löytyi valmiita eri standardien mukaan valmistettuja testiprofiileja erilaisille puristuslujuuden mittausstandardeille. Laitteisto näkyy kuvassa 5.

ECT- ja FCT -näytteitä mitatessa kuitenkin paljastui, että niitä vastaavat testiprofiilit eivät mitanneet maksimivoimaa luotettavasti edes useamman päivän aikana kokeiluilla lukuisilla eri asetusarvoilla.

Maksimivoimat kyllä havaittiin, piirrettiin ja laite alkoi palautua aloitusasentoon, mutta tuloksia tarkastellessa ohjelma ei muistanut mittaamaansa puristuslujuutta, vaan mittauslukeman tilalle oli ilmestynyt viiva osoittamaan hylättyä mittausta. Vain BCT-testiprofiili toimi odotetulla tavalla.



KUVA 5. ZwickRoell Z020 (Maksim Nikolaev 2022).

Ongelma ratkaistiin käyttämällä räätälöityä BCT-testiprofiilia kaikkiin mittauksiin. BCT-testiprofiilia muokattiin tarpeen mukaan eri standardien mukaisiksi asettamalla näytteen muoto ja mitat sillä hetkellä mitattavan näytteen vaatiman standardin mukaiseksi. Myös murtumaherkkyys säädettiin samalle tasolle Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n kanssa. Tämä osoittautui toimivaksi ratkaisuksi.

6.3 Suoritus

Laitteiden tarkkuutta vertaillaan suorittamalla kummallakin laitteella vertailukelpoiset testaussarjat. Laitteilla mitataan ensin reunalitistyslujuudet kahdesta erityyppisestä aaltopahvista, joista toinen on yksiaaltoista aaltopahvia ja toinen kaksiaaltoista aaltopahvia. Reunalitistyslujuuksien mittaamisen lisäksi yksiaaltoisesta aaltopahvista mitataan myös tasolitistyslujuus.

Viimeiseksi testataan laatikon puristuslujuus kolmikerroksisesta taivekartongista valmistetuista pikkulaatikoista. Tuloksille lasketaan keskihajonnat, joista saadaan hyvä käsitys laitteiden toistotarkkuudesta, kun tuloksia vertaillaan keskenään. Taulukossa 1 on mittaussuunnitelma, mittausten määrä sarjaa kohden ja mitattu materiaali.

TAULUKKO 1. Mittaussuunnitelma.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	ZwicRoell Z020					
Testi	Testien määrä	Testien määrä	Käytetty materiaali	Aallon tyyppi	Neliö-paino	Käytetty standardi	Standardin edellyttämä testien määrä
ECT	10	10	Yksiaaltoinen aaltopahvi	C-aalto	500 g/m ²	ISO 3037:2022	10
ECT	10	10	Kaksiaaltoinen aaltopahvi	BC-aalto	770 g/m ²	ISO 3037:2022	10
FCT	10	10	Yksiaaltoinen aaltopahvi	C-aalto	500 g/m ²	ISO 3035:2011	10
BCT	10	10	Taivekartonkilaatikko	-	280 g/m ²	ISO 12048:2000	5

BCT-mittauksia tehtiin standardin ISO 12048:2000 ohjeistuksesta poiketen 10 kappaletta. Syynä tähän oli muista mittauksista poikkeava tulos, mikä varmennettiin lisämittauksin.

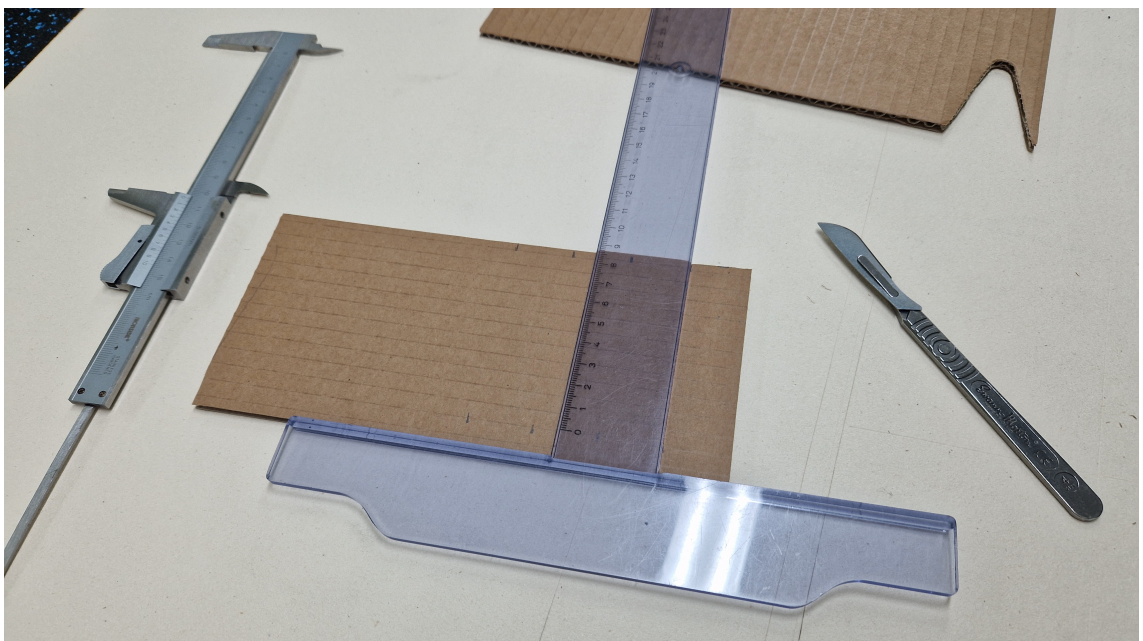
Mittaukset suoritettiin standardin ISO 187:2022 mukaisissa vakio-olosuhteissa 23 °C lämpötilassa ja 50 % suhteellisessa ilmankosteudessa. BCT-mittaukset suoritettiin tästä poiketen noudattaen standardia ISO 2233:2000, mutta samoissa olosuhteissa. BCT-testeihin valittiin siis standardista ISO 2233:2000 olosuhteiksi sama 23 °C lämpötila ja sama 50 % suhteellinen ilmankosteus.

6.4 Puristuslujuustestit

6.4.1 Aaltopahvin reunalitistyslujuustesti ECT

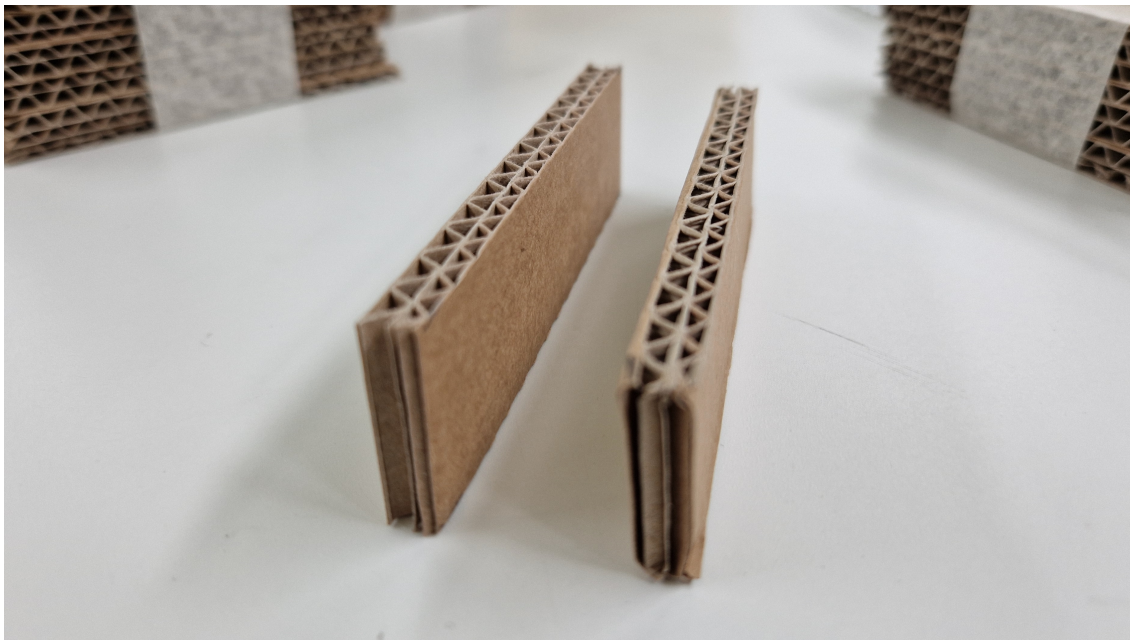
Testi kuvaa aaltopahvin reunan poikkisuuntaista lujuutta ja sitä voidaan myös käyttää kokonaisen aaltopahvilaatikon puristuslujuuden laskemisessa. ECT:n testaamisessa on tärkeää, että näyte ei pääse nurjahtamaan tai kääntymään. Tätä voidaan estää näytteiden huolellisella valmistelulla.

Näytteet valmisteltiin mahdollisimman hyvin ISO 3037:2022 standardin mukaan käyttäen leikkuuvälineenä skalpellia. Valitettavasti standardin edellyttämää bille-rud-leikkuria ei ollut saatavilla. Kuvassa 6 näkyy näytteiden valmistelua leikkupisteellä.



KUVA 6. ECT-näytteiden valmistelua (Maksim Nikolaev 2023).

Näytteiden ilmastoiduttua 72 h niitä alettiin testaamaan. ECT-näytteiden testaaminen sujui pääasiassa hyvin. Kääntymisiä ja nurjahduksia ei tapahtunut varsinaisten kokeiden aikana. Kuvassa 7 näkyy vasemmalla testaamaton ja oikealla testattu ECT-näyte.



KUVA 7. ECT-näyte ennen testaamista ja sen jälkeen (Maksim Nikolaev 2023).

Kuvassa 7 oikealla nähdään aallotuskartongin luhistumista reunan välittömässä läheisyydessä. Myös linerit ovat liiskautuneet. Tästä seurannutta puristuslujuuden alenemaa aiempi lukuarvo jäi koneiden muistiin onnistuneesti. ECT-kokeet sujuivat ilman ongelmia.

6.4.2 Aaltopahvin tasolitistyslujuustesti FCT

Tasolitistyslujuustesti mittaa aaltopahvin puristuslujuutta kohtisuoraan pintaa vasten. Testi mittaa aaltopahvin aaltojen puristuslujuutta ennen kuin ne antavat periksi. Tämä testi soveltuu standardin ISO 3035:2011 mukaan parhaiten yksiaaltoiselle aaltopahville.

