LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT Kemia / Paperitekniikan Laboratorio
BJ10A0101 Kandityö ja Seminaari

# Kartongin taivutusjäykkyys ja sen määrittäminen

Tekijä: Tuomas Nevalainen 0279924
Tarkastajat: Professori Kaj Backfolk
Projektitutkija Mika Pulkkinen

Lappeenrannassa 15.2.2012

**Tiivistelmä**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma

*Tuomas Nevalainen*

**Kartongin taivutusjäykkyys ja sen määrittäminen**
Kandityö
2011

22 sivua, 14 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastajat: Professori Kaj Backfolk
Projektitutkija Mika Pulkkinen

Tämän työn tavoitteena oli käydä läpi kartongille tärkeän taivutusjäykkyyden vaikutusta eri kartonkilajeilla sekä perehtyä taivutusjäykkyyden määrittämiseen. Korkean taivutusjäykkyyden saavuttaminen vaatii kuitenkin kompromisseja niin kartongin muiden ominaisuuksien kanssa kuin tulevaisuuden suuntauksiakin silmälläpitäen.

Kartonkien kysyntä on ilmastonmuutoksen lisääntymisen myötä nousussa pakkauksien ekologisuuden myötä. Erityisesti nykypäivän kuluttaja arvostaa kierrätettävää pakkausta suuresti. Tämä mahdollistaa kartonkilaatujen jatkuvat kehityttämisen ja uusien innovaatioiden etsimisen metsäteollisuuden alalla.

Taivutusjäykkyys ilmiönä on sama kaikilla materiaaleilla, niin metalleilla, muoveilla kuin kartongillakin. Taivutusjäykkyys saadaan laskettua samalla yhtälöllä kaikille tasomaisille palkeille. Verrattaessa materiaaleja toisiinsa ominaisjäykkyyden avulla, materiaalin paino huomioon ottaen, kartonki saavuttaa jopa muovia tai alumiinia korkeamman jäykkyyden.

Taivutusjäykkyyttä mitataan yksikertaisesti kartonkia taivuttamalla. Taivutusjäykkyyden mittaamiseen käytetään yleisesti kahta, 2- ja 4-pistemenetelmä. Näistä 2-pistemenetelmä on yleisempi ja soveltuu useimmille kartonkilaaduille. Jäykkyyden kasvaessa suureksi 2-pistemenetelmä voi kuitenkin saada aikaan kartongin murtumista, jolloin taivutusjäykkyyttä ei voida mitata. 4-pistemenetelmää onkin suunnattu jäykille kartonkilaaduille ja sen yleisimmät käyttökohteen ovat aaltopahvin ja sen materiaalien kohdalla.

**Symboliluettelo**

| | |
|---|---|
| a | taivutuspisteen ja vastakappaleen välimatka, [m] |
| b | leveys, [m] |
| d | paperin tehollinen paksuus, [m] |
| E | kimmokerroin, [$N/m^2$] |
| F | voima, [N] |
| h | kerroksen paksuus, [m] |
| l | pituus, [m] |
| $S_b$ | taivutusjäykkyys, [Nm] |
| $S_{b,s}$ | taivutusjäykkyysindeksi, [$Nm^7/kg^3$] |
| w | paperin neliömassa, [$g/m^2$] |
| z | kartongin keskitaso |
| $z_0$ | neutraalitaso |
| $\rho$ | tiheys, [$kg/m^3$] |
| $\theta$ | taivutuskulma, [ °] |
| $\delta$ | taivutuspoikkeama, [m] |

**Sisällysluettelo**

1 Johdanto ..... 2
2 Kartonki ..... 2
2.1 Kartongin rakenne ..... 3
2.2 Kartonkilajit ..... 4
2.2.1 Taivekartonki ..... 5
2.2.2 Nestepakkauskartonki ..... 5
2.2.3 Valkaistu sellukartonki ..... 6
2.2.4 Lainerit ..... 6
3 Taivutusjäykkyys ..... 7
3.1 Taivutusjäykkyyden määrittäminen ..... 7
3.2 Monikerroskartongin taivutusjäykkyys ..... 10
3.3 Jäykkyyteen vaikuttavat prosessit ..... 13
4 Taivutusjäykkyyden mittaaminen ..... 14
4.1 Kaksipistemenetelmä ..... 15
4.2 Nelipistemenetelmä ..... 18
5 Yhteenveto ..... 19
Lähteet ..... 21

# 1 Johdanto

Taivutusjäykkyys on yksi tärkeimmistä kartongin ominaisuuksista. Erityisesti pakkauskartongeilta vaaditaan jäykkyyttä, joka takaa pakkausten kestävyyden aina kuluttajalle asti. Korkean jäykkyyden takaaminen vaatii kartongilta paljon ja on ristiriidassa metsäteollisuuden tulevaisuuden suuntausten kanssa. Paperi- ja kartonkilaatuja on pyritty valmistamaan kuitua säästämällä ja korvaamalla kuituja esimerkiksi täyteaineilla, mikä aiheuttaa ongelmia jäykkyyden takaamiseksi. Kartonkien kohdalla kuidun määrän vähentäminen tai korvaaminen muilla lisäaineilla onkin harvinaisempaa.

Ilmastonmuutoksen aikaansaama biotuotteiden suosion kasvu on kuitenkin kasvattanut kartonkipakkausten kysyntää suuresti niiden ekologisuuden takia ja muovia on alettu korvaamaan juuri kartonkipakkauksilla. Tämä tuo lisähaasteensa kartonkipakkauksia kehitettäessä, mutta takaa samalla mahdollisuuden uusille innovaatioille pakkauksien kohdalla.

Työn tarkoituksena onkin antaa yleiskuva taivutusjäykkyyden merkityksestä kartongeille. Työssä käydään läpi yleisimmät kartonkilajit, taivutusjäykkyyden merkitystä kartongeilla sekä taivutusjäykkyyden määrittämistä. Kartongeilla taivutusjäykkyyteen voidaan vaikuttaa monin eri tavoin ja parantaakseen tuotteen jäykkyyttä joudutaan samalla tekemään kompromisseja muiden ominaisuuksien kanssa.

# 2 Kartonki

Kartongilla tarkoitetaan joko yksi tai monikerroksista, hyvän jäykkyyden omaavaa paperin kaltaista tuotetta, jonka pääasiallinen käyttötarkoitus on erilaisissa pakkauksissa pakkausmateriaalina. Kartongilta vaaditaan siis lujuuden ja jäykkyyden lisäksi usein myös hyviä painettavuusominaisuuksia. Kartonkilajit voidaan karkeasti jakaa kolmeen pääryhmään: sisäpakkauskartongit, ulkopakkauskartongit ja erikoiskartongit. Kartonki eroaa paperista ennen kaikkea