Tasolitistyslujuuden mittaaminen on tärkeää, jotta voidaan arvioida, kuinka hyvin laatikko suojelee tuotteita aaltopahvin pintaan suuntautavalta puristavalta voimalta. Hyvä tasolitistyslujuus suojelee sisältöä myös iskuilta. (KnowPap 2023)

FCT-mittaukset suoritettiin ISO 3035:2011 standardin mukaisesti valmistetuille näytteille, jonka halkaisijaksi valittiin standardista 112,8 mm, mikä oli samankoinen paperilaboratorion neliöpainoleikkurin kanssa. Neliöpainoleikkurilla näytteet saatiin valmisteltua erittäin tarkasti standardin mukaisiksi. Vaurioituneita kohtia tai painettuja alueita ei testattu.

Tasolitistyslujuus mitattiin vain yksiaaltoiselle aaltopahville standardin muistuttaessa moniaaltoisten aaltopahvien tasolitistyslujuuden testaamisen olevan huonokäytäntö mahdollisen epätarkkuuden vuoksi. Näytteiden ilmastoiduttua 72 h niitä päästiin testaamaan. Kuvassa 8 näkyy FCT-näytteiden mittausta mittauspöytäkirjaa varten.



KUVA 8. FCT-näytteiden mittausta (Maksim Nikolaev 2023).

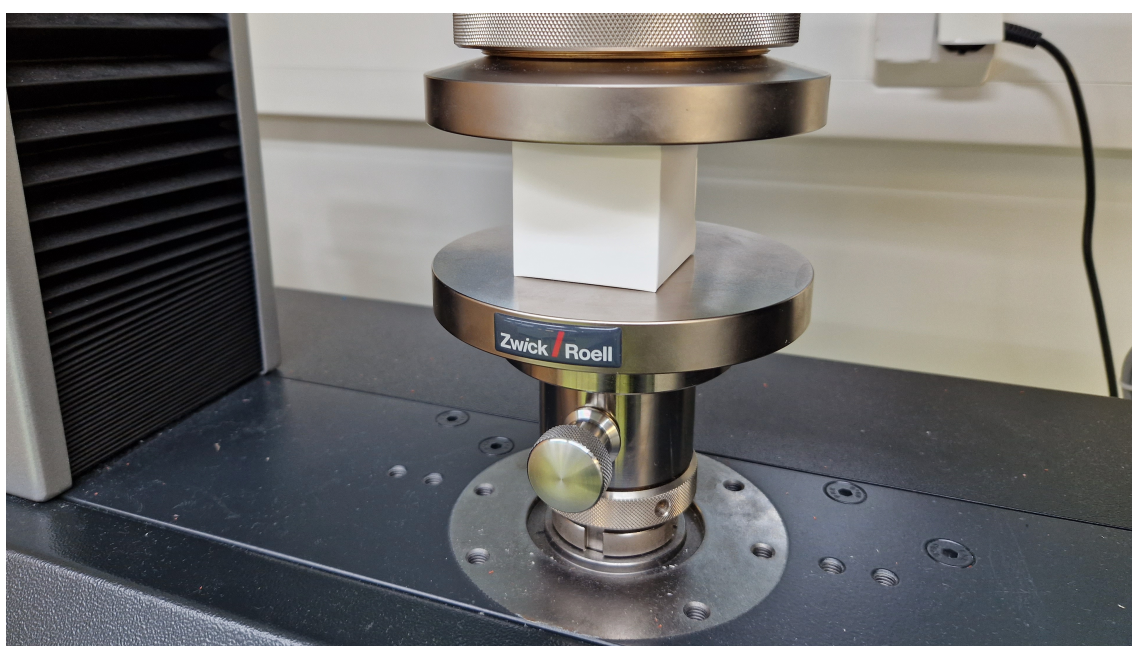
Mittauksien aikana selvisi, että Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 piti asettaa mittausväliin 0–5 kN, sillä puristusvoimat ylittivät mittauksien aikana 1999 N ylärajan. FCT-näytteiden aallot eivät testin aikana saaneet kääntyä ja merkkejä tällaisesta ei testien jälkeen havaittu. Mittaukset sujuivat hyvin kummallakin laitteella.

6.4.3 Laatikon puristuslujuustesti BCT

BCT-näytteitä valittaessa rajoittavaksi tekijäksi ilmeni puristuslujuuslaitteiden alustojen pienet koot. Alun alkaen BCT haluttiin mitata aaltopahvilaatikoista. Aaltopahvista tehtyjä laatikoita ei kuitenkaan löytynyt sopivan kokoisina, sillä pienimmät olivat vain hieman alustaa pienempiä ja siten oli olemassa ainakin teoriassa vaara puristavan tason liukumisesta laatikon sivujen sisälle aiheuttaen suurta virhettä tuloksissa.

Markkinoilta löytyi kuitenkin jäykästä valkoisesta taivekartongista valmistettuja 50 x 50 x 50 mm laatikoita, jotka osoittautuvat sopivan kokoisiksi kummallekin testilaitteelle. Standardi ISO 12048:2000 antoi melko vapaat kädet laatikon valmistelussa testejä varten. Näytteiden määräksi suositeltiin viittä kappaletta ja pakkauksen piti olla valmisteltu ja täytetty kuten loppukäyttökohteessa.

BCT-testeissä ZwickRoell Z020:ssa käytettiin erityisen BCT-näytteiden testaukseen tarkoitetun puristustason sijasta yleismallista puristustasoa, sillä tämä kuvassa 9 näkyvä yleismallinen puristustaso ei aiheuta puristuksen loppuvaiheessa puristavaa voimaa vastustavaa lisävoimaa, mikä pitäisi ottaa huomioon laskuissa. Lisävoiman mahdollinen vaihtelu olisi myös saattanut olla potentiaalinen virheen lähde. Kuvassa 9 näkyy BCT-näytteiden testausta ZwickRoell Z020:lla.



KUVA 9. BCT-näytteiden mittausta ZwickRoell Z020:lla (Maksim Nikolaev 2023).

Laatikoiden aihoiden ilmastoiduttua 72 h taiteltiin aihiot kasaan huolellisesti vaa-roen aiheuttamasta vaurioita laatikon pintoihin, mikä olisi saattanut toimia heik-kona pisteenä alentaen laatikon puristuslujuutta. Standardin mukaan kokeet teh-tiin ensin viiden laatikon sarjoilla kummallakin laitteella.

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n BCT -tulokset antoivat niitä tarkastel-lessa viiden näytteen sarjalla kuitenkin yllättävän tuloksen, jonka vuoksi BCT-tes-tejä laajennettiin ja kummallakin laitteella testit suoritettiin yhteensä 10 laatikolle varmentamaan tätä tulosta. Tulos varmentui oikeaksi.

BCT-näytteiden mittaus onnistui yleisesti ottaen hyvin, mutta toista viiden näyt-teen sarjaa mitattaessa ZwickRoell Z020:lla esiintyi epäluotettavuutta jännitys-venymäkäyrän piirtämisessä ja havaitun maksimivoiman pitämisessä TestXpert III -ohjelmiston muistissa.

BCT-testiprofiili, jota tuolloin käytettiin, oli sama kuin aiemman viiden näytteen kanssa. Maksimivoima kyllä havaittiin, mutta se ei jostakin syystä jäänyt pysy-mään näkyviin, vaikka toivotut kolme huippua näkyi jännitys-venymäkäyrässä ai-nakin osassa testejä.

Muutamien epäonnistuneiden näytteiden jälkeen ZwickRoell Z020 alkoi kuitenkin taas jättämään maksimivoiman muistiin. Epäonnistuneet mittauksia ei otettu mu-kaan mittauspöytäkirjaan.

7 LASKUT

7.1 ECT yksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre)

Ennen reunalitistyslujuuden ja sen keskihajonnan laskemista on laskettava maksimipuristusvoimien aritmeettinen keskiarvo (kaava 1).

$$\bar{F}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

jossa \bar{F}_{\max} on maksimipuristusvoimien keskiarvo, n on mittauksien lukumäärä ja x on yksittäinen mitta.

Edellä olevaan kaavaan 1 voidaan laittaa mittausarvot ja laskea maksimipuristusvoimien keskiarvo.

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\max} &= \frac{442 \text{ N} + 422 \text{ N} + 474 \text{ N} + 430 \text{ N} + 424 \text{ N} + 451 \text{ N} + \\ &\quad 415 \text{ N} + 418 \text{ N} + 424 \text{ N} + 421 \text{ N}}{10} \\ &= 432,1 \text{ N} \end{aligned}$$

Seuraavaksi pitää laskea reunalitistyslujuus, johon käytetään standardissa ISO 3037:2022 annettua kaavaa 2

$$R = \frac{\bar{F}_{\max}}{l}, \quad (2)$$

jossa R on reunalitistyslujuus, \bar{F}_{\max} on maksimipuristusvoimien keskiarvo ja l on näytteen pituus.

Sijoittamalla äskettäin lasketun maksimipuristusvoimien keskiarvon kaavaan 2 ja jakamalla se näytteen pituudella saadaan laskettua reunalitistyslujuus. Standardin ISO 3037:2022 mukaisesti näytteen pituutena ei käytetä näytteistä mitattujen todellisten pituuksien keskiarvoa vaan ideaalisen näytteen pituutta, joka on standardissa mainittu 100 mm.

$$R = \frac{432,1 \text{ N}}{100 \text{ mm}} = 4,321 \text{ N/mm} = 4,321 \text{ kN/m} \approx 4,32 \text{ kN/m}$$

Seuraavaksi lasketaan mitatuille maksimipuristusvoimille keskihajonta seuraavaa kaavaa (kaava 3) käyttäen

$$s_{F_{\max}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

jossa $s_{F_{\max}}$ on maksimipuristusvoimien keskihajonta, n on mittauksien lukumäärä, x on yksittäinen mittaus ja \bar{x} on mittausten keskiarvo.

Kaavaan 3 sijoitetaan mittaukset ja aiemmin laskettu maksimipuristusvoimien keskiarvo. Näin saadaan laskettua maksimipuristusvoimien keskihajonta.

$$s_{F_{\max}} = \sqrt{\frac{(442 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (422 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (474 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (430 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (424 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (451 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (415 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (418 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (424 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2 + (421 \text{ N} - 432,1 \text{ N})^2}{10}} \\ = 17,50114 \dots \text{ N}$$

Reunalitistyslujuuden keskihajonnan laskemiseksi on standardissa ISO 3037:2022 annettu seuraava kaava (kaava 4)

$$s_R = \frac{s_{F_{\max}}}{l}, \quad (4)$$

jossa s_R on reunalitistyslujuuden keskihajonta, $s_{F_{\max}}$ on maksimipuristusvoimien keskihajonta ja l on näytteen pituus.

Kaavaan 4 sijoitetaan laskettu maksimipuristusvoimien keskihajonta ja näytteen pituus.

$$s_R = \frac{17,50114 \dots N}{100 \text{ mm}} = 0,17501 \dots N/mm$$

$$= 0,17501 \dots kN/m \approx 0,18 kN/m$$

Seuraavalla kaavalla (kaava 5) voidaan laskea variaatiokerroin. Variaatiokerroin on hyödyllinen kun vertaillaan keskihajontaa laitteiden välillä

$$V = \frac{s}{\bar{X}}, \quad (5)$$

jossa V on variaatiokerroin, s on keskihajonta ja \bar{X} puristuslujuuksien keskiarvo.

Edellinen kaava 5 voidaan muuttaa seuraavaan helpommin ymmärrettävään muotoon ja laskea variaatiokerroin reunalitistyslujuudelle prosentteina

$$V_R = \frac{s_R}{R} \times 100 \%,$$

jossa V_R on variaatiokerroin reunalitistyslujuudelle, s_R on reunalitistyslujuuden keskihajonta ja R on reunalitistyslujuus. Huom. R on jo itsessään keskiarvo, joka on peräisin mitatuista puristusvoimista.

$$V = \frac{0,17501 \dots kN/m}{4,321 kN/m} \times 100 \% = 4,05025 \dots \% \approx 4,1 \%$$

Toistettavuus voidaan laskea käyttämällä kaavaa 6, joka on otettu standardista ISO 3035:2011

$$r = 1,96 \times \sqrt{2} \times s_{\text{within lab}}, \quad (6)$$

jossa r on toistettavuus ja $s_{\text{within lab}}$ on laboratorion sisäinen keskihajonta. Sijoitetaan arvot ja lasketaan toistettavuus.

$$r = 1,96 \times \sqrt{2} \times 0,17501 \dots kN/m = 0,48510 \dots kN/m \approx 0,49 kN/m$$

7.2 ECT yksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell)

Aloitetaan laskemalla maksimipuristusvoimien aritmeettinen keskiarvo, jota käytetään reunalitistyslujuuden laskemisessa.

$$\bar{F}_{max} = 455,921 \text{ N}$$

Seuraavaksi lasketaan reunalitistyslujuus.

$$R = 4,55921 \text{ kN/m} \approx 4,56 \text{ kN/m}$$

Seuraavaksi lasketaan maksimipuristusvoimien keskihajonta.

$$s_{F_{max}} = 9,42530 \dots \text{ N}$$

Sitten lasketaan reunalitistyslujuudelle keskihajonta.

$$s_R = 0,09425 \dots \text{ kN/m} \approx 0,09 \text{ kN/m}$$

Reunalitistyslujuuden jälkeen lasketaan variaatiokerroin reunalitistyslujuudelle.

$$V = 2,06731 \dots \% \approx 2,1 \%$$

Viimeisenä lasketaan toistettavuus.

$$r = 0,26125 \dots \text{ kN/m} \approx 0,26 \text{ kN/m}$$

7.3 ECT kaksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre)

Laskut suoritetaan samaan tapaan myös kaksiaaltoisille aaltopahveille. Laskeminen alkaa maksimipuristusvoimien aritmeettisen keskiarvon laskemisella.

$$\bar{F}_{\max} = 774,4 \text{ N}$$

Seuraavaksi voidaan laskea reunalitistyslujuus.

$$R = 7,744 \text{ kN/m} \approx 7,74 \text{ kN/m}$$

Keskihajonta maksimipuristusvoimille lasketaan seuraavaksi.

$$s_{F_{\max}} = 36,29380 \dots \text{ N}$$

Sitten lasketaan keskihajonta reunalitistyslujuudelle.

$$s_R = 0,36293 \dots \text{ kN/m} \approx 0,36 \text{ kN/m}$$

Sitten lasketaan variaatiokerroin reunalitistyslujuudelle.

$$V = 4,68669 \dots \% \approx 4,7 \%$$

Viimeiseksi lasketaan toistettavuus.

$$r = 1,00601 \dots \text{ kN/m} \approx 1,01 \text{ kN/m}$$

7.4 ECT kaksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell)

Laskeminen aloitetaan laskemalla maksimipuristusvoimien aritmeettinen keskiarvo.

$$\bar{F}_{\max} = 774,11 \text{ N}$$

Seuraavaksi lasketaan reunalitistyslujuus.

$$R = 7,7411 \text{ kN/mm} \approx 7,74 \text{ kN/mm}$$

Sitten lasketaan maksimipuristusvoimien keskihajonta.

$$s_{F_{\max}} = 12,01714 \dots N$$

Seuraavaksi lasketaan reunalitistyslujuudelle keskihajonta.

$$s_R = 0,12017 \dots kN/m \approx 0,12 kN/m$$

Sitten lasketaan variaatiokerroin reunalitistyslujuudelle.

$$V = 1,55238 \dots \% \approx 1,6 \%$$

Viimeisenä lasketaan toistettavuus.

$$r = 0,33309 \dots kN/m \approx 0,33 kN/m$$

7.5 FCT yksiaaltoisesta aaltopahvista (Lorentzen & Wettre)

Tasolitistyslujuuden ja sen keskihajonnan laskemiseksi tarvitsee ensin laskea maksimipuristusvoimien aritmeettinen keskiarvo.

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\max} &= \frac{2,20 kN + 3,25 kN + 2,08 kN + 2,20 kN + 1,76 kN + \\ &\quad 3,22 kN + 2,25 kN + 2,24 kN + 2,22 kN + 2,23 kN}{10} \\ &= 2,365 kN \end{aligned}$$

Sitten lasketaan maksimipuristusvoimille keskihajonta.

$$s_{F_{\max}} = \sqrt{\frac{(2,20 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (3,25 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,08 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,20 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (1,76 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (3,22 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,25 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,24 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,22 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2 + (2,23 \text{ kN} - 2,365 \text{ kN})^2}{10}}$$

$$= 0,45651 \dots \text{ kN} = 456,51396 \dots \text{ N}$$

Tasolitistyslujuus voidaan laskea seuraavalla standardissa ISO 3035:2011 annetulla kaavalla (kaava 7)

$$X = \frac{\bar{F}}{A} \times 10^6, \quad (7)$$

jossa X on tasolitistyslujuus, \bar{F} on maksimipuristusvoimien keskiarvo kilonewtoneissa ja A on pinta-ala neliömillimetreissä. Kaavan 7 loppuosa muuttaa kN/mm² kilopascaliksi (kN/m²).

$$X = \frac{2,365 \text{ kN}}{9993,28056 \dots \text{ mm}^2} \times 10^6 = 236,65902 \dots \text{ kPa} \approx 237 \text{ kPa}$$

Tasolitistyslujuuden jälkeen sen keskihajonta voidaan laskea seuraavanlaisella kaavalla, joka on muunnettu kaavasta 4 pinta-alalle sopivaan muotoon

$$s_x = \frac{s_{F_{\max}}}{A},$$

jossa s_x on tasolitistyslujuuden keskihajonta, $s_{F_{\max}}$ on maksimipuristusvoimien keskihajonta ja A on pinta-ala.

$$s_x = \frac{0,45651 \dots \text{ kN}}{9993,28056 \dots \text{ mm}^2} = 4,56820 \dots \times 10^{-5} \text{ kN/mm}^2$$

$$= 45,68209 \dots \text{ kPa} \approx 46 \text{ kPa}$$

Seuraavaksi lasketaan variaatiokerroin tasolitistyslujuudelle seuraavanlaisella kaavalla, joka on peräisin kaavasta 5

$$V = \frac{s_x}{X} \times 100 \%,$$

jossa V on variaatiokerroin tasolitistyslujuudelle, s_x on tasolitistyslujuuden keskihajonta ja X on tasolitistyslujuus.

$$\begin{aligned} V &= \frac{45,68209 \dots \text{kPa}}{236,65902 \dots \text{kPa}} \times 100 \% \\ &= 19,30291 \dots \% \approx 19,3 \% \end{aligned}$$

Viimeiseksi lasketaan toistettavuus.

$$\begin{aligned} r &= 1,96 \times \sqrt{2} \times 45,68209 \dots \text{kPa} \\ &= 126,62429 \dots \text{kPa} \approx 126,62 \text{ kPa} \end{aligned}$$

7.6 FCT yksiaaltoisesta aaltopahvista (ZwickRoell)

Tasolitistyslujuuden laskeminen pitää aloittaa laskemalla ensin maksimipuristusvoimien aritmeettinen keskiarvo.

$$\bar{F}_{\max} = 2,310615 \text{ kN}$$

Tämän jälkeen lasketaan maksimipuristusvoimien keskihajonta.

$$s_{F_{\max}} = 0,19510 \dots \text{kN}$$

Sitten lasketaan tasolitistyslujuus.

$$X = 231,21686 \dots \text{kPa} \approx 231 \text{ kPa}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea tasolitistyslujuudelle keskihajonta.

$$s_x = 19,52391 \dots \text{kPa} \approx 20 \text{ kPa}$$

Sitten voidaan laskea variaatiokerroin tasolitistyslujuudelle.

$$V = 8,44398 \dots \% \approx 8,4 \%$$

Viimeisenä lasketaan toistettavuus.

$$r = 54,11752 \dots \text{ kPa} \approx 54,12 \text{ kPa}$$

7.7 BCT kartonkikotelosta (Lorentzen & Wettre)

Laatikon puristuslujuus on sama asia kuin siitä mitattujen maksimipuristusvoimien keskiarvo. Tähän voidaan siis käyttää maksimipuristusvoimien aritmeettisen keskiarvon laskemiseen käytettävää kaavaa 1. Laatikon puristuslujuus voidaan laskea seuraavanlaisella kaavalla

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

jossa X on laatikon puristuslujuus, n on mittauksien lukumäärä ja x on yksittäinen mittaus.