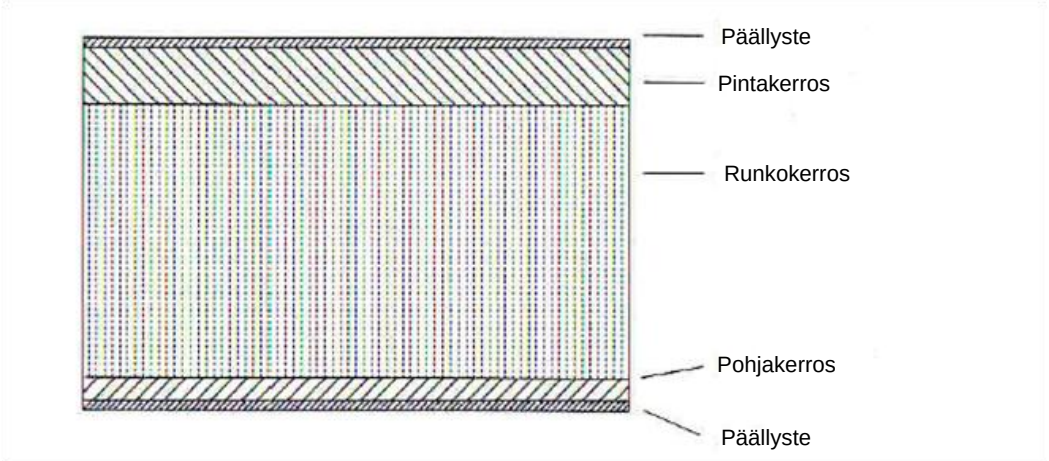
sen neliömassan ollessa normaalisti 150 g/m$^3$ aina 600 g/m$^3$, kun papereilla neliömassa on tyypillisesti 30–100 g/m$^3$. /1/

Kartonkien kysyntä pakkausmateriaalina on lisääntynyt ja lisännyt sen kysyntää ympäri maailmaa. Pakkausmateriaalina se on uusiutuvista luonnonmateriaaleista tehtyä ja antaa näin tuotteesta ympäristöystävällisen kuvan. Lisäksi pakkaukset ovat kevyitä verrattuna muovi ja alumiini pakkauksiin. Kartonkipakkaustuotteisiin (kuva 1) jokainen kuluttaja törmää päivittäin kaupassa käydessään. /1, 2/

Kuva 1. Kartonkipakkauksia normaalista arjesta/2/

## 2.1 Kartongin rakenne

Kartongit ovat useimmiten monikerroksisia (kuva 2), jolloin keskimmäisen kerroksen tehtävänä on taata vaadittavat lujuus ominaisuudet ja pintakerrosten hyvät paino-ominaisuudet, kuten sileys ja vaaleus. Tyypillisesti pakkauskartongit ovatkin kolmikerroksisia. Tällöin runko-osa on hallitsevin ja tekee noin 50–80 % koko kartongin neliöpainosta. Runkokerroksessa käytetään yleisesti korkean bulkin omaavaa mekaanista massaa, joka antaa kartongille vaadittavan paksuuden. Pintakerroksen neliöpaino on 40–60 g/m$^3$ ja pohjan 20–30 g/m$^3$. Pinta- ja pohjakerroksen raaka-aineena on yleisesti pitkäkuituinen sellu, joka takaa lujuuden ja tasaisen painopinnan. /1, 3/




Kuva 2. Tyypillinen kolmikerroskartongin rakenne /1/

Monikerroksisen rakenteen lisäksi kartongit ovat usein päällystettyjä, jolloin pinnanominaisuudet saadaan vastaamaan paremmin haluttuja ominaisuuksia. Kartongin päällystykseen käytetään sekä mineraalipäällystystä parantamaan painopintaa että barrier -päällystystä antamaan kartongille läpäisemättömyysominaisuuksia. Barrier -päällysteet ovat kartongeilla yleisiä, tunnetuin tällainen on jokaiselle suomalaiselle kuluttajalle tuttu nestepakkauskartonki eli esimerkiksi maitopurkit. Tällöin nestebarrier luodaan muovipäällystyksellä, jossa kartongin pinnalle lisätään ohut PE- eli polyeteenimuovifilmi. Muita tällaisia suoja päällysteitä ovat kaasubarrierit, jotka estävät hajujen ja makujen leviämisen ja pääsyn tuotteeseen. Tulevaisuuden innovaatioita ovat mm. älypaperit, joissa kartongin ja paperin pinnalle voidaan aikaansaada liikkuvaa tai ainakin muuttuvaa kuvaa. /1, 2/

## 2.2 Kartonkilajit

Kartongit voidaan karkeasti jakaa kuluttajapakkauskartonkeihin, kuljetuspakkauskartonkeihin ja erikoiskartonkeihin. Kuluttajapakkauskartonkeja näkee yleisesti kauppojen hyllyillä. Kuljetuspakkauskartongeista yleisin on laineri, josta valmistetaan esimerkiksi aaltopahvia. Erikoiskartonkien kirjo on laaja. Erikoiskartongeiksi lasketaan esimerkiksi hylsykartonki ja kirjojen kansissa käytettävät kartonki. Näissä tapauksissa kartongilta ei vaadita barrier-ominaisuuksia, eli kartongin ei tarvitse suojata tuotetta esimerkiksi kosteudelta, vaan niiden tehtävänä on jämäköittää tuotetta. /1, 3/

### 2.2.1 Taivekartonki

Taivekartongin tyypilliset käyttökohteet löytyvät pakkausmateriaalina kosmetiikka-, lääke-, tupakka-, elintarvikepakkauksista. Taivekartongille on tyypillistä kolmikerroksinen rakenne, jossa runko on usein mekaanisesti valmistettua massaa ja pinta- sekä pohjakerros valkaistua sellua. Taivekartongilla pinta pigmenttipäällystetään joko yhteen tai kahteen kertaan käyttökohteesta riippuen hyvien paino-ominaisuuksien takaamiseksi. Taustapuoli voidaan käyttötarpeesta riippuen joko päällystää tai pintaliimata. /1, 3/

Painettavuuden lisäksi taivekartongilta vaaditaan hyviä lujuusominaisuuksia, kuten taivutusjäykkyys ja z-suuntainen lujuus. Koska kartongilta vaaditaan painatuksen kannalta tärkeää pinnan sileyttä ja samanaikaisesti hyviä lujuusominaisuuksia, ei pinnan muokkaamiseen voida käyttää kalanterointia. Taivekartonkikoneissa onkin tyypillisesti suuri jenkkisylinteri osana kuivatusosaa parantamassa pinnan sileyttä. Suuren halkaisijan ansiosta paperin viipymäaika sylinterin pinnalla pitenee, joka saa aikaan pinnan tasoittumista ja sulkee pinnan rakenteen. Tasainen ja tiivis pinta parantaa samalla päällystyksen tehokkuutta. /1, 3/

### 2.2.2 Nestepakkauskartonki

Nestepakkauskartongin rakenne eroaa taivekartongista lähinnä runkokerroksen materiaalin vuoksi. Runkokerroksessa käytetään joko sellua tai CTMP-massaa korkean bulkin takaamiseksi. Lisäksi nestepakkauskartonki pintaliimataan molemmin puolin ennen varsinaista muovipäällystystä. Nestepakkauskartongin valmistuksessa käytetään lähes aina pelkästään neitseellistä kuitua sen korkean hygieniatason vuoksi. /1/

Yleisimmän nestepakkaustuotteet ovat tiiliskiven muotoisia tai harjallisia mehu- ja maitopakkauksia. Nestepakkauskartonkien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat lujuus- ja barrier-ominaisuudet. Pakkauksen tulee suojata tuotetta aromeilta, kaasuilta, kosteudelta ja nesteiltä. Tällöin ainut riittävän suojan takaava barrier on muovipäällystys, esimerkiksi PE-filmillä. Muovipäällystys tehdään normaalisti kartongin molemmille puolille, jotta kylmäsäilytyksestä aiheutuva kosteus ei

aiheuta kartonkipakkauksen ulkopinnalle vahinkoa. Useasti barrier -ominaisuuksia parannetaan pitkäkestoisilla tuotteilla lisäämällä alumiinifolio tai erikoislakkaus osaksi päällystyskerrosta /1, 2, 4/

Nestepakkauskartongilta ei vaadita pinnan sileydeltä aivan yhtä paljon kuin taivekartongin kohdalla, vaikka kaikki tuotteet päätyvätkin painatukseen. Painatus tapahtuu vasta muovipäällystyksen jälkeen, jolloin muovifilmi tasaa pinnan. Myöskään kartongin taivutusjäykkyydellä ei ole niin suuria vaatimuksia, sillä molemminpuolinen muovipäällystys tukevoittaa kartonkia parantaen sen elastisuutta ja sitä kautta parantaa kartongin jäykkyyttä. /1, 4/

### 2.2.3 Valkaistu sellukartonki

Korkean vaaleuden omaavaa sellukartonkia käytetään erityisesti luksustuotteissa. Valkaistujen sellukartonkien käyttökohteet ovat pääosin samat kuin taivekartongilla, mutta useasti korkean hygieniatason vaativat tuotteet, kuten suklaa ja tupakka tuotteet, pakataan taivekartongin sijaan sellukartonkipakkauksiin haju ja makuhaittojen minimoimiseksi. /1, 2/

Valkaistu sellukartonki voidaan valmistaa joko yksikerros menetelmällä tai taivekartongin tavoin kolmesta eri kerroksesta. Sellukartonkien neliömassa vaihtelee 150 g/m3 aina 350 g/m3. Kun kartonki valmistetaan kokonaan kemiallisesta sellusta, lujuusominaisuudet eivät ole niin kriittinen tekijä kuin mekaanisesta massasta valmistetuilla kartongeilla. Valkaistulle sellukartongille on yleistä ennen pigmenttipäällystystä suoritettava kostuttava konekalanterointi. Tällöin kosteuden avulla pinta saadaan pehmennettyä ja kalanterointi tasoittaa pinnan tehokkaasti. Muovipäällystykseen ja sitä kautta elintarvikepakkauksiin päätyville tuotteille ei kuitenkaan tehdä pigmenttipäällystystä ja konekalanteroinnin yhteydessä kartonkia ei kostuteta. /1, 3/

### 2.2.4 Lainerit

Lainerit eli kaksikerroskartongit ovat pääosin ulkopakkauskartonkeja ja niitä käytetään mm. aaltopahvin pintakerroksissa. Lainerit koostuvat runkokerroksesta ja pintakerroksesta. Pintakerroksen tehtävänä on taata hyvä painopinta.

Pintakerros voi olla joko valkaistua tai valkaisematonta sellua käyttökohteesta riippuen, kun runkokerroksessa käytetään joko mekaanista massaa tai kierrätyskuitua. Lainerien neliömassa vaihtelee 100–350 g/m3 välillä. /1, 3/

Tärkeimpiä lainereiden ominaisuuksia ovat puhkaisu- ja vetolujuus. Tavallisesti lainerit päätyvät lähinnä tuotteiden kuljetuspakkauksiin, mistä johtuen paino-ominaisuudet eivät ole erityisen tärkeässä asemassa. Toisaalta valkopintaista laineria käytetään myös tuotepakkauksissa, jolloin painojäljen laadun merkitys kasvaa. /1, 3/

# 3 Taivutusjäykkyys

Erityisesti kartongeilla taivutusjäykkyys on tärkeimpiä ominaisuuksia ja koneen poikkisuuntainen taivutusjäykkyys on yksi kriittisistä ominaisuuksista. Hyvä taivutusjäykkyys merkitsee, että tuote on jämäkkä eikä murru helposti. Juuri jämäkkyyttä ja kestävyyttä pakkauksilta vaaditaankin. Kulutuksen siirtyessä kohti ekologisia pakkauksia, kartonki on nousut yhdeksi varteenotettavimmista muovin korvaajista kuluttajapakkauksista. Tämä mahdollistaa tuotekehityksen lisäämisen juuri pakkauskartonkien osalta. /1, 5-7/

Taivutusjäykkyyteen vaikuttavat ominaisuudet ovat paperin paksuus ja sen elastisuus. Elastisuuteen eli kartongin kimmokertoimeen vaikuttaa suuresti käytetty raaka-aine. Käyttämällä runkokerroksessa suuren bulkin ja pintakerroksille suuren kimmokertoimen omaavaa massaa, parannetaan kartongin jäykkyyttä. Toisaalta pakkausteollisuudessa kartongin ajettavuus on ratkaisevaa, sillä lähes kaikki pakkaustenvalmistuslinjat on nykyään automatisoitu. Kartongin jäykkyys saattaa olla tällöin myös ongelma ja aiheuttaa tuotantokatkoksia erityisesti pieniä pakkauksia valmistettaessa, kuten tupakka-askeja. /5-7/

## 3.1 Taivutusjäykkyyden määrittäminen

Paperille tavutusjäykkyys määritetään kuten mille tahansa yksikkölevyiselle sileälle palkille yhtälön 1 mukaan. /5/

$$S_b = \frac{Ed^3}{12} \quad (1)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | $S_b$ | taivutusjäykkyys | [Nm] |
| | E | kimmokerroin | [N/m$^2$] |
| | d | paperin tehollinen paksuus | [m] |

Paperin kimmokertoimeen vaikuttaa paksuuden välityksellä myös paperin tiheys. Yhteen muuttujaan vaikutettaessa, esimerkiksi kalanteroinnin yhteydessä, muuttuvat samalla muutkin paperin ominaisuudet. Kalanteroinnin yhteydessä paperin tehollisen paksuus pienenee ja vastaavasti kimmokerroin kasvaa, mutta myös paperin tiheys kasvaa. Samalla kuitenkin taivutusjäykkyys pienenee. Paperin tiheyden huomioon ottamiseksi voidaan muokata taivutusjäykkyyden yhtälö ominaiskimmokertoimen yhtälön 2 avulla. /5/

$$\frac{E}{\rho} = \frac{Ed}{w} \quad (2)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | ρ | tiheys | [kg/m$^3$] |
| | w | paperin neliömassa | [g/m$^2$] |

Tällöin paperin taivutusjäykkyyden yhtälö 3 voidaan kirjoittaa muotoon /5/:

$$S_b = \frac{(E/\rho)wd^2}{12} \quad (3)$$

Eri paperi- ja kartonkilaatujen vertailemiseksi käytetään lisäksi taivutusjäykkyys indeksiä, joka ottaa huomioon neliöpainon vaihtelut laskemalla taivutusjäykkyyden neliömassan kolmannen potenssin avulla yhtälön 4 mukaisesti /5/.

$$S_{b,s} = \frac{S_b}{w^3} \quad (4)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | $S_{b,s}$ | taivutusjäykkyysindeksi | [Nm$^7$/kg$^3$] |

Taivutusjäykkyys indeksin avulla voidaan vertailla eri paperi- ja kartonkilaatujen lisäksi myös eri materiaaleja toisiinsa. Taulukossa I on esitetty yleisimpien paperi-

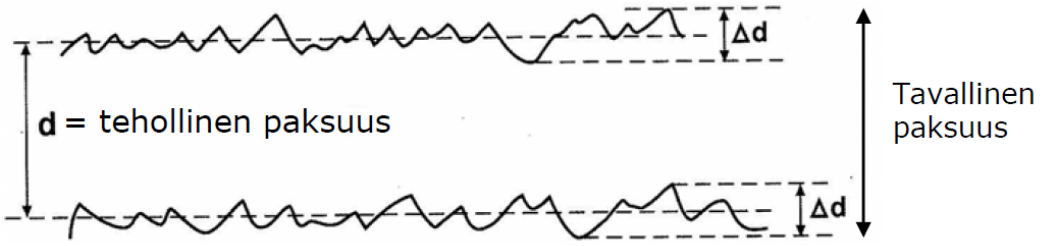
ja kartonkilaatujen taivutusjäykkyys indeksien lisäksi myös muiden materiaalien arvoja. /5, 6/