Sijoittamalla arvot kaavaan voidaan laskea laatikon puristuslujuus X .

$$\begin{aligned} X &= \frac{168 N + 162 N + 167 N + 163 N + 165 N + 159 N + 163 N + 156 N + 162 N + 169 N}{5} \\ &= 163,4 N \approx 163 N \end{aligned}$$

Laatikon puristuslujuuden keskihajonnan laskemiseen voidaan käyttää kaavaa 3. Keskihajonta laatikon puristuslujuudelle lasketaan seuraavanlaisella kaavalla

$$s_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

jossa s_x on laatikon puristuslujuuden keskihajonta, n on mittauksien lukumäärä, x on yksittäinen mittaus ja \bar{x} on mittausten keskiarvo.

$$s_x = \sqrt{\frac{(168 N - 163,4 N)^2 + (162 N - 163,4 N)^2 + (167 N - 163,4 N)^2 + (163 N - 163,4 N)^2 + (165 N - 163,4 N)^2 + (159 N - 163,4 N)^2 + (163 N - 163,4 N)^2 + (156 N - 163,4 N)^2 + (162 N - 163,4 N)^2 + (169 N - 163,4 N)^2}{10}}$$

$$= 3,82622 \dots N \approx 3,8 N$$

Sitten lasketaan variaatiokerroin laatikon puristuslujuudelle.

$$V = \frac{3,82622 \dots N}{163,4 \text{ kPa}} \times 100 \%$$

$$= 2,34163 \dots \% \approx 2,3 \%$$

Viimeiseksi lasketaan toistettavuus.

$$r = 1,96 \times \sqrt{2} \times 3,82622 \dots N = 10,60575 \dots N \approx 10,61 N$$

7.8 BCT kartonkikotelosta (ZwickRoell)

Ensin lasketaan laatikon puristuslujuus maksimipuristusvoimien aritmeettisena keskiarvona.

$$X = 157,841 \dots N \approx 158 N$$

Seuraavaksi lasketaan laatikon puristuslujuudelle keskihajonta.

$$s_x = 5,40712 \dots N \approx 5,4 N$$

Tämän jälkeen lasketaan variaatiokerroin laatikon puristuslujuudelle.

$$V = 3,42567 \dots \% \approx 3,4 \%$$

Viimeiseksi lasketaan toistettavuus.

$$r = 14,98777 \dots N \approx 14,99 N$$

8 TULOKSET

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 -puristuslujuustesterin ulkoinen tarkkuus oli melko hyvällä tasolla. Tulokset olivat suunnilleen oikeellisia, kun sitä verrattiin ZwickRoell Z020:een.

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n ulkoista tarkkuutta voidaan tarkastella vertailemalla laitteilla suoritetuista mittauksista saatuja tuloksia keskenään. Taulukossa 2 on esitettyinä lasketut reuna- ja tasolitistyslujuudet sekä laatikon puristuslujuus yksiköineen keskihajonnalla ilmaistuna. Taulukon 2 tiedot on laskettu liitteiden 1, 2, 3 ja 4 tietojen perusteella Laskut-osiossa.

TAULUKKO 2. Puristuslujuuden tulokset keskihajonnalla ilmaistuna.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	ZwickRoell Z020
ECT (yksiaaltoinen aaltopahvi)	4,32 kN/m ± 0,18 kN/m	4,56 kN/m ± 0,09 kN/m
ECT (kaksiaaltoinen aaltopahvi)	7,74 kN/m ± 0,36 kN/m	7,74 kN/m ± 0,12 kN/m
FCT (yksiaaltoinen aaltopahvi)	237 kPa ± 46 kPa	231 kPa ± 20 kPa
BCT (taivekartonki)	163 N ± 3,8 N	158 N ± 5,4 N

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla päästiin kaksiaaltoisen aaltopahvin reunalitistyslujuutta mitatessa suureen oikeellisuuteen ja reunalitistyslujuus olikin pyöristämisen jälkeen samansuuruinen ZwickRoell Z020:n kanssa. Alhaisin oikeellisuus Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla oli yksiaaltoisen aaltopahvin reunalitistyslujuudessa.

Oikeellisuutta laitteiden välillä voidaan vertailla vertailemalla Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tuloksien eroja suhteutettuna ZwickRoell Z020:aan. Puristuslujuuksien erot on nähtävissä taulukossa 3. Taulukon 3 tiedot on laskettu liitteiden 1, 2, 3 ja 4 tietojen perusteella Laskut-osiossa.

TAULUKKO 3. Erot mitatuissa ECT-, FCT- ja BCT -tuloksissa ZwickRoell Z020:aan verrattuna.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	ZwickRoell Z020	Ero
ECT (yksiaaltainen aaltopahvi)	94,78 %	100 %	5,22 %
ECT (kaksiaaltainen aaltopahvi)	100,04 %	100 %	0,04 %
FCT (yksiaaltainen aaltopahvi)	102,35 %	100 %	2,35 %
BCT (taivekartonki)	103,52 %	100 %	3,52 %
Keskiarvo	100,17 %	100 %	2,78 %

Tasolitistyslujuudessa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tulokset erosivat ZwickRoell Z020:sta 2,35 % ja laatikon puristuslujuudessa 3,52 %. Reunaliitistyslujuus yksiaaltoisella aaltopahvilla erosi ZwickRoell Z020:sta 5,22 % ja kaksiaaltoisella tulos oli laitteiden välillä lähes samansuuruinen.

Kaikkien tuloksien välillä Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tulosten oikeellisuus erosi vain 2,78 % ZwickRoell Z020:sta. Tämä osoittaa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n kykenevän antamaan oikean suuruisia tuloksia.

Seuraavaksi on syytä vertailla Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n sisäistä tarkkuutta ZwickRoell Z020:aan. Taulukossa 4 on esitettyinä puristuslujuustulosten keskihajonnat ja varianssit. Taulukon 4 tiedot on laskettu liitteiden 1, 2, 3 ja 4 tietojen perusteella Laskut-osiossa.

TAULUKKO 4. Puristuslujuustulosten keskihajonta ja varianssi.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048		ZwickRoell Z020	
	Keskihajonta	Varianssi	Keskihajonta	Varianssi
ECT (yksiaaltainen aaltopahvi)	0,18 kN/m	4,1 %	0,09 kN/m	2,1 %
ECT (kaksiaaltoinen aaltopahvi)	0,36 kN/m	4,7 %	0,12 kN/m	1,6 %
FCT (yksiaaltainen aaltopahvi)	46 kPa	19,3 %	20 kPa	8,4 %
BCT (taivekartonki)	3,8 N	2,3 %	5,4 N	3,4 %

Vertailemalla laitteiden keskihajontaa ja varianssia nähdään, että Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 on tulosten toistotarkkuuden osalta epätarkempi kuin ZwickRoell Z020. Tuloksien keskihajonta oli Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla suurempaa, lukuun ottamatta laatikon puristuslujuutta, jossa keskihajonta oli pienempää kuin ZwickRoell Z020:lla.

Toistotarkkuutta laitteiden välillä voidaan vertailla tarkastelemalla taulukkoa 5. Taulukossa 5 on vertailtu puristuslujuuden tuloksien keskihajontaa suhteutettuna ZwickRoell Z020:aan. Taulukon 5 tiedot on laskettu liitteiden 1, 2, 3 ja 4 tietojen perusteella Laskut-osiossa.

Taulukko 5. Erot mitattujen ECT-, FCT- ja BCT -tuloksien keskihajonnassa ZwickRoell Z020:aan suhteutettuna.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048		ZwickRoell Z020	
	Keskihajonta	Ero	Keskihajonta	Ero
ECT (yksiaaltainen aaltopahvi)	0,18 kN/m	185,68 %	0,09 kN/m	100,00 %
ECT (kaksiaaltainen aaltopahvi)	0,36 kN/m	302,02 %	0,12 kN/m	100,00 %
FCT (yksiaaltainen aaltopahvi)	46 kPa	233,98 %	20 kPa	100,00 %
BCT (taivekartonki)	3,8 N	70,76 %	5,4 N	100,00 %
		Keskiarvo		Keskiarvo
		198,11 %		100 %

Taulukosta 5 huomataan, että kaikkien testien välillä Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n toistotarkkuus oli lähes kaksi kertaa huonompi verrattuna ZwickRoell Z020:aan. Huonompaa toistotarkkuutta ei kuitenkaan tule sekoittaa huonomman oikeellisuuden kanssa, joka oli Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla kuitenkin melko hyvällä tasolla.

Tulosten toistotarkkuutta voidaan tutkia myös keskihajonnasta lasketun toistettavuuden kautta. Toistettavuus antaa normaalijakautumaan pohjautuen 95 % varmuudella sen välin mihin tulokset sijoittuvat toistettaessa testi samoissa olosuhteissa. Tulokset toistettavuudelle näkyvät taulukossa 6. Taulukon 6 tiedot on laskettu liitteiden 1, 2, 3 ja 4 tietojen perusteella Laskut-osiossa.

TAULUKKO 6. Toistettavuudet.

	Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048	ZwickRoell Z020
	Toistettavuus	Toistettavuus
ECT (yksiaaltainen aaltopahvi)	0,49 kN/m	0,26 kN/m
ECT (kaksiaaltainen aaltopahvi)	1,01 kN/m	0,33 kN/m
FCT (yksiaaltainen aaltopahvi)	126,62 kPa	54,12 kPa
BCT (taivekartonki)	10,61 N	14,99 N

Toistettavuuksia tutkiessa voidaan huomata uudestaan se, että Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n toistotarkkuus ja sitä kautta sisäinen tarkkuus on huonompi verrattuna ZwickRoell Z020:aan.

ECT -tuloksien toistettavuuden tasoja voidaan vertailla standardin EN ISO 3037:2022 ilmoittamien toistettavuuksien kanssa. Standardin ilmoittamat toistettavuudet on esitetty taulukossa 7. On kuitenkin otettava huomioon, että tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia erilaisten materiaalien vuoksi, mutta niillä voi silti arvioida tutkimuksen onnistumista.

TAULUKKO 7. EN ISO 3037:2022 Table B.1 (CEPI-CTS)

Material	Number of laboratories	Mean value (kN/m)	Standard deviation (kN/m)	Repeatability limit (kN/M)
Pre-cut sample level 1	14	6,84	0,124	<u>0,344</u>
Pre-cut sample level 2	15	11,5	0,30	<u>0,83</u>
Lab-cut sample level 1	14	6,40	0,147	<u>0,407</u>
Lab-cut sample level 2	13	10,3	0,23	<u>0,64</u>

FCT -tuloksien toistettavuuksia voidaan vastaavasti tarkastella standardin EN ISO 3035:2011 ilmoittamien toistettavuuksien kanssa. Standardin ilmoittamat toistettavuudet on esitetty taulukossa 8. Samalla tapaa ECT -standardin kanssa, eivät myöskään FCT -tulokset ole täysin vertailukelpoisia, tämän tutkimuksen ja FCT -standardin käyttämien materiaalien erojen vuoksi.

TAULUKKO 8. EN ISO 3035:2011 Table A.1 (TAPPI-CTS)

Material	Number of laboratories	Mean value (kPa)	Standard deviation (kPa)	Repeatability limit (kPa)
42-26-33	7	208	14	<u>38</u>
52-26-52	7	215	11	<u>30</u>
42-33-42	7	271	15	<u>42</u>

ECT ja FCT toistettavuuksissa on päästy tässä tutkimuksessa yleisesti ottaen hyvälle tasolle, kun tuloksia verrataan vastaavien standardien ilmoittamiin viitearvoihin menetelmällä odotettavissa olevasta toistettavuudesta (Standardit EN ISO 3037:2022, 12, Table B.1 & EN ISO 3035:2011, 6, Table A.1). BCT standardissa EN ISO 12048:1994 ei oltu mainittu samanlaisia viitearvoja, mikä johtunee erilaisten laatikoiden kokoeroista ja siitä johtuvasta liian suuresta toistettavuuden vaihtelusta, mikä aiheuttaa vertailukelvottomuutta.

Yhteenvetona toistettavuuksien pohjalta voidaan sanoa, että tutkimus onnistui hyvin, sillä esimerkiksi ECT-näytteet valmisteltiin käsin skalpellilla, billerud-tyyppisen leikkurin puuttuessa paperilaboratoriosta. Tämän tutkimuksen toistettavuudet ovat standardien toistettavuuteen verrattuna vähintään vertailukelpoisia ja osin myös alittavat standardien esittämät toistettavuudet, ollen niitä paremmalla tasolla.

Lisää tutkimusten välisiä toistettavuuksia vertaillessa huomataan, että heikoin tulos niissä tuli Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla sillä tehdyissä FCT-mittauksissa. Tulos on mielenkiintoinen ja koska FCT-näytteiden valmistelussa käytettiin mittatarkkaa neliömassaleikkuria, se todennäköisesti viittaa FCT-näytteisiin käytettyyn mittausväliin 0-5 kN, jossa laitteen pienin erottelukyky oli 10 N normaalin 1 N sijasta.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n tarkkuus todistettiin kokeellisesti huomommaksi verrattuna ZwickRoell Z020:aan. Tarkkuus todettiin hieman huomommaksi oikeellisuuden osalta ja merkittävästi huomommaksi toistotarkkuuden osalta. Heikoin tulos oikeellisuuden kannalta Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla tuli yksiaaltoisen aaltopahvin reunalitistyslujuutta mitattaessa.

Laitteelle on kuitenkin vielä paljon sopivia käyttötarkoituksia sen antamien tulosten hieman huomommasta oikeellisuudesta huolimatta. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n antamat tulokset ovat kaikesta huolimatta oikean suuruisia ja suurimmalta osin myös oikeellisia. Laite on tämän lisäksi käytettävyydeltään erittäin helppokäyttöinen ja robusti.

Tulosten tarkkuus kelpaa todennäköisesti erinomaisesti ainakin paperilaboratoriossa suoritettaviin harjoitustöihin, sekä muihin testeihin, jossa oikeellisuutta on mahdollista parantaa entisestään käyttämällä suurempaa koejoukkoa.

Mainitsemisen arvoisia on myös sillä saadut laatikon puristuslujuuden tulokset, jossa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:n toistotarkkuus todettiin yllättäen ZwickRoell Z020:aa täsmällisemmäksi. Testissä oikeellisuus oli myös erinomaisella tasolla ja Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 todettiin tässä tapauksessa tarkemmaksi laitteistoksi.

10 MITTAUSVIRHEIDEN SYYT JA VIRHEARVIOINTI

10.1 Satunnainen virhe

Satunnainen virhe kasvaa silloin kun mittalaitteella saatujen mittausten keskihajonta kasvaa. Oikein kalibroitu Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 antaa ohjekirjan mukaan maksimivoiman alle 1 % virheellä välillä 500 N – 5000 N. ZwickRoell Z020:n Xforce P -voimasensorin virheeksi on ilmoitettu yli 80 N voimalla alle 1 % ja yli 400 N voimalla alle 0,5 %.

Vastoin yleistä luuloa, mittalaitteen antaessa erittäin oikeellisia tuloksia, satunnaisen virheen osuus voi olla suuri. Tämä ilmiö voidaan selittää mittauslaitteen erottelukyvyn pienenemisenä. Anturi, joka kykenee mittaamaan erittäin suuria voimia, ei ole kaikissa tapauksissa ideaalinen pienten mitta-asteikon alapäässä olevien voimien mittaamiseen, sillä sen erottelukyky ei välttämättä riitä havaitsemaan pieniä voimia suurella tarkkuudella. (Järvinen & Keinänen 2014, 95)

10.2 Systemaattinen virhe

Systemaattinen virhe vaikuttaa heikentämällä tuloksien oikeellisuutta. Systemaattiseen virheeseen voi vaikuttaa kalibroimalla mittalaitteen, mikäli se on mahdollista. Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 kalibrointi tarkistettiin ennen jokaista testikertaa. ZwickRoell Z020 oli myös kalibroitu. (Järvinen & Keinänen 2014, 95)

10.3 Karkea virhe

Karkeaa virhettä syntyy silloin kun laitteen käyttäjä tekee esimerkiksi tuloksien käsittelyn aikana desimaalivirheitä, merkitsee havaitun lukeman epähuomiossa väärin tai käyttää pyöristettyjä välituloksia laskuissa. (Järvinen & Keinänen 2014, 95)

Karkeaa virhettä on eliminoitu siten, että lukemat on tarkistettu kertaalleen kirjaimisen jälkeen. Laskuja laskiessa on käytetty aina tarkkoja, pyöristämättömiä välituloksia — aina taulukoihin päätyneisiin tuloksiin saakka. Desimaalivirheitä ei ole havaittu ja niiden sattuessa ne olisi ollut helppo huomata epäilyttävän suurista tai pienistä tuloksista.

Karkeaa virhettä on myös näytteenoton epäonnistuminen. Esimerkiksi nurjahtanut tai kääntynyt näyte voi vaikuttaa merkittävästi tulkintaan ECT-tyyppisen näytteen puristuslujuudesta. (Järvinen & Keinänen 2014, 95)

Nurjahduksen tai kääntymisen tapahtuessa, kyseistä näytettä ei ole otettu mukaan koejoukkoon, vaan näytteenotto on uusittu uudella näytteellä.

10.4 Näytteen valmistelu

Reunalitistyslujuusnäytteet on leikattu viivainta pitkin skalpellilla pitäen terä suorakulmassa leikattavaan pintaan nähden. Reunat on tarkistettu valoa vasten irtokuitujen varalta ja skalpellin terää on vaihdettu 20 näytteen leikkaamisen välillä.

Reunalitistyslujuusnäytteiden pituuden mittaukseen on käytetty mikrometriä, jonka mittavälin pienin asteikko on 0,05 mm. Skalpellilla leikaten ja mikrometrillä tarkastaen päästiin suurimmalta osin ECT-standardin edellyttämiin tarkkuuksiin. Valitettavasti TAMK:n paperilaboratoriossa ei ollut billerud-tyyppistä leikkuria saatavilla reunalitistyslujuusnäytteiden valmistelua varten.

Tasolitistyslujuus näytteet on leikattu mittatarkasti neliömassaleikkurilla. Laatikon puristuslujuusnäytteet taiteltiin varovasti kasaan varoen aiheuttamasta laatikon sivuille minkäänlaista painauma.

10.5 Ympäristön virhe

Ympäristön lämpötila ja kosteus voi vaikuttaa huomattavasti paperin, kartongin ja aaltopahvin ominaisuuksiin. Lämpötilan ja kosteuden aiheuttamaa vaihtelua paperituotteiden lujuusarvoihin pyritään estämään suorittamalla testit vakio-olosuhteissa.

Mittaukset suoritettu standardien ISO 187:2022 ja ISO 2233:2000 mukaisissa vakio-olosuhteissa Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratorion vakiokosteushuoneessa. ECT- ja FCT-näytteet on ilmastoitu standardin 187:2022 mukaisesti ja BCT-näytteet standardin ISO 2233:2000 mukaisesti.

Lämpötila ja suhteellinen kosteus on merkitty jokaisen mittaussarjan kohdalle mitauspöytäkirjaan (Liitteet 1, 2, 3 ja 4).

11 POHDINTA

Mittausten suoritus sujui suurilta osin hyvin ja isoja ongelmia ei tullut vastaan. Opinnäytetyössä todettiin Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 jonkin verran epätarkemmaksi kuin ZwickRoell Z020. Lisäksi epätarkkuudet mitattiin ja esitettiin tuloksissa.

Johtopäätös huonommasta tarkkuudesta ei kuitenkaan tarkoita, että Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 ei olisi käytettävissä esimerkiksi joihinkin harjoitustöihin, sillä se ei antanut suoranaisesti vääriä, vaan vain hieman epätarkempia tuloksia. Tästä syystä alussa asetettu tavoite laitteen käyttökelpoisuuden määrittelystä täyttyi.

Työssä vahvistui oletukset ZwickRoell Z020:n suuremmasta tarkkuudesta, mutta hieman yllättävästi Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla saavutettiin parempi tarkkuus laatikon puristuslujuutta mitatessa. Lisäksi kaksiaaltoista aaltopahvia mitattaessa Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048 antoi tulosten oikeellisuuden kannalta yhtä tarkan tuloksen kuin ZwickRoell Z020.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lle löytyy vielä käyttötarkoituksia Tampereen ammattikorkeakoulun paperilaboratoriossa. Laite antaa huonommasta toistotarkkuudestaan huolimatta parhaimmillaan hyvin oikeellisia tuloksia.

Standardien mukaisien näytekokojen käyttö voi rajoittaa laitteella mitattavien materiaalien valintaa. Esimerkiksi betonin tai muiden kovin vahvojen materiaalien puristuslujuuksien mittaaminen voi olla vaikeaa ylikuorimittamatta laitteen voimakkenoa, joka kykenee tuottamaan enintään 5 kN puristavan voiman.