Taulukko I. Kartonkituotteiden ominaisjäykkyydet verrattuna muiden yleisesti käytettyjen materiaalien jäykkyyksiin /6/

| Materiaali | Ominaisjäykkyys |
|---|---|
| **Käärepaperi** | **0.7** |
| **Taivekartonki** | **1.3** |
| **Aaltopahvi (E-aalto = 1.1 mm)** | **3.2** |
| **Aaltopahvi (C-aalto = 3.6 mm)** | **119** |
| **Kova muovi (PET)** | **up to 0.2** |
| **Alumiini** | **0.3** |
| **Teräs** | **0.032** |

Erityisesti kartongin ja aaltopahvin saavuttamat korkeat taivutusjäykkyysindeksin arvot verrattuna muoviin ja teräkseen ovat vakuuttavia. Tämä vahvistaa kartongin toimivan erityisesti pienissä pakkauksissa erinomaisesti, kun materiaalilta vaaditaan lujuuden lisäksi keveyttä. /5/

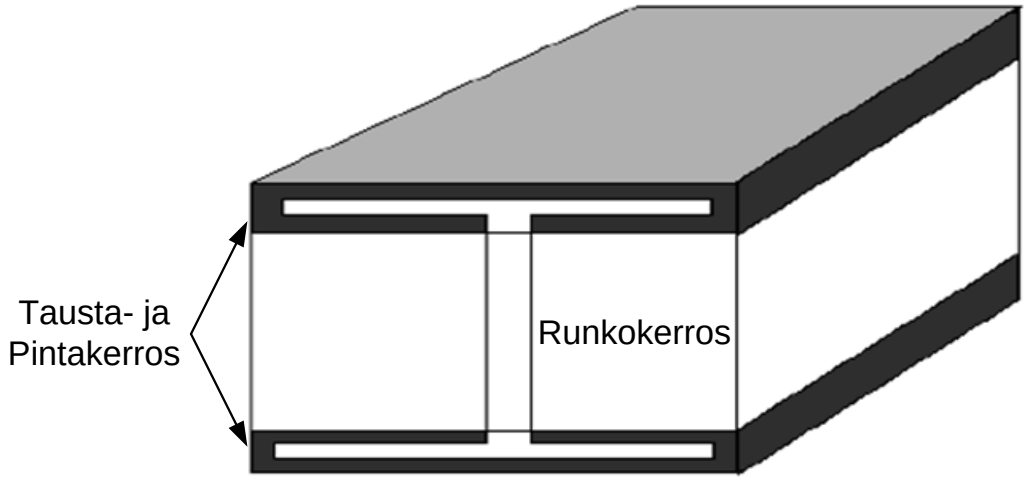
Taivutusjäykkyyttä laskettaessa paksuudessa tulee ottaa huomioon paperin pinnan karheus, jolloin kyseessä on tehollinen paksuus. Paperille tehollisen paksuuden määrittäminen on helppoa sen homogeenisen rakenteen ansiosta, koska voidaan olettaa tiheyden pysyvän vakiona sen eri osissa. Kuvassa 3 on esitetty paperin tehollinen paksuus verrattuna paksuusmittarilla saatuun paksuuteen. /5/




Kuva 3. Kartongin tehollinen paksuus ottaa huomioon kartongin pinnan karheuden. /6/

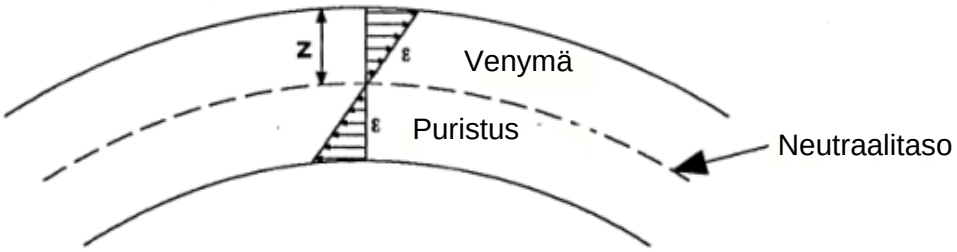
### 3.2 Monikerroskartongin taivutusjäykkyys

Monikerroskartongeilla taivutusjäykkyyteen vaikuttavat kaikki kerrokset ja niissä käytetyt massalaadut. Yleisesti kolmikerroskartongin runkona käytetään korkean bulkin omaavaa mekaanista massaa, jonka tiheys on pienempi kuin kemiallisesti valmistetulla sellulla, ja tällöin sen vaikutus taivutusjäykkyyteen on kartongin pintakerroksia vähäisempi. Kolmikerroskartongilla yleisesti pintakerrokset antavat kartongille vaadittavan lujuuden. Kuvassa 4 on esitetty kartongeille yleinen kolmikerrosrakenne ja sen takaama korkea taivutusjäykkyys ns. I-palkin avulla. /1, 8/



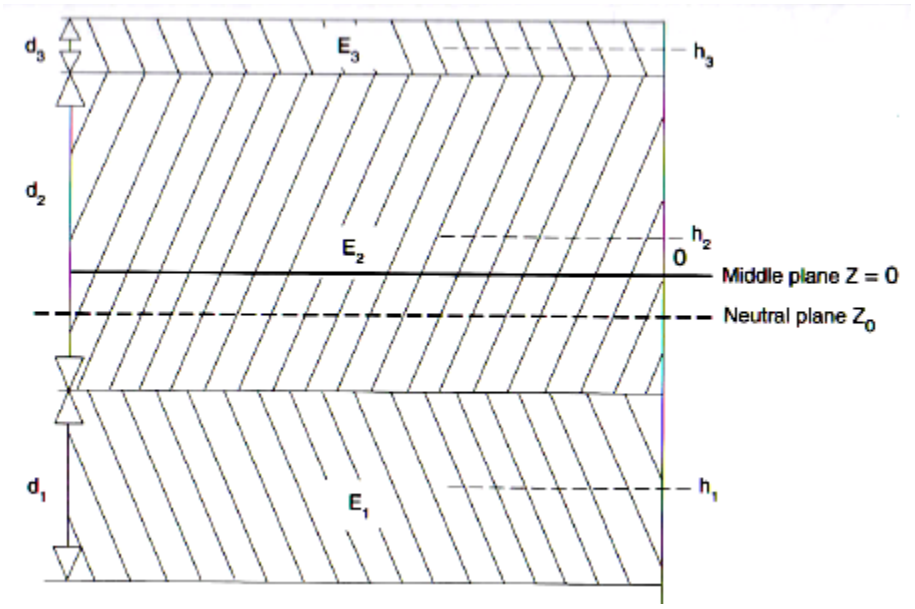

Kuva 4. Kolmikerroskartongin muodostama I-palkki /6/

Kartongilla taivutusjäykkyys määritetään sen eri kerrosten taivutusjäykkyyksien summana yhtälön 1 avulla. Monikerroskartongeilla tulee taivutusjäykkyyttä määritettäessä kuitenkin ottaa huomioon kartongin eri kerroksissa tapahtuvat ilmiöt taivutettaessa. Kartongin kuperalle puolelle syntyy taivutuksen yhteydessä venymää ja vastaavasti koveralle puolelle puristumaa. Venymää ja puristumaa vastaan syntyy vastustava voima, jonka suuruuteen vaikuttaa niin kerrosten paksuus kuin elastisuus ja tiheys. Kartongin poikkileikkausta tarkasteltaessa havaitaan rakenteen saavuttavan neutraalitason, jonka yläpuolella ilmenee venymää ja alapuolella puristumaa. Neutraalitason ilmeneminen on havainnollistettu kuvassa 5. /5, 6, 9/