Lorentzen & Wettre Crush Tester SE 048:lla testattavat materiaalit eivät siis rajoitu vain aaltopahviin vaan laitteella voisi mitata puristuslujuutta ainakin esimerkiksi styroksista ja kipsistä.

LÄHTEET

EN ISO 12048:2000. Packaging – Complete, filled transport packages – Compression and stacking tests using a compression tester. Viitattu 12.3.2023.

EN ISO 187:2022. Paper, board and pulps – Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples. Viitattu 4.4.2023.

EN ISO 2233:2000. Packaging. Complete, filled transport packages and unit loads. Conditioning for testing. Viitattu 23.4.2023.

EN ISO 3035:2011. Corrugated fibreboard – Determination of flat crush resistance. Viitattu 12.3.2023.

EN ISO 3037:2022. Corrugated fibreboard - Determination of edgewise crush resistance (non-waxed edge method). European Committee for Standardization. Viitattu 12.3.2023.

Järvi-Kääriäinen, T. & Ollila, M. 2007. Toimiva pakkaus. Pakkausteknologia-PTR. Viitattu 14.11.2022.

Järvinen, M & Keinänen, T. 2014. Mittaustekniikka. Sanoma Pro Oy. Viitattu 15.4.2023.

Kalajoki, M. n.d. Aikamoinen pakkaus!. Verkkosivu. Viitattu 24.11.2022. <https://www.storaensometsa.fi/aikamoinen-pakkaus/>

Karhuketo, H., Seppälä, J., Törn, T., & Viluksela, P. 2004. Kemiallinen metsäteollisuus 3. Opetushallitus. Viitattu 24.11.2022.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Aallotuskartonki kartonkilajina. Viitattu 2.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Aaltopahvi. Viitattu 25.2.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Jäykkyys. Viitattu 2.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Massaliimaus. Viitattu 3.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Puristuslujuus. Viitattu 2.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

KnowPap versio 24.0. 2023. AEL / Prowledge Oy. Yleistä paperin painatuksesta. Viitattu 2.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

L&W crush tester operating instructions. n.d. Käyttöopas. Viitattu 19.1.2023.

Urbanik, T.J. 2001. Effect of corrugated flute shape on fibreboard edgewise crush strength and bending stiffness. Journal of Pulp and Paper Science. Viitattu 5.4.2023.

ZwickRoell Group. n.d. Pre-owned Z020 AllroundLine, 20 kN. Verkkosivu. Viitattu 11.1.2023. <https://www.zwickroell.com/products/pre-owned-market/pre-owned-z020-allroundline-20-kn/>

n.d. Mittaustulosten käsittely. Aalto-yliopisto. Viitattu 12.3.2023. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/884063/mod_resource/content/1/AloitusMatsku.pdf

n.d. Menetelmän tarkkuus. Kemian seurat. Viitattu 9.4.2023. <https://kemiaanseurat.fi/finntesting/wp-content/uploads/2014/03/Menetelm%C3%A4n-tarkkuus.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Mittauspöytäkirja (ECT)

Reunaltistyslujuus												
Tampere, 6.2.2023. Skalpelli. Sytönopeus 12,5 mm/min. 2 aaltoinen aaltopahvi, C-aalto. 500 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastoituu 3 päivää. T=23,2 °C ja RH=49,9%. Sensitiivty 10% ja threshold 0.												
	l (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	nurjattiko	kääntyykö				
	1	99,9	24,9	3,8	1,208	1,0	442	ei	ei			
	2	100,0	25,0	3,8	1,225	0,9	422	ei	ei			
	3	99,9	25,1	3,8	1,245	0,6	474	ei	ei			
	4	99,5	25,1	3,8	1,232	0,6	430	ei	ei			
	5	99,5	25,0	3,8	1,206	0,8	424	ei	ei			
	6	99,5	25,1	3,9	1,223	0,6	451	ei	ei			
	7	100,0	25,0	3,8	1,242	1,9	415	ei	ei			
	8	100,0	25,1	3,8	1,242	2,1	418	ei	ei			
	9	100,0	25,0	3,8	1,244	0,7	424	ei	ei			
	10	100,0	25,0	3,8	1,237	2,0	421	ei	ei			
	ka	99,83	25,03	3,81	1,23040	1,12	432,10					
Tampere, 6.2.2023. Skalpelli. Sytönopeus 12,5 mm/min. 2 aaltoinen aaltopahvi, BC-aalto. 770 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastoituu 3 päivää. T=23,2 °C & RH=49,9%. Sensitiivty 10% ja threshold 0.												
	l (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	nurjattiko	kääntyykö				
	1	99,9	24,9	6,1	1,929	2,4	743	ei	ei			
	2	100,1	25,1	6,1	1,940	1,1	781	ei	ei			
	3	100,1	25,0	6,2	1,945	0,9	794	ei	ei			
	4	100,3	24,8	6,1	1,879	1,6	804	ei	ei			
	5	99,9	25,0	6,1	1,938	2,2	801	ei	ei			
	6	100,3	24,9	6,2	1,938	1,7	793	ei	ei			
	7	100,2	25,0	6,3	1,941	1,9	785	ei	ei			
	8	100,2	24,8	6,1	1,925	1,6	808	ei	ei			
	9	100,0	25,0	6,1	1,940	2,0	685	ei	ei			
	10	100,2	25,2	6,2	1,964	0,7	750	ei	ei			
	ka	100,12	24,97	6,15	1,93390	1,61	774,40					

Liite 2. Mittauspöytäkirja (ECT)

Reunallistussylijuus										
Tampere, 27.2.2023. Skalpelli. Syöttönopeus 12,5 mm/min. 1 aaltoinen aaltopahvi, C-aalto. 500 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastotettu 3 päivää. T=23,1 C & RH=49,8 %. 10 % sensitivity ja threshold 0.										
	I (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	nurjattiko	kääntyykö		
1	100,0	25,0	3,8	1,229	1,9	439,40	ei	ei		
2	100,0	25,0	3,8	1,235	2,0	456,70	ei	ei		
3	100,1	25,1	3,8	1,258	1,8	442,91	ei	ei		
4	100,1	25,0	3,8	1,243	2,0	461,70	ei	ei		
5	100,1	25,0	3,8	1,243	2,1	470,75	ei	ei		
6	100,0	25,0	3,8	1,233	2,0	457,56	ei	ei		
7	100,0	25,0	3,8	1,241	1,7	461,83	ei	ei		
8	99,9	25,0	3,8	1,240	2,7	450,05	ei	ei		
9	99,9	25,1	3,8	1,248	1,7	466,16	ei	ei		
10	100,0	24,9	3,8	1,218	1,9	452,05	ei	ei		
ka	100,01	25,01	3,80	1,23880	1,98	455,921				
Tampere, 27.2.2023. Skalpelli. Syöttönopeus 12,5 mm/min. 2 aaltoinen aaltopahvi, BC-aalto. 770 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastotettu 3 päivää. T=23,1 C & RH=49,8 %. 10 % sensitivity ja threshold 0.										
	I (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	nurjattiko	kääntyykö		
1	100,1	25,0	6,2	1,947	4,2	763,43	ei	ei		
2	100,0	25,0	6,2	1,904	3,4	760,91	ei	ei		
3	100,0	25,0	6,2	1,934	1,9	760,84	ei	ei		
4	99,9	25,1	6,2	1,969	3,0	771,61	ei	ei		
5	100,0	25,0	6,2	1,939	3,4	770,58	ei	ei		
6	100,1	25,0	6,2	1,922	3,7	782,82	ei	ei		
7	100,0	25,0	6,2	1,917	2,0	778,31	ei	ei		
8	100,0	25,0	6,2	1,937	2,7	764,79	ei	ei		
9	100,0	25,0	6,2	1,947	2,5	794,81	ei	ei		
10	99,9	25,1	6,2	1,936	2,3	792,90	ei	ei		
ka	100,00	25,02	6,20	1,93520	2,91	774,11				

Liite 3. Mittauspöytäkirja (FCT)











Tasoitteystulokset										
Tampere, 6.2.2023. Pyöröleikkuri. Sytönopeus 12,5 mm/min. 1 aaltokoinen aaltopahvi, C-aalto. 500 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastoitu 3 päivää. T=23,2 °C ja RH=49,9 %. Sensitivity 10 % ja threshold 0.										
	d (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	kääntytikö aallot				
L&W	1	113,0	3,7	4,941	2,20	ei				
	2	112,8	3,7	4,893	1,2	3,25	ei	uustitu tulos		
	3	112,5	3,8	4,944	0,4	2,08	ei			
	4	112,9	3,7	4,950	0,5	2,20	ei			
	5	112,6	3,8	4,937	0,3	1,76	ei			
	6	112,9	3,8	4,931	1,1	3,22	ei	uustitu tulos		
	7	112,4	3,8	4,905	0,3	2,25	ei			
	8	112,8	3,8	4,941	0,4	2,24	ei			
	9	112,7	3,8	4,940	0,6	2,22	ei			
	10	112,6	3,7	4,935	0,4	2,23	ei			
ka	112,72	3,76	4,93170	0,58	2,365					
Tampere, 6.2.2023. Pyöröleikkuri. Sytönopeus 12,5 mm/min. 1 aaltokoinen aaltopahvi, C-aalto. 500 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastoitu 3 päivää. T=23,2 °C ja RH=49,9 %. Sensitivity 10 % ja threshold 0.										
	d (mm)	b (mm)	m (g)	Δb (mm)	Fmax (N)	kääntytikö aallot				
ZR	1	112,7	3,7	4,936	0,3	2,424,11	ei			
	2	112,8	3,8	4,930	0,6	2141,71	ei			
	3	112,7	3,6	4,921	0,4	2233,82	ei			
	4	112,7	3,9	4,918	0,4	2050,18	ei			
	5	112,7	3,8	4,933	0,5	2463,47	ei			
	6	112,9	3,8	4,928	0,5	2430,41	ei			
	7	112,7	3,8	4,897	0,6	2414,08	ei			
	8	112,7	3,9	4,923	0,4	2599,04	ei			
	9	113,0	3,9	4,924	0,4	1954,48	ei			
	10	112,9	3,8	4,930	0,4	2394,85	ei			
ka	112,78	3,80	4,92400	0,45	2310,615					

Liite 4. Mittauspöytäkirja (BCT)

Laatikon puristuslujuus										sisätkö: 0 kg	
Tampere, 15.3.2023. Syöttönopeus 10,0 mm/min. Taivekarlonki. 280 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastettu 3 päivää. T=23,2 °C ja RH=49,8 %. Sensitivity 10 % ja threshold 0.											
	l (mm)	w (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δh (mm)	Fmax (N)				
1	49,5	50,3	50,6	425,4	5,599	1,0	168				
2	49,7	50,5	50,2	419,2	5,597	1,1	162				
3	49,5	50,4	50,6	410,1	5,556	1,0	167				
4	49,6	50,6	50,3	414,8	5,604	1,1	163				
5	49,6	50,3	50,7	421,6	5,602	1,0	165				
L&W											
6	49,5	50,6	50,2	430,1	5,626	1,1	159				
7	49,6	50,5	50,8	430,1	5,613	0,8	163				
8	49,6	50,6	50,7	427,2	5,578	1,2	156				
9	49,5	50,3	50,6	430,0	5,588	1,7	162				
10	49,9	50,8	50,2	422,9	5,600	0,7	169				
ka	49,60	50,49	50,49	423,14	5,59630	1,07	163,40				
Tampere, 15.3.2023. Syöttönopeus 10,0 mm/min. Taivekarlonki. 280 g/m ² . Ei testattu painettuja alueita. Ilmastettu 3 päivää. T=23,2 °C ja RH=49,8 %. Sensitivity 10 % ja threshold 0.											
	l (mm)	w (mm)	h (mm)	b (mm)	m (g)	Δh (mm)	Fmax (N)				
1	49,6	50,3	50,2	422,4	5,611	1,0	167,55				
2	49,7	50,1	50,5	422,1	5,587	1,1	159,03				
3	49,6	50,3	50,8	419,4	5,567	1,0	162,63				
4	49,8	50,2	50,5	419,6	5,569	1,0	157,89				
5	49,6	50,2	50,2	424,2	5,594	0,8	163,98				
ZR											
6	49,6	50,4	50,5	431,7	5,608	1,5	155,34	uusittu tulos			
7	49,8	50,4	50,8	423,2	5,624	0,8	151,02				
8	49,6	50,5	50,5	422,9	5,575	0,6	150,40				
9	49,9	50,1	50,0	421,4	5,582	0,5	158,01				
10	49,8	50,3	50,2	426,4	5,632	0,4	152,56				
ka	49,70	50,28	50,42	423,33	5,59490	0,87	157,841				

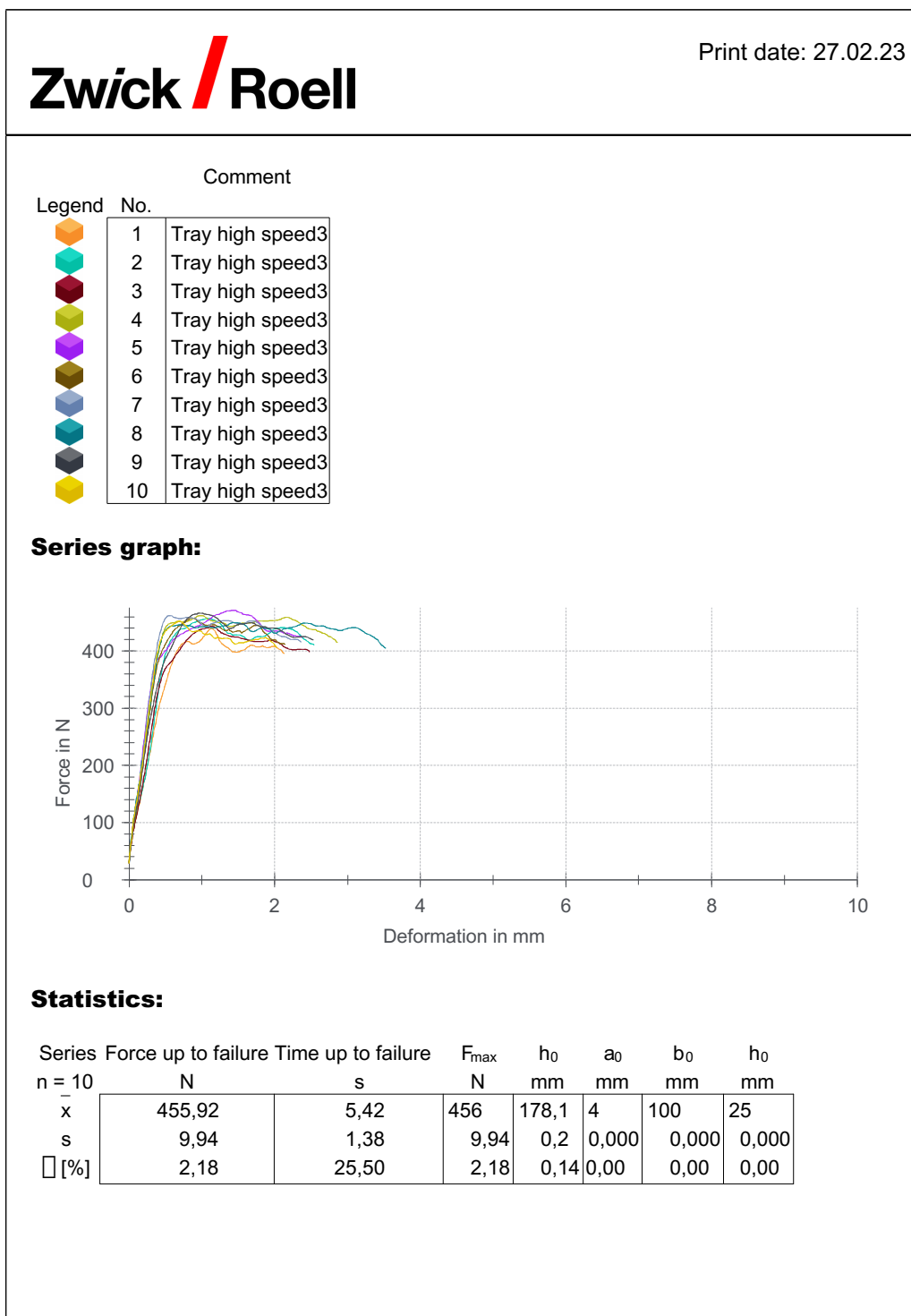
Liite 5. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)

1 (4)

Zwick / Roell		Print date: 27.02.23							
Test report									
Customer	:								
Job no.	:								
Test standard	:	DIN EN ISO 3037							
Type and designation	:								
Material	:								
Pre-treatment	:								
Tester	:								
Notes	:								
Type of packing	:								
Reinforcement elements	:								
Padding material	:								
Transportation lock	:								
Packaging	:								
Nett mass of the packaging	:								
Gross mass of the packaging	:								
Position of the packaging	:								
Position of the measuring points	:								
Machine data	:								
Test method	:	Compression test							
Pre-load	:	35 N							
Point of load application for creep	:	4000 N							
Hold time for creep	:	10 s							
Test results:									
		Judgment	Force up to failure	Time up to failure	F _{max}	h ₀	a ₀	b ₀	h ₀
Legend	No.		N	s	N	mm	mm	mm	mm
	1	n.o.k.	439,40	5,86	439	178,0	4	100	25
	2	n.o.k.	456,70	5,77	457	178,2	4	100	25
	3	n.o.k.	442,91	5,97	443	178,4	4	100	25
	4	n.o.k.	461,70	5,30	462	178,2	4	100	25
	5	n.o.k.	470,75	7,37	471	178,0	4	100	25
	6	n.o.k.	457,66	4,62	458	178,1	4	100	25
	7	n.o.k.	461,83	3,08	462	178,2	4	100	25
	8	n.o.k.	450,05	7,38	450	178,2	4	100	25
	9	n.o.k.	466,16	5,08	466	178,6	4	100	25
	10	n.o.k.	452,05	3,78	452	177,6	4	100	25











Liite 6. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)

2 (4)



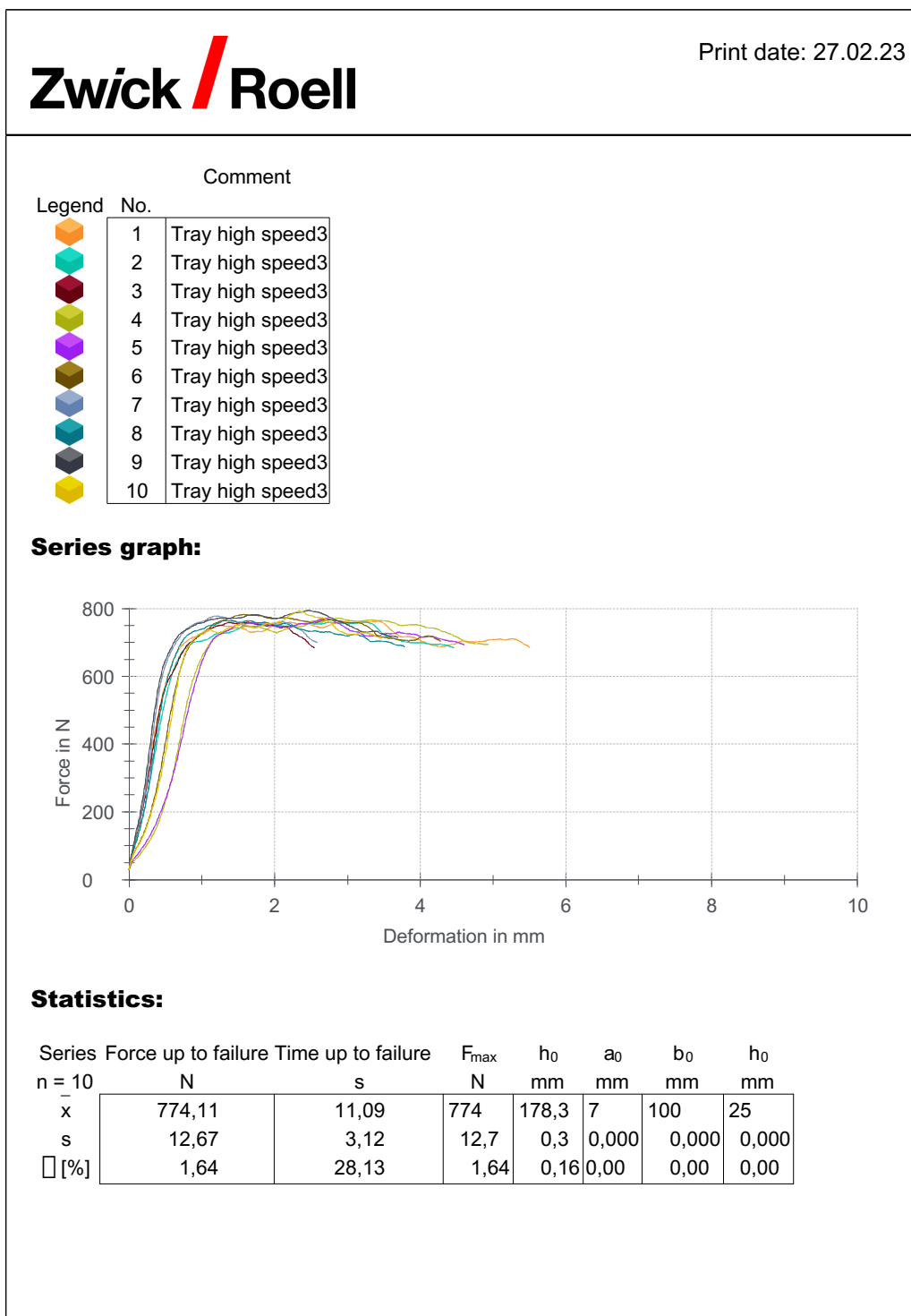
Liite 7. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)