Kuva 5. Venymän ja puristuman ilmeneminen kartongin neutraalitason eri puolilla puolin /9/

Monikerroskartongeilla neutraalitaso ei ole aina kartongin keskellä, koska kerrosten paksuus ja kimmokerroin vaihtelevat. Kuvassa 6 on esitetty tyypillisen epäsymmetrisen kolmikerroskartongin rakenne. /6/




Kuva 6. Epäsymmetrinen 3-kerroskartonki, jonka neutraalitaso poikkeaa kartongin keskitasosta. /6/

Tällöin neutraalitaso tulee määrittää yhtälöiden 5 ja 6 mukaisesti /5/:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0(z - z_0) \tag{5}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | z | kartongin keskitaso | [m] |
| | $z_0$ | neutraalitaso | [m] |

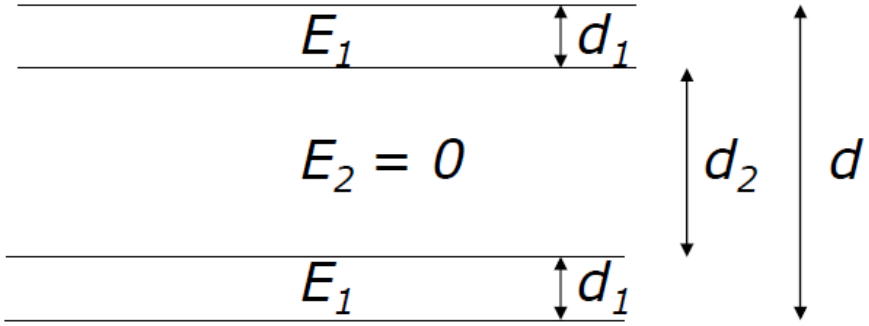
$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} E_i d_i h_i}{\sum_{i=1}^{N} E_i d_i} \quad (6)$$

jossa h kerroksen paksuus [m]

Kun kartongin neutraalitaso on tiedossa, saadaan taivutus jäykkyys laskettua yhtälön 7 avulla /5/:

$$S_b = \sum_{i=1}^{N} (E_i \left[\frac{d_i^3}{12} + d_i (h_i - z_0)^2\right] \quad (7)$$

Poikkeustapauksina kolmikerroskartongeilla ovat tuotteet, joilla rakenne on pinta- ja pohjakerroksen osalta symmetrinen. Tällöin ei tarvitse määrittää erikseen kartongin neutraalitasoa, koska symmetrisen rakenteen ansiosta se sijaitsee automaattisesti kartongin keskellä. Kuvassa 7 on esitetty symmetrisen kartongin poikkileikkaus. /6/



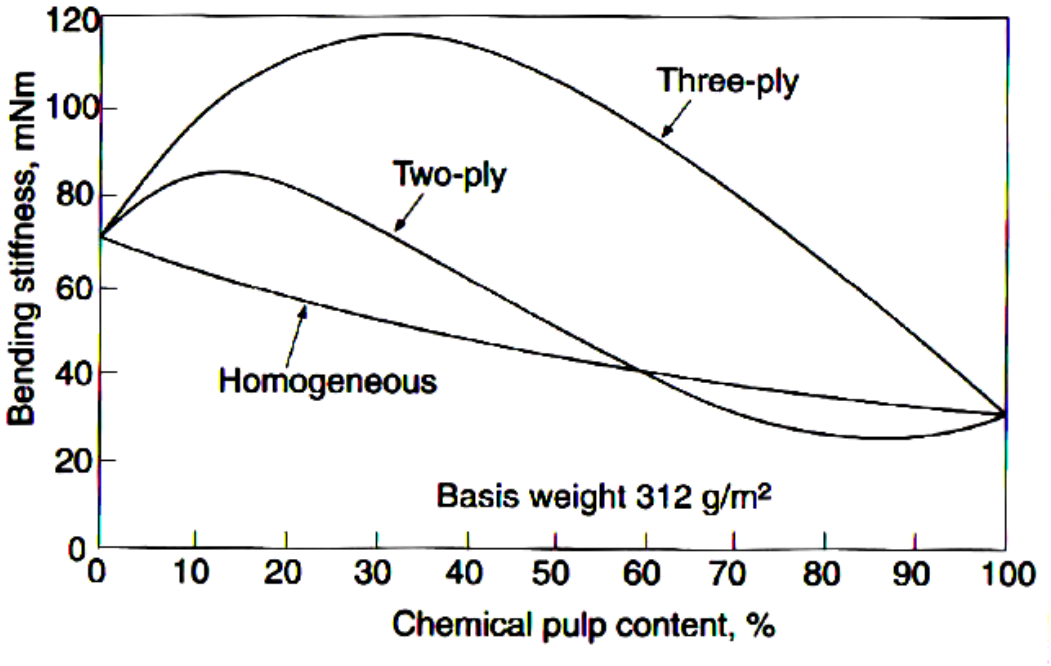

Kuva 7. Symmetrisen kolmikerroskartongin rakenne /6/

Symmetriset kartongit ovat yleisin erikoistapaus kartonkien taivutusjäykkyyttä määritettäessä. Taivutusjäykkyys saadaan laskettua tällöin suoraan yhtälöstä 1 saadun yhtälön 8 avulla. /5/

$$S_b = \frac{E_1 d_1^3}{12} + \frac{E_2 (d^3 - d_1^3)}{12} \quad (8)$$

Korkean jäykkyyden takaamiseksi kartonkien rakenne ja käytettävät massalaadut tulee olla oikeassa suhteessa toisiinsa. Vaikka pinta-taustakerroksen vaikutus taivutusjäykkyyteen on suuri sellun korkean tiheyden ja elastisuuden takia, vaaditaan kartongilta kuitenkin paksuutta korkean taivutusjäykkyyden

saavuttamiseksi. Samalla kuitenkin kartongin neliömassa halutaan pitää alhaisena. Tällöin mekaanisen massan, jonka ominaistilavuus on suurempi, käyttö runkona paksuuden lisäämiseksi parantaa lopputuotteen ominaisjäykkyyttä. Kuvassa 8 on esitetty ominaisjäykkyyden muutos massan laadun suhteen muuttuessa, kun neliömassa pysyy vakiona. /6-8/




Kuva 8. Kemiallisen sellun osuuden vaikutus yksi- ja monikerroskartonkien jäykkyyteen tuotteiden neliömassan pysyessä vakiona /7/

Kuvasta 8 havaitaan, että optimaalinen kemiallisen sellun suhde mekaaniseen massaan on noin 33 % kolmikerroskartongeilla. Tämän jälkeen kartongin paksuuden aleneminen alkaa vaikuttaa heikentävästi ominaistaivutusjäykkyyteen neliömassan pysyessä vakiona. Tietyissä tuotteissa, kuten sellukartongeissa, mekaanisen massan käyttö on lopputuotteelta vaadittavien optisten ominaisuuksien takia olematonta. Tällöin kartongin jäykkyyteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi käyttämällä eri sellulaatuja sekä muuttamalla jauhatusastetta sekä kemikaalien annostusta. /8/