3 (4)

Zwick / Roell		Print date: 27.02.23							
Test report									
Customer	:								
Job no.	:								
Test standard	:	DIN EN ISO 3037							
Type and designation	:								
Material	:								
Pre-treatment	:								
Tester	:								
Notes	:								
Type of packing	:								
Reinforcement elements	:								
Padding material	:								
Transportation lock	:								
Packaging	:								
Nett mass of the packaging	:								
Gross mass of the packaging	:								
Position of the packaging	:								
Position of the measuring points	:								
Machine data	:								
Test method	:	Compression test							
Pre-load	:	35 N							
Point of load application for creep	:	4000 N							
Hold time for creep	:	10 s							
Test results:									
		Judgment	Force up to failure	Time up to failure	F _{max}	h ₀	a ₀	b ₀	h ₀
Legend	No.		N	s	N	mm	mm	mm	mm
	1	n.o.k.	763,43	14,98	763	178,3	7	100	25
	2	n.o.k.	760,91	13,70	761	178,1	7	100	25
	3	n.o.k.	760,84	8,30	761	178,1	7	100	25
	4	n.o.k.	771,61	14,23	772	179,1	7	100	25
	5	n.o.k.	770,68	13,33	771	178,4	7	100	25
	6	n.o.k.	782,82	8,00	783	178,1	7	100	25
	7	n.o.k.	778,31	6,20	778	178,2	7	100	25
	8	n.o.k.	764,79	8,28	765	178,3	7	100	25
	9	n.o.k.	794,81	12,23	795	178,3	7	100	25
	10	n.o.k.	792,90	11,64	793	178,6	7	100	25











Liite 8. ECT testitulokset (ZwickRoell Z020)

4 (4)



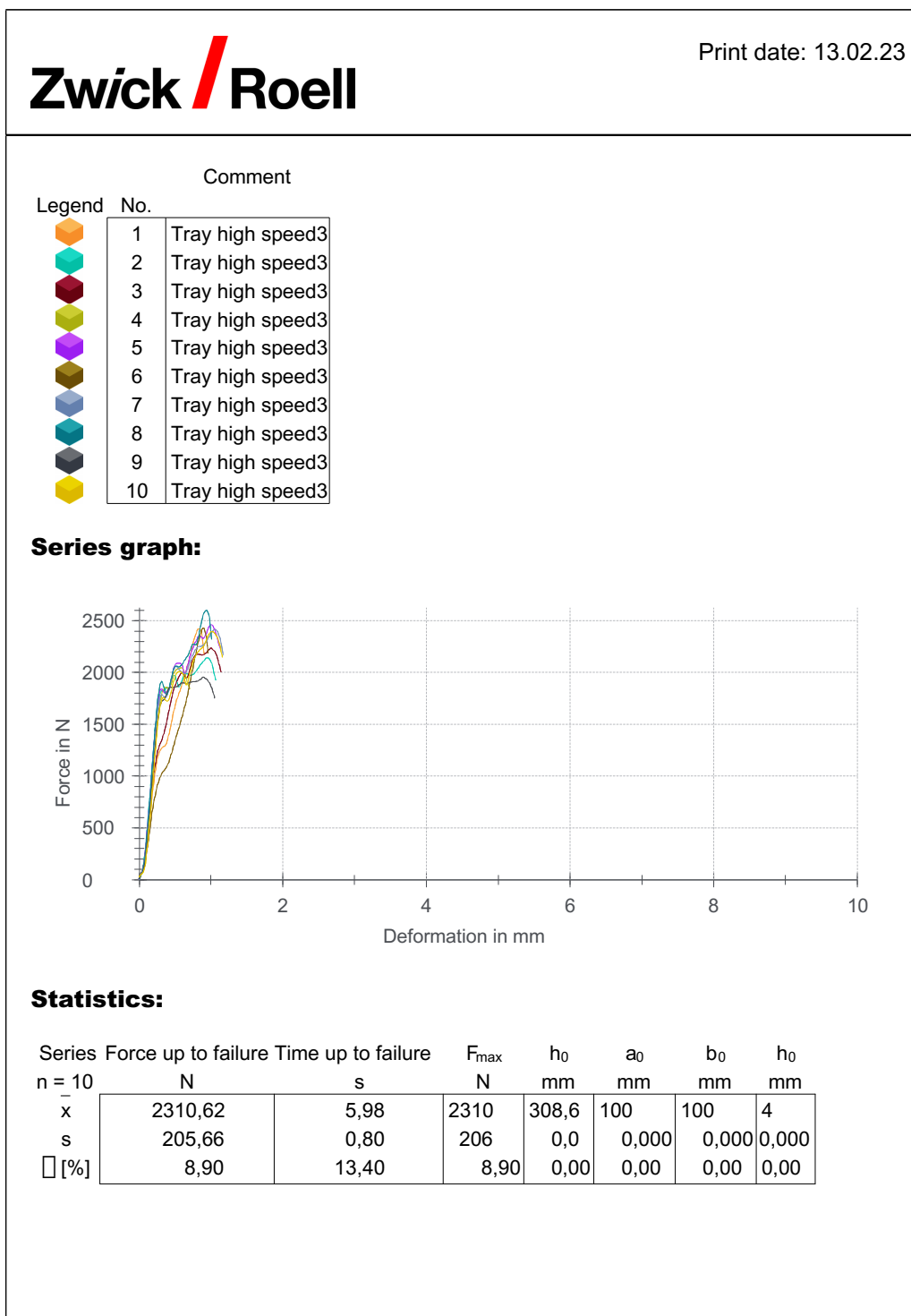
Liite 9. FCT testitulokset (ZwickRoell Z020)

1 (2)

Zwick / Roell		Print date: 13.02.23							
Test report									
Customer	:								
Job no.	:								
Test standard	:	DIN EN ISO 3035							
Type and designation	:								
Material	:								
Pre-treatment	:								
Tester	:								
Notes	:								
Type of packing	:								
Reinforcement elements	:								
Padding material	:								
Transportation lock	:								
Packaging	:								
Nett mass of the packaging	:								
Gross mass of the packaging	:								
Position of the packaging	:								
Position of the measuring points	:								
Machine data	:								
Test method	:	Compression test							
Pre-load	:	10 N							
Point of load application for creep	:	4000 N							
Hold time for creep	:	10 s							
Test results:									
		Judgment	Force up to failure	Time up to failure	F _{max}	h ₀	a ₀	b ₀	h ₀
Legend	No.		N	s	N	mm	mm	mm	mm
	1	n.o.k.	2424,11	5,51	2420	308,6	100	100	4
	2	n.o.k.	2141,71	6,16	2140	308,6	100	100	4
	3	n.o.k.	2233,82	6,46	2230	308,6	100	100	4
	4	n.o.k.	2050,18	4,00	2050	308,6	100	100	4
	5	n.o.k.	2463,47	6,50	2460	308,6	100	100	4
	6	n.o.k.	2430,41	5,81	2430	308,6	100	100	4
	7	n.o.k.	2414,08	6,80	2410	308,6	100	100	4
	8	n.o.k.	2599,04	6,06	2600	308,6	100	100	4
	9	n.o.k.	1954,48	5,89	1950	308,6	100	100	4
	10	n.o.k.	2394,85	6,60	2390	308,6	100	100	4











Liite 10. FCT testitulokset (ZwickRoell Z020)

2 (2)



Liite 11. BCT testitulokset (ZwickRoell Z020)

1 (2)

Zwick / Roell		Print date: 15.03.23							
Test report									
Customer	:								
Job no.	:								
Test standard	:	DIN EN ISO 12048							
Type and designation	:								
Material	:								
Pre-treatment	:								
Tester	:								
Notes	:								
Type of packing	:								
Reinforcement elements	:								
Padding material	:								
Transportation lock	:								
Packaging	:								
Nett mass of the packaging	:								
Gross mass of the packaging	:								
Position of the packaging	:								
Position of the measuring points	:								
Machine data	:								
Test method	:	Compression test							
Pre-load	:	35 N							
Point of load application for creep	:	4000 N							
Hold time for creep	:	10 s							
Test results:									
		Judgment	Force up to failure	Time up to failure	F _{max}	h ₀	a ₀	b ₀	h ₀
Legend	No.		N	s	N	mm	mm	mm	mm
	1	n.o.k.	167,55	9,38	168	203,6	50	50	50
	2	n.o.k.	159,03	9,70	159	203,5	50	50	50
	3	n.o.k.	162,63	8,93	163	203,6	50	50	50
	4	n.o.k.	157,89	9,33	158	203,6	50	50	50
	5	n.o.k.	163,98	9,21	164	203,5	50	50	50
	6	n.o.k.	155,34	34,42	155	203,6	50	50	50
	7	n.o.k.	151,02	21,05	151	203,6	50	50	50
	8	n.o.k.	150,40	10,08	150	203,6	50	50	50
	9	n.o.k.	158,01	13,22	158	203,5	50	50	50
	10	n.o.k.	152,56	13,54	153	203,5	50	50	50

Liite 12. BCT testitulokset (ZwickRoell Z020)

2 (2)