### 3.3 Jäykkyyteen vaikuttavat prosessit

Paperin paksuuteen tai kimmokertoimeen vaikuttamisen lisäksi taivutusjäykkyyttä voidaan muokata valmistusprosessin eri vaiheilla. Yleisesti on tiedossa, että

märkäpuristus ja kalanterointi heikentävät jäykkyyttä pienentäen paperin paksuutta. Viiraosalla tapahtuva märkäveto puolestaan parantaa jäykkyyttä saaden aikaan kuitujen orientoitumisen konesuuntaan. /5/

Päällystys parantaa tuotteen taivutusjäykkyyttä antaen tuotteelle monikerrosrakenteen. Päällysteillä saadaankin parannettua erityisesti yksikerrosrakenteen omaavien papereiden jäykkyyttä. Kartonkien jäykkyyttä voidaan toki myös parantaa, mutta vaikutus jää melko pieneksi. /5/

Päällysteiden kimmokerroin vaihtelee runsaasti, mutta se voi olla jopa kaksinkertainen paperin kimmokertoimeen verrattuna. Päällysteiden kohdalla niiden kimmokertoimen nostamista rajoittaa kuitenkin sen vaikutus muihin päällystykseltä vaadittaviin ominaisuuksiin. Päällysteiden kohdalla törmätään siis samaan tasapainoiluun eri ominaisuuksien välillä kuin itse runkopaperillakin. /5/

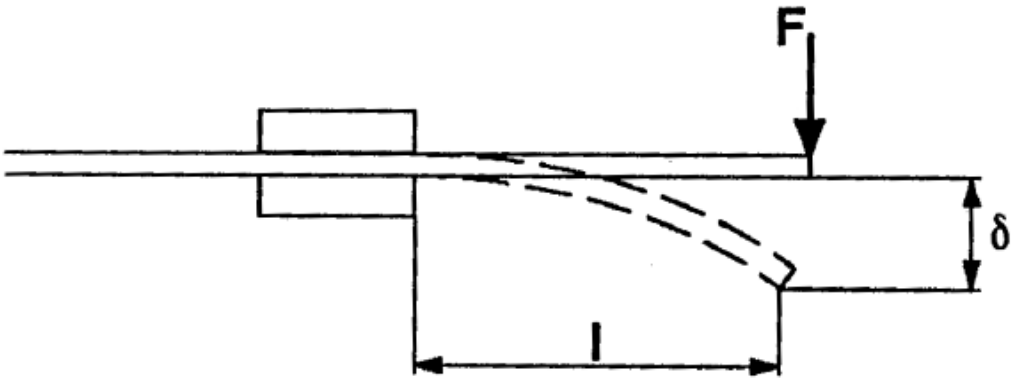
# 4 Taivutusjäykkyyden mittaaminen

Taivutusjäykkyyden mittaamiseen on olemassa useita eri menetelmiä. Yleisimpiä menetelmiä mitata kartonkien taivutusjäykkyyttä ovat 2-piste- ja 4-pistemenetelmät, joissa kartonkia taivutetaan mekaanisen liikkeen avulla ja mitataan taivutukseen vaadittavaa voimaa. Lisäksi jäykkyys voidaan mitata resonanssimenetelmällä, jolloin vakiopituinen näyteliuska joutuu värähtelyn alaisena resonanssiin ja resonanssipituudesta saadaan laskettua jäykkyys. /9-11/

Kartongeilla 2-pistemenetelmä soveltuu useimmille laaduille ja on näin ollen yleisin menetelmä. Menetelmä tarjoaa lisäksi mahdollisuuden säätää taivutuskulmaa, jolloin jäykkien kartonkien kohdalla kulmaa voidaan pienentää kartongin murtumisen välttämiseksi. 4-pistemenetelmä soveltuu parhaiten jäykille tuotteille ja sen pääasiallinen käyttökohde onkin aaltopahvin ja sen runkomateriaalien kohdalla. /9-11/

### 4.1 Kaksipistemenetelmä

2-pistemenetelmällä näytettä nimensä mukaisesti taivutetaan kahden kiintopisteen avulla. Näyteliuska, jonka pituus on 50 mm ja leveys 38 mm, kiinnitetään toisesta päästä kiinnikkeeseen, joka taivuttaa näyteliuskaa vastaelementtiä vasten. Kuvassa 9 on havainnollistettu 2-pistejäykkyyden mittaaminen. /9/




Kuva 9. 2-pistejäykkyyden mittaamisen perusperiaate /9/

2-pistemenetelmällä mitattaessa taivutuskulmaa on mahdollista muuttaa kartongin jäykkyyden muuttuessa. Yleisin käytetty taivutuskulma on 15°, joka soveltuu suurimmalle osalle pakkauskartongeista. Jäykillä kartongeilla suuri taivutuskulma voi aiheuttaa kartongin murtumista, jolloin mittauksella ei saada todellista arvoa selville. Tällöin taivutuskulma voidaan laskea 7,5°:ssa murtumisen välttämiseksi. Yhtälön 9 avulla saadaan laskettua jäykkyys 2-pitemenelmän avulla. /9/

$$S_b = \frac{F \times l^3}{\delta \times 3 \times b} \qquad (9)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | F | voima | [N] |
| | l | pituus | [m] |
| | b | leveys | [m] |
| | δ | taivutuspoikkeama | [m] |

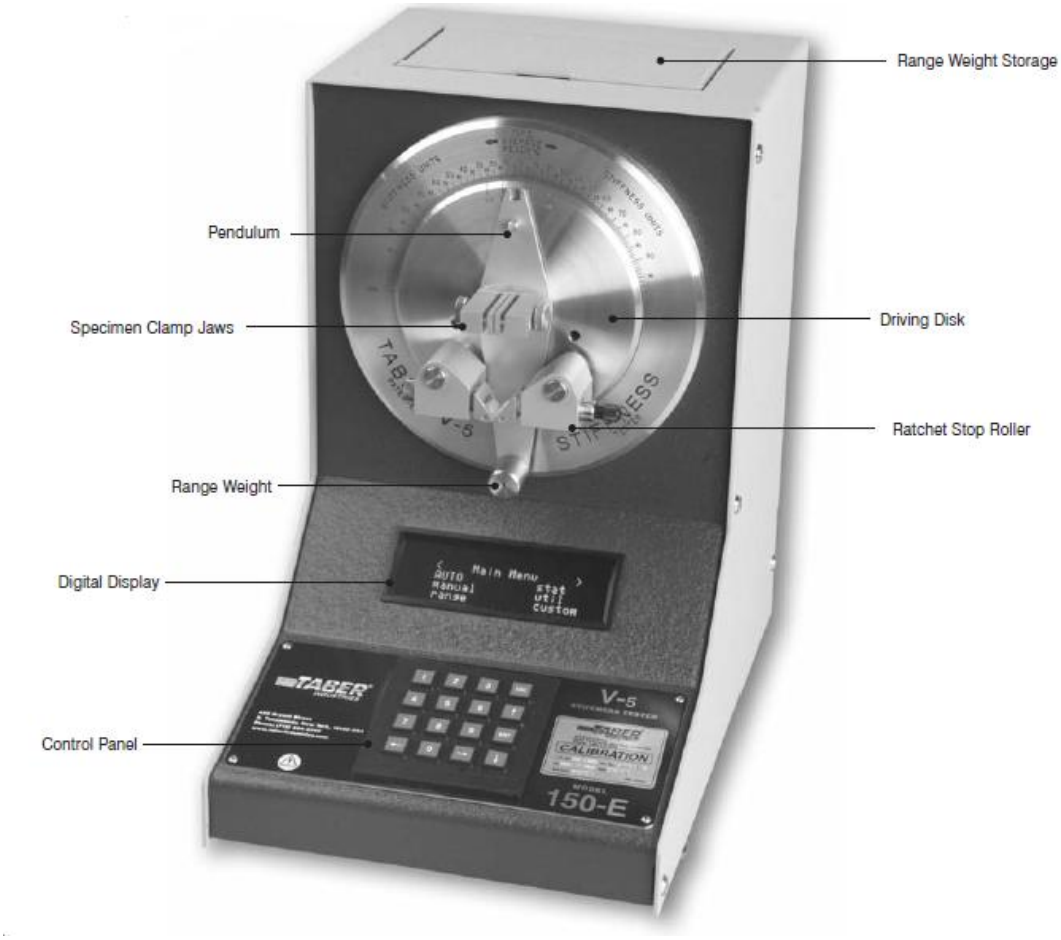
Taivutuspoikkeama voidaan yhtälössä 9 määrittää taivutuskulman θ avulla, jolloin $\delta = \theta \times l$, jossa l on ympyrän säteen pituus ja taivutuskulma on ilmoitettu sen radiaanin avulla. Jotta taivutus kulma voidaan sijoittaa yhtälöön asteina, tulee

θ (rad) muuttaa asteiksi yhtälön θ = 180° / π. Tällöin saadaan 2-pistejäykkyys laskettua yhtälöstä 10. /9/

$$S_b = \frac{F \times l^2 \times 60}{\theta \times \pi \times b} \quad (10)$$

jossa θ taivutuskulma [ °]

Yleisimmät mittalaitteet 2-pistetaivutusjäykkyyden mittaamiseen ovat Lorentzen & Wettre (L&W), Taber ja Gurley. Erityisesti USA:ssa jäykkyyden mittaamiseen käytetään Taber -laitetta, jonka yhteydessä puhutaankin Taberjäykkyydestä. Tällöin jäykkyyden yksiköksi saadaan mNm ja taivutuskulmana käytetään 15° tai vaihtoehtoisesti 7,5°. Taber -jäykkyys mittalaite taivuttaa näytettä molempiin suuntiin yhden mittauksen aikana, jolloin saadaan näytteen määritettyä kokonaisjäykkyys. Kuvassa 10 on esitetty taberjäykkyys mittalaitte. /9, 10/




Kuva 10. Taber-mittalaite 2-pistejäykkyyden määrittämiseen /12/

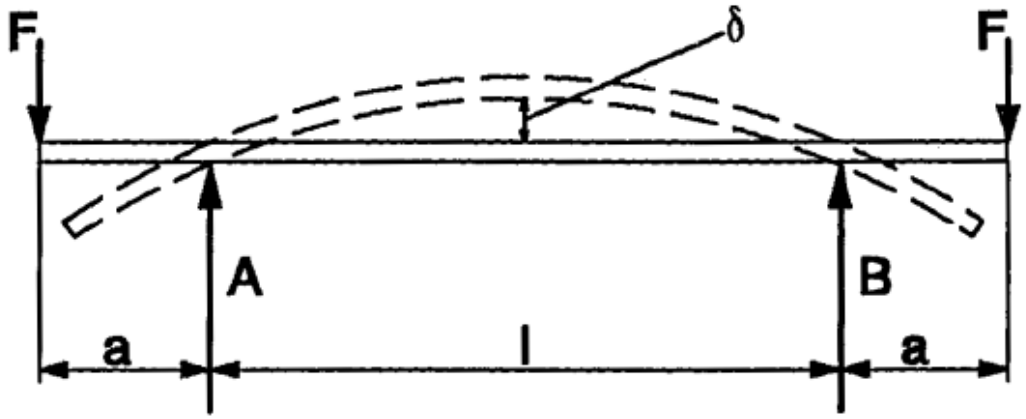
Euroopassa yleisin mittalaite on L&W mittalaite taivutusjäykkyyden mittaamiseksi. L&W laite eroaa taberjäykkyys laitteesta vain hieman, ja sen avulla pystytään määrittämään jäykkyys myös taberjäykkyyden yksikössä mNm. L&W laite kuitenkin taivuttaa kartonkia vain yhteen suuntaan mittauksen aikana, joten kokonaisjäykkyyden saamiseksi täytyy suorittaa kaksi mittauskertaa, yksi kartongin kummallekin puolella, ja laskea jäykkyys keskiarvon avulla. L&W:n laite kuitenkin mahdollistaa jäykkyyden mittaamisen Euroopassa yleisesti käytetyllä 5° taivutuskulmalla, joka sopii suurimmalle osalle kartongeista. Kuvassa 11 on esitetty L&W:n jäykkyysmittari. /9, 13/

Kuva 11. Lorentzen&Wettre-mittalaite 2-pistejäykkyyden määrittämiseen /13/

Aaltopahvien ja lainereiden kohdalla jäykkyys kuitenkin kasvaa niin suureksi että yleisesti turvaudutaan muihin mittausmenetelmiin jäykkyyden määrittämiseksi. /10/

### 4.2 Nelipistemenetelmä

4-pistejäykkyys soveltuu korkean jäykkyyden omaaville kartongeille. Menetelmä määrittää kartongin jäykkyyden taivuttamalla kartonkia näyteliuskan molemmista päistä vastakappaleita vasten voimalla F ja mittaamalla näyteliuskan keskikohdan poikkeamaa vaakatasosta. Kuvassa 12 on esitetty havainnekuva 4-pistejäykkyyden mittaamisesta. /9, 10/




Kuva 12. 4-pistejäykkyyden mittaamisen perusperiaate /9/

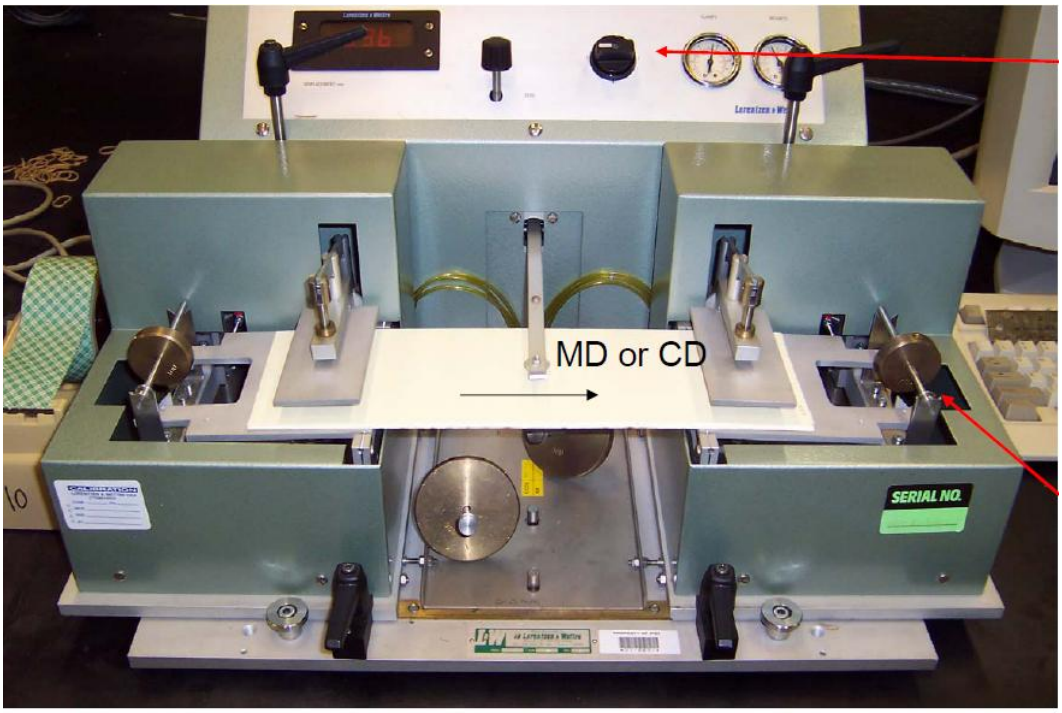
4-pistejäykkyyttä mitattaessa näyteliuskan pituus ei vaikuta saatuun tulokseen mittauksen tapahtuessa vaakatasossa ja voiman kohdistuessa näytteen molempiin päihin. Lisäksi taivutusjäykkyyttä laskettaessa näyteliuskan leveys otetaan huomioon. Yleisesti käytetyt näyteliuskat ovat 100 mm leveitä ja 100:stä 300:aan mm pitkiä näytteen paksuudesta riippuen. 4-pistejäykkyys saadaankin laskettua yhtälön 11 avulla. /9-11/

$$S_b = \frac{F \times a \times l^2}{b \times \delta \times 8} \qquad (11)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| jossa | F | voima | [N] |
| | l | pituus | [m] |
| | b | leveys | [m] |
| | δ | taivutuspoikkeama | [m] |
| | a | taivutuspisteen ja vastakappaleen välimatka | [m] |

Nelipiste menetelmällä voidaan mitata kartongin jäykkyyttä sekä kone- että poikkisuunnassa. Näytteen paksuuden ja rakenteen vaihdellessa voimaa, jolla

näytettä taivutetaan, voidaan säädellä vaihdettavien standardoitujen punnusten avulla. Kuvassa 13 on esitetty havainnekuva L&W:n 4-pistejäykkyyden mittalaitteesta. /10/




Kuva 13. Lorentzen&Wettre-mittalaite 4-pistejäykkyyden määrittämiseen /10/

2- ja 4-pistejäykkyyden lisäksi paperin ja kartongin jäykkyys voidaan määrittää resonanssimenetelmän avulla, jolloin näyteliuska saatetaan tietynpituisena resonanssiin. Havaitusta resonanssipituudesta saadaan laskettua kartongin tai paperin jäykkyys. Resonanssimenetelmällä ei saada taivutusjäykkyyden kannalta aivan oikeaa tulosta, joten taivutusjäykkyyttä määritettäessä käytetään yleisesti yllä esitettyjä staattisia mittausmenetelmiä. /6/

## 5 Yhteenveto

Taivutusjäykkyyden merkitystä kartongeilla ei voi ylikorostaa. Suojaavan pakkauksen tulee olla jämäkkä ja taata tuotteen säilyvyys. Ilmiönä taivutusjäykkyys ei siis ole uusi ja sen määritysmenetelmät ovat pitkän kokemuksen kautta hyväksi havaittuja. Suurin haaste taivutusjäykkyyden kannalta lieneekin tuotantovolyymien kasvaminen ja sitä kautta kasvavat nopeudet

pakkaustenvalmistus linjoilla. Kartongilta vaaditaankin nykypäivänä korkean taivutusjäykkyyden lisäksi myös joustavuutta.

Nyky-yhteiskunnassa kilpailu markkinoilla on kovaa ja tuotteiden määrä kaupoissa kasvaa jatkuvasti. Ennen riitti että pakkaus oli kestävä ja antoi suojaa. Nykyään pakkauksen tulee erottua joukosta, jolloin paino-ominaisuudet korostuvat. Kaikki tämä tuo lisähaasteensa pakkauksen jäykkyyttä ajateltaessa.

Pakkauskartonkien kirjo onkin laajentunut suuresti. Eri aloilla arvostetaan erilaisia ominaisuuksia pakkausmateriaalissa. Lisäksi maantieteellisesti eroavat mieltymykset tuovat lisän muutenkin laajaan pakkauskartonkien kirjoon. Pakkausten yksilölliset vaatimukset tuovatkin mukaan myös haasteensa lujuusominaisuuksia testatessa ja laatuja toisiinsa verratessa, mikä pitää kartongin tuottajien lisäksi myös analyysilaitteiden valmistajat ajan hermoilla.

Taivutusjäykkyyden parantamiseksi on nykypäivän kuitua säästävässä suuntauksessa etsittävä uusia keinoja. Paksuuden nostaminen ei juuri tule kysymykseen, joten tavoitteena on vaikuttaa joko raaka-aineen tai lopputuotteen kimmokertoimeen. Tulevaisuuden mahdollisuuksina onkin tutkia eri paperikemikaalien ja täyteaineiden vaikutusta jäykkyyteen. Lisäksi päällystyksen vaikutus jäykkyydelle korostuu kuitumäärän ja paksuuden laskiessa.

**Lähteet**


1. Kiviranta, A., *Paperboard grades, Paper and Board Grades, Papermaking Science and Technology*, Book 18, Paulapuro, H. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 2000, p. 54-72

2. Stora Enso, Paperboard guide, http://www.storaenso.com/products/packaging/Documents/paperboard_guide.pdf, 12.10.2011

3. Tillmann, O., *Paper and Board Grades and Their Properties, Handbook of Paper and Board*, p. 446-466

4. Kuusipalo, J., *Extrusion coating and products, Paper and Paperboard Converting*, Papermaking Science and Technology, Book 12, Kuusipalo, J. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 2008, p. 106-166

5. Kajanto, I., *Structural mechanics of paper and board, Paper Physics*, Papermaking Science and Technology, Book 16, Niskanen, K. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 1998, p. 229-264

6. Kajanto, I., Kartonkipakkaukset, Paperitekniikan soj –kurssin luentomateriaali, kevät 2008

7. Mark, R. E., *Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard*. Vol. 1, Marcel Dekker Inc, New York, 1983, p.

8. Navaee-Ardeh, S., Nazhad, M. M., A new model for maximizing the bending stiffness of a symmetric three-ply paper or board, *Tappi Journal*, October (2008), p. 28-32

9. Markström, H., Bending Stiffness, Lorentzen & Wettre, http://www.lorentzen-wettre.com/images/stories/LorentzenWettre/QT_bilder/Measuring_bending_stiffness.pdf, 13.10.2011.

10. ME 8883 Paper Physical Properties, *Bending Stiffness, 2 point and 4 point, Taber and L&W instruments*, Institute of Paper Science and Technology, Georgia Tech, Saatavissa: http://www.ipst.gatech.edu/testing_services/paper_physical_testing/lectures/ME%208883%20Paper%20Physical%20Properties%20lecture%204%20bending%20stiffness%20.pdf, 13.10.2011

11. SCAN-P65:91, Bending Stiffness, Scandinavian Pulp, Paper and Board testing committee, 1984. 3 s.

12. Taber Industries, CCSi, http://www.ccsi-inc.com/p-abrader-taber-150e.htm, 13.10.2011

13. Lorentzen & Wettre, L&W Bending Tester, http://l-w.com.datakultur.net/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=45&category_id=23&option=com_virtuemart&Itemid=53&lang=en, 13.10.2011